



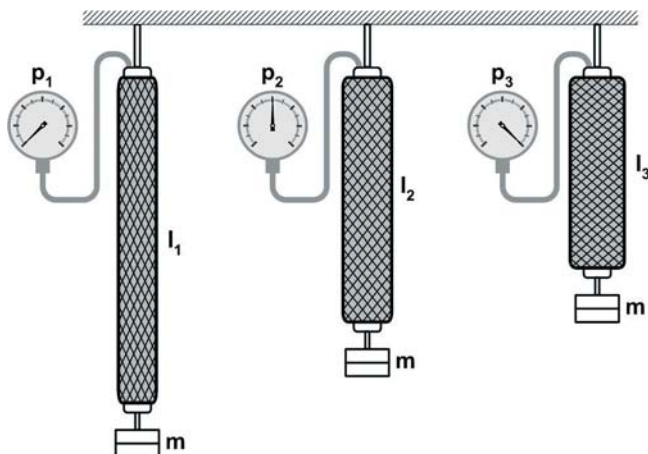
Pneumatický umelý sval – perspektívny prvok mechatroniky (2)

V prvej časti seriálu sme sa venovali histórii a vývoju pneumatického umelého svalu a McKibbenovmu pneumatickému umelému svalu. V tejto časti budeme pokračovať jeho vlastnosťami.

Vlastnosti pneumatického umelého svalu

Vlastnosti, tvar a správanie pneumatických umelých svalov sú porovnateľné s ľudskými svalmi, čo umožňuje ich ľahké vzájomné prepojenie do zložitejších manipulačných mechanizmov. Ďalšie významné charakteristické vlastnosti pneumatických umelých svalov [1], [4], [5]:

1. Pneumatické umelé svaly sa vyznačujú mimoriadne vysokým pomerom sily a výkonu k hmotnosti a objemu.
2. Pneumatické umelé svaly môžu byť vyrobené v rôznych veľkostiach a tým aj v rôznych silových a prestavovacích rozsahoch. V súčasnosti môže byť dĺžka svalu v rozsahu 100 až 4 000 mm, priemer svalu v rozsahu 10 až 70 mm.
3. Dosiadnutelné maximálne skrátenie (kontrakcia) závisí od konštrukcie svalu. V súčasnosti je štandardne 30 až 35 % menovitej dĺžky svalu, čo je porovnateľné s biologickými svalmi.
4. Ťahová sila umelého svalu na jednotku plochy prierezu môže dosiahnuť až 300 N/cm^2 v porovnaní s $30 - 40 \text{ N/cm}^2$ pre biologický sval.
5. Dosiad' vyvinuté regulátory sú schopné dosiahnuť presnosť regulácie polohy akčného člena na báze pneumatického umelého svalu lepšiu ako 1 % pri medzných frekvenciách do 10 Hz.
6. Pneumatické umelé svaly sú bezpečné na použitie vo vodnom alebo inom kvapalinovom prostredí a v prostredí s nebezpečenstvom výbuchu plynov a pár.
7. Veľmi zaujímavou vlastnosťou pneumatických umelých svalov (podobne ako pri biologických) je ich schopnosť činnosti v antagonistickom zapojení, čo umožňuje regulovať ich vlastnú tuhosť/poddajnosť. Táto schopnosť, ktorá nie je bežná pri klasických typoch pohonov, prináša množstvo výhod v jednotlivých aplikáciách pohonov na báze pneumatických umelých svalov.
8. 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.



Obr.5 Pneumatický umelý sval s konštantnou záťažou (izotonické zaťaženie)

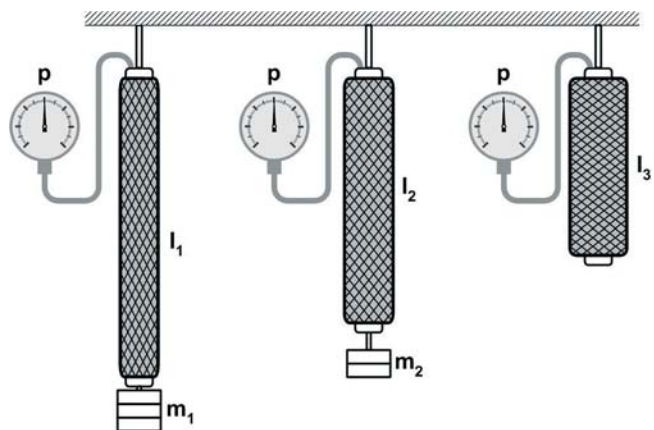
9. Pri pneumatických umelých svaloch sa nevyskytuje tzv. stick-slip efekt vznikajúci pri pohybe piesta v pneumatickom (resp. hydraulickom) valci.

Základné vlastnosti a princíp činnosti pneumatického umelého svalu možno jednoducho vysvetliť aj na obr. 5, 6 a 7 pri pokuse so závažím zaveseným na jednom konci umelého svalu, pričom druhý koniec svalu je pevne ukotvený [3].

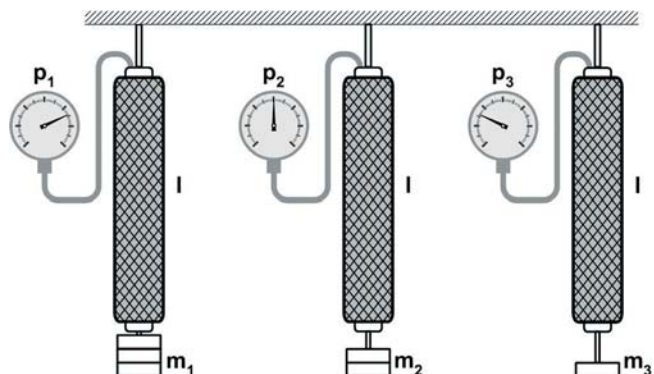
Ak zaťažíme sval závažím s konštantnou hmotnosťou (izotonické zaťaženie), tak v začiatočnom stave pri nulovom tlaku v svalce bude jeho objem minimálny, dĺžka svalu bude maximálna a kontrakcia svalu bude nulová (obr. 5). Postupným zvyšovaním tlaku v svalce sa bude jeho objem zväčšovať, sval sa začne skracovať (kontrakcia zväčšovať) generujúc ťahovú silu, ktorá spôsobí zdvíhanie závažia dovtedy, kým nedôjde k rovnováhe ťahovej sily svalu a tiažovej sily závažia.

Na obr. 6 je sval natlakovaný na konštantný tlak (izobarické zaťaženie), pričom sa postupne bude znižovať hmotnosť závažia. Znižovaním hmotnosti závažia sa bude objem svalu zväčšovať, jeho dĺžka skracovať a zároveň bude klesať aj sila vyvinutá svalom. Pri odstránení závažia bude objem svalu maximálny, dĺžka minimálna a vyvinutá sila nulová. V tomto sa pneumatický umelý sval líši od pneumatických valcov, kde sila závisí iba od tlaku a plochy piestu a nie od posunutia [2].

Na obr. 7 je znázornený prípad pre konštantnú dĺžku (kontrakciu) svalu v závislosti od klesajúceho zaťaženia svalu (izometrické zaťaženie). Na udržanie konštantnej dĺžky svalu pri znižovaní hmotnosti závažia



Obr.6 Pneumatický umelý sval s konštantným tlakom (izobarické zaťaženie)



Obr.7 Pneumatický umelý sval s konštantnou dĺžkou (izometrické zaťaženie)



treba znižovať tlak v svaloch, aby sa zabezpečila rovnováha medzi ťahovou silou svalov a ťažovou silou závažia.

Skladaný pneumatický umelý sval

Nevýhodou klasickej konštrukcie opleteného McKibbenovho pneumatického umelého svalov je to, že počas jeho skrakovania vzniká pomerne vysoké trenie medzi vláknami vonkajšej vrstvy a gumenou stenou rúrky vnútornej vrstvy. Toto trenie má za následok zníženie svalom vyvinutej sily a prejavuje sa tiež ako hysteréza, ktorá komplikuje riadenie svalov. Typickou pre tento typ svalov je prahová necitlivosť pri zvyšovaní tlaku, keď ku kontrakcii svalov dôjde až po dosiahnutí určitej úrovne nárastu tlaku [6], [9].

Na pracovisku Vrije Universiteit Brussel boli vykonané výskumné práce s cieľom obmedzenia vzniku trenia a tým aj hysterézy, čím by sa uľahčilo riadenie svalov znížením jeho prahovej necitlivosti. Dosiahlo sa to konštrukciou membrány s pozdĺžnymi drážkami, ktoré sa môžu voľne rozširovať v dôsledku radiálneho tlaku pri plnení svalov. Ťahové sily sú prenášané extrémne silnými polymérovými vláknami umiestnenými v každej drážke membrány [9]. Takýto pneumatický umelý sval bol pomenovaný Pleated Pneumatic Artificial Muscles – PPAM (voľne preložené ako skladaný, resp. plisovaný). Nenatlakovaný PPAM vyzerá podobne ako vzduchový filter v automobilovom motore. Natlakovaný skladaný pneumatický umelý sval (PPAM) [12] je na obr. 8, kde svetlé pruhy v membráne sú polymérové vlákna.



Obr.8

Sila generovaná týmto svalom je nelineárna a je priamo úmerná tlaku v svaloch a druhej mocnine začiatkovej dĺžky svalov. Ak sa zanedbá vplyv elasticity materiálu membrány, potom pre ťahovú silu F platí [9]:

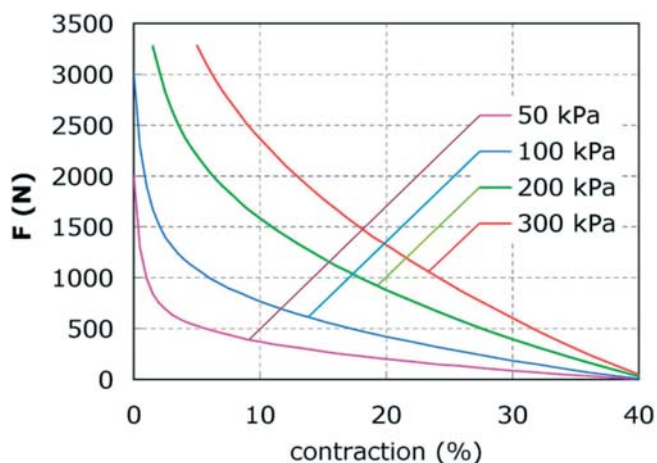
$$F = p \cdot l_0^2 \cdot f\left(\kappa, \frac{l_0}{r_0}\right) \quad (1)$$

kde p je tlak vo svaloch,
 l_0 – začiatková dĺžka svalov,
 r_0 – polomer nezaťaženého svalov,
 κ – kontrakcia svalov.

Priebeh funkcie f vo vzťahu (1) závisí od kontrakcie a geometrických rozmerov svalov, pričom jej hodnota je tým väčšia, čím je sval hrubší (väčšie r_0) a menej stiahnutý (menšia kontrakcia κ).

Priebeh sily generovanej svalom so začiatkovou dĺžkou 100 mm a priemerom 25 mm v závislosti od kontrakcie svalov pre rôzne veľkosti tlaku je na obr. 9 [9].

Na praktické použitie je rozsah kontrakcie tohto typu svalov ohraničený zdola cca 5 % a zhora cca 35 %. Pri nižších kontrakciách je hodnota sily už veľmi vysoká a spôsobuje nadmerné zaťaženie materiálov svalov. Pri vyšších kontrakciách je pokles generovanej sily veľmi veľký, hoci



Obr.9 Závislosť sily PPAM svalov od kontrakcie [9]

teoreticky by mohla kontrakcia svalov dosiahnuť až okolo 50 %. Z obr. 9 vyplýva, že pre prax použiteľný rozsah kontrakcie môže tento umelý sval s hmotnosťou cca 100 g pri tlaku 300 kPa vyvinúť silu s veľkosťou až 3 000 N.

V súčasnosti je tento typ svalov používaný na pracovisku tvorcov tohto svalov v ďalších výskumných a vývojových prácach na konštrukcii manipulačných ramien a kráčajúcich robotov. V čase tvorby tejto práce autorom nebolo známe priemyselné využitie umelého svalov tohto typu, hoci vzhľadom na jeho niektoré lepšie vlastnosti v porovnaní s klasickým McKibbenovým svalom možno v blízkej budúcnosti očakávať aj jeho komerčné využitie.

Literatúra

- [1] DAVIS, S., TSAGARAKIS, N., CANDLERLE, J., CALDWELL, D.: Enhanced Modelling and Performance in Braided Pneumatic Muscle Actuators. The International Journal of Robotics Research. Vol. 22, No. 3 – 4, 2003, pp. 213 – 227.
- [2] DAERDEN, F., LEFEBER, D.: Pneumatic Artificial Muscles: Actuators for robotics and automation. European Journal of Mechanical and Environmental Engineering. Vol. 47, No. 1 (2002), pp. 11 – 21. ISSN 1371-6980
- [3] DINDORF, R. Modelowanie sztucznych układow mieśniowych z aktuatorami pneumatycznymi. Bio-Algorithms and Med-Systems. Vol. 1, No. 1/2, 2005, pp. 147 – 156.
- [4] KOPEČNÝ, L., ŠOLC, F.: McKibbenův pneumatický sval v robotice. In: AT&P journal. roč. X, č. 2, 2003, s. 62 – 64.
- [5] NOVÁK-MARCINČIN, J.: Umelý sval ako pohon v automatizačnej manipulačnej technike – kandidátska práca. Prešov: Sjf TU, 1993. 208 s.
- [6] NOVÁK-MARCINČIN, J., ZAMBORSKÝ, J.: Pohon robotov a manipulatorov umelými svalmi - konštrukcia, princíp činnosti a riadenie. In: Automatizace. roč. 36, č. 6, 1993, s. 168 – 170.
- [7] PLETTENBURG, D. H.: Pneumatic Actuators: a Comparison of Energy-to-Mass Ratio's. In: Proceeding of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, June 28 – July 1, 2005. Chicago, 2005, pp. 545 – 549.
- [8] RAMASAMY, R., JAHARI, M. R., MAMAT, M. R., YAACOB, S., MOHD NASIR, N. F., SUGISAKA, M.: An Application of Finite Element Modelling to Pneumatic Artificial Muscle. American Journal of Applied Sciences. Vol. 11, No. 2 (2005), pp. 1 504 – 1 508.
- [9] VERRELST, B., DAERDEN, F., LEFEBER, D., VAN DAMME, M., FABRI, T.: Introducing Pleated Pneumatic Artificial Muscles for the Actuation of Legged Robots: a One-dimensional Set-up. In: Proceedings of CLAWAR 2000: 3rd International Conference on Climbing and Walking Robots, October 2 – 4, 2000. Madrid: CSCI, 2000, pp. 583 – 590.
- [10] www.festo.com [cit. 2007-12-18].
- [11] www.shadowrobot.com [cit. 2007-12-01].
- [12] http://www.vub.ac.be [cit. 2008-01-16]

doc. Ing. Ján Pitel, PhD.
 doc. Ing. Milan Balara, PhD.

25

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