

ZÁKLADNÍ IDENTIFIKACE A ŘÍZENÍ PNEUMATICKÝCH SVALŮ

Petr Vaňous

VUT Brno, FEKT, ÚAMT

ABSTRAKT

Princip pneumatického svalu je znám poměrně dlouho. V poslední době však vrůstá zájem o tento netradiční akční člen. To je způsobeno jeho výbornými vlastnostmi (zejména hmotnost ku vyvozené síle) a podobností s biologickým svalem. Mezi nevýhody, které omezují uplatnění tohoto akčního členu jako pneumatického servomechanismu, patří nelineární charakteristiky základních parametrů svalu a obtížné spojitě řízení pneumatických ovládacích prvků.

Při identifikaci a řízení pneumatického svalu byla použita měřicí karta MF-614 a nadstavba programu Matlab Real-Time toolbox. Dále byly použity a srovnávány dva typy pneumatických ventilů (dva způsoby řízení) - spínací a proporcionální.

KEYWORDS

PMA (pneumatic muscle actuator), identification, mathematical model, actuator, pneumatic drive, valve, Matlab, RealTime Toolbox

1. ÚVOD

Pneumatický sval (*PMA-pneumatic muscle actuator*) (**Obr. 1, Obr. 2**) je doposud málo známý akční člen poháněný stlačeným vzduchem, který je schopný vykonávat mechanickou práci. Ve srovnání s jinými akčními členy se PMA vyznačuje zejména malou velikostí, lehkostí a konstrukční jednoduchostí. Komerční aplikace jsou zatím známy zejména díky firmě Festo a pouze s logickým ovládacím akčním zásahem (nejedná se o klasické zpětnovazební řízení). Mnohá universitní pracoviště se pokouší použít PMA jako „pneumatický servomechanismus“, který by nahradil běžné elektromechanické servomechanismy v některých specifických případech (například v mobilních nebo rehabilitačních zařízeních). Pro řízení jsou většinou použity pevně nastavené klasické PD regulátory.

Pneumatický sval se skládá z pružné hadice vložené do houževnaté sítě vymezující expanzi v souvislosti se zvyšováním tlaku - PMA se roztahuje do stran a zároveň zkracuje. Je-li pneumatický sval upnut k prvkům, které mu brání ve zkrácení, vyvíjí tento sval při nafouknutí značnou tahovou sílu.



Obr. 1: Konstrukce pneumatického svalu

2. MATEMATICKO-FYZIKALNÍ POPIS SYSTÉMU

Ke správnému experimentálnímu určení parametrů pneumatického svalu by byla nezbytná znalost dynamických vlastností systému napájejícího pneumatický sval vzduchem (**Obr. 3**). Úplný systém je tvořen těmito prvky: kompresor, tlaková nádoba (zásobník stlačeného vzduchu), redukční ventil, řídicí ventil, rozvodné hadice a další spojovací prvky. Jelikož jsme měli k dispozici snímače tlaku ve svaly, před a za ventilem, nemuseli jsme pro určení toku vzduchu uvažovat vlastnosti všech zmiňovaných prvků.

Přestože **pneumatický sval** je jednoduché zařízení, není snadné sestavit jeho přesný matematický model. Materiály, z nichž je pneumatický sval složen, se vyznačují nelineárními vlastnostmi, které nelze jednoduše popsat. Z tohoto důvodu platí, že matematické popisy PMA jsou vytvářeny pro jednotlivé svaly a jedná se spíše o matematický přepis naměřených závislostí. Sestavit obecný model pneumatického svalu podle vlastností použitých materiálů se v roce 1999 pokusil Glenn K. Klute (Washington), který vyjádřil sílu generovanou svalem F rovnicí:

$$F = P^* \frac{dV_{sval}}{dL} - V_b \frac{dW}{dL} \quad (1)$$

kde:

P^* tlak v pneumatickém svalu

V_{sval} objem vzduchu v pneumatickém svalu

L délka pneumatického svalu

V_b objem gumové části pneumatického svalu

W hustota mechanické energie v gumě (úměrná napnutí gumy)

Blíže definovat druhý výraz pravé strany rovnice (1) je obtížné vzhledem k nelineárním vlastnostem gumy. Pokud jej zanedbáme, a pokud budeme předpokládat, že pneumatický sval je kruhový válec, lze psát (Gaylord 1958):

$$F_{gaylord} = \frac{P^*}{4 N^2 \pi} \left[3 (\lambda_i L_0)^2 - B^2 \right] \quad (2)$$

kde:

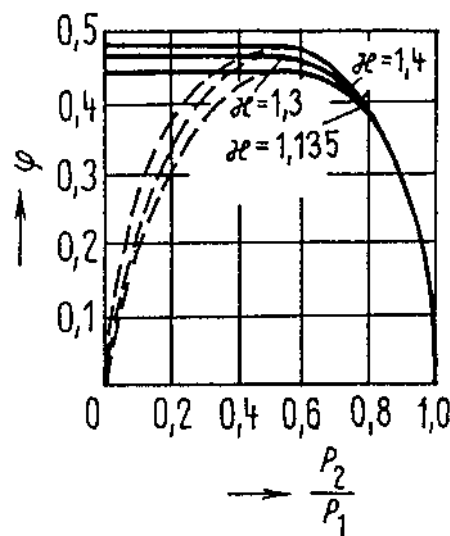
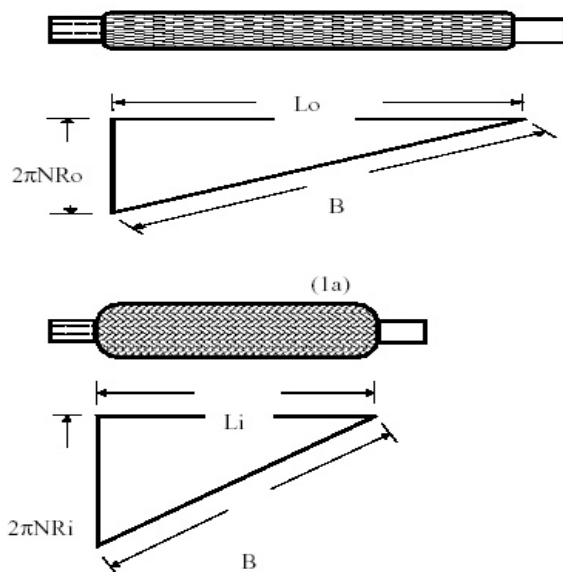
$F_{gaylord}$ je síla generovaná svalem podle rovnice (2)

N počet obrátek jednoho vlákna sítě kolem svalu (vlákna tvoří spirály)

B délka jednoho vlákna (B i N lze určit z geometrických rozměrů vlákna dle **Obr. 2**, kde R_0 je poloměr svalu v klidu)

L_0 klidová délka pneumatického svalu

λ_i poměr okamžité a klidové délky



Obr. 2: Geometrické rozměry PMA

Graf 1: Výtokový součinitel dýzy

Pro přesnější modelování pneumatického svalu je nutné nezanedbávat druhý výraz rovnice (1). Řešení tohoto výrazu vyžaduje podrobnější popsání nelineárních vlastností gumy, což lze provést podle teorie Mooney a Rivlin (Treloar 1958). Odvozený a zjednodušený vztah (3) je vzhledem k tepelné závislosti materiálových konstant jen těžko použitelný.

$$F_{mr} = P \left\{ \frac{3(\lambda_1 L_0)^2 - B^2}{4 N^2 \pi} \right\} - V_b \left\{ \frac{1}{2 L_0^3 \lambda_1^3} \left[\begin{aligned} & 4(C_{10} + C_{01}) L_0^2 (-1 + \lambda_1^4) \\ & + \frac{4 L_0^6 (-1 + \lambda_1) \lambda_1^2 (1 + \lambda_1) (C_{10} + C_{01} \lambda_1^2)}{[-4 N^2 \pi^2 R_0^2 + L_0^2 (-1 + \lambda_1^2)]} \\ & - \frac{4 L_0^4 (C_{10} + C_{01} \lambda_1^4)}{-4 N^2 \pi^2 R_0^2 + L_0^2 (-1 + \lambda_1^2)} \\ & - \frac{L_0^4 \lambda_1^4 [C_{10} + C_{01} (-1 + 2 \lambda_1^2)]}{N^2 \pi^2 R_0^2} \end{aligned} \right] \right\} \quad (3)$$

C_{01} a C_{10} jsou materiálové konstanty.

Tlak uvnitř pneumatického svalu je ovládán rychlým **třícestným ventilem**. Výpočet průtoku se provádí jako pro výtok otvorem, reprezentovaným nejužším průřezem regulačního orgánu, za předpokladu konstantního tlaku před orgánem a za ním. Konstrukční zvláštnosti orgánu a vlastnosti protékajícího média, které ovlivňují průtok, se respektují vhodnými součiniteli, jejichž hodnota se prověřuje měřením. V provozu nebývá předpoklad konstantních tlaků splněn.

Objemový průtok regulačním ventilem je vyjádřen vztahem:

$$Q_V = \beta_\kappa \varepsilon S_v \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_1}} = \beta_\kappa S_v \varphi \sqrt{\frac{2P_1}{\rho_1}} \quad (4)$$

kde

Q_V je objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

P_1 absolutní tlak tekutiny před ventilem [Pa],

P_2 absolutní tlak za ventilem [Pa],

ρ_1 hustota tekutiny při tlaku P_1 a teplotě ν_1 před ventilem [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

S_v průtočný průřez ventilu [m^2]

β_κ průtokový součinitel stlačitelné tekutiny se

κ Poissonova konstanta, (pro vzduch platí $\kappa = 1.400$)

ε expanzní součinitel stlačitelné tekutiny

φ výtokový součinitel

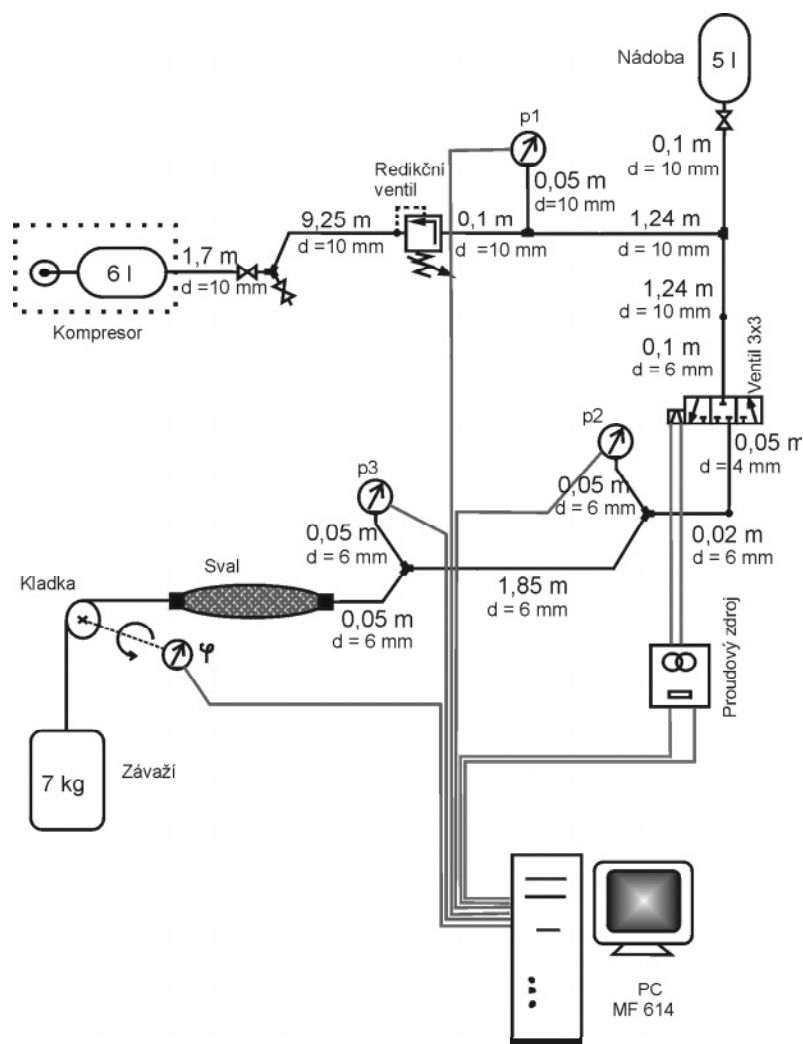
$$\varphi = \varepsilon \sqrt{\frac{P_1}{P_1 - P_2}} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]} \quad (5)$$

pro případ $P_2 \rightarrow P_1$ platí $\varphi \rightarrow 0$.

Vzorce (5) platí pro podkritické proudění, tj. takové proudění, kde tlak v nejužším průtočném průřezu je větší než tlak kritický P_k . S klesajícím tlakem P_2 za ventilem průtok podle vztahu (4) stoupá, pokud tlak v nejužším průřezu nedosáhne kritické hodnoty. Při dalším poklesu tlaku P_2 se tlak v tomto kritickém průřezu již nemění, nemění se proto ani průtok. To platí ovšem jen pro výtokové otvory se zaobleným vstupem (tvar dýzy) **Graf 1**. Kritická hodnota poměru P_k / P_1 pro vzduch je 0,530.

3. OVĚŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU

Pneumatický sval byl měřen na pracovišti vybaveném počítačem se speciální kartou fi Humusoft MF-614, která umožňuje zpracovávat analogové signály ze snímačů tlaku a zároveň vyhodnocovat IRC signály z inkrementálních snímačů polohy měřící zkrácení PMA (**Obr. 3**). Další výhodou této karty, kromě jednoduchého použití v prostředí Matlab – Extended Real Time Toolbox (ver. 3.11, WinXP Pro), je implementace časovačů s PWM a PFM.



Obr. 3: Schéma zapojení pneumatické části soustavy

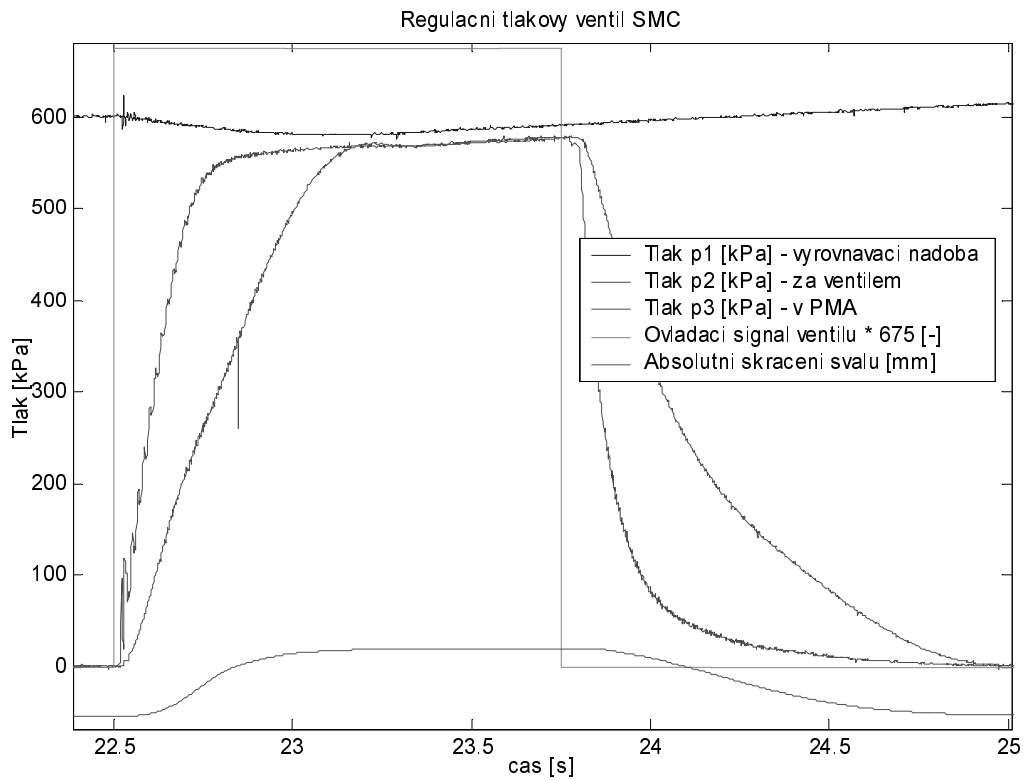
Na pneumatický sval můžeme pohlížet jako na zdroj síly, který je úměrný vnitřnímu tlaku vzduchu (1). Tento tlak je měněn otevřením napouštěcího nebo vypouštěcího ventilu. Dvojice ventilů 2/2 resp. ventil typu 3/3 představuje akční člen, kterým ovládá pneumatický systém. Žádanou hodnotou je zkrácení svaly a pomocnou regulovanou veličinou může být tlak uvnitř PMA.

Pro řízení PMA jsme měli k dispozici tři odlišné ovládací prvky:

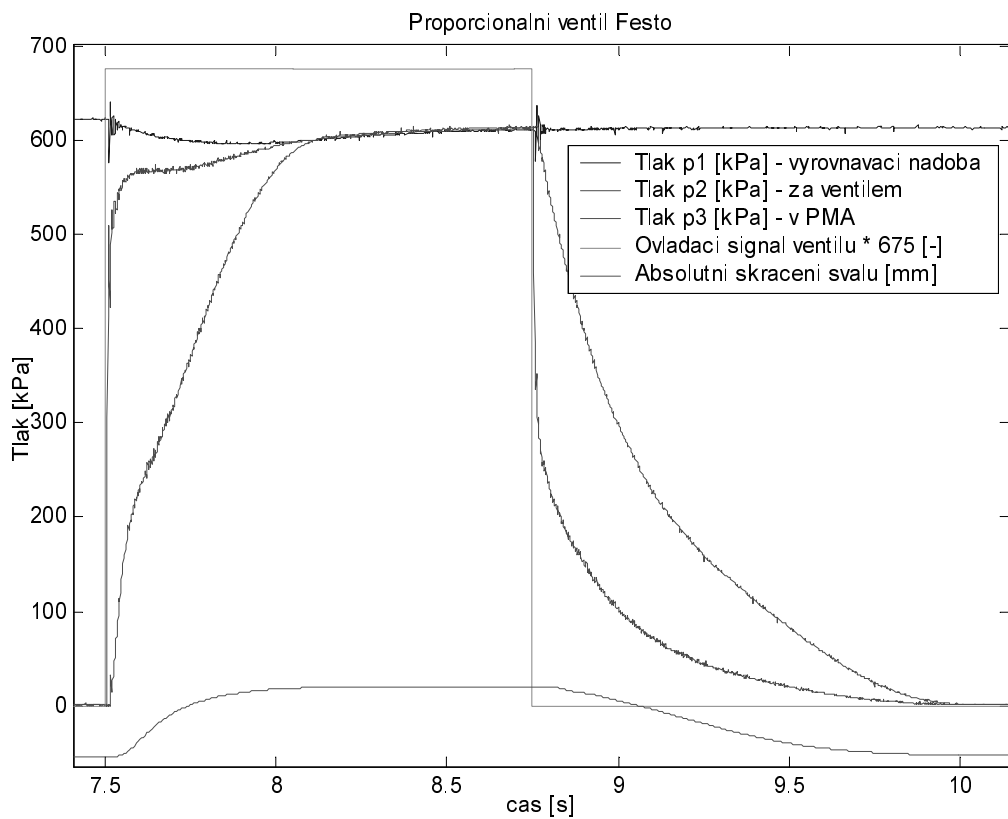
- Elektropneumatický regulátor tlaku – SMC IVT 2050
- Elektropneumatický proporcionální ventil – Festo MPYE-5-M5
- Elektropneumatický spínací ventil – Matrix MK-754

Jedná se o zařízení lišící se jak funkčností, tak pořizovacími náklady. Vzhledem k charakteru řízené soustavy bylo možné použít velmi rychlý regulátor tlaku. V podstatě se jedná o rychlý proporcionální ventil s elektropneumatickým řízením a regulátorem tlaku. Požadovaná hodnota tlaku je nastavována pomocí napětového signálu ($0-10V \approx 0-0.9MPa$). O něco horší dynamické vlastnosti (Graf 2) jsou nahrazeny snadným použitím, nenáročným na řídicí algoritmus.

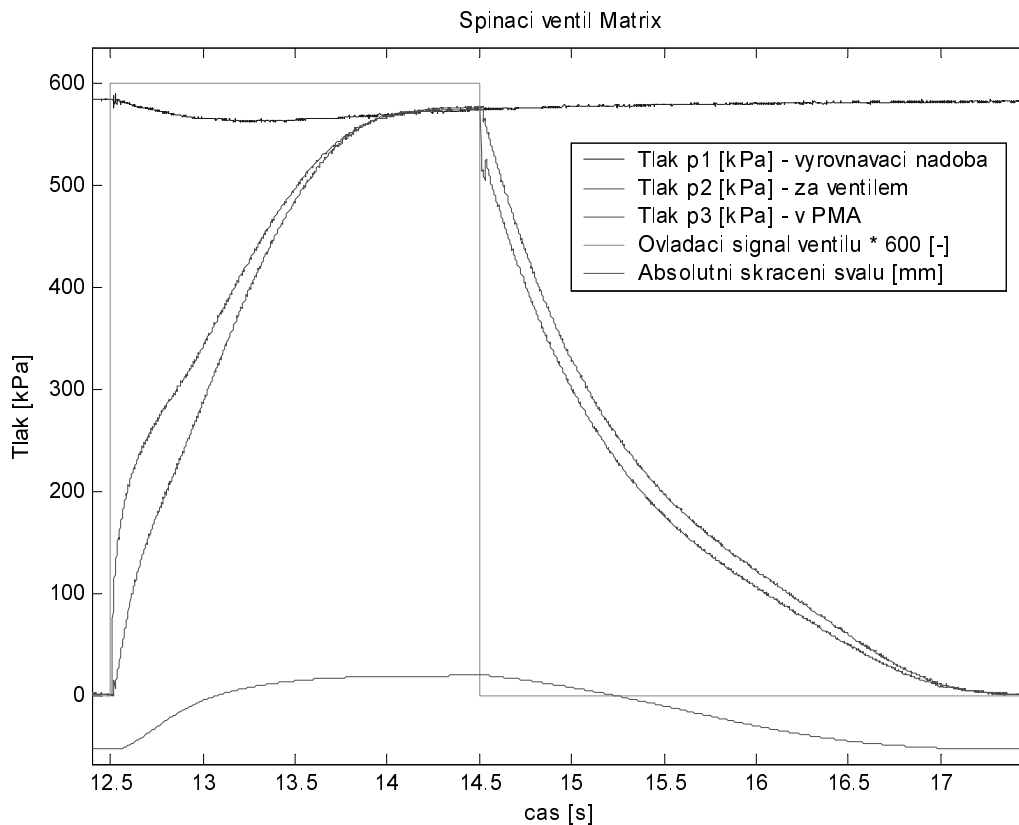
Nejlepší vlastnosti dle očekávání prokázal proporcionální ventil Festo MPYE-5-M5. Na grafu (**Graf 3**) je ze změny tlaku za ventilem dobře patrná vysoká přestavovací rychlost ($0-10V \approx -Q_{Max, Vyp} - Q_{Max, Nap}$). Dynamika celé soustavy je zpomalena tlakovou hadicí spojující ventil a PMA. Naproti tomu nejrychlejší akční člen (spínací ventil Matrix MK-754) není vzhledem k malému průřezu (nízkému nominálnímu průtoku) téměř omežován použitým rozvodem (**Graf 4**). Způsob řízení (PWM, PFM) a nelineární závislost průtoku na délce budícího impulsu (Graf 5) zvyšuje náročnost jeho použití.



Graf 2 Odezva regulátoru tlaku SMC na změnu žádané hodnoty výstupního tlaku



Graf 3 Odezva proporcionalního ventilu Festo na změnu otevření (maximální napouštění a vypouštění)



Graf 4 Odezva spínacího ventilu Matrix MK-754

Při napouštění tlakové nádoby stlačeným vzduchem z kompresoru byly bez přímého měření průtoku učeny základní charakteristiky **spínacího (on/off) ventilu**. Z následujícího grafu (Graf 5) je patrná nelinearita typu „pásmová necitlivosti“ daná dynamickými ději při otevírání. Nesymetrie je způsobena rozdílnými poměry tlaků před a za ventilem při vypouštění (záporná délka impulsu) a napouštění. Další graf (Graf 6) popisuje změřenou závislost mezi průtokem a poměrem tlaků. Na základě získaných dat byla provedena linearizace a výpočet průtoku z aktuálního poměru tlaků na ventilu.

Vlastnosti **pneumatického svalu** byly proměřovány se závažím definované hmotnosti (**Obr. 3**). Aproximace statické charakteristiky je ukázána v grafu (Graf 7). Model pneumatického svalu bez hystereze byl aproximován touto funkcí:

$$F = A_s(\Delta l) \cdot p^* + B_s(\Delta l), [N, kPa],$$

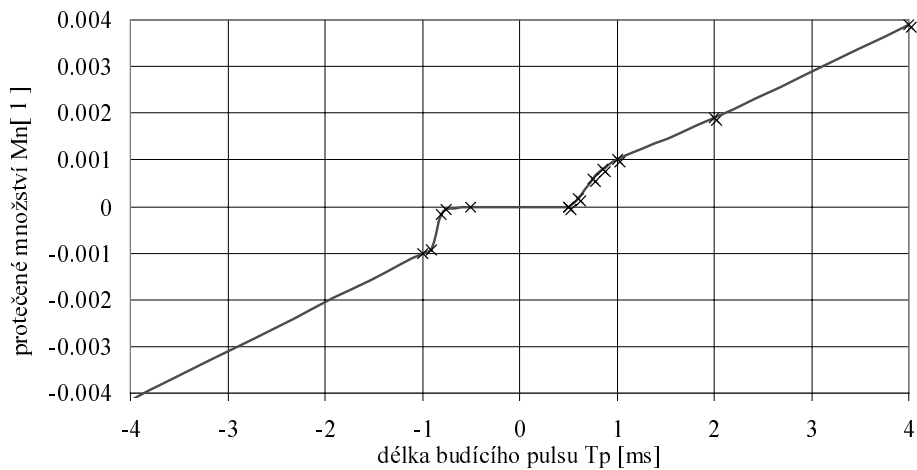
$$A_s(\Delta l) = -7,40 \cdot 10^{-6} \Delta l^3 + 1,00 \cdot 10^{-3} \Delta l^2 - 6,00 \cdot 10^{-2} \Delta l + 2,35 \quad [N / kPa, mm] \quad (6)$$

$$B_s(\Delta l) = -0,002 \Delta l^3 + 0,25 \Delta l^2 - 11,4 \Delta l \quad [N, mm]$$

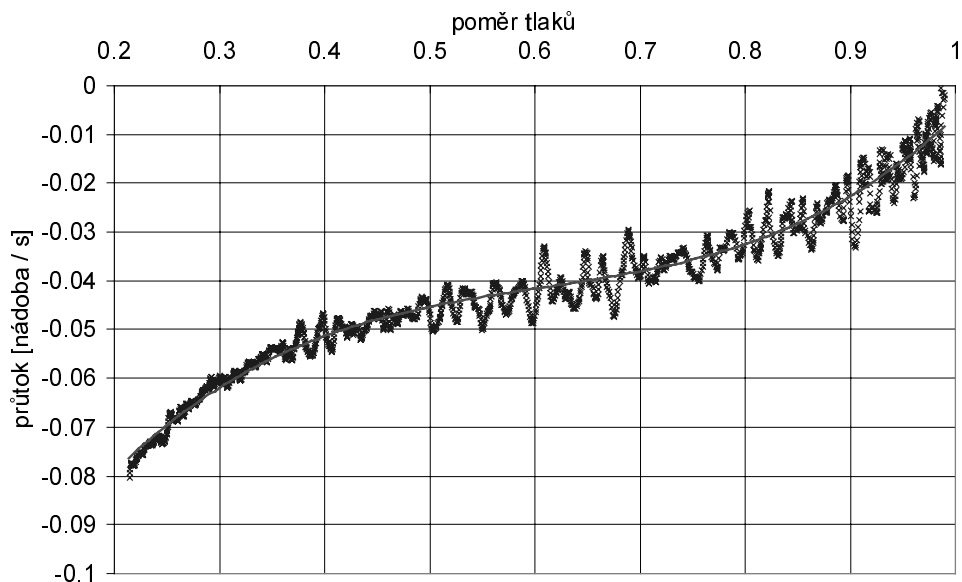
Dynamická charakteristika PMA, která je zejména popisována třením a akumulovanou energií v gumě (1) byla získána při rychlém napouštění resp. vypouštění a následném ustalování (Graf 8). Pro základní aproximaci tohoto jevu byla použita obdoba viskosního tření se saturací, která dávala dostatečné přiblížení:

$$F_{ilum} = 35 \cdot \frac{d\Delta l}{dt} \quad \text{pro } 1 > \frac{d\Delta l}{dt} > 0 \quad (3.7)$$

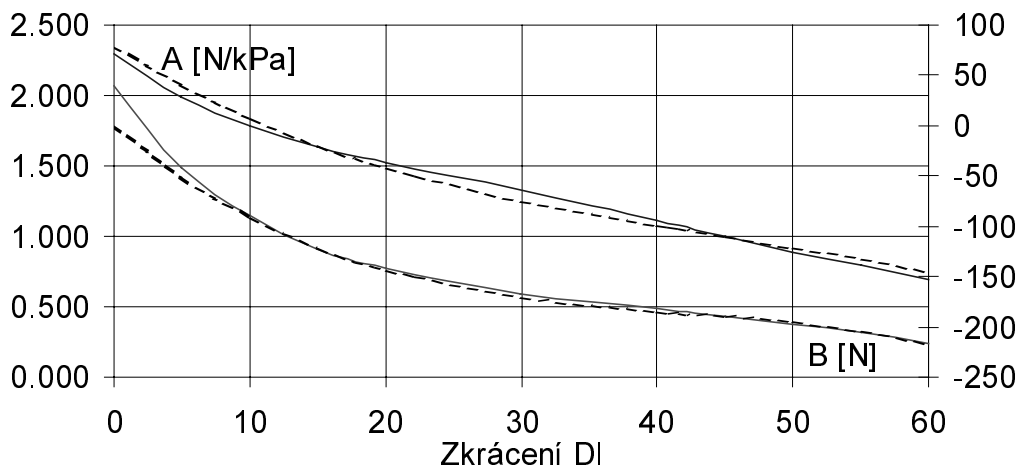
$$F_{ilum} = 35 \quad \text{pro } \frac{d\Delta l}{dt} > 1$$



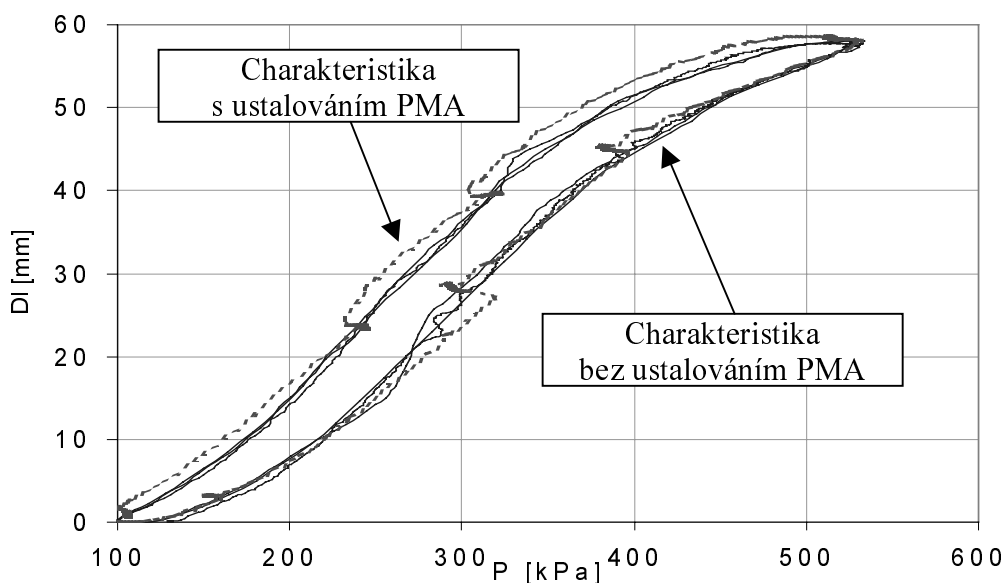
Graf 5 Závislost průtoku ventilem Q_n na délce budícího impulsu ventilu



Graf 6 Závislost průtoku Q_n napouštěcím ventilem na poměru tlaků na ventilu



Graf 7 Závislost A_s a B_s na zkrácení svalu Δl . matematická aproximace-čárkovaně.



Graf 8 Závislost zkrácení svalu na tlaku při zatížení silou 65 N.

4. ZÁVĚR

V článku jsou prezentovány obecné vztahy používané pro popis pneumatického svalu a ventilu. Na základě změřených dat se ukázalo, že ne vždy tyto rovnice odpovídají skutečnosti.

V dalším studiu použití PMA se předpokládá rozšíření matematického modelu na zbývající pneumatické prvky a pokus o odstranění snímačů tlaku v okolí ventilu, případně využití doplňkové informace ze snímače síly.

5. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HANUŠ, Bořivoj; OLEHLA, Miroslav; MODRLÁK, Osvald: *Číslicová regulace technologických procesů*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1460-X.
- [2] Glenn K. Klute Joseph M. Czerniecki Blake Hannaford: *McKibben Artificial Muscles: Pneumatic Actuators with Biomechanical Intelligence*. IEEE/ASME 1999

Poděkování: Tento příspěvek vznikl za podpory grantu GAČR 102/02/0782 „Výzkum chování a řízení netradičních akčních členů pro robotiku“

Kontakt: Petr Vaňous, ÚAMT FEKT VUT, Božetěchova 2, 612 66 Brno
email: vanous@feec.vutbr.cz, url: <http://wes.feec.vutbr.cz/UAMT/robotics/>