

Návrh adaptivního regulátoru pro řízení systému na bázi pneumatických svalů

¹Michal Moučka, ¹Maryna Garan, ¹Iaroslav Kovalenko, ²Mária Tóthová

¹Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní
Katedra výrobních systémů a automatizace
Studentská 2, 461 17 Liberec, Česká republika
michal.moucka@tul.cz
maryna.garan@tul.cz
iaroslav.kovalenko@tul.cz

²Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove
Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky
Bayerova 1, 080 01 Prešov, Slovenská republika
maria.tothova@tuke.sk

Abstrakt

Článek pojednává o návrhu adaptivního regulátoru pro polohové řízení systému na bázi umělých pneumatických svalů. Jsou zde odvozeny rovnice adaptivního regulátoru s referenčním modelem. Pro potřeby odvození jsou též uvedeny dílčí výsledky identifikace systému. Výsledky z ověření funkčnosti regulátoru jsou též v článku uvedeny.

Klíčová slova: umělý pneumatický sval; identifikace; adaptivní regulátor

1 Úvod

Umělé pneumatické svaly díky svým jedinečným vlastnostem jsou využívány konstruktéry jako pohonná jednotka v návrzích nejrozličnějších strojů. Příkladem jsou manipulátory, konstrukce robotů, nebo náhrady končetin lidského těla. Pracovním médiem svalů je plyn, nejčastěji upravený stlačený vzduch. Plyn není zrovna ze své podstaty nejvhodnějším zdrojem energie. Změna jeho vlastností (stavových veličin) v průběhu pracovního procesu je zdrojem mnoha problémů při přesném polohování. V ideálním případě je jeho chování popsáno stavovou rovnicí [1] ideálního plynu

$$p = \rho r T, \quad (1)$$

kde p je tlak, ρ hustota, T termodynamická teplota plynu. Všechny uvedené stavové veličiny jsou časovými závislostmi. Dokonce i individuální plynová konstanta r není ve skutečnosti konstantou. Její hodnota je závislá na aktuální vlhkosti plynu.

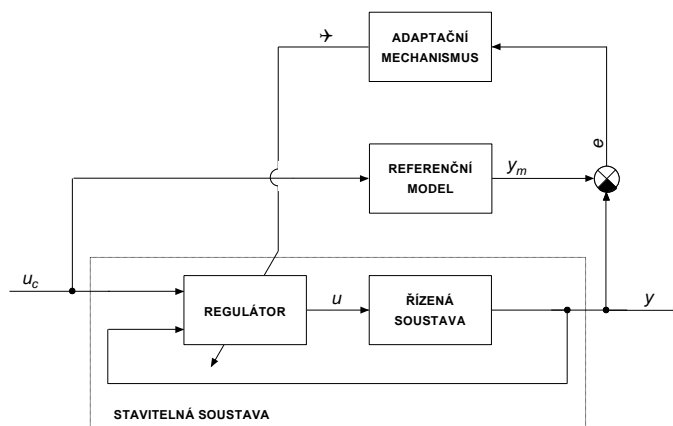
Je tedy zřejmé, že řízení pneumatických systémů nemusí být triviální záležitostí. A většinou klasické konvenční řídicí systémy s regulátory s pevně nastavenými parametry nemusí vždy vykazovat dostatečnou kvalitu regulačního pochodu. V tomto případě pak nacházejí uplatnění regulátory, které dostatečně rychle reagují na změnu vlastnosti řízené soustavy - regulátory adaptivní. A právě návrhem adaptivního regulátoru s referenčním modelem (dále MRAS) pro polohování systému na bázi pneumatických svalů se zabývá předložený článek.

2 Adaptivní regulátor s referenčním modelem

Schéma adaptivního systému s referenčním modelem je uvedeno na Obr. 1. Systém se skládá ze stavitelné soustavy, referenčního modelu a adaptačního mechanismu. Referenční model je zdrojem požadovaného průběhu odezvy y_m na změnu vstupního signálu u_c . Snahou adaptačního mechanismu je dosáhnout konvergence parametrů stavitelné soustavy k parametrům referenčního modelu, tak aby

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y_m(t) - y(t)) = 0. \quad (2)$$

Adaptační systém na základě velikosti regulační odchylky e ladí parametry Θ regulátoru (součást stavitelné soustavy) tak, aby bylo dosaženo požadované konvergence.



Obrázek. 1: Adaptivní systém MRAS

Způsobů jak takový regulátor odvodit je mnoho, jedním z nich je MIT pravidlo [2], které pochází z Massachusetts Institute of Technology. Filozofie MIT pravidla vychází z minimalizace zvolené ztrátové funkce

$$J(\Theta) = f(e) \quad (3)$$

gradientní metodou. V našem případě byla zvolena funkce

$$J(\Theta) = 0.5e^2. \quad (4)$$

Následně je tedy adaptační pravidlo pro uvedenou funkci rovno

$$\frac{d\Theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\Theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \Theta}. \quad (5)$$

Tato rovnice je MIT pravidlem pro uvedenou ztrátovou funkci. Parciální derivace $\partial e / \partial \theta$ odchylky podle stavitelného parametru je citlivostní derivací. Uvádí, jak je odchylka e závislá na parametru θ . Za předpokladu, že se derivace mění pomaleji než ostatní parametry, lze konstatovat, že θ je konstantní.

Před vlastním odvozením vztahů adaptivního regulátoru je nezbytné identifikovat řízenou soustavu. Přesněji řečeno určit tvar a řád obrazového přenosu. Parametry přenosu nejsou pro odvození důležité. A stejně je jejich hodnota časově závislá.

3 Identifikace systému

Obrazový přenos soustavy byl vypočten metodou ploch [3] z přechodové charakteristiky aplikací System Identifier /2, viz Obr 2. Charakteristika byla vypočtena z odezvy systému na budící signál u ve tvaru skoku velikosti 600 kPa. Měření probíhalo naprázdno (pneumatiký sval nebyl zatížen).

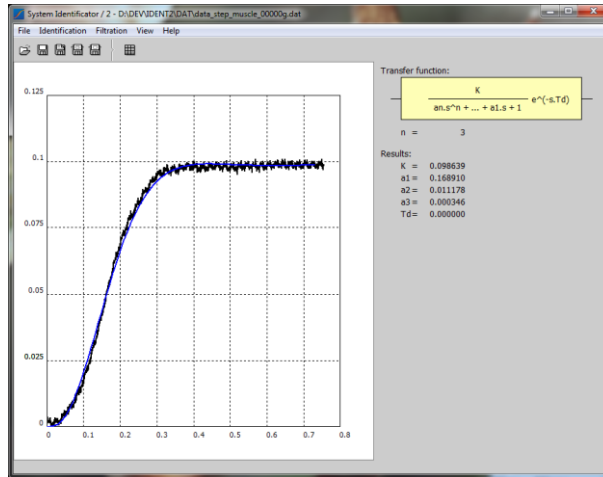
Identifikací bylo zjištěno, že nejlépe soustavě odpovídá obrazový přenos statické soustavy třetího řádu

$$G(s) = \frac{b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (6)$$

respektive lineární diferenciální rovnice

$$a_3 \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t), \quad (7)$$

kde $B(s)$ je polynom čitatele, $A(s)$ je polynom jmenovatele obrazového přenosu, a , b jsou koeficienty příslušných polynomů. Hodnoty koeficientů jsou uvedeny v tabulce.



Obrázek. 2: Identifikace soustavy

Tabulka 1: Koeficienty obrazového přenosu

$B(s)$	$A(s)$			
b_0	a_3	a_2	a_1	a_0
0.098639	0.003460	0.011178	0.168910	1.000000

4 Odvození MRAS pro identifikovanou soustavu

Diferenciální rovnici (7) lze převést podělením koeficientem a_3 a zavedením pomocných koeficientů α, β na normovaný tvar

$$\frac{d^3 y(t)}{dt^3} + \alpha_1 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \alpha_2 \frac{dy(t)}{dt} + \alpha_3 y(t) = \beta u(t). \quad (8)$$

Stejný tvar bude mít logicky diferenciální rovnice referenčního modelu

$$\frac{d^3 y_m(t)}{dt^3} + \alpha_{m1} \frac{d^2 y_m(t)}{dt^2} + \alpha_{m2} \frac{dy_m(t)}{dt} + \alpha_{m3} y_m(t) = \beta_m u_c(t). \quad (9)$$

Diferenciální rovnice řízené soustavy má čtyři koeficienty $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ a β . Tomu bude odpovídat diferenciální rovnice regulátoru se čtyřmi stavitelnými parametry $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ a Θ_4 ve tvaru

$$u(t) = \Theta_1 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} - \Theta_2 \frac{dy(t)}{dt} - \Theta_3 y(t) - \Theta_4 u_c(t). \quad (10)$$

V diferenciálních rovnicích (8), (9) a (10) nahradíme všechny derivace vztahem

$$\frac{d^i y(t)}{dt^i} = s_i y(t), \quad (11)$$

kde hodnota i odpovídá řádu nahrazované derivace. Zároveň dosadíme do (8) za u z rovnice (10). Dostáváme:

$$s_3 y(t) = -\alpha_1 s_2 y(t) - \alpha_2 s_1 y(t) - \alpha_3 y(t) + \beta [\Theta_1 u_c(t) - \Theta_2 y(t) - \Theta_3 s_1 y(t) - \Theta_4 s_2 y(t)], \quad (12)$$

$$s_3 y_m(t) = -\alpha_{m1} s_2 y_m(t) - \alpha_{m2} s_1 y_m(t) - \alpha_{m3} y_m(t) + \beta_m u_c(t). \quad (13)$$

Dále upravíme na tvar

$$y = \frac{\beta \Theta_1}{s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3) + \alpha_3 + \beta \Theta_2} u_c, \quad (14)$$

$$y_m = \frac{\beta_m}{s_3 + \alpha_{m1} s_2 + \alpha_{m2} s_1 + \alpha_{m3}} u_c. \quad (15)$$

Rovnice dosadíme do odchylky e výstupů

$$e(t) = y(t) - y_m(t), \quad (16)$$

a vypočteme její parciální derivace podle parametrů Θ :

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_1} = \frac{\beta}{s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3) + \alpha_3 + \beta \Theta_2} u_c, \quad (17)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_2} = \frac{\beta^2 \Theta_1}{[s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3) + \alpha_3 + \beta \Theta_2]^2} u_c, \quad (18)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_3} = \frac{\beta^2 \Theta_1 s_1}{[s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3) + \alpha_3 + \beta \Theta_2]^2} u_c, \quad (19)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_4} = \frac{\beta^2 \Theta_1 s_2}{[s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3) + \alpha_3 + \beta \Theta_2]^2} u_c. \quad (20)$$

Rovnice parciálních derivací (18), (19) a (20) substitucí (14) zjednodušíme:

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_2} = \frac{-\beta}{s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3) + \alpha_3 + \beta \Theta_2} y, \quad (21)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_3} = \frac{-\beta s_1}{s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3) + \alpha_3 + \beta \Theta_2} y, \quad (22)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_4} = \frac{-\beta s_2}{s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3) + \alpha_3 + \beta \Theta_2} y. \quad (23)$$

Jelikož nebudou v průběhu práce známy aktuální parametry α a β řízené soustavy není možné použít získané rovnice (17), (21), (22) a (23) přímo. Je nezbytné je nějakým způsobem nahradit.

V případě ideálního stavu je odchylka e rovna nule. V anglické literatuře je tento stav popisován termínem perfect model-following. Parametry modelu se shodují s parametry stavitelné soustavy. Rovnice (14) je s rovnicí (15) v rovnováze

$$\frac{\beta \Theta_1^*}{s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4^*) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3^*) + \alpha_3 + \beta \Theta_2^*} u_c = \frac{\beta_m}{s_3 + \alpha_{m1}s_2 + \alpha_{m2}s_1 + \alpha_{m3}} u_c \quad (24)$$

Hvězdička * u stavitelných parametrů Θ znamená ideální stav. V tomto stavu pro jmenovatele výrazu (24) platí

$$s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4^*) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3^*) + \alpha_3 + \beta \Theta_2^* = s_3 + \alpha_{m1}s_2 + \alpha_{m2}s_1 + \alpha_{m3}, \quad (25)$$

Přibližně tedy

$$s_3 + s_2(\alpha_1 + \beta \Theta_4) + s_1(\alpha_2 + \beta \Theta_3) + \alpha_3 + \beta \Theta_2 \approx s_3 + \alpha_{m1}s_2 + \alpha_{m2}s_1 + \alpha_{m3} \quad (26)$$

Polynom ve jmenovateli rovnic (17), (21), (22) a (23) lze tedy v případě zanedbání chyby aproximovat polynomem jmenovatele modelu (15). V případě potřeby je též možné porovnáním koeficientů příslušných konkrétnímu diferenciálnímu operátoru s získat vztahy pro stavitelné parametry Θ^* v ideálním stavu

$$\Theta_i^* = \begin{cases} \frac{\beta_m}{\beta} & \text{pro } i=1 \\ \frac{\alpha_{m(i+1)} - \alpha_{(i+1)}}{\beta} & \text{pro } i>1 \end{cases}, \quad (27)$$

kde i je index příslušného parametru.

Po dosazení (17), (21), (22) a (23) do (9) a aproximaci jmenovatelů získáme rovnice pro adaptivní aktualizaci parametrů regulátoru ve stavitelné soustavě:

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial t} = -\kappa \left[\frac{\alpha_{m0}}{s_3 + s_2\alpha_{m2} + s_1\alpha_{m1} + \alpha_{m0}} u_c \right] e, \quad (28)$$

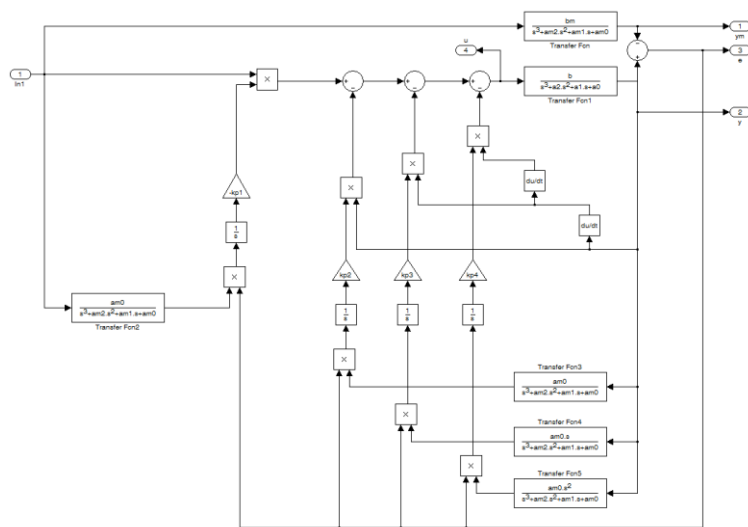
$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial t} = \kappa \left[\frac{\alpha_{m0}}{s_3 + s_2 \alpha_{m2} + s_1 \alpha_{m1} + \alpha_{m0}} y \right] e, \quad (29)$$

$$\frac{\partial \Theta_3}{\partial t} = \kappa \left[\frac{\alpha_{m0} s_1}{s_3 + s_2 \alpha_{m2} + s_1 \alpha_{m1} + \alpha_{m0}} y \right] e, \quad (30)$$

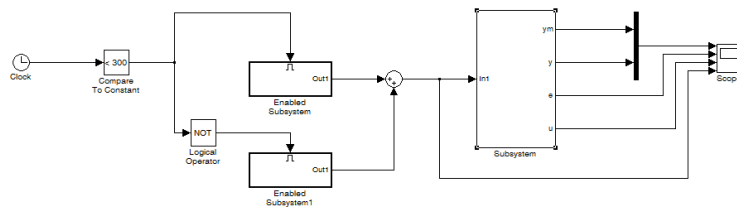
$$\frac{\partial \Theta_4}{\partial t} = \kappa \left[\frac{\alpha_{m0} s_2}{s_3 + s_2 \alpha_{m2} + s_1 \alpha_{m1} + \alpha_{m0}} y \right] e, \quad (31)$$

5 Ověření regulátoru

Správnost adaptivního regulátoru byla ověřena v produktu Matlab-Simulink. Z rovnic byla sestavena simulační schémata, viz Obr. 3. Pomocným schématem (Obr. 4) je schéma pro generování budicího signálu.

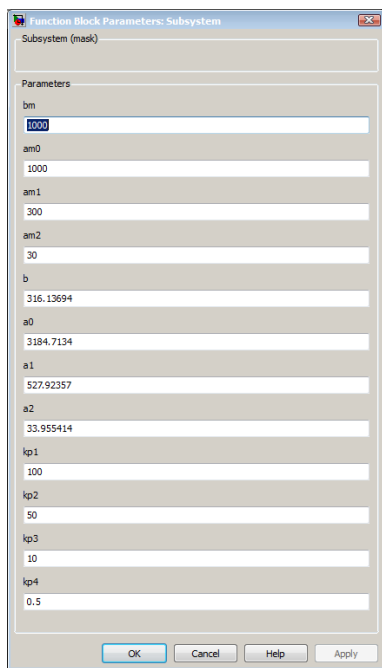


Obrázek 3: Simulační schéma systému s referenčním modelem

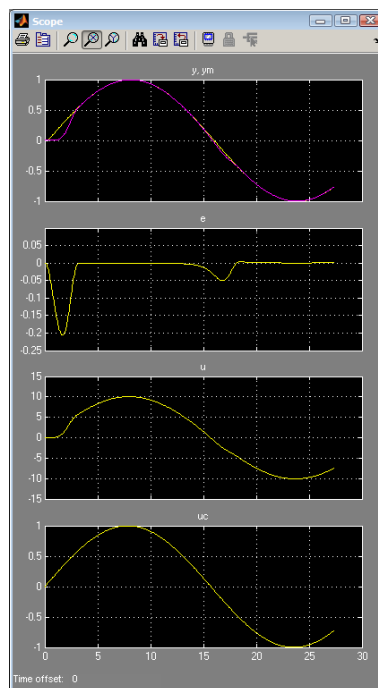


Obrázek 4: Generátor budicího signálu

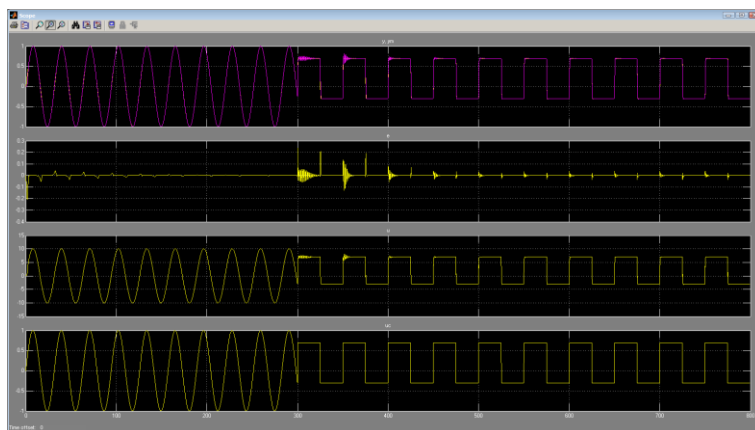
Výsledky ze simulace jsou uvedeny v grafech na Obr. 6 a Obr 7. Na Obr. 6 je zřejmá adaptace stavitelné soustavy (regulátor v interakci s řízenou soustavou). Žlutá křivka odpovídá výstupu z referenčního modelu, fialová řízené soustavě. Simulace proběhla pro parametry uvedené na Obr. 4 s dialogovým oknem pro nastavení. Na Obr. 7 je pak uvedena simulace pro dva různé budicí signály.



Obrázek. 5: Simulační parametry



Obrázek. 6: Sledování



Obr. 7: Regulační pochod s MRAS

6 Závěr

Na základě simulací lze závěrem konstatovat, že navržený adaptivní regulátor s referenčním modelem je funkční a plně použitelný pro řízení pneumatických systémů na bázi pneumatických svalů. Další směr výzkumu adaptivního řízení s referenčním modelem bude směřovat k implementaci algoritmu řízení na některý z průmyslových systémů. S největší pravděpodobností se bude jednat o průmyslový systém NI-PXI, kterým pracoviště autorů disponuje.

Poděkování. Výsledky prezentované v příspěvku byly částečně podpořeny Ministerstvem školství České republiky prostřednictvím grantu č. 7AMB14SK209.

Seznam použité literatury

- [1] P.K. Kundu, I.M. Cohen, *Fluid mechanics (third edition)*, Elsevier Academic Press, London, 2004.
- [2] K.J. Åström, B. Wittenmark, *Adaptive Control (second edition)*, Addison Wesley Publishing Company, New York, 1995.
- [3] R. Isserman, *Identifikation Dynamischer Systeme*, Springer-Verlag, Berlin, 1992.