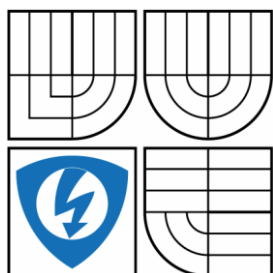


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ PNEUMATICKÝCH SVALŮ

CONTROL OF PNEUMATIC MUSCLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

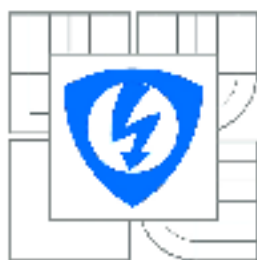
JAKUB MICHNA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Kopečný, Ph. D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Jakub Michna
Ročník: 3

ID: 134560
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Řízení pneumatických svalů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Model pneumatického svalu vytvořený v rámci semestrální práce validujte v porovnání s reálným systémem. Určete parametry modelu konkrétního pneumatického svalu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

TONDU, B., LOPEZ, P. Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators. IEEE Control Systems Magazine, 2000, vol. 20, no. 2, p. 15 – 38.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 27.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá vlastnostmi McKibbenova pneumatického svalu a identifikací parametrů vytvořeného modelu pneumatického svalu. Pro identifikaci parametrů vytvořeného modelu pneumatického svalu je použita Matlabovská funkce fminsearch. Výsledkem této práce je porovnání vytvořeného modelu pneumatického svalu s reálným pneumatickým svalem, na základě podobnosti průběhů absolutního tlaku a okamžité délky pneumatického svalu.

Klíčová slova

McKibbenův pneumatický sval, Matlab, Simulink, Model pneumatického svalu, Tlaková nádoba, Identifikace, Identifikace tlumení, Diferenciální rovnice, Linearizace pneumatického ventilu, Řízení pneumatického ventilu, Fminsearch.

Abstract

This work deals with basic properties of McKibben pneumatic muscle and identification of the parameters of the model of pneumatic muscle. To identify the parameters of the model of pneumatic muscle is used MATLAB function Fminsearch. The result of this work is the comparison of the model of pneumatic muscle with real pneumatic muscle, based on the similarity of waveforms of absolute pressure and on the similarity of instantaneous length of pneumatic muscle.

Keywords

McKibben pneumatic muscle, Matlab, Simulink, Model of pneumatic muscle, Pressure vessel, Identification, Identification of damping, Differential equations, Linearization of pneumatic valve, Control of pneumatic valve, Fminsearch.

Bibliografická citace:

MICHNA, J. *Řízení pneumatických svalů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 39s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Řízení pneumatických svalů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **23. května 2013**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Kopečnému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **23. května 2013**

.....
podpis autora

1 OBSAH

1	OBSAH.....	7
2	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
3	ÚVOD.....	10
3.1	Pneumatické svaly.....	10
3.2	Princip funkce pneumatického svalu	11
4	MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL PNEUMATICKÉHO SVALU.....	12
4.1	Popis pneumatického svalu	12
4.2	Statický model pneumatického svalu.....	13
4.3	Odvození tažné síly v závislosti na tlaku a okamžité délce svalu.....	14
4.4	Princip tlakové nádoby.....	15
5	NAVRŽENÝ MODEL PNEUMATICKÉHO SVALU	16
5.1	Návrh simulovaného modelu	16
5.2	Parametry simulovaného modelu.....	17
5.3	Zjištění diferenciální rovnice pro hmotný bod závaží.....	17
5.4	Omezení maximální délky svalu	18
6	pracoviště s reálným pneumatickým svaem	19
6.1	Převodní charakteristika tlakového čidla	19
6.2	Převodní charakteristika enkodéru	20
6.3	Pneumatický ventil MATRIX	20
6.3.1	Řízení ventilu.....	21
6.3.2	Řízení napouštění a vypouštění	21
6.3.3	Linearizace ventilu.....	22
7	IDENTIFIKACE PARAMETRŮ NAVRŽENÉHO MODELU PNEUMATICKÉHO SVALU.....	23
7.1	Identifikace parametrů pro porovnání absolutních tlaků reálného a navrženého modelu pneumatického svalu.....	23
7.1.1	Použití funkce $F_{minsearch}$ při identifikaci parametrů pro porovnání absolutních tlaků	24
7.1.2	Vypočítané hodnoty hmotnostního toku Q_m a $Pocatecni$ hmotnost... ..	25
7.2	Výpočet tlumící konstanty B	25
7.2.1	Použití funkce $F_{minsearch}$ při výpočtu tlumení.....	25
7.2.2	Vypočítané hodnoty tlumící konstanty B	26
8	ZÁVĚR.....	27
9	LITERATURA	29

10	Seznam příloh	30
10.1	Příloha 1: Výpis m-file – konstanty nutné pro běh simulace	30
10.2	Příloha 2: Namodelované schéma rovnice 5.7	31
10.3	Příloha 3: Průběhy řídících signálů hmotnostního toku	32
10.4	Příloha 4: Porovnání absolutních tlaků.....	34
10.5	Příloha 5: Porovnání okamžité délky svalů	37

2 SEZNAM OBRÁZKŮ

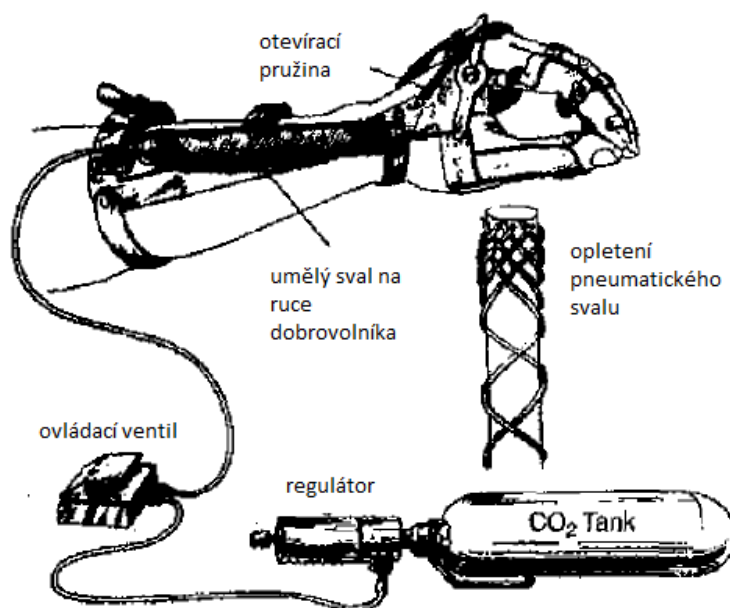
Obrázek 1 Aplikace McKibbenova umělého svalu	10
Obrázek 2 Pneumatický sval při stahu a klidovém stavu	11
Obrázek 3 Parametry pneumatického svalu.....	12
Obrázek 4 Simulovaný model pneumatického svalu.....	16
Obrázek 5 Omezení maximální délky svalu	18
Obrázek 6 Pneumatický ventil MATRIX MK 754.8E102	20
Obrázek 7 Řízení pneumatického ventilu MATRIX	21
Obrázek 8 Řízení napouštění a vypouštění pneumatického ventilu MATRIX7	21

3 ÚVOD

3.1 Pneumatické svaly

McKibbenův pneumatický sval je souhrnný a nejpoužívanější název pro pneumatické svaly s různými druhy opletení. McKibben sestrojil svůj pneumatický sval v roce 1950 k tomu, aby poháněl protézy lidských končetin. Umělý pneumatický sval se vyznačuje jednoduchou konstrukcí. Zpravidla je to dvouplášťová struktura, kde vnitřní vrstva je tvořena gumovou trubicí a vnější vrstva je tvořena bifilárně spirálovitě splétanými vlákny (pantografická struktura).

Nespornou výhodou pneumatického svalu je vysoký poměr síly a výkonu k hmotnosti a objemu. Pneumatický sval lze vyrobit v téměř libovolných rozměrech, především délce. Svými vlastnostmi, chováním a tvarem připomínají lidské svaly, toho se využívá v protézách. Pneumatické svaly umožňují přesný a plynulý chod mezi krajními polohami. Velkou výhodou je jejich bezpečnost, která umožňuje použití ve výbušném a vlhkém prostředí. Nevýhodou pneumatických svalů je jejich závislost na stálém přísunu stlačeného média, tlaku.



Obrázek 1 Aplikace McKibbenova umělého svalu

3.2 Princip funkce pneumatického svalu

Princip funkce je založen na zkracování gumové trubice při zvyšování vnitřního tlaku, čímž zároveň dojde ke zvětšení průměru gumové trubice. Pantografická struktura vláken omotaných kolem gumové trubice zajišťuje, že dochází ke kontrakci gumové trubice při zvýšení vnitřního tlaku. Radiální síla rozšiřující trubici je převáděna pomocí pantografické struktury na kontrakční axiální sílu. Důsledkem toho je, že při zvyšování vnitřního tlaku svalu dochází ke kontrakci, to znamená zvětšení průměru svalu a zmenšení délky svalu. Při kontrakci dochází k převodu pneumatické energie na mechanickou.



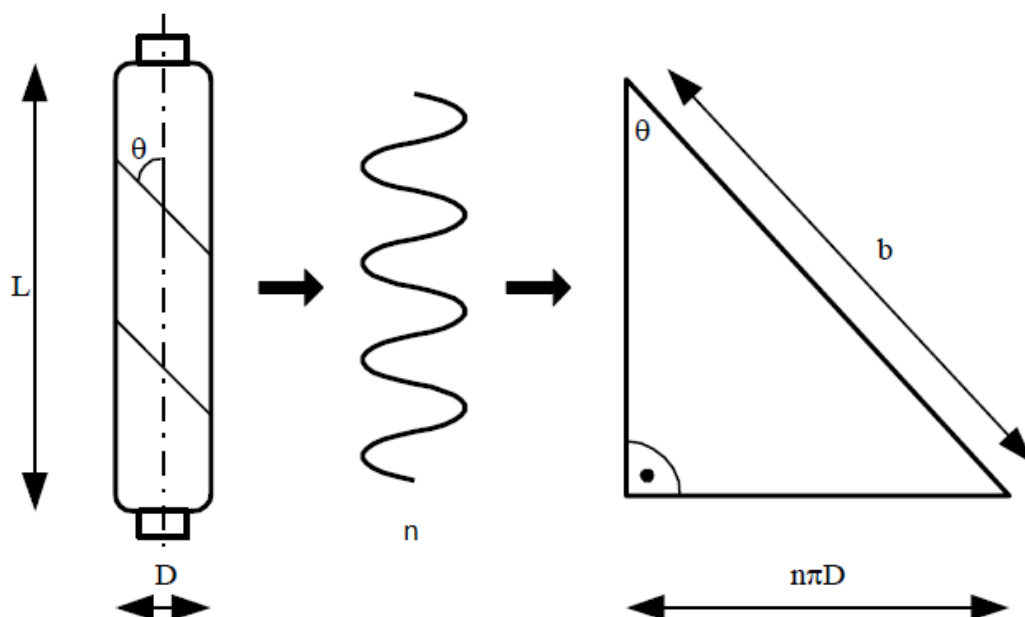
Obrázek 2 Pneumatiký sval při stahu a klidovém stavu

4 MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL PNEUMATICKÉHO SVALU

4.1 Popis pneumatického svalu

Z pracovního principu je jasné, že činnost pneumatického svalu lze popsat třemi základními parametry:

- Délka svalu – při počátečním tlaku ve svalu je délka svalu L_0 , po napuštění svalu tlakem se délka svalu zmenší na L . Musí platit $L_0 > L$.
- Průměr svalu – vnitřní gumová trubice je v těsném kontaktu s vnějším opletením, aby i při malé změně průměru svalu vlivem tlaku uvnitř svalu došlo k přenosu síly na opletení. Při počátečním tlaku má sval počáteční průměr D_0 , po napuštění svalu tlakem se průměr svalu zvětší na D . Musí platit $D_0 < D$.
- Úhel Θ – je to úhel svíraný vlákny opletení a osou svalu. Při počátečním tlaku vlákna svírají úhel Θ_0 , po napuštění svalu tlakem se úhel změní na Θ . $\Theta_0 < \Theta$.



Obrázek 3 Parametry pneumatického svalu

Dle Obrázek 3 si označíme základní parametry pneumatického svalu, podle [3]:

L	délka svalu [m]
D	šířka svalu [m]
Θ	úhel mezi vlákny a osou svalu[°]
n	počet obtočení vlákna [-]
b	délka vlákna [m]

Z obrázku je vidět, že lze snadno vyjádřit okamžitou délku svalu a okamžitý průměr svalu:

$$L = b \cdot \cos\theta \quad (4.1)$$

$$D = \frac{b \cdot \sin\theta}{n \cdot \pi} \quad (4.2)$$

Pomocí rovnic 4.1 a 4.2 lze jednoduše vypočítat objem svalu:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} = \frac{b^3}{4 \cdot \pi \cdot n^2} \cdot \sin^2\theta \cdot \cos\theta \quad (4.3)$$

4.2 Statický model pneumatického svalu

Přestože je pneumatický sval jednoduché zařízení, není jednoduché sestavit jeho přesný matematický model. Materiály tvořící pneumatický sval se vyznačují nelineárními vlastnostmi, které nelze jednoduše popsat.

Základní matematický model pneumatického svalu nepočítá se dvěma jevy:

- Při kontrakci svalu si sval nezachovává válcovitý tvar po celé své délce, ale na okraje svalu získávají kuželovitý tvar. S rostoucí kontrakcí se tímto vlivem snižuje aktivní plocha svalu.
- Vlastnosti modelu a skutečné vlastnosti trubice s opletením se liší. Model předpokládá, že vlákna opletení jsou neroztažitelná a zanedbává možnost deformace vláken.

4.3 Odvození tažné síly v závislosti na tlaku a okamžité délce svalu

Odvození bylo provedeno dle [4]. Vyjádření vstupní práce plynu W_{in} konané ve svalu když tlak působí na stěny trubice:

$$dW_{in} = \int_{S_i} (P - P_0) dl_i \cdot ds_i = (P - P_0) \int_{S_i} dl_i \cdot ds_i = P' dV \quad (4.4)$$

P	absolutní tlak uvnitř svalu
P_0	vnější tlak okolo svalu (atmosférický tlak)
P'	relativní tlak $P' = (P - P_0)$
S_i	celkový vnitřní povrch
ds_i	diferenciál vnitřního povrchu
dl_i	posunutí vnitřního povrchu
dV	změna objemu

Vyjádření výstupní práce W_{out} konané při zkrácení svalu:

$$dW_{out} = -F dL \quad (4.5)$$

F	axiální tažná síla [N]
dL	axiální posun

Ze zákona zachování energie vyplývá (za předpokladu zanedbání ztrát):

$$dW_{out} = dW_{in} \quad (4.6)$$

Po dosazení rovnic 4.4 a 4.5 z předešlých vztahů a následnou úpravou získáme:

$$-F dL = P' dV \quad (4.7)$$

$$F = -P' \frac{dV}{dL} \quad (4.8)$$

Jak již bylo řečeno dříve, model zanedbává změnu tvaru okrajů svalu při kontrakci, předpokládáme dokonalý válcový tvar svalu i během kontrakce. L a D lze vyjádřit jako funkci θ s konstantními parametry n a b:

$$L = b \cdot \cos\theta \quad (4.9)$$

$$D = \frac{b \cdot \sin\theta}{n \cdot \pi} \quad (4.10)$$

Objem svalu po dosazení předchozích rovnic 4.9 a 4.10:

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 L = \frac{b^3}{4\pi n^2} \sin^2\theta \cos\theta \quad (4.11)$$

Nyní lze rovnici výpočtu síly vyjádřit jako:

$$F = -P' \frac{dV}{dL} = -P' \frac{dV/d\theta}{dL/d\theta} = \frac{P'b^2}{4\pi n^2} (3\cos^2\theta - 1) \quad (4.12)$$

Předchozí vzorec lze upravit na rovnici 4.13, což je vzorec, který je použit pro výpočet v mém simulovaném modelu:

$$F = P' \frac{(3L^2 - b^2)}{4\pi n^2} \quad (4.13)$$

4.4 Princip tlakové nádoby

Pneumatický sval si můžeme také představit jako tlakovou láhev, jediné co k tomu potřebujeme je rovnice ideálního plynu:

$$pV = nRT \quad (4.14)$$

p tlak plynu

V objem plynu

n látkové množství

T termodynamická teplota

R molární plynová konstanta

Látkové množství lze vyjádřit jako:

$$n = \frac{m}{M} \rightarrow m = \frac{n}{M} \quad (4.15)$$

m skutečná hmotnost plynu

M molární hmotnost plynu

Hmotnost m je možné vyjádřit jako hmotnostní průtok Q_m za čas:

$$m = \int Q_m dt \quad (4.16)$$

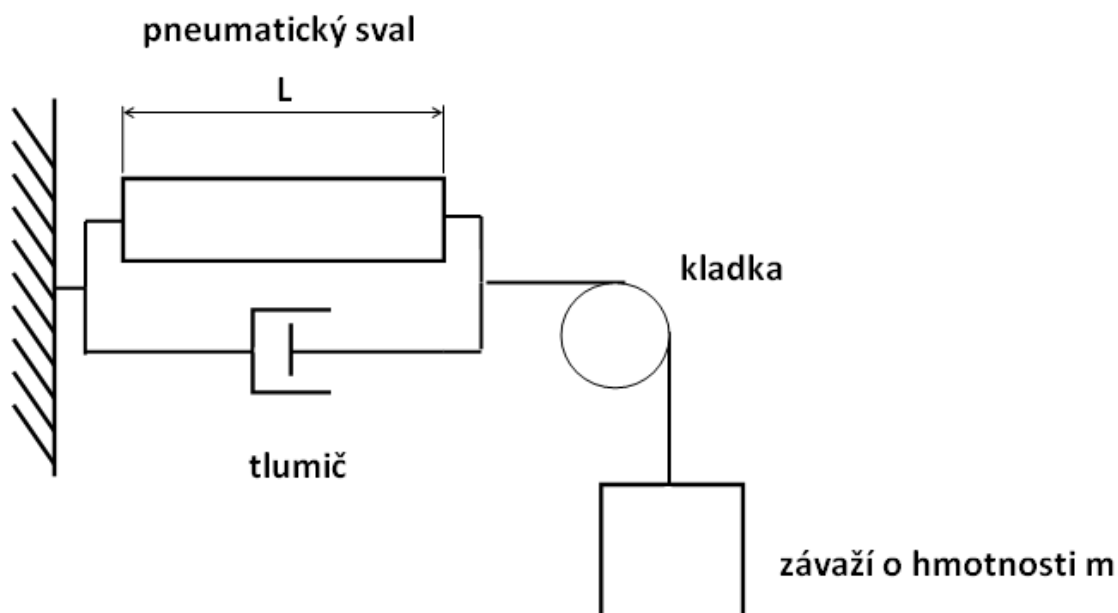
Substitucí látkového množství n a následnou úpravou rovnice 4.14 získáme rovnici pro výpočet tlaku plynu uvnitř nádoby:

$$p = m \frac{RT}{MV} = \int Q_m dt \cdot \frac{RT}{MV} \quad (4.17)$$

5 NAVRŽENÝ MODEL PNEUMATICKÉHO SVALU

5.1 Návrh simulovaného modelu

Úkolem této práce bylo porovnat navržený model pneumatického svalu s reálným modelem pneumatického svalu. Navržený model pneumatického svalu se sestává ze samotného pneumatického svalu, kladky, závaží, se kterým bude pneumatický sval pohybovat, a tlumiče. Tento dodaný tlumič simuluje tlumení reálného svalu. Pokud by tento navržený model neobsahoval tlumení, pak by nikdy nedošlo k ustálení svalu v jedné poloze, model by neustále kmital. Použitý vzorec pro výpočet tahné síly svalu žádným způsobem neřeší tlumení svalu, proto tam bylo nutné tlumič dodat uměle.



Obrázek 4 Simulovaný model pneumatického svalu

5.2 Parametry simulovaného modelu

Při simulaci modelu je použito velké množství parametrů, jejich celý výčet uveden v Příloha 1: Výpis m-file – konstanty nutné pro běh simulace.

Zde jsou uvedeny pouze základní parametry simulovaného modelu dle Obrázek 3 a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Parametry pneumatického svalu odpovídají reálným parametrům, které byly změřeny. Počáteční (klidová) délka pneumatického svalu $L_0 = 0.3\text{m}$, počáteční (klidová) šířka pneumatického svalu $D_0 = 2.02\text{cm}$, počáteční (klidový) úhel mezi vlákny a osou svalu $\theta = 32.4155^\circ$, délka jednoho vlákna $b = 0.3554\text{m}$, počet obtočení vlákna $n = 3$. Hmotnost závaží nacházejícího se v modelu se skládá z hmotnosti skutečného závaží zavěšeného na svalu a z hmotnosti ocelového lanka, které spojuje skutečné závaží a sval. Hmotnost závaží v modelu je $m = 7.051\text{kg}$. Tlumič má jediný parametr, tlumící konstantu B . Pro zjednodušení je kladka uvažována jako nehmotná.

5.3 Zjištění diferenciální rovnice pro hmotný bod závaží

Pro zjištění diferenciální rovnice simulovaného modelu musíme znát jednotlivé dílčí síly působící v modelu. Jmenovitě to jsou gravitační síla F_G působící na závaží, tlumící síla tlumiče F_B a síla vyvolávaná pneumatickým svalem F_S .

$$F_B = B \cdot \dot{y} \quad (5.1)$$

$$F_G = m \cdot g \quad (5.2)$$

$$F_S = P' \frac{(3L^2 - b^2)}{4\pi b^2} \quad (5.3)$$

Sestavení pohybové rovnice pro hmotný bod:

$$F = F_G - F_B - F_S \quad (5.4)$$

$$m\ddot{y} = mg - B\dot{y} - P' \frac{(3L^2 - b^2)}{4\pi n^2} \quad (5.5)$$

Protože zanedbáváme kladku, můžeme si představit, že je závaží připevněno přímo ke svalu, a proto parametr L můžeme vyjádřit jako y :

$$y = L \quad (5.6)$$

Po substituci parametru L a úpravě předešlé rovnice 5.6 získáváme diferenciální rovnici vyjadřující zrychlení hmotného bodu závaží ve tvaru:

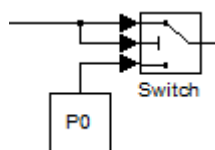
$$\ddot{y} = g - \frac{B}{m}\dot{y} - \frac{P'}{4m\pi n^2}(3y^2 - b^2) \quad (5.7)$$

Namodelováním rovnice 5.7 v programu Matlab-Simulink získáme následující modelační schéma vyobrazené v Příloha 2: Namodelované schéma rovnice 5.7.

Vstupem systému je hmotnostní tok Q_m , který se integruje na hmotnost plynu vstupujícího do bloku **Vypocet tlaku**, jehož výstupem je tlak uvnitř svalu. Druhým vstupem do bloku **Vypocet tlaku** je okamžitý objem svalu. Vstupem do bloku **Vypocet zrychlení zavazi** jsou tlak, rychlost závaží a délka pneumatického svalu. Výstupem tohoto bloku je zrychlení hmotného bodu závaží. Výstupem celého systému je délka pneumatického svalu označená jako y .

5.4 Omezení maximální délky svalu

Reálné pneumatické svaly mají omezenou maximální klidovou délku. Pokud bychom nechali systém počítat pouze se vzorcem 4.13, pneumatický sval by se roztahoval do nereálných délek. Jakmile začne relativní tlak svalu klesat a blížit se nule, vlivem singularity ve vzorci by se sval začal roztahovat do nereálné délky. Proto je nutné omezit roztažitelnost svalu. Toto omezení je zabezpečeno sestavou bloků uvedených na Obrázek 5.



Obrázek 5 Omezení maximální délky svalu

Konstanta P_0 určuje minimální možný tlak vzduchu ve svaly, aby nedošlo k roztažení svalu nad klidovou délku L_0 .

6 PRACOVISTĚ S REÁLNÁM PNEUMATICKÝM SVALEM

Pracoviště s pneumatickým svaem se sestává z více prvků, zde je jejich výčet:

- Tlakový snímač Motorola MPX5700
- Pneumatický ventil MATRIX MK 754.8E102
- Plastové potrubí
- Centrální rozvod stlačeného vzduchu
- Inkrementální enkodér Baumer electric CH-8501 Frauenfeld
- Měřicí karta Humusoft MF614
- Pneumatický sval se závažím

Abychom mohli začít porovnávat reálný a namodelovaný pneumatický sval, je nejdříve potřeba nastavit převodní charakteristiku tlakového čidla, převodní charakteristiku enkodéru připevněného ke kladce a provést linearizaci ventilu, který řídí průtok vzduchu dovnitř a ven z pneumatického svalu.

6.1 Převodní charakteristika tlakového čidla

Pro měření tlaku se v pneumatické soustavě nachází tlakové čidlo Motorola MPX5700. Převodní charakteristika tohoto čidla je dána tímto vztahem, podle [10]:

$$V_{out} = V_S(0.0012858P + 0.04) \pm Error \quad (6.1)$$

$$V_S = 5V_{dc} \quad (6.2)$$

Prvním krokem je změření napětí V_{out} , které změříme při nulovém relativním tlaku. Tím získáme hodnotu offsetu, o který je posunutá převodní charakteristika mimo nulu. Tato hodnota byla změřena na:

$$V_0 = 0.2V \quad (6.3)$$

Dosazením hodnoty V_0 a V_S do rovnice 6.1 získáme velikost složky **Error**.

$$0.2 = 5(0.0012858 \cdot 0 + 0.04) \pm Error \quad (6.4)$$

$$Error = 0 \quad (6.5)$$

Se znalostí hodnoty **Error** lze vyjádřit tlak z rovnice 6.1 a tím získáme převodní charakteristiku tlakového čidla.

$$P = \frac{\frac{V_{out} \pm Error}{V_S} - 0.04}{0.0012858} \quad (6.6)$$

$$P = \frac{\frac{V_{out}}{5} - 0.04}{0.0012858} \quad (6.7)$$

6.2 Převodní charakteristika enkodéru

Převodní charakteristiku inkrementální enkodér Baumer electric CH-8501 Frauenfeld potřebujeme, abychom byli schopní zaznamenávat změny délky pneumatického svalu. Jedno otočení enkodéru připojeného ke kladce odpovídá 2000 pulsům. Měřicí karta ale vyhodnocuje signál kvadraturním čítačem, což znamená že čítá nástupné i sestupné hrany obou signálů z enkodéru. Proto budeme počítat jako by měl enkodér 8000 pulsů na otáčku. Průměr kladky byl změřen na 50 mm. Z těchto hodnot jednoduše zjistíme vzorec pro převodní charakteristiku enkodéru.

$$O = \pi d \quad (6.8)$$

$$O = 157.08 \quad (6.9)$$

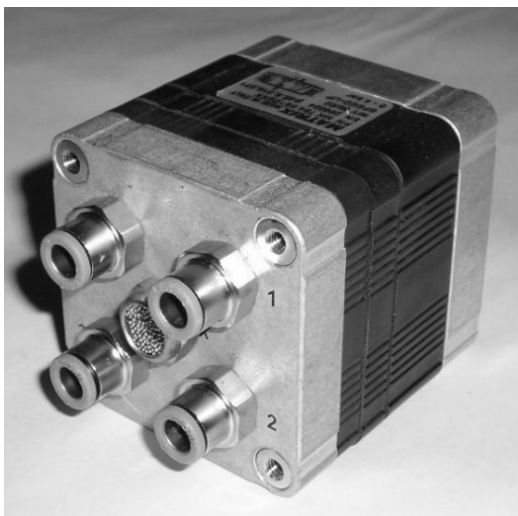
$$y = \frac{O}{\text{počet pulsů na otáčku}} \cdot x \quad (6.10)$$

$$y = \frac{157.08}{8000} \cdot x = 0.0196x \quad (6.11)$$

V rovnicích 6.10 a 6.11 y značí hodnotu v milimetrech, o kterou se změní délka svalu při jednom pulsu enkodéru, x značí příchozí pulsy z enkodéru.

6.3 Pneumatický ventil MATRIX

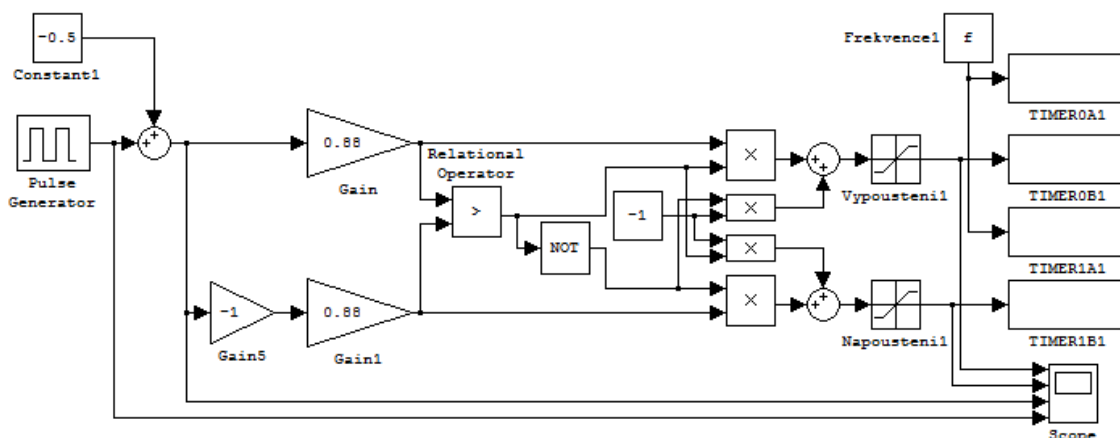
V reálném modelu s pneumatickým svalem se nachází rychlý solenoidní ventil MATRIX MK 754.8E102. Tento ventil je ovládaný pulsně šířkovou modulací a je typu ON/OFF. Ventil je otevřený, zavřený, nebo se právě otevírá, nebo se právě zavírá, to vše v závislosti na pulsu.



Obrázek 6 Pneumatický ventil MATRIX MK 754.8E102

6.3.1 Řízení ventilu

Ventil je řízen obdélníkovým signálem, nazývaným jako řídicí signál hmotnostního toku. Frekvence řídicího signálu určuje, s jakou frekvencí se bude sval stahovat a roztahovat. Amplituda řídicího signálu řídí střidu spínací frekvence ventilu. Hodnota amplitudy řídicího signálu se pohybuje v mezích $\langle -1; 1 \rangle$, hodnota 1 znamená, že střída spínací frekvence ventilu je 100%, naopak hodnota -1 znamená, že střída spínací frekvence ventilu je 0%.

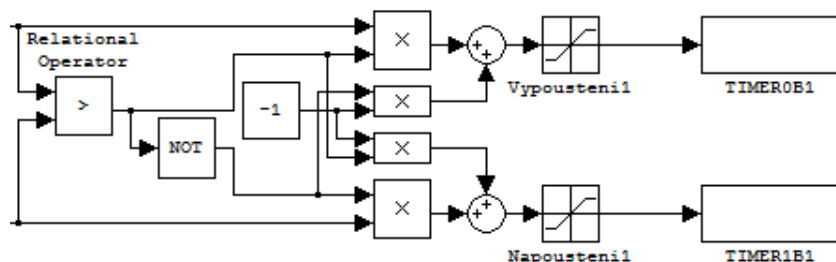


Obrázek 7 Řízení pneumatického ventilu MATRIX

6.3.2 Řízení napouštění a vypouštění

V Obrázek 7 jsou vidět bloky TIMERxxx. Bloky TIMER0A1 a TIMER1A1 slouží k určení spínací frekvence ventilu, tato frekvence je nastavena na $f = 100$ Hz. Signál vstupující do bloku TIMER0B1 určuje, s jakou střídou bude pracovat spínací frekvence ventilu pro vypouštění svalu. Naopak signál vstupující do bloku TIMER1B1 určuje, s jakou střídou bude pracovat spínací frekvence ventilu pro napouštění svalu.

Na Obrázek 8 je vidět mechanismus zajišťující, aby nedocházelo k částečnému vypouštění svalu při napouštění svalu a opačně. Pokud chci sval napouštět, amplituda signálu vstupujícího do bloku TIMER1B1 musí být větší než amplituda signálu vstupujícího do bloku TIMER0B1. Aby nedocházelo k částečnému vypouštění, při napouštění je signál pro blok TIMER1B1 nastaven do -1.



Obrázek 8 Řízení napouštění a vypouštění pneumatického ventilu MATRIX7

6.3.3 Linearizace ventilu

Aby se tento ventil uzavřel nebo otevřel, potřebuje na to určitý čas, velikost tohoto času je $T_{0z} = 600\mu s$. Pokud by při napouštění svalu nastala situace, že by byla střída spínací frekvence ventilu příliš malá (doba, po kterou by měl být ventil otevřen, by byla menší než T_{0z}), nestihl by se ventil otevřít a sval by se tedy nenapouštěl. Opačně by mohla nastat situace, že by byla střída spínací frekvence příliš velká a ventil by se nestihl zavřít. Tyto dvě pásma necitlivosti je potřeba linearizovat pro správnou funkci ventilu.

Přepočet amplitudy řídicího signálu na dobu, po kterou je ventil otevřen:

Amplituda řídicího signálu A nabývá hodnot $\langle -1; 1 \rangle$, přepočet amplitudy A na střidu spínací frekvence ventilu B bude vypadat takto:

$$B = 100 \left(\frac{A}{2} + 0.5 \right) \quad (6.12)$$

Přepočet střidy spínací frekvence ventilu B na dobu C , po kterou bude ventil otevřen při jedné periodě T :

$$C = T \frac{B}{100} \quad (6.13)$$

$$C = T \frac{100 \left(\frac{A}{2} + 0.5 \right)}{100} \quad (6.14)$$

$$C = \frac{1}{f} \left(\frac{A}{2} + 0.5 \right) \quad (6.15)$$

Vyjádřením amplitudy A z rovnice 6.15 získáme přepočet času C na amplitudu A

$$A = 2(Cf - 0.5) \quad (6.16)$$

Abychom linearizovali ventil, musíme zajistit, aby hodnota času C byla v mezích $\langle 0 + T_{0z}; T - T_{0z} \rangle \rightarrow \langle 0.6ms; 9.4ms \rangle$. Pomocí rovnice 6.16 můžeme tyto hodnoty přepočítat na mezní hodnoty amplitudy A , kterých může nabývat. Přepočítané hodnoty jsou $\langle -0.88; 0.88 \rangle$. Amplituda řídicího signálu A nabývá hodnot $\langle -1; 1 \rangle$. Vynásobením této amplitudy konstantou 0.88 zajistíme, že amplituda nebude dosahovat pásem necitlivosti a bude se tedy pohybovat pouze v rozsahu $\langle -0.88; 0.88 \rangle$, to vše pro nastavenou frekvenci $f = 100Hz$.

7 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ NAVRŽENÉHO MODELU PNEUMATICKÉHO SVALU

Reálný pneumatický sval a navržený model pneumatického svalu byly porovnávány podle průběhu okamžité délky pneumatického svalu. Okamžitá délka reálného pneumatického svalu byla měřena pro různé periody řídicího signálu hmotnostního toku, při konstantní amplitudě 1. Periody řídicího signálu byly zvoleny tři: $T=1s$, $T=2s$ a $T=3s$. Příloha 3: Průběhy řídicích signálů obsahuje průběhy všech tří řídicích signálů.

7.1 Identifikace parametrů pro porovnání absolutních tlaků reálného a navrženého modelu pneumatického svalu

Prvním krokem při porovnávání bylo přiblížení průběhů absolutních tlaků reálného svalu a navrženého modelu svalu. V navrženém modelu svalu je absolutní tlak počítán z hmotnostního toku Q_m a realizační konstanty `Pocatecni` `hmotnost`. Aby absolutní tlaky sobě maximálně odpovídaly, byla použita Matlabovská funkce `Fminsearch`. Tato funkce byla použita tak, aby vypočítala hodnotu hmotnostního toku Q_m a realizační konstanty `Pocatecni` `hmotnost`, a zároveň dosáhla co nejmenší odchylky absolutního tlaku reálného svalu a absolutního tlaku modelu svalu. Odchylka byla počítána metodou nejmenších čtverců.

Realizační konstanta `Pocatecni` `hmotnost` byla použita, protože průběh absolutního tlaku reálného svalu nikdy nedosahoval nulové hodnoty. Průběh bez této realizační konstanty, tím že dosahoval nulové hodnoty, se příliš lišil od průběhu absolutního tlaku reálného svalu. Proto tedy použití této konstanty více přiblížilo porovnávané průběhy.

7.1.1 Použití funkce **Fminsearch** při identifikaci parametrů pro porovnání absolutních tlaků

Funkce **identifikace_tlakuD**:

```
function f=identifikace_tlakuD(Tlak)
warning off;
a0=[-0.2 1];
fminsearch(@idntif_tlakD,a0,optimset('Display','iter','MaxFunEvals'
    100000,'MaxIter',100000,'TolFun',1e-3,'TolX',1e-3),Tlak)
```

Funkce **idntif_tlakD**:

```
function f=idntif_tlakD(B,Tlak)
load_system('m10_modelD');
set_param('m10_modelD/Akcni_velicina(hmotnostni
prutok)','Amplitude',mat2str(B(1)));
set_param('m10_modelD/Pocatecni_hmotnost','Value',mat2str(B(2)));
sim('m10_modelD',14.99);
f=(y2-Tlak)'*(y2-Tlak);
```

Vysvětlení parametrů funkce **Fminsearch**:

Display, iter – při každé iteraci se vypíše řádek s informacemi o počtu iterací, velikosti hodnoty kvadratické chyby charakteristik a procedura která byla provedena během výpočtu

MaxFunEvals, MaxIter – omezení, které zajišťuje zastavení počítání, pokud funkce nemůže nalézt řešení

TolFun, TolX – pokud se dosáhne požadované přesnosti, funkce přestane počítat

a0 – parametr, kterým se předává počáteční odhad, odkud má funkce začít počítat

Tlak – parametr předávající charakteristiku, se kterou funkce porovnává vypočítané hodnoty

@idntif_tlakD – takto je funkci **Fminsearch** předána další funkce, která počítá charakteristiku absolutního tlaku modelovaného svalu

Princip výpočtu je tedy následující. Pomocí funkce **idntif_tlakD** je nejdříve vypočítána charakteristika absolutního tlaku modelovaného svalu (označena jako **y2**). Tato charakteristika je počítána na základě hodnot předaných parametrem **a0**. Posledním krokem je vypočítání kvadratické chyby charakteristik **y2** a **Tlak**. Funkce **Fminsearch** provádí výpočty, dokud nedosáhne požadované přesnosti, nebo dokud nenarazí na stanovená omezení. Výsledkem jsou hodnoty hmotnostní tok **Q_m** a **Pocatecni_hmotnost**, pro které kvadratická chyba dosahuje nejmenší velikosti.

7.1.2 Vypočítané hodnoty hmotnostního toku Q_m a Pocatecni hmotnost

Tabulka s vypočítanými hodnotami:

	T = 1s	T = 2s	T = 3s
Hmotnostní tok Q_m [kg·s ⁻¹]	-0.6147	-0.4751	-0.3211
Pocatecni hmotnost [kg]	0.1172	0.0246	0.0117

V této tabulce jsou vypočítané hodnoty, pro které je nejmenší kvadratická chyba mezi průběhy absolutních tlaků. Hodnota hmotnostního toku představuje amplitudu, se kterou je generován signál hmotnostního toku. Po integraci hmotnostního toku na hmotnost je připočítána hodnota offsetu Pocatecni hmotnost.

7.2 Výpočet tlumicí konstanty B

Všechny potřebné parametry pro běh modelu svalu byly změřeny na základě reálného svalu. Tlumič byl do modelu svalu přidán uměle, proto jeho tlumicí konstanta nemohla být změřena. Díky funkci `Fminsearch` lze tlumicí konstantu B dohledat na základě co nejmenší odchylky průběhů délek reálného svalu a modelu svalu. Odchylka byla opět počítána metodou nejmenších čtverců.

7.2.1 Použití funkce `Fminsearch` při výpočtu tlumení

Funkce `identifikace_tlumení`:

```
function f=identifikace_tlumeni(Delka)
warning off;
a0 = 50;
fminsearch(@idntif_tlumeni,a0,optimset('Display','iter','MaxFunEvals',
100000,'MaxIter',100000,'TolFun',1e-3,'TolX',1e-3),Delka)
```

Funkce `idntif_tlumeni`:

```
function f=idntif_tlumeni(B,Delka)
load_system('m10_modelD');
set_param('m10_modelD/Vypocet zrychleni zavazi','Expression',
['g-u(1)*(3*(u(2))^2-b*b)' '-(u(3)/m)*(' mat2str(abs(B(1))) ')]);
sim('m10_modelD',14.99);
f=(y-Delka)'*(y-Delka);
```

Při výpočtu tlumení je princip stejný jako u porovnávání absolutního tlaku. Parametr `a0` nyní předává pouze jednu hodnotu (počáteční odhad tlumicí konstanty) a výsledkem je také jedna hodnota, tlumicí konstanta, při kterém je nejmenší odchylka charakteristik délky skutečného svalu a délky modelovaného svalu.

7.2.2 Vypočítané hodnoty tlumicí konstanty B

Tabulka s vypočítanými hodnotami:

	T = 1s	T = 2s	T = 3s
Tlumicí konstanta B[kg·s ⁻¹]	72.6886	44.5575	-5.3693

Funkce `Fminsearch` hledá pouze minimum funkce `identif_tlumeni` pro různé hodnoty tlumicí konstanty. Proto se může stát, že funkce `Fminsearch` vypočítá minimum funkce pro zápornou hodnotu tlumicí konstanty, což je fyzikálně nemožné. Tento jev byl ošetřen tak, že tlumicí konstanta je do modelu dosazována vždy v absolutní hodnotě, jak je vidět ve funkci `identif_tlumeni`.

Tlumení pneumatického svalu je frekvenčně závislé, jak je i vidět na vypočítaných hodnotách. Značně se liší pro různé frekvence řídicího signálu.

8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo porovnat navržený model pneumatického svalu s reálným pneumatickým svalem. K tomu byla využita laboratoř s potřebným vybavením k práci s pneumatickou soustavou.

První část této práce je zaměřena na seznámení se s pneumatickým svalem a na popis matematicko-fyzikálního modelu svalu. V této části jsou uvedeny charakteristické vlastnosti a parametry pneumatického svalu, odvození rovnice tažné síly pneumatického svalu v závislosti na tlaku uvnitř svalu a okamžité délce svalu. V závěru této části je uveden pohled na pneumatický sval jako na tlakovou nádobu s proměnným objemem.

Další část je zaměřena na vytvoření modelu pneumatického svalu v prostředí Matlab-Simulink. Tato část obsahuje odvození potřebné diferenciální rovnice pro model svalu, parametry reálného pneumatického svalu dosazené do vytvořeného modelu a vysvětlení proč model musí obsahovat omezení délky svalu.

V kapitole Reálný model pneumatického svalu jsou vypsány a popsány jednotlivé prvky, které obsahuje pracoviště s pneumatickým svalem. Jmenovitě to je tlakové čidlo Motorola MPX5700 a jeho převodní charakteristika, inkrementální enkodér Baumer electric CH-8501 Frauenfeld a jeho převodní charakteristika. U pneumatického ventilu MATRIX MK 754.8E102 je popsáno, jakým způsobem je řízen pomocí obdélníkového signálu, a jaký vliv mají parametry signálu na otevření a uzavření ventilu. Poslední částí této kapitoly je linearizace ventilu.

Při porovnávání reálného pneumatického svalu a navrženého modelu svalu byl vytvořen program, využívající funkce `Fminsearch`, pomocí kterého byly nejdříve identifikovány konstanty navrženého modelu, které byly nutné pro porovnání absolutních tlaků obou svalů. Výsledkem identifikace byly hodnoty hmotnostního toku Q_m a hodnoty `Pocatecni_hmotnost`, tyto výsledky jsou prezentovány v kapitole 7.1.2. Grafy charakteristik absolutního tlaku reálného svalu a navrženého modelu svalu jsou v Příloha 4: Porovnání absolutních tlaků.

Při periodě řídicího signálu hmotnostního toku $T = 1s$ se průběhy téměř shodují. Rozdíl v první periodě je způsoben konstantou `Pocatecni_hmotnost`. Reálný sval se postupně napouští, zatímco `Pocatecni_hmotnost` působí už v čase $t = 0s$.

U druhého grafu, $T = 2s$, se objevuje mnohem větší odchylka obou průběhů. Důvod této odchylky je, že tlumení skutečného pneumatického svalu je mnohem komplexnější než lineární tlumič, který je použit v navrženém modelu. Pro odstranění této nepřesnosti by lineární tlumič v navrženém modelu musel být nahrazen komplexnějším řešením tlumení pneumatického svalu, což je ale nad rámec této bakalářské práce.

U posledního grafu, $T = 3s$, se projevuje nepřesnost způsobená lineárním tlumičem ještě více.

Při výpočtu tlumicí konstanty B byl pro každý průběh řídicího signálu použit vytvořený program používající funkci `Fminsearch`. Z výsledků prezentovaných v kapitole 7.2.2 je vidět že se jednotlivé hodnoty velmi liší pro různé frekvence řídicího signálu. Grafy délek skutečného pneumatického svalu a navrženého modelu pneumatického svalu pro všechny tři průběhy řídicího signálu jsou vidět v Příloha 5: Porovnání okamžité délky svalů.

Vertikální posunutí, které je pozorovatelné u všech tří charakteristik, je způsobené protažením pneumatického svalu před započítáním měření. Pokud je sval v klidu, bez tlaku a je na něm zavěšeno závaží, dojde k protažení svalu. Navržený model svalu s tímto protažením nepočítá a začíná pracovat ze svojí klidové délky.

S rostoucí periodou řídicího signálu se začne více a více projevovat nedostatek modelu svalu způsobený lineárním tlumičem. Záchvěvy viditelné při vyšších periodách řídicího signálu by byly pravděpodobně odstraněny, pokud by byl lineární tlumič nahrazen komplexnějším řešením tlumení svalu.

Pneumatický sval je při práci ovlivňován velkým množstvím jevů a dal by se považovat téměř za stochastický systém. Pro nižší frekvence řídicího signálu navržený model svalu odpovídá reálnému svalu. Průběhy absolutního tlaku i délky svalu si odpovídají. Při vyšších frekvencích se začne uplatňovat nedostatek způsobený použitím jednoduchého lineárního tlumiče. Aby navržený model svalu více odpovídal reálnému svalu, bylo by potřeba model svalu rozšířit o komplexnější tlumení svalu a protažení svalu vlivem závaží před začátkem práce svalu.

9 LITERATURA

- [1] SUZAMORI KANDA. <http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp> [online]. [cit. 2013 03 10]. Dostupný na WWW: <http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp/kouseigaku/research/2009/system/spreader/01.jpg>
- [2] TONDU, B., LOPEZ, P. Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators. *IEEE Control Systems Magazine*, 2000, vol. 20, no. 2, p. 15 – 38.
- [3] CHOU, C.P., HANNAFORD, B. Static and Dynamic Characteristic of McKibben Pneumatic Artificial Muscles. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1994. vol. 1, p. 281-286.
- [4] KOPEČNÝ, Lukáš. *McKibbenův pneumatický sval: Modelování a použití v hmatovém rozhraní* [online]. Brno, 2009 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20176. Doktorská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce prof. ing. František Šolc, csc.
- [5] DVOŘÁK, Zdeněk. *Řízení pneumatického svalu*. Brno, 2003. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ing. Petr Vaňous.
- [6] CHLEBOUN, Václav. *Robotický kloub s pneumatickými svaly*. Brno, 2004. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.
- [7] BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace I: Základy regulace lineárních systémů - spojitě a diskrétní*. Brno. Skripta. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [8] ŠOLC, František, Pavel VÁCLAVEK a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace II: Analýza a řízení nelineárních systémů* [online]. Brno, 2011 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://brr2.vaclavek.net/soubory-ke-sta%C5%BEen%C3%AD/Regulace_a_rizeni_II.pdf?attredirects=0&d=1
- [9] ŠOLC, František a Pavel VÁCLAVEK. *Modelování a simulace* [online]. Brno, 2009 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://bmod.vaclavek.net/soubory-ke-sta%C5%BEen%C3%AD/bmod.pdf?attredirects=0&d=1>
- [10] MOTOROLA. *Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated: MPX5700 SERIES* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MPX5700.pdf>
- [11] BAUMER. *Incremental encoders: Micro series - shaft o5 mm, Resolution 10...2048 pulses* [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://baumer.amirada.net/pfinder_motion/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Drehgeber/PI_BDK_EN.pdf
- [12] MICHNA, Jakub. *Řízení pneumatických svalů*. Brno, 2012. Semestrální práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

10 SEZNAM PŘÍLOH

10.1 Příloha 1: Výpis m-file – konstanty nutné pro běh simulace

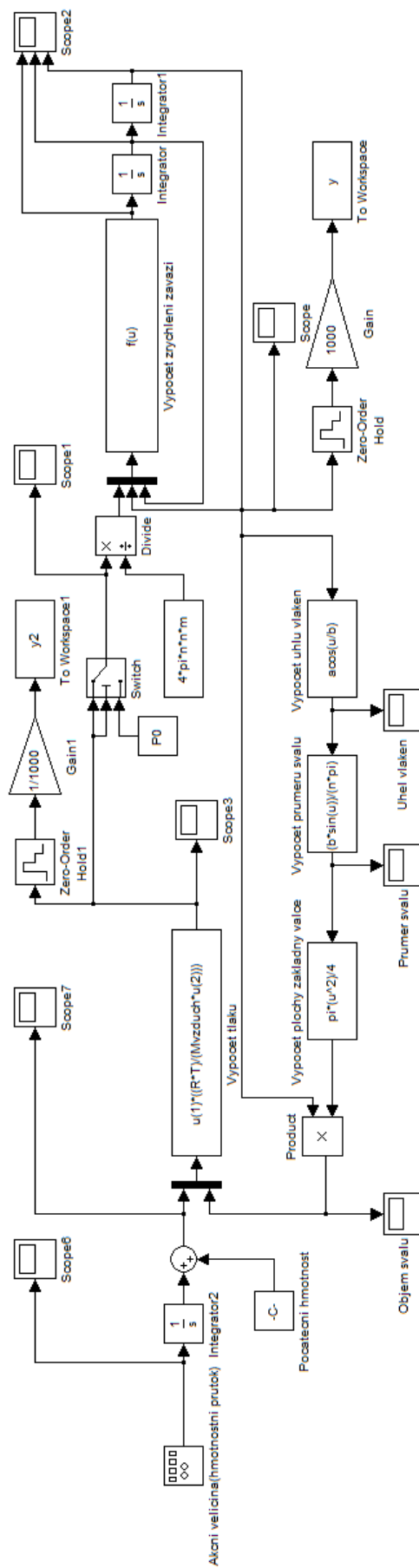
```
%% Fyzikální konstanty
NA = 6.02214179E23;      % Avogadrova konstanta
k = 1.3806488E-23;      % Boltzmannova konstanta
R = NA*k;                % Molární plynová konstanta
Mvzduch = 28.96;         % Molární hmotnost vzduchu
g = 9.81;                % Gravitační zrychlení
K = 273.15;              % Kelvin

%% Parametry pneumatického svalu a závaží
n = 3;                   % Počet obtočení vlákna [-]
b = 0.355373;            % Délka vlákna [m]
O = degtorad(32.4153);   % Úhel vláken [°]
L0 = 0.3;                % Počáteční (klidová) délka svalu [m]
D0 = 0.0635/pi;          % Počáteční (klidový) průměr svalu [m]
V0 = L0*pi*(D0^2)/4;     % Počáteční (klidový) objem svalu [m^3]
Lmin = 0.25;              % Délka svalu při maximální kontrakci [m]

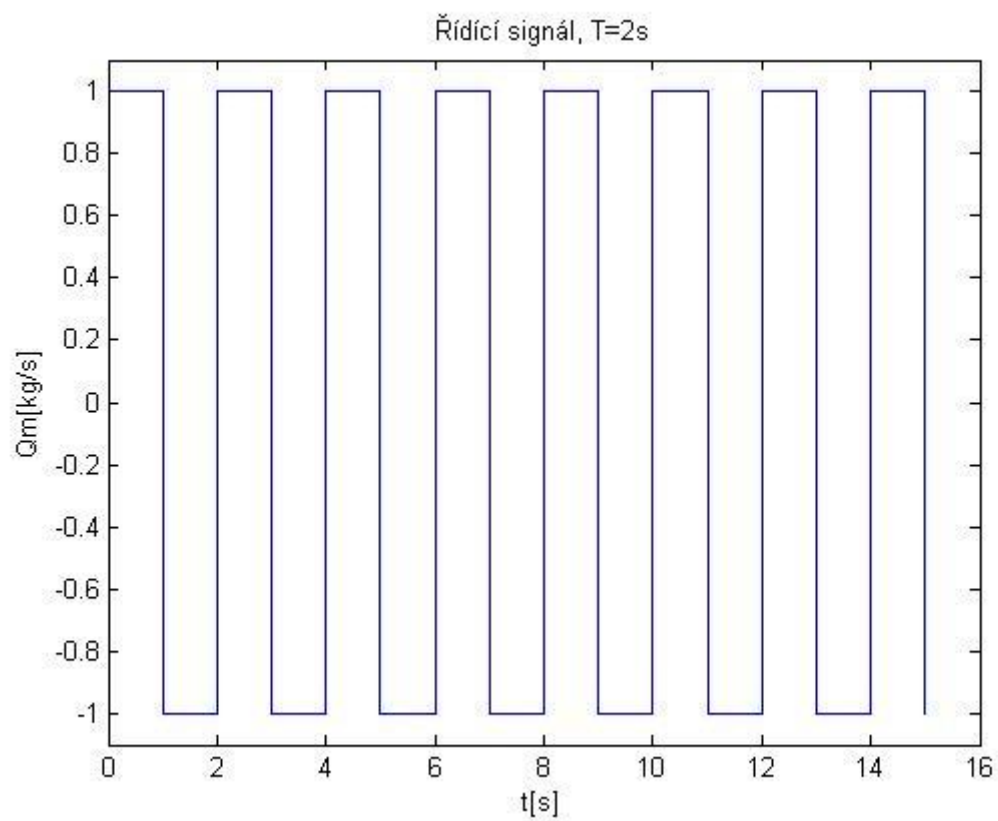
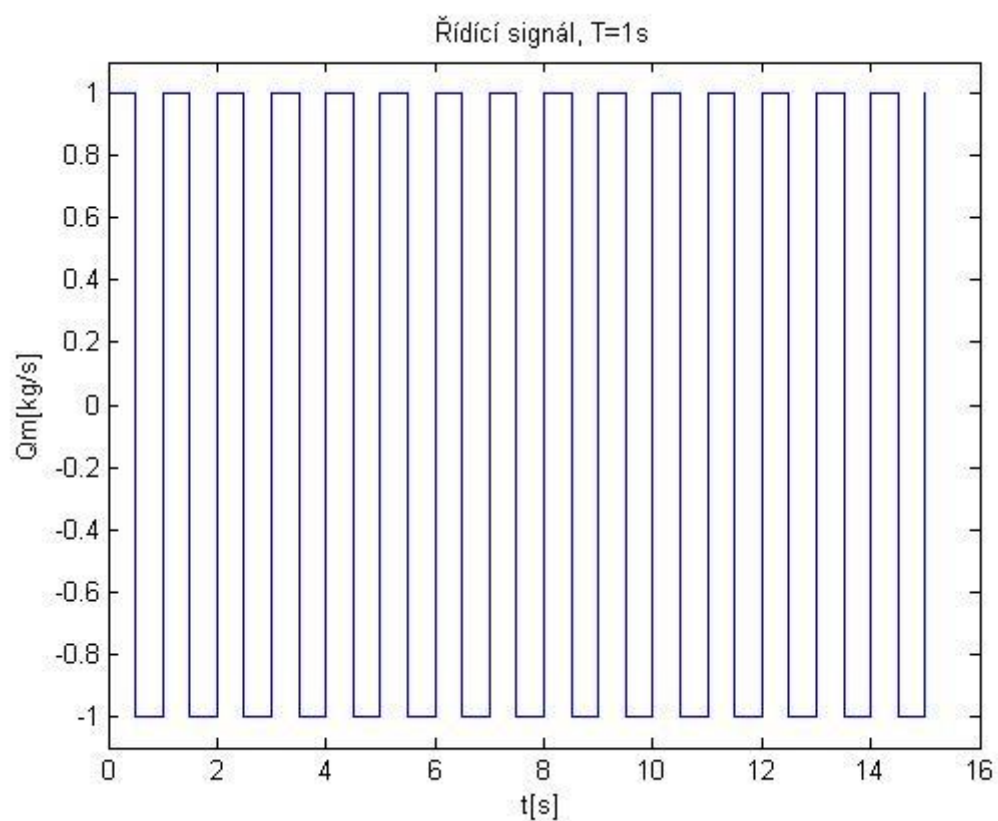
m = 7.051;               % Hmotnost závaží [kg]
z = 0;                   % Délka závěsu [m]
T = 25 + K;              % Teplota vzduchu [K]
Qm = 1;                  % Hmotnostní průtok vzduchu [kg/s]
B = 75;                  % Tlumič

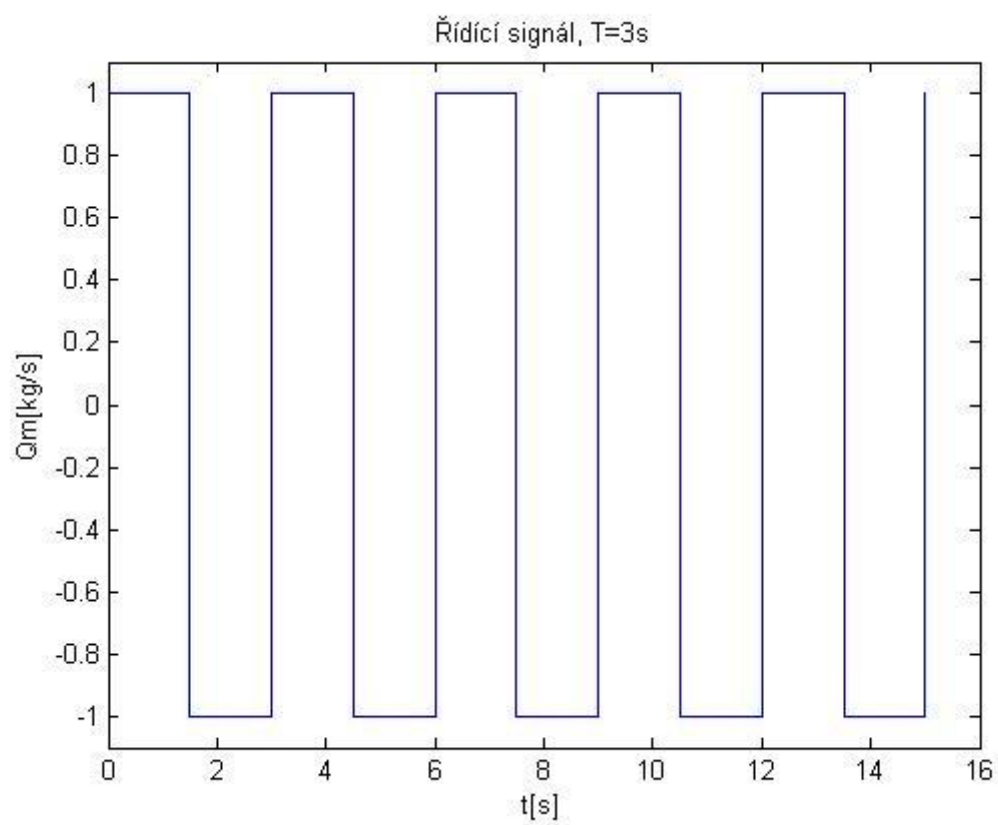
P0 = (m*g)*(4*pi*n*n)/(3*L0*L0-b*b);      % Minimální tlak pro L0 [Pa]
```

10.2 Příloha 2: Namodelované schéma rovnice 5.7

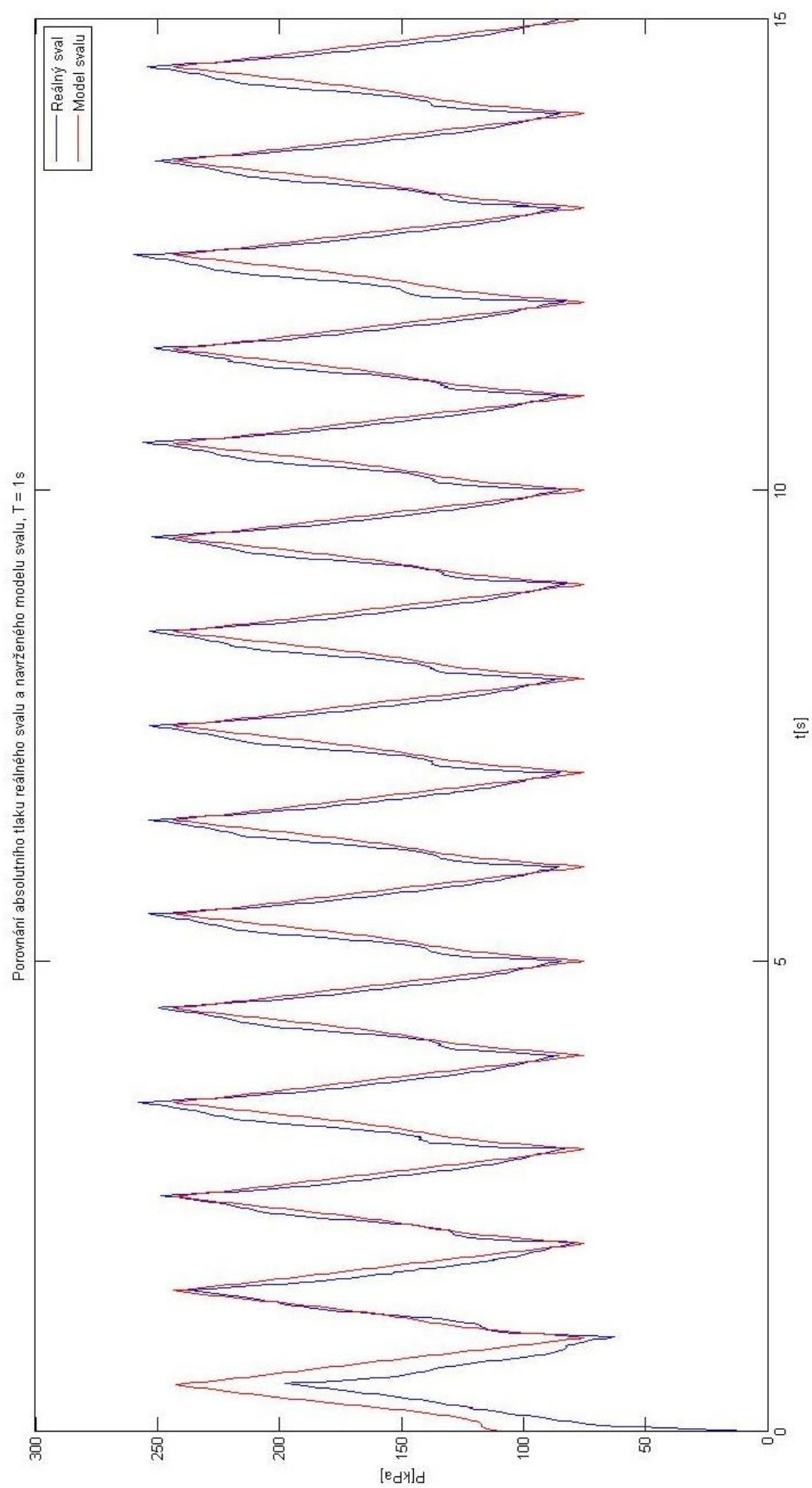


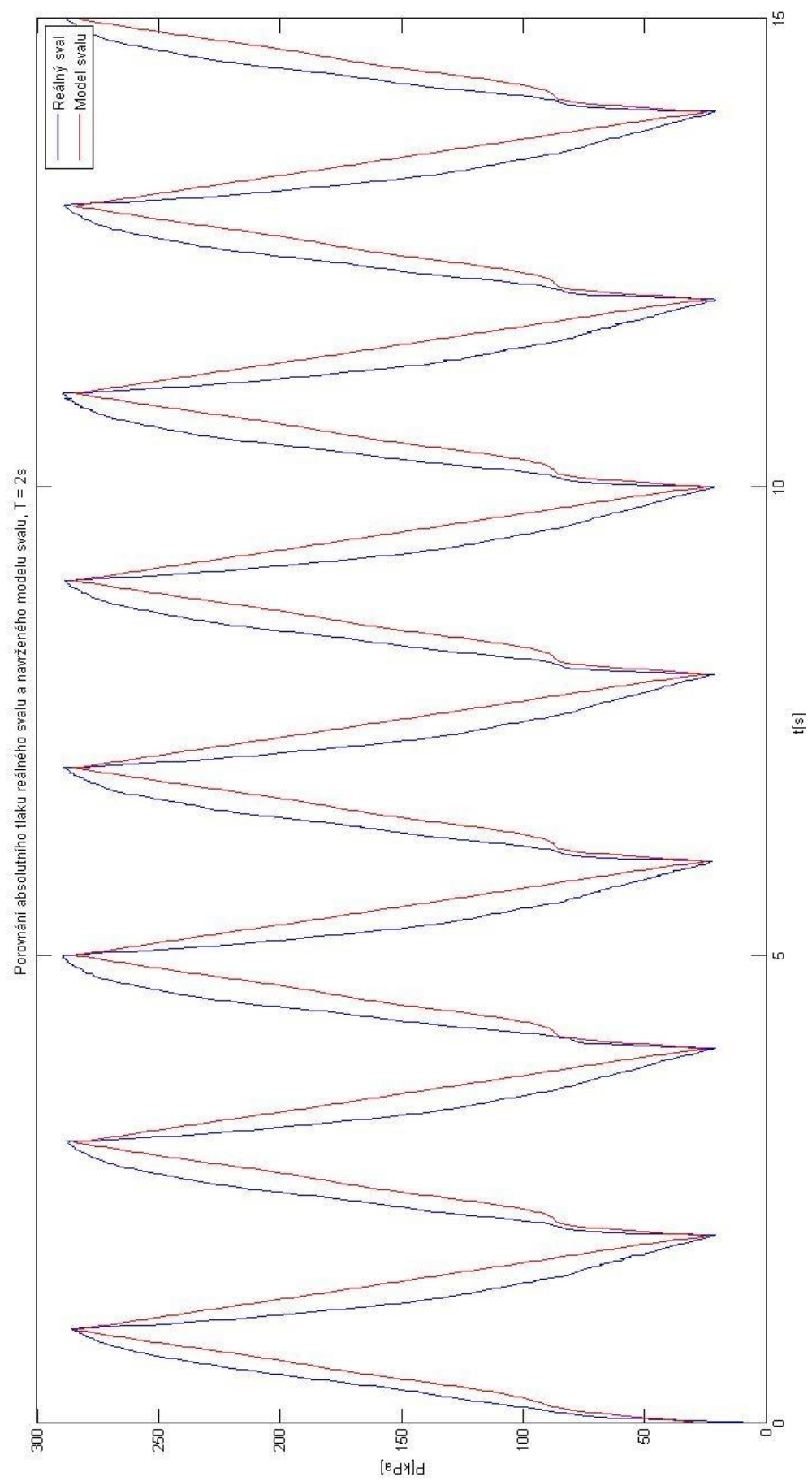
10.3 Příloha 3: Průběhy řídicích signálů hmotnostního toku

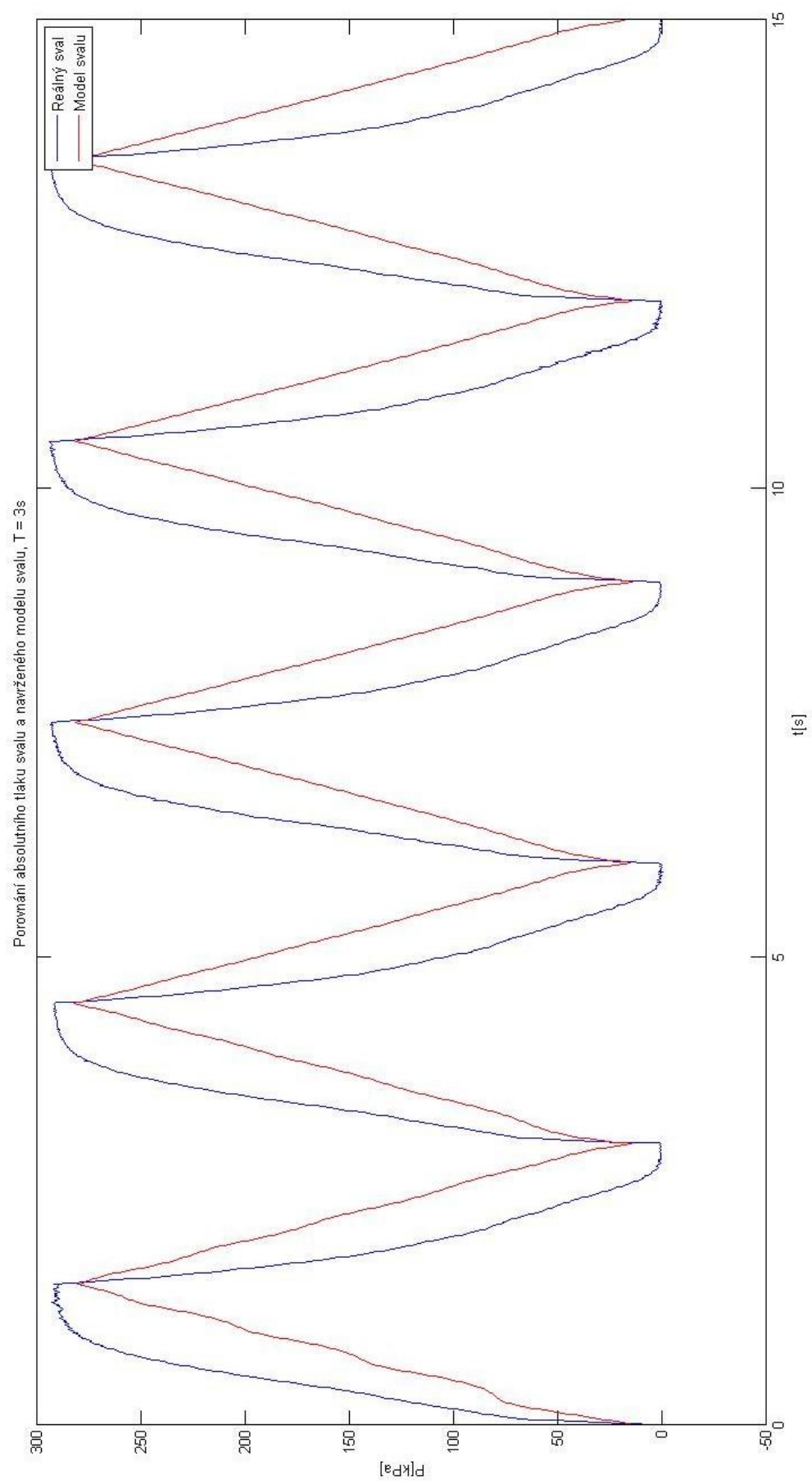




10.4 Příloha 4: Porovnání absolutních tlaků







10.5 Příloha 5: Porovnání okamžité délky svalů

