

# 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 )

Bližší 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:

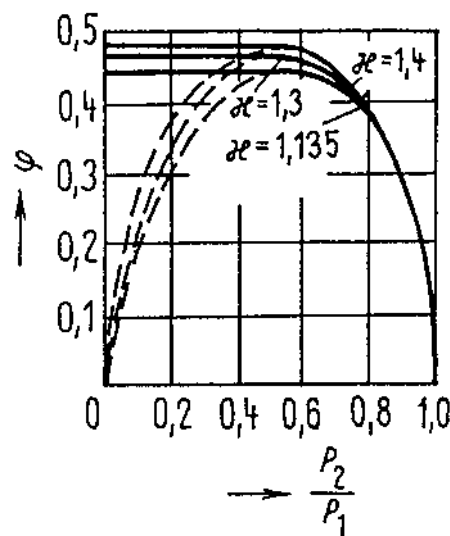
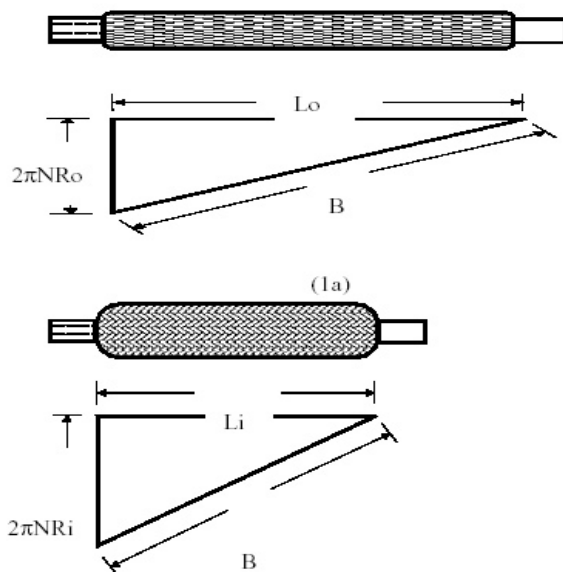
$F_{gaylord}$  je síla generovaná svalem podle rovnice ( 2 )

$N$  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

$\lambda_i$  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],

$\rho_1$  hustota tekutiny při tlaku  $P_1$  a teplotě  $\nu_1$  před ventilem [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$S_v$  průtočný průřez ventilu [ $\text{m}^2$ ]

$\beta_\kappa$  průtokový součinitel stlačitelné tekutiny se

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

$\varepsilon$  expanzní součinitel stlačitelné tekutiny

$\varphi$  výtokový součinitel

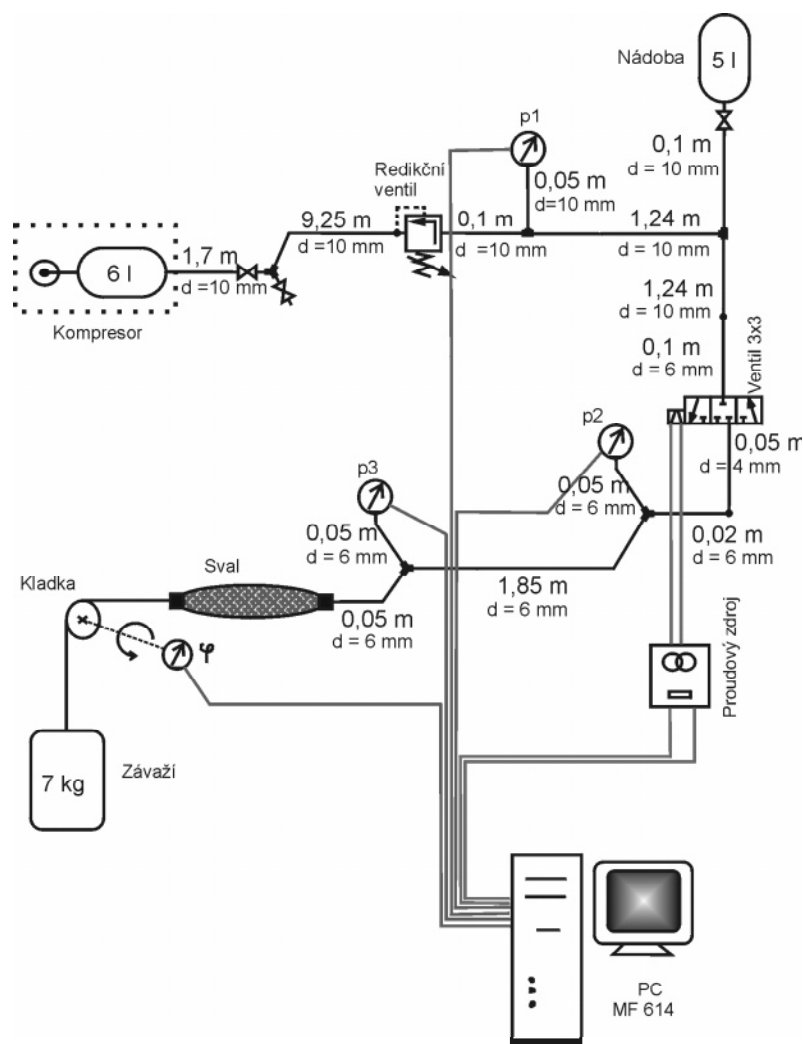
$$\varphi = \varepsilon \sqrt{\frac{P_1}{P_1 - P_2}} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]} \quad (5)$$

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

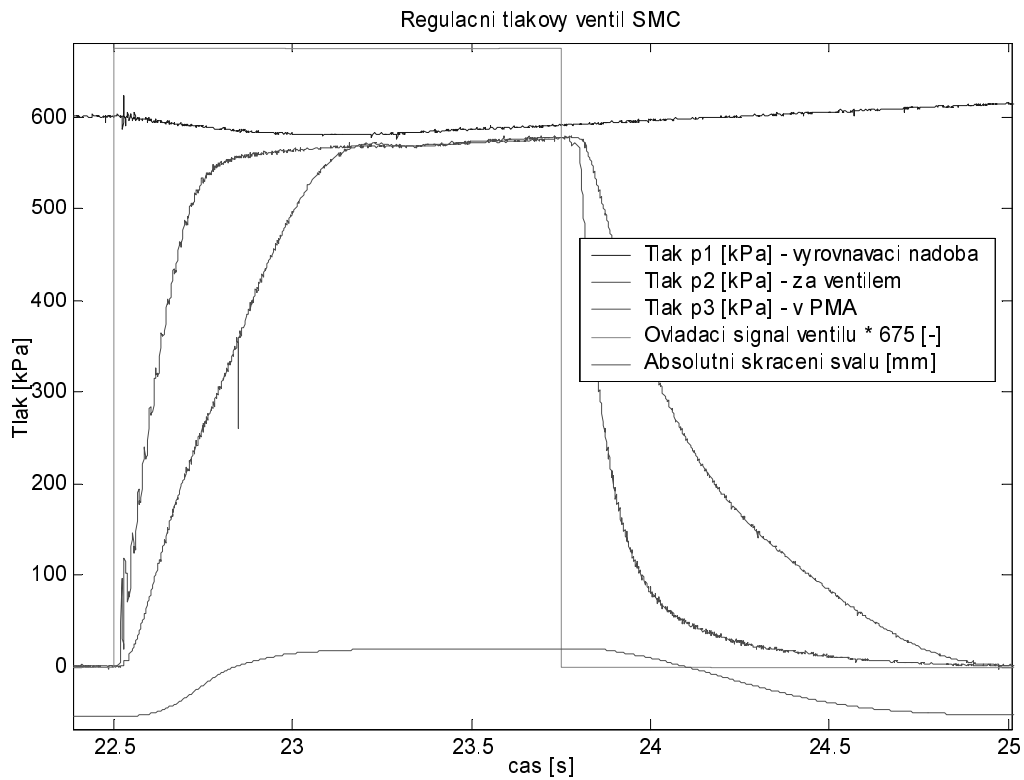
Na pneumatický sval můžeme pohlížet jako na zdroj síly, který je úměrný vnitřnímu tlaku vzduchu ( 1 ). Tento tlak je měněn otevřením napouštěcího nebo vypouštěcího ventilu. Dvojice ventilů 2/2 resp. ventil typu 3/3 představuje akční člen, kterým ovládá pneumatický systém. Žádanou hodnotou je zkrácení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

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

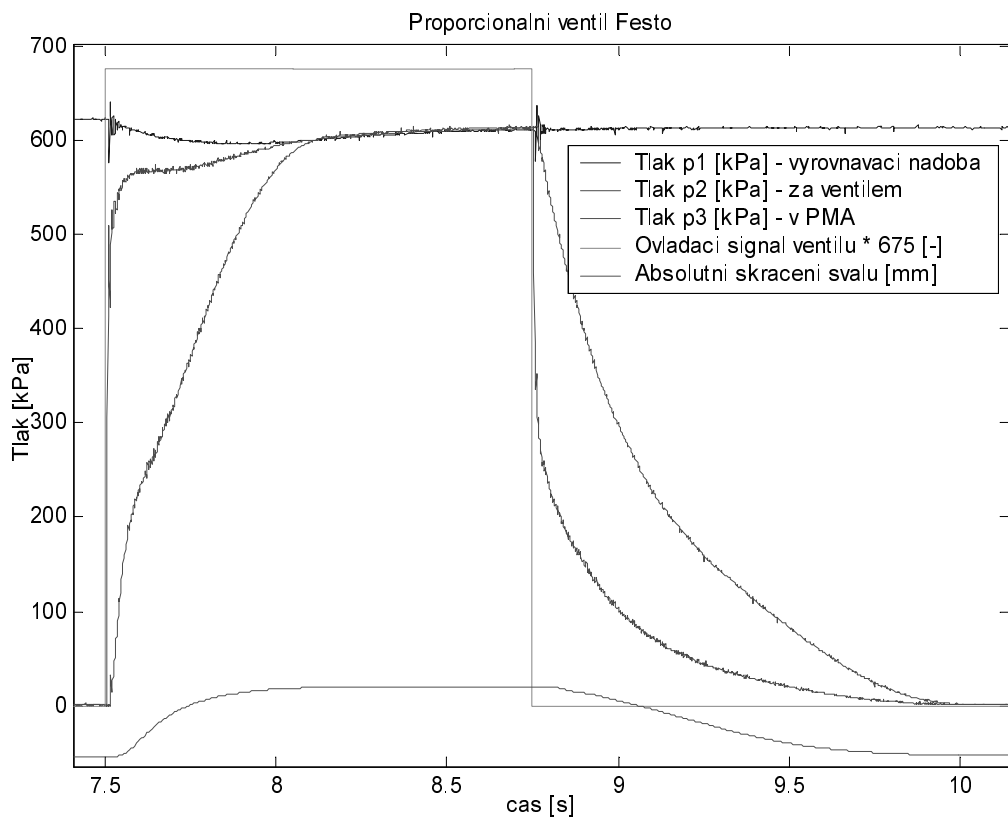
- Elektropneumatický regulátor tlaku – SMC IVT 2050
- Elektropneumatický proporcionální ventil – Festo MPYE-5-M5
- Elektropneumatický spínací ventil – Matrix MK-754

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.

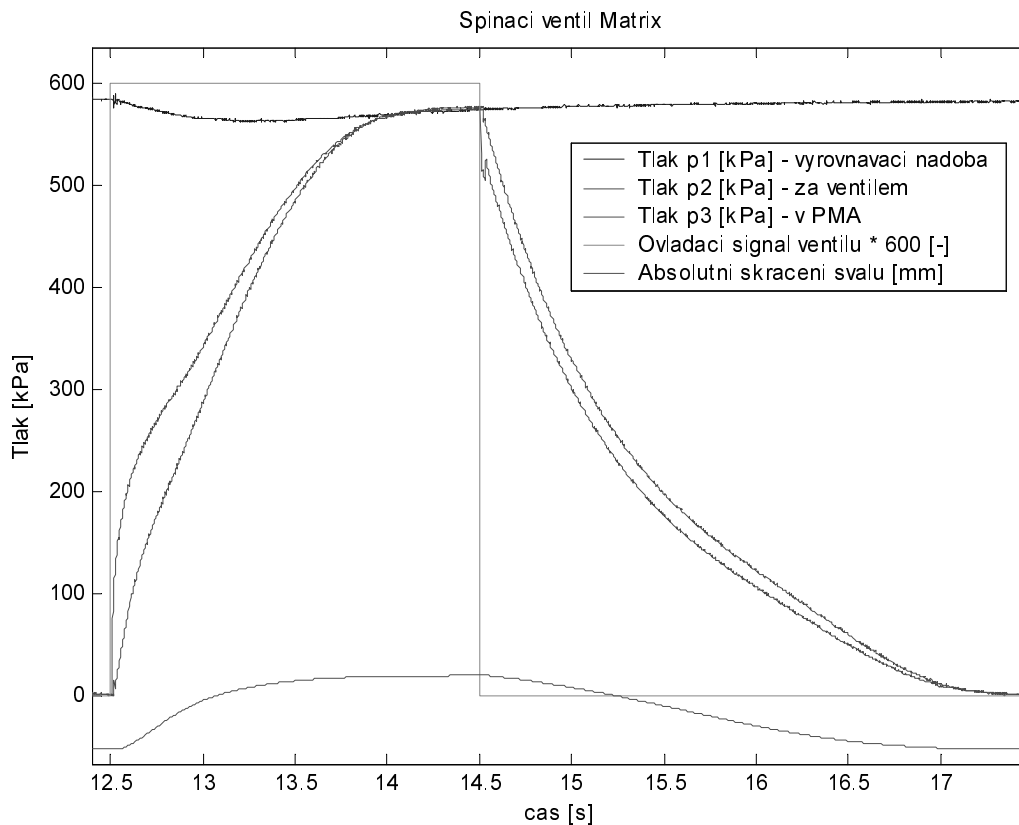
Nejlepší vlastnosti dle očekávání prokázal proporcionální ventil Festo MPYE-5-M5. Na grafu (**Graf 3**) je ze změny tlaku za ventilem dobře patrná vysoká přestavovací rychlost ( $0-10V \approx -Q_{Max, Vyp} - Q_{Max, Nap}$ ). Dynamika celé soustavy je zpomalena tlakovou hadicí spojující ventil a PMA. 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 svaly** byly proměřovány se závažím definované hmotnosti (**Obr. 3**). Aproximace statické charakteristiky je ukázána v grafu (Graf 7). Model pneumatického svaly bez hystereze byl aproximován touto funkcí:

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

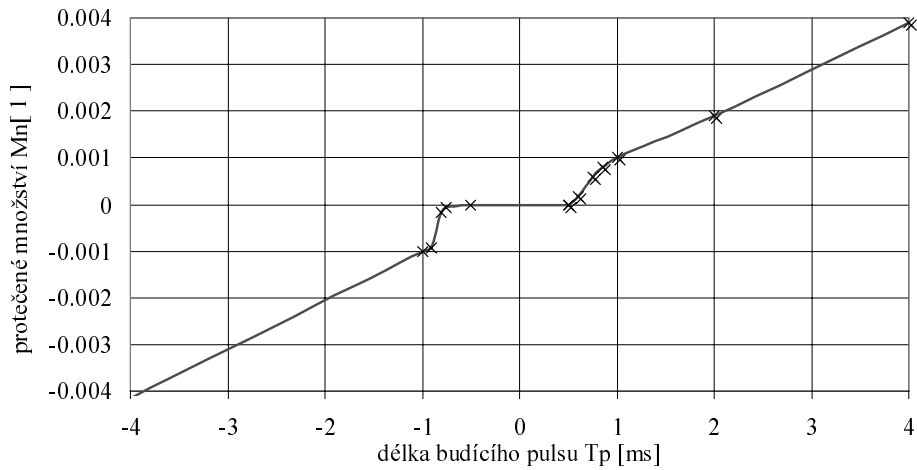
$$A_s(\Delta l) = -7,40 \cdot 10^{-6} \Delta l^3 + 1,00 \cdot 10^{-3} \Delta l^2 - 6,00 \cdot 10^{-2} \Delta l + 2,35 \quad [N / kPa, mm] \quad (6)$$

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

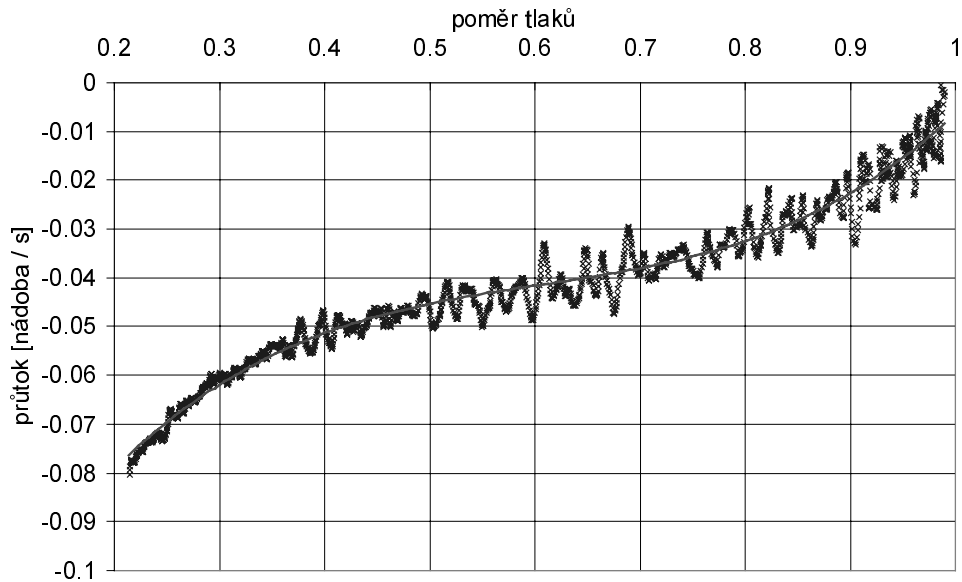
Dynamická charakteristika PMA, která je zejména popisována třením a akumulovanou energií v gumě (1) byla získána při rychlém napouštění resp. vypouštění a následném ustalování (Graf 8). Pro základní aproximaci tohoto jevu byla použita obdoba viskosního tření se saturací, která dávala dostatečné přiblížení:

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

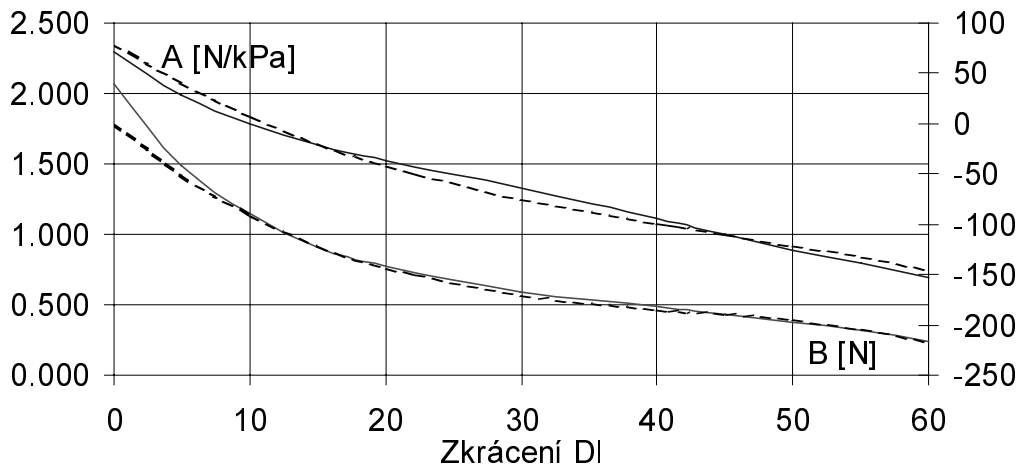
$$F_{ilum} = 35 \quad \text{pro } \frac{d\Delta l}{dt} > 1$$



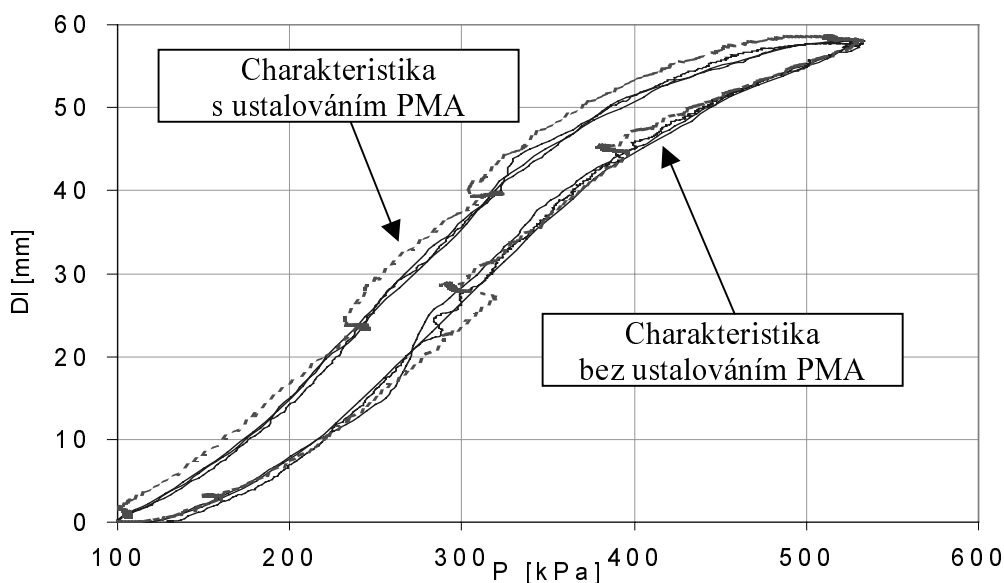
**Graf 5** Závislost průtoku ventilem  $Q_n$  na délce budícího impulsu ventilu



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



**Graf 7** Závislost  $A_s$  a  $B_s$  na zkrácení svalu  $\Delta l$ . 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](mailto:vanous@feec.vutbr.cz), url: <http://wes.feec.vutbr.cz/UAMT/robotics/>