# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

# Fakulta strojní

Katedra aplikované kybernetiky



# VLASTNOSTI UMĚLÝCH PNEUMATICKÝCH SVALŮ

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Obor:

Výrobní systémy a procesy

Doktorand: Školitel: Ing. Zdeněk Varga prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.

Liberec, květen 2013

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

# Fakulta strojní

Katedra aplikované kybernetiky



# VLASTNOSTI UMĚLÝCH PNEUMATICKÝCH SVALŮ

# AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Obor:

Výrobní systémy a procesy

Doktorand: Školitel: Ing. Zdeněk Varga prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.

Liberec, květen 2013

## Anotace

Tato práce je zaměřena na zkoumání vlastností umělých pneumatických svalů. Pro zkoumání pneumatických svalů byl vybrán fluidní sval FESTO, který díky průmyslovému provedení umožňuje snadnou a reálnou aplikaci, což je jednou z hlavních výhod tohoto svalu. V práci byl zmapován vnější a vnitřní objem umělého pneumatického svalu. Byl proveden návrh prostorové funkce, pomocí které lze vypočítat vnitřní objem pneumatického svalu v závislosti na délce svalu a vnitřním přetlaku. Vytvořením této prostorové funkce byla snížena chyba při výpočtu vnitřního objemu svalu z původních 47 % na pouhých 5 %. V práci byl prostudován materiál, ze kterého je vyrobena stěna pneumatického svalu. U materiálu byla prostudována jak geometrie a rozměry vyztužujících nití, tak míra energie, která je utlumena ve svalu při dynamickém zatěžování. Pomocí dosažených výsledků z oblasti popisu vnitřního objemu svalu byl doplněn popis termodynamického děje, který probíhá uvnitř pneumatického svalu v průběhu zaplňování.

V práci byl proveden důkladný rozbor vlastností pneumatického ventilu, který byl použit při výrobě zkušebního standu, kterým je řízen průběh tlaku uvnitř pneumatického svalu. Při analýze ventilu byly prozkoumány průtokové vlastnosti ventilu, tuhosti pružin, vlastnosti membrány z pryže a v neposlední řadě i dynamické vlastnosti ventilu. Pomocí prostudování dynamických vlastností ventilu byly objasněny nejasnosti ve výzkumu spolupracovníků z Finské univerzity Aälto, kteří ventil VPPM použili pro tlumení kmitů. Rozbor dynamických vlastností ukázal, že zvolený ventil VPPM není vhodný pro řízení rychlých dynamických dějů nad 10 [Hz].

**Klíčová slova:** Umělý pneumatický sval, pneumatický ventil, matematický model, vlastnosti pryže

## Annotation

This work is focused on the exploration of the properties of artificial pneumatical muscles. For the research of a pneumatical muscles was chosen the fluidic muscle from FESTO company, which can be easily applied due to industrial execution what is the one of the main advantages of this muscle. In this work was mapped the outer and the inner volume of an artificial pneumatic muscle. It was made a concept of the space function, internal volume of the muscle depends on the length of the muscle and the internal gauge pressure can be counted by this function. By the formulation of this space fiction was the bug during counting an internal volume of the muscle reduce from original 47 % on only to 5 %. In this work was read up the material form which is made a pneumatic muscle wall. In the material was read up as geometry and dimensions of the reinforced threads and then the value of energy which is dissipated in the muscle during the dynamical loading. Via attained results from the area of the description of the internal volume of muscle were fill in into the thermodynamical process which run inside the pneumatical muscle during the filling.

In the work were done complete study of properties a pneumatical valve which were used for the producing testing stand, by which is lead course a pressure inside the pneumatic muscle. During analysis were read up flow characteristic of the valve, stiffness of spring, properties of the rubber membrane and not least round event dynamical properties of the valve. Via read up dynamical properties of the valve were clarify uncertainties in the research of lads from Finland University Aälto, which used valve VPPM for the damping a vibration. Study of the dynamical properties showed, then the selected valve VPPM isn't suitable for leading fast dynamical process up 10 [Hz].

Keywords: Artificial Pneumatical Muscle, Pneumatical Valve, Mathematical Model,

Properties of Rubber

Úvodem bych chtěl poděkovat svému školiteli, panu prof. Ing. Miroslavu Olehlovi, CSc. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování mé disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat M.Sc. Petrimu Keski-Honkolovi z Aälto University Finland (Engineering design and Production department) za cennou pomoc při měření v laboratořích hydrodynamické zkušebny, bez které by tato práce nemohla být dokončena.

A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodičům za podporu, bez které bych tuto práci nedokončil.

Ing. Zdeněk Varga

10. května 2012

# Obsah

An	lotace	2		
An	Annotation			
Ob	osah	5		
1	Úvod	6		
2	Fluidní sval FESTO	7		
	2.1 Matematické modely pneumatického svalu McKibbenova typu	7		
	2.1.1 Statický model	7		
	2.1.2 Rozšířený statický model	9		
	2.1.3 Měření objemu svalu potápěním svalu do vody	11		
	2.1.4 Měření objemu svalu pomocí image processing	11		
	2.1.5 Porovnání naměřených dat vnějšího objemu s teorií	12		
	2.1.6 Měření objemu svalu s uvažováním stěny svalu	13		
	2.2 Analýza materiálu stěny svalu	14		
	2.2.1 Určení mechanických vlastností tahovou zkouškou	15		
	2.2.2 Metodika vyhodnocování naměřených dat	15		
	2.2.3 Analýza naměřených dat z dynamické zkoušky pryže	16		
	2.3 Hystereze při zatěžování	17		
3	Termodynamika pneumatických svalů	19		
4	Popis průtoku plynu proporcionálním ventilem	20		
	4.1 Určení pneumatické vodivosti a kritického tlakového poměru zvyšováním tlaku na vstupu	20		
	4.2 Určení pneumatické vodivosti a kritického tlakového poměru zaplňováním prostoru o konstantním objemu	21		
	4.3 Odvětrávání prostoru o konstantním objemu	23		
	4.4 Dynamické vlastnosti ventilu	24		
5	Tvorba matematického modelu ventilu	27		
6	Závěr	30		
Se	znam literatury	32		
Pu	Publikační činnost			
Pro	Profesní životopis			

# 1 Úvod

U pneumatických svalů je provozním médiem stlačený vzduch, ovšem jak uvádí i výrobce, lze jako pracovní médium užít i jiná média, jako je například stlačený olej. Pneumatické svaly se stlačeným olejem namísto stlačeného vzduchu lze využít k tlumení, což jsem publikoval se svými kolegy z Finské Univerzity Aälto v článku Magnetorheological fluidic muscle as semi-active damper.

Řešením popisu chování pneumatických svalů a návrhu jejich regulace se zabývalo již několik autorů. Přičemž při tvorbě matematického modelu, kterým autoři popisují výslednou axiální sílu v pneumatickém svalu, vycházeli z idealizované délky vlákna kordu. S totožným způsobem odvození objemu a výsledné axiální síly se též můžeme setkat i v literatuře zabývající se pneumatickými hadicemi. Rozsáhlejší matematické modely pneumatických svalů obsahují členy, kterými jsou popsány, jak deformace idealizovaného vlákna kordu, z kterého jsou vypočteny objemy a energie spjaté se stlačeným vzduchem, tak i mechanické vlastnosti stěny svalu.

Cílem této práce bylo prozkoumat vlastnosti umělých pneumatických svalů a tím rozšířit vědomosti o pneumatických svalech a pomocí výsledků zpřesnit stávající matematické modely popisující umělé pneumatické svaly. Matematickým modelům umělého pneumatického svalu je věnována jedna samostatná kapitola, která je doplněna nejrozličnějšími analýzami. Jednou z rozsáhlých analýz je analýza objemu svalu. Tato oblast byla do současnosti téměř neprozkoumána a veškeří autoři vycházeli z množství zjednodušujících předpokladů, se kterými se můžeme setkat i u hadicových pružin. Při zkoumání vlastností pneumatického svalu byla věnována velká pozornost materiálu pneumatického svalu, protože vlastnosti kompozitního materiálu, z kterého je sval vyroben, je druhým zásadním faktorem, který vstupuje do matematických modelů svalů.

Pro důkladné prozkoumání vlastností umělého pneumatického svalu byl na Katedře aplikované kybernetiky TUL vyroben speciální stand, na kterém byly zkoumány vlastnosti pneumatického svalu jako celku. Byla zkoumána měnící se teplota pneumatického svalu a hystereze svalu při zatěžování konstantní zátěží. Při výrobě standu pro zkoumání vlastností pneumatických svalů byl použit proporcionální redukční tlakový ventil typu VPPM od firmy FESTO. Uvedenému ventilu byla v této práci věnována velká pozornost, jelikož právě vlastnosti ventilu zásadním způsobem ovlivňují výsledné chování pneumatického svalu. Vlastnosti a možnosti regulace svalu pomocí uvedeného proporcionálního redukčního tlakového ventilu jsou v závěru porovnány s výzkumem, který byl proveden Finskou Univerzitou Aälto a pomocí výsledků této práce bylo objasněno chování ventilu VPPM a byly tím objasněny možnosti jeho použití.

## 1 Fluidní sval FESTO

Fluidní sval od firmy FESTO je pneumatický sval McKibbenova typu, u kterého jsou vyztužující vlákna kordu umístěna ve dvou na sobě nezávislých rovinách. Tyto dvě nezávislé roviny kordu jsou zality ve vrstvě pryže, která zajišťuje těsnost svalu. Takto vyrobená stěna svalu je na obou koncích zakončena kovovými koncovkami umožňujícími přivedení stlačeného média, uchycení pneumatického svalu ke konstrukci a zátěži, viz Obr. 1.

Při plnění fluidního svalu stlačeným médiem dochází, stejně jako u McKibbenova svalu, k rozšiřování hadice v důsledku radiální síly, která se transformuje na axiální sílu, což způsobuje kontrakci svalu.



D průměr svalu (druhá položka v typovém označení svalu),  $L_0$  původní délka svalu (třetí položka v typovém označení svalu),  $\theta$  úhel sklonu vláken vůči ose svalu

#### Obr. 1. Fluidní sval McKibbenova typu od firmy FESTO

Díky průmyslovému provedení fluidního svalu od firmy FESTO lze pneumatický sval navrhnout pro reálnou aplikaci, což je jednou z výhod tohoto svalu. Další výhodou je možnost porovnání výsledků z měření s jinými výzkumnými pracovišti i s přihlédnutím k faktu, že mechanické vlastnosti každého svalu budou nepatrně odlišné díky jiné šarži materiálu nití a pryže. Z uvedených důvodů byl tento typ svalu použit pro tuto práci.

#### 2.1 Matematické modely pneumatického svalu McKibbenova typu

V dostupné literatuře [27], [47] se můžeme setkat s odvození základních matematických modelů pomocí geometrie vláken vyztužujícího kordu pneumatického svalu. Obdobný princip použil prof. Krejčíř [34] pro odvození rovnic popisujících pneumatické pružiny. V následujícím textu je uveden statický a rozšířený statický model pneumatického svalu.

#### 2.1.1 Statický model

S odvozením rovnic pro popis statického modelu pneumatického svalu vycházejícího ze zákona zachování energie se lze setkat v literatuře [27]. Přičemž vstupní práce  $W_{in}$  je vykonána při zaplňování vnitřního prostoru svalu. Velikost této práce je rovna:

$$W_{in} = \iint_{l_i s_i} (P - P_o) dl_i \cdot ds_i = (P - P_o) \iint_{l_i s_i} dl_i \cdot ds_i , \qquad (1)$$

Součástí odvození statického modelu pneumatického svalu je schematický nákres viz Obr. 2, znázorňující idealizované délky a počtu otáček vlákna kordu.



Obr. 2. Schématický nákres svalu a grafické znázornění idealizované délky vlákna kornu a počtu otáček.

Při odvozování idealizovaného objemu svalu byla vyjádřena celková klidová délka svalu *L* pomocí délky vlákna kordu  $b_{thr}$  a úhlu sklonu vláken  $\theta$  vůči ose svalu. Následně bylo z pravoúhlého trojúhelníku, viz Obr. 2 vpravo, možné vyjádřit průměr svalu *D* jako funkci  $\theta$  s konstantními parametry  $n_{thr}$  a  $b_{thr}$  [27], [52], viz vztahy (2) a (3),

$$L = b_{thr} \,\cos\theta,\tag{2}$$

$$D = \frac{b_{thr} \sin \theta}{n_{thr} \pi} \tag{3}$$

Kde  $b_{thr}$  je délka nitě,  $\theta$  je úhel mezi osou svalu a nitěmi,  $n_{thr}$  je počet závitů vlákna.

Poté, co byla celková délka a průměr pneumatického svalu vyjádřena jako funkce  $\theta$ , bylo možné sestrojit rovnici popisující objem svalu:

$$V = \frac{1}{4}\pi D^2 L \tag{4}$$

Ovšem uvedená rovnice (4) určuje objem svalu, který neuvažuje tloušťku stěny  $t_k$ . Po zavedení konstanty tloušťky stěny do rovnice (4) bylo možné vyjádřit vnitřní objem svalu, který je roven:

$$V = \frac{1}{4}\pi (D - 2t_k)^2 L.$$
 (5)

Axiální síla F jako funkce relativního tlaku P' a úhlu sklonu vláken  $\theta$  pro případ, kdy nebyla uvažována tloušťka stěny svalu  $t_k$  je vyjádřena rovnicí (6).

$$F = -P' \frac{dV}{dL} = -P' \frac{dV/d\theta}{dL/d\theta} = \frac{P' b_{thr}^2 (2\cos^2\theta - \sin^2\theta)}{4\pi n_{thr}^2}$$

$$= \frac{P' b_{thr}^2 (3\cos^2\theta - 1)}{4\pi n_{thr}^2}.$$
(6)

Axiální sílů v pneumatickém svalu bylo možné také vypočítat pro případ, kdy byla tloušťka stěny svalu uvažována a výsledná axiální síla je rovna:

$$F = -P \cdot \frac{dV}{dL} = \frac{\pi D_0^2 P'}{4} (3 \cos^2 \theta - 1) + \pi P' \left[ D_0 t_k \left( 2 \sin \theta - \frac{1}{\sin \theta} \right) - t_k^2 \right]$$
(7)

kde  $D_0$  je průměr svalu pro  $\theta$  rovno 90° [27],

$$D_0 = b_{thr} / n_{thr} \pi. \tag{8}$$

#### 2.1.2 Rozšířený statický model

Statický model pneumatického svalu nepostihuje veškeré faktory, které ovlivňují výslednou osovou síly ve svalu. Z toho důvodu bylo zapotřebí odvozenou osovou sílu doplnit o členy, které zachytí vliv tření mezi vlákny kordu svalu a změnu deformační práce, která je vynaložena na deformaci stěny svalu při jejím zkrácení. Rovnice osové síly ve svalu (9) umožňuje pomocí druhého a třetího členu na pravé straně popis zmíněných vlivů vstupujících do celkové osové síly s uvažováním energie deformující stěnu svalu a tření mezi vlákny, přičemž osová síla ve svalu je:

$$F = P \frac{dV}{dL} - V_b \frac{dW}{dL} - F_f, \qquad (9)$$

kde *P* je tlak uvnitř pneumatického svalu, dV je změna vnitřního objemu svalu, dL je změna délky svalu,  $V_b$  je objem stěny pneumatického svalu, dW je změna hustoty deformační práce,  $F_f$  je člen popisující vliv tření mezi nitěmi kordu a pryží[30].

Rovnice (9) byla užita z dostupné literatury [30],[31] jako model pneumatického svalu, který postihuje ztráty energie ve stěně svalu. Při vyslovení předpokladu, že stěnu pneumatického svalu lze popsat jako isotropní nestlačitelný materiál, tak lze pro vyjádření hustoty deformační energie použít Mooney-Rivlinův model vyjadřující deformační energii ve tvaru:

$$W = \sum_{i=0,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$$
(10)

Nestlačitelný izotropní materiál lze popsat pouze pomocí dvou parametrů  $C_{10}$  a  $C_{01}$  přičemž  $C_{00} = 0$ . Konstanty materiálu  $C_{10}$  a  $C_{01}$  lze stanovit pouze pomocí měření.

V rovnici (9) ještě vystupuje třetí člen na pravé straně, který popisuje tření mezi nitěmi kordu a pryžovou matricí. Popisem tření u pneumatických svalů se zabýval autor rovnice (9) ve své práci [30], ve které uvedl parametry tření pro sval odpovídající vnitřním průměrem svalu použitého v této práci. Přičemž tření ve svalu bylo popsáno rovnicí

$$F_f = m_{fr}P + b_{fr} \tag{11}$$

kde parametry dané rovnice jsou rovny  $m_{fr} = 28[N/bar]$  a  $b_{fr} = -38,2[N]$  a P je vnitřní přetlak ve svalu<sup>1</sup>.

Přes veškerou snahu nebylo možné provést měření, kterým by byly stanoveny materiálové konstanty  $C_{10}$  a  $C_{01}$ . Bylo by možné převzít konstanty  $C_{10}$  a  $C_{01}$  z literatury [30] ( $C_{10} = 118,4$  [kPa],  $C_{01} = 105,7$  [kPa]) a stejně tak parametry popisující tření  $m_{fr}$  a  $b_{fr}$ . Znamenalo by to ovšem zanesení velké chyby do samotné práce a vyslovení několika nepravdivých předpokladů. Z uvedených důvodů nebylo možné do hloubky prozkoumat vliv materiálu na výslednou osovou sílu v pneumatickém svalu FESTO. Další výzkum pneumatických svalů se proto může zaměřit na měření těchto konstant a prozkoumat vliv těchto parametrů na výslednou osovou sílu ve svalu.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Klute, G. K.: Actuators for Biorobotic Systems. University of Washington. 1999, Washington D.C, Doctoral Tesies, str. 21.

### 2.1.3 Měření objemu svalu potápěním svalu do vody

První z metod, užitých pro určení vnějšího objemu pneumatického fluidního svalu FESTO, bylo potopení svalu do kapaliny a následné měření změny objemu při měnícím se přetlaku uvnitř svalu.



1 ab. 1. Data z mereni objemu svalu	Tab.	1.	Data	z	měření	ob	ojemu	svalu	ı.
-------------------------------------	------	----	------	---	--------	----	-------	-------	----

	Změna obje	mu [dm <sup>3</sup> ]	
Tlak [bar]	MAS-20-605N-AA-	DMSP-20-150N-	
	MC-O-ER-BG	RM-RM	
0	0	0	
0,5	0,0181	0,0050	
1,0	0,0630	0,0130	
1,5	0,1250	0,0270	
2,0	0,1686	0,0370	
2,5	0,2029	0,0430	
3,0	0,2200	0,0465	
3,5	0,2285	0,0485	
4,0	0,2370	0,0505	

Obr. 3. Schéma měření objemu svalu potápěním do vody

### 2.1.4 Měření objemu svalu pomocí image processing

Měření objemu svalu pomocí image processing následovalo po analýze objemu svalu potápěním do vody a analýze objemu v prostředí programu AutoCad. Měřením objemu svalu pomocí image processing poskytuje informace jak o tvaru, tak o objemu svalu při změně vnitřního přetlaku.

Určení tvaru a následně objemu svalu se sestávalo ze čtyř kroků. Nejprve musel být zjištěn obrys celého svalu, poté bylo zjištěno měřítko fotografie.



Graf 1. Měření objemu svalu MAS-20-605N-AA-MC-O-ER-BG analýzou image processing v Matlab®

Následně byla vytvořena vazba rozměrů svalu a pixelů fotografie a nakonec byl vypočten objem svalu. Při výpočtu objemu svalu musel být vysloven předpoklad uvažování ideálního rotačního tělesa, ovšem objem byl určován z obou obrysů svalu, čímž byla minimalizována chyba. Dalšího snížení chyby při stanovování objemu by mohlo být dosaženo užitím dvou fotoaparátů, namísto jednoho a tím minimalizování vlivu prostorového efektu.

Výpočet objemu byl proveden tak, že pro jednotlivé vzdálenosti mezi pixely po délce svalu byly vypočteny komolé jehlany (v případě, že docházelo ke změně průměru jiným způsobem vytvořený program v Matlab<sup>®</sup> uvažoval válce) a jejich sečtením byl určen objem svalu. V programu nebylo zapomenuto ani na vliv prostorového efektu a deformace tím způsobené byly dopočteny. Tato metoda se ukázala jako velmi produktivní a poskytla jak určení vnějšího objemu svalu, tak i grafické vyjádření tvaru svalu v grafu. Jedno z provedených měření je znázorněno v Grafu 1.

#### 2.1.5 Porovnání naměřených dat vnějšího objemu s teorií

Porovnání metod měření objemu fluidního svalu FESTO s teoretickými vztahy pro výpočet objemu, bylo provedeno pomocí následujících grafů, viz Graf 2. V horní části uvedeného grafu jsou vidět závislosti změny objemu svalu na tlaku, a to pro dva typy svalu, vlevo pro sval MAS-20-605N-AA-MC-O-ER-BG a vpravo pro fluidní sval DMSP-20-150N-RM-RM.



Graf 2. Porovnání matematického modelu objemu svalu s měřením vlevo MAS-20-605N-AA-MC-O-ER-BG a vpravo DMSP-20-150N-RM-RM

Pro porovnání naměřených hodnot objemu byl vysloven předpoklad, že metoda potápění svalu do vody je nejpřesnější. Rozdíl mezi naměřenými daty pomocí potápění svalu do vody od teorie je až 40% pro MAS-20-605N-AA-MC-O-ER-BG a až 47% pro sval DMSP-20-150N-RM-RM. Data z měření objemu pomocí analýzy obrazu v AutoCadu nebyla začleněna do tohoto porovnání, jelikož uvedená metoda měření byla užita pouze pro typ svalu MAS-20-605N-AA-MC-O-ER-BG a nebylo by možné provést komplexní srovnání uvedených metod. Metoda určování objemu pomocí image processing poskytla výsledky, které pro sval DMSP-20-150N-RM-RM kopírují tvar naměřených hodnot z měření objemu potápěním svalu do vody. U delšího svalu MAS-20-605N-AA-MC-O-ER-BG jsou výsledky víceméně neprůkazné. Pro zpřesnění výsledků by bylo vhodné měření opakovat, jelikož pomocí jednoho měření nelze vyslovit jednoznačný závěr.

### 2.1.6 Měření objemu svalu s uvažováním stěny svalu

Teoretické výpočty osové síly ve svalu uvažují vnitřní objem, v kterém dochází k termodynamickým pochodům při zaplňování vnitřního objemu svalu stlačeným plynem, proto proběhlo měření objemu svalu s uvažováním stěny svalu. V hydrodynamické laboratoři Finské Univerzity Aälto proběhlo změření vnitřního objemu svalu.

Vnitřní objem svalu byl změřen na fluidním pneumatickém svalu FESTO DMSP-20-150N-RM-RM, stejná metoda měření byla použita i pro sval MAS-20-605N-AA-MC-O-ER-BG. Při měření byl sval uchycen v měřícím přípravku, viz Obr. 4.



l pneumatický sval, 2 senzor vzdálenosti, 3 skleněná trubice s ryskou, 4 tlakoměr, 5 zdroj stlačeného vzduchu **Obr. 4. Schéma měření vnitřního objemu svalu** 

Měření vnitřního objemu svalu bylo provedeno v souladu s grafem vyjadřujícím vztah osové síly a polohy, který je součástí dokumentace výrobku. Při měření tedy byl nejprve sval ve své celkové délce natlakován na požadovaný tlak a poté byla při tomto

konstantním tlaku měněna jeho celková délka pomocí šroubového mechanismu do okamžiku, kdy ve svalu vymizela osová síla od vnitřního přetlaku. Vizualizací naměřených dat vznikl Graf 3. pomocí kterého, byla sestrojena rovnice (12) vyjadřující vnitřní objem svalu jako funkce vnitřního tlaku a zkrácení.



Graf 3. Závislost změny vnitřního objemu svalu na zkrácení pro daný vnitřní přetlak, sval FESTO DMSP-20-150N-RM-RM

$$V(x,p) = a_1(p)x^2 + b_1(p)x + c_1(p).$$
(12)

#### 2.2 Analýza materiálu stěny svalu

V rozšířeném statickém modelu pneumatického svalu vyjadřující osovou sílu v pneumatickém svalu vystupuje druhý a třetí člen vyjadřující změnu deformační práce, která je vynaložena na deformaci stěny svalu při jejím zkrácení a vliv tření mezi vlákny kordu svalu. Pro maximální ověření platnosti uvedených vztahů byla provedena měření mechanických vlastností materiálu stěny svalu.

Prvním krokem analýzy kompozitního materiálu stěny svalu byla výroba vzorků ze stěny svalu. Pro výrobu vzorků bylo použito dosavadních výsledků z měření úhlu sklonu  $\theta$  a mezinárodní normy ČSN ISO 37, která výrobu a rozměry pryžových vzorků předepisuje.



Obr. 5. Orientace vzorků z pryže vzhledem ke kordu pneumatického fluidního svalu

Vzorky z pryže byly vyrobeny v třech provedeních popisujících hlavní směry orientace pryžového kordu, viz Obr. 5., a na konci vzorků byly přilepeny kousky velmi poddajné pryže viz Obr. 6. Tyto malé kousky pryže napomohly ke zvýšení upínací síly potřebné při měření a zabránily tím vyklouznutí vzorku pryže z upínací čelisti měřícího stroje.



Obr. 6. Tvar vzorku pryže vyrobený dle normy ČSN ISO 37, typ vzorku 3

#### 2.2.1 Určení mechanických vlastností tahovou zkouškou

Tahová zkouška byla provedena k zjištění základních mechanických vlastností pryže a tím nalezení optimálních podmínek pro dynamické zatěžování, na všech třech typech připravených vzorků pryže. Výsledky měření tahové zkoušky jsou znázorněny v Grafu 4, na kterém je vidět, že u každého vzorku pryže dochází k makroskopickému ději. Poté, co je dosažena mez kluzu, dojde k výraznému poklesu osové síly a makroskopický proces, při kterém dochází k oddělování vyztužujících vláken od pryžové matrice svalu se začne projevovat.



Graf 4. Tahová zkouška pro vzorky pryže s rozdílnou orientací vystužujících vláken

#### 2.2.2 Metodika vyhodnocování naměřených dat

Pro analýzu naměřených dat z dynamického zatěžování vzorků byly použity články [11] a [12], v nichž je uvedena rovnice (13), kterou byla v těchto článcích vypočtena disipovaná energie  $W_d$  způsobená tlumící sílou  $F_d$  jako křivkový integrál:

$$W_d = \oint F_d \, dx. \tag{13}$$

V této práci byla disipovaná energie určena výpočtem z plochy hysterezní smyčky naměřených dat pomocí rovnice (14). Naměřená hysterezní křivka je mnohoúhelníkem s vrcholy  $A_1 = [x_1, y_1], A_2 = [x_2, y_2], ..., A_n = [x_n, y_n]$  Obsah tohoto mnohoúhelníka je disipovaná energie  $W_d$ , kterou lze vypočíst jako [43]:

$$W_d = \frac{1}{2} \left| \frac{x_1 \cdot x_2}{y_1 \cdot y_2} \right| + \frac{x_2 \cdot x_3}{y_2 \cdot y_3} + \dots + \frac{x_n \cdot x_1}{y_n \cdot y_n} \right|.$$
 (14)

### 2.2.3 Analýza naměřených dat z dynamické zkoušky pryže

Při opakované dynamické zkoušce vzorků typu **A**, došlo ke kompletnímu zničení vzorku pryže, a to díky oddělení vyztužujících vláken od pryžové matrice svalu. Po nevydařených pokusech provést měření byl vyroben speciální vzorek pryže o šířce 10 mm.



Graf 5. Závislost tlumící síly na prodlouření pro různé frekvence – naměřená data pro vzorek typu B.

Naměřená data na novém typu vzorku nemohla být použita pro srovnání s ostatními skupinami, jelikož materiál stěny svalu je nelineární a zatěžování vzorků bylo silově řízeno.



Graf 6. Závislost disipované energie způsobené tlumící silou na frekvenci

Nicméně měření na vzorcích typu **B** a **C** umožnilo vytvořit náhled velikosti energie, která je umořena ve stěně svalu při dynamickém zatěžování. K porovnávání naměřených dat z dynamické zkoušky pryže, byla použita vypočtená disipovaná energie u vzorků **B** a **C** pro různé frekvence zatěžování. Disipovaná energie byla vypočtena ze vztahu (14) a výsledky této energie pro rozdílné frekvence zatěžování jsou uvedeny v Grafu 6.

### 2.3 Hystereze při zatěžování

Při analýze vlastností pneumatických svalů bylo provedení experimentů na konkrétním typu svalu se zátěží. Pro tento experiment bylo zapotřebí vyrobit měřící stand, na kterém by bylo možné provést uvedené měření. Při návrhu zkušebního standu bylo upuštěno od antalogického zapojení svalů jelikož mechanizmus potřebný k antalogickému zapojení svalů vnáší do úlohy nelinearity od tření řetězového mechanismu. Proto bylo voleno vertikální zavěšení svalu zatěžované konstantní zátěží viz Obr.7.



Obr. 7. Fotografie a schéma zapojení úlohy pro zkoumání vlastností pneumatických svalů v laboratoři aplikované kybernetiky

Na Obr. 7. je vidět fotografie a schéma zapojení úlohy pro zkoumání vlastností pneumatických svalů s vertikálním zavěšením pneumatického svalu. V úloze byl užit pneumatický sval FESTO MAS-20-605N-AA-MC-O-ER-BG, proporcionální redukční ventil FESTO VPPM-6L-L-1-618-0L10H-A4P-S1C1, mikrofiltr FESTO LFR 1/4-5M-MIN a spínací ventil FESTO HEE 1/4-MINI-24. Celá úloha byla připojena na centrální rozvod stlačeného vzduchu, který je napájen kompresorem

Orlík SKS9/200 s vyrovnávací nádobou o objemu 200 l a kondenzační sušičkou Orlík KSO 01OA.



Obr. 8. Čelní panel programu Fluidní sval FESTO – měřící program.vi

Pro monitorování polohy konce svalu byl vytvořen program *Fluidní sval FESTO – měřící program.vi*, který ovládal proporcionální ventil a laserové čidlo pomocí měřící karty DAQPad-6015, na kterou byly vyjmenované komponenty připojeny. Cyklickým zatěžováním byly naměřeny hysterezní smyčky, z kterých byly vytvořeny 3D plochy odlehčení a zatížení svalu, které poskytují informaci o hysterezi svalu při zatížení.



Graf 7. Závislost zkrácení svalu na vnitřním přetlaku a zatížení – 3D graf zatěžování

## 3 Termodynamika pneumatických svalů

Pro odvození diferenciální rovnice, která by popisovala průběh tlaku uvnitř pneumatického svalu při zaplňování vnitřního prostoru svalu byla užita podobnost s případem zaplňování pracovního prostoru lineárního pneumotoru stlačeným plynem. Pro odvození potřebné diferenciální rovnice byla užita literatura [40].

Odvozenou diferenciální rovnice tlaku v pracovním prostoru pneumatického svalu lze zapsat jako:

$$\frac{1}{p} \cdot dp = \frac{\kappa}{V} \cdot \left[ R \cdot \frac{1}{p} \cdot (dm_E \cdot T_E - dm_A \cdot T_A) - dV - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \frac{1}{p} \cdot \alpha \right]$$

$$\cdot S_W \cdot (T - T_W) \cdot dt$$
(15)

Bez dalších zjednodušení je tato diferenciální rovnice analyticky neřešitelná. Pro popis děje uvnitř pneumatického svalu se změnou teploty bylo nezbytné transformovat diferenciální rovnici (14) na její diferenční tvar. Velikost termodynamických veličin a veličin popisujících přestup tepla byl uvažován v každém časovém kroku konstantní. Výpočet byl proveden z hodnot odpovídajících předchozímu časovému intervalu.

Transformace diferenciální rovnice tlaku v pracovním prostoru pneumatického svalu na diferenční tvar byla vyjádřena jako:

$$p(t + \Delta t) = p(t) + \frac{\kappa}{V} \cdot \left[ \frac{R \cdot \frac{1}{p} \cdot (\Delta m_E \cdot T_E - \Delta m_A \cdot T_A) - p \cdot dV/dt + \frac{\kappa - 1}{\kappa}}{\cdot \alpha \cdot S_W \cdot (T - T_W)} \right].$$
(16)

Což je diferenční tvar rovnice popisující tlak uvnitř pneumatického svalu. Matematickou simulací vzniknul Graf. 8 vyjadřující závislost tlaku uvnitř pneumatického svalu v čase.



Graf 8. Závislost tlaku uvnitř pneumatického fluidního svalu FESTO v čase

## 4 Popis průtoku plynu proporcionálním ventilem

## 4.1 Určení pneumatické vodivosti a kritického tlakového poměru zvyšováním tlaku na vstupu

K stanovení pneumatické vodivosti a kritického tlakového poměru u proporcionálního redukčního tlakového ventilu VPPM bylo provedeno na ventilu VPPM-6L-L1-G18-0L6H-V1P-S1C1, který byl pro dané měření pořízen. Pro samotné měření bylo zapotřebí vyrobit přípravek, který by zajistil fixaci trysky v konstantní poloze a zachoval by funkci labyrintu Pro ovládání trysky ventilu bylo dále zapotřebí vyrobit hřídel, aby bylo možné s tryskou manipulovat a tím měnit otevření ventilu. Přípravky musely být vyrobeny jelikož se jednalo o proporcionální typ ventilu a bylo zapotřebí zachytit trysku v konstantní poloze.

Měření pneumatické vodivosti a kritického tlakového poměru proběhlo dle normy ISO 6358 zvyšováním tlaku na vstupu, a to nejprve pomocí průtokoměru RectuTest RT02 s dvěma tryskami Z82 a X96 pro rozdílné hodnoty průtoku. Přesnost průtokoměru RectuTest RT02 je dle výrobce do 2,5 % naměřené hodnoty průtoku. Z opakovaného měření vyplynulo, že průtokoměr, který byl k dispozici, není k danému měření vhodný. Dále se ukázalo, že dochází ke změně směrnice naměřených dat po výměně trysek. Proto po provedeném neúspěšném měření pomocí průtokoměru RectuTest RT02 bylo provedeno měření, kde byl průtok měřen pomocí rotametru.



Měření pomocí rotametru přineslo pozitivní výsledek, jelikož rotametr umožňuje snadno změřit i malé hodnoty průtoků, které jsou dosahovány při malých tlacích na vstupu. Právě při malých hodnotách vstupního tlaku dochází ke změně proudění

z podkritické oblasti na kritickou oblast proudění. Naměřenými daty byla proložena rovnice průtoku pro podkritické proudění a výsledná numerická aproximace je vidět v Grafu 9. Součástí vytvořeného programu pro aproximaci naměřených dat byl výpočet pneumatické vodivosti *C* a kritického tlakového poměru *b* pomocí funkce *fminsearch* 

$$C = 6,329 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{Pa}} \right],$$
  
$$b = 0,1527[-].$$

## 4.2 Určení pneumatické vodivosti a kritického tlakového poměru zaplňováním prostoru o konstantním objemu

Zaplňování prostoru o konstantním objemu bylo druhou metodou, která byla aplikována pro stanovení pneumatické vodivosti *C* a kritického tlakového poměru *b*. Toto měření bylo provedeno ve spolupráci s Aälto University Finland (Engineering design and Production department). Pro měření byly použity dva typy proporcionálního redukčního tlakového ventilu VPPM, a to ventil VPPM-6L-L1-G18-0L10H-A4P-S1C1, který byl použit pro úlohu na katedře aplikované kybernetiky a ventil VPPM-6L-L1-G18-0L6H-V1P-S1C1, který je používán v laboratoři Univerzity Aälto, a to z důvodu, aby bylo možné srovnání vlastnosti těchto dvou ventilů.





1 centrální rozvod stlačeného vzduchu, 2 filtr AW30K – F03, 3 teploměr, 4 tlakoměr, 5 proporcionální pneumatický ventil VPPM, 6 tlaková nádoba, 7 měřící karta, 8 stolní PC

Obr. 9. Měření průtokových charakteristik zaplňováním a odvětráváním prostoru konstantním objemu a) fotografie experimentu b) schéma zapojení Z měření naplňování tlakové nádoby pomocí ventilu VPPM-6L-L-1-G18-0L10H-A4P-S1C1 a VPPM-6L-L1-G18-0L6H-V1P-S1C1 byly pořízeny záznamy. Jeden ze zmíněných záznamů je vidět na Grafu 10.



Graf 10. Závislost tlaku uvnitř tlakové nádoby na čase, záznam z měření průběhu zaplňování ventilem VPPM-6L-L-1-G18-0L10H-A4P-S1C1

Ověření platnosti rovnic popisujících průběh tlaku stlačeného vzduchu uvnitř nádoby o konstantním objemu a porovnání těchto teoretických výsledků s provedeným měřením bylo provedeno na vytvořeném simulačním modelu v prostředí Matlab<sup>®</sup> Simulink. V Grafu 11. je zachycena vypočtená a naměřená závislost tlaku uvnitř tlakové nádoby na čase v průběhu zaplňování ventilem VPPM-6L-L-1-G18-0L10H-A4P-S1C1. Z uvedeného grafu je patrné, že matematická simulace poskytuje velice dobrou náhradu naměřeného děje zaplňování prostoru o konstantním objemu pomocí parametrů kritického tlakového poměru b a pneumatické vodivosti C pro danný typ ventilu.



Graf 11. Závislost tlaku uvnitř tlakové nádoby na čase, simulace průběhu zaplňování

#### 4.3 Odvětrávání prostoru o konstantním objemu

U proporcionálního tlakového ventilu VPPM je odlišná cesta průtoku plynu ventilem ve směru z ① do ② od cesty ve směru z ② do ③. Tento rozdíl má za následek rozdílné hodnoty parametru kritického tlakového poměru *b* a pneumatické vodivosti *C*, což bylo důvodem popsání průtoku plynu i ve směru z ② do ③, což odpovídá vypouštění pracovního prostoru pneumatického svalu do okolní atmosféry. Pro zjištění uvedených konstant byl proveden experiment s tlakovou nádobou, kdy natlakovaná nádoba byla odpouštěna pomocí ventilu typu VPPM a záznam z měření je vidět na Grafu 12.



Graf 12. Závislost tlaku uvnitř tlakové nádoby na čase, záznam z měření průběhu odvětrávání ventilem VPPM-6L-L-1-G18-0L10H-A4P-S1C1

Z uvedené závislosti je patrné, že nedochází ke změně tvaru křivky, nýbrž pouze počáteční hodnoty. Tato skutečnost byla potvrzena i následným výpočtem konstant *b* a *C* a funkční zkouškou ventilu VPPM, která ověřila danou teorii, že při odvětrávání je ventil vždy otevřen do stejné polohy.



Graf 13. Závislost tlaku uvnitř tlakové nádoby na čase, simulace průběhu odvětrávání

Z teoretických rovnic byl sestrojen matematický model odvětrávání tlakové nádoby v prostředí Matlab<sup>®</sup> Simulink. Vypočtenou a naměřenou závislost tlaku uvnitř tlakové nádoby na čase v průběhu odvětrávání ventilem VPPM-6L-L-1-G18-0L10H-A4P-S1C1 lze vidět v Grafu 13. Z grafu je patrné, že matematická simulace poskytuje velice dobrou náhradu naměřeného děje stejně, jako tomu bylo v předchozím případě.

## 4.4 Dynamické vlastnosti ventilu

Aby vytvořený matematický model pneumatického proporcionálního tlakového ventilu VPPM byl co nejpřesnější, proběhla analýza dynamických vlastností ventilu. Na začátku analýzy dynamických vlastností bylo vytvořeno schéma ventilu, které vystihovalo, jakým způsobem jsou jednotlivé informace předávány od uživatele (řídící veličiny *w*) a jakým způsobem je tato informace uvnitř ventilu zpracována.

Pro měření dynamických vlastností ventilu, které proběhlo na Finské Univerzitě Aälto byla provedena úprava ventilu VPPM. V prvním kroku byl do stěny ventilu vyvrtán malý otvor (o průměru 1,5 mm), pomocí kterého bylo možné měřit tlakoměrem SMC PSE530-M5-L tlak nad pryžovou membránou.



1 hlavní ovládací procesor, 2 ovládací procesor řídících ventilů, 3 řídící ventily, 4 prostor s řídícím tlakem, 5 přepouštěcí prostor, 6 tlakoměr řídícího prostoru, 7 výstupní tlakoměr

#### Obr. 10. Schéma regulované soustavy ventilu VPPM

Dále byl připojen stejný tlakoměr přímo na výstup ventilu, čímž bylo možné změřit průběh zaplnění minimálního prostoru za ventilem. Byla tak získána informace přímo o chování ventilu. Tím, že byl tlakoměr na výstupu připojen přímo na ventil, byl minimalizován vliv rozpínání plynu a dalších termodynamických dějů. Na Obr. 10 byla znázorněna řídící veličina w, akční veličina u, regulovaná veličina y a zpětná vazba ventilu e, která je dána rovnicí:

$$e = w - y. \tag{17}$$

Z měření přechodové charakteristiky systému, jsou vidět dva cykly sepnutí ventilu. Při sepnutí ventilu dojde k postupnému zaplnění prostoru nad membránou ventilu stlačeným plynem, viz červená křivka. V důsledku vzniklého přetlaku nad membránou dojde k posunu trysky a následně k zaplnění malého prostoru za ventilem, viz modrá křivka v Grafu 14. Impulsy pro plnění a odvětrání prostoru nad membránou a tím i řízení tlaku na výstupu jsou znázorněny zelenou skokově měnící se funkcí. Na naměřených datech je patrné, že při měření se projevil vliv mechanické části a vliv proudění plynu labyrintem ventilu. Vliv proudění plynu ventilem je patrný z Grafu 14., když řídící tlak (červená křivka) přechází na žádanou hodnotu, dojde k jeho zpoždění a zploštění tvaru naměřených dat.



Graf 14. Závislost řídícího a výstupního tlaku v čase se znázorněním závislosti napěťového impulsu pro plnění a odvětrávání v čase ventilem VPPM-6L-L1-G18-0L6H-V1P-S1C1 – naměřená data.

Pro vyhodnocení přechodové charakteristiky proporcionálního pneumatického tlakového ventilu VPPM byla zvolena metoda prof. Strejce. Po vypočtení časových konstant, statického zesílení a stanovení dopravního zpoždění byl stanoven aproximační přenos systému jako:

$$F_a(s) = \frac{1,2}{(0,081936\ s+1)(0,03262\ s+1)} \cdot e^{-0,003\ s},\tag{18}$$

po roznásobení jmenovatele

$$F_a(s) = \frac{1.2}{_{0,0026727\,s^2 + \,0.1145556\,s + 1}} \cdot e^{-0.003\,s}.$$
(19)

Pro určení aproximačního přenosu soustavy byla užita přechodová charakteristika řídícího tlaku, přičemž pro matematický model ventilu je žádoucí nalézt přenos výstupního tlaku. Toto nemohlo být provedeno díky dopravnímu zpoždění a vlivem mechanické části ventilu, které se projevilo zákmitem tlaku na výstupu. Proto byla provedena aproximace přenosu soustavy na řídícím tlaku a časové konstanty včetně dopravního zpoždění byly poupraveny tak, aby co nejpřesněji odpovídaly danému přenosu. Výsledný přenos, který nejlépe proložil naměřenou přechodovou charakteristiku, přešel do tvaru:

$$F_a(s) = \frac{1,2}{0,00354822\,s^2 + 0,101\,s + 1} \cdot e^{-0,010\,s}.$$
(20)

Blokové schéma, pomocí kterého byl upraven výsledný přenos soustavy, je znázorněn na Obr. 11. Aby bylo možné porovnat aproximaci systému s naměřenými daty, byl do soustavy začleněn blok načítající data ze souboru, kde byla data uložena.



Obr. 11. Blokové schéma aproximace přechodové charakteristiky výstupního tlaku

Výsledná aproximace přechodové charakteristiky je znázorněna v Grafu 15. Jak bylo již uvedeno, pro aproximaci byly upraveny časové konstanty včetně hodnoty dopravního zpoždění, která byla snížena na 0,010 [s] z původních 0,025 [s] aby výsledná aproximace nejlépe kopírovala naměřená data.



Graf 15. Aproximace přechodové charakteristiky výstupního tlaku

Objasněním dopravních zpoždění a chování ventilu VPPM vysvětlilo nejasnosti, které vyšli najevo při aplikaci ventilu VPPM k řízení útlumu kmitů dynamické soustavy v práci kolegy Honkoly [26]. Závěrem z práce Honkoly a provedené dynamické analýzy ventilu je, že daný ventil není vhodný pro řízení umělých pneumatických svalů

v reálných dynamických soustavách, jelikož při řízení rychlejších dějů dochází díky zpoždění k posunu řízené a řídící veličiny do fáze.

## 5 Tvorba matematického modelu ventilu

Tvorbě matematického modelu předcházel rozbor funkce ventilu a analýza jednotlivých součástek včetně popisu proudění plynu ventilem. Pro sestrojení matematického modelu proporcionálního tlakového ventilu VPPM bylo sestrojeno schéma jednotlivých součástek, které vstupují do pohybové rovnice mechanického celku ventilu, viz Obr. 12.



Obr. 12. Schéma ventilu pro případ plnění (nalevo) a pro případ odvětrání (napravo)

Schéma ventilu na Obr. 12 zachycuje pohybující se části ventilu pro případ plnění z ① do ② nalevo a pro případ odvětrávání z ② do ③ napravo. V obrázku je též barevně znázorněno proudění plynu ventilem pro snazší vysvětlení, jak stlačený plyn proudí tělem ventilu.

K popisu polohy konce trysky ventilu byly sestrojeny pohybové rovnice (21) až (24). První dvě rovnice (21) a (22) popsují pohyb konce trysky ventilu pro případ plnění:

$$m_p \ddot{x}(t) + b_{tl} \dot{x}(t) + k_1 (h_1 + x(t)) + k_2 (h_2 + x(t)) = F_p(t),$$
(21)

$$F_p(t) = S \cdot p_p(t). \tag{22}$$

Druhá dvojice pohybových rovnic (23) a (24) popisuje konec trysky ventilu pro případ odvětrávání:

$$m_o \ddot{x}(t) + b_{tl} \dot{x}(t) + k_1 (h_1 + x(t)) = F_o(t),$$
(23)

$$F_o(t) = S \cdot p_o(t), \tag{24}$$

Závěrečnou fází před tvorbou matematického modelu byla úprava rovnic popisujících průtok plynu dle normy ISO 6358. Uvedené rovnice byly doplněny o polynomy, aby bylo možné vyjádřit průtok plynu proporcionálním tlakovým ventilem VPPM v závislosti na zdvihu trysky.

$$\dot{m}^*(x) = C(x) p_1 \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \qquad \text{pro } \frac{p_2}{p_1} \le b \text{ nadkritické proudění,} \qquad (25)$$

$$\dot{m}(x) = C(x) p_1 \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{p_2}{p_1} - b(x)}{1 - b(x)}\right)^2} \quad \text{pro } \frac{p_2}{p_1} > b \text{ podkritické proudění.}$$
(26)

Pomocí výše uvedených analýz vlastností jednotlivých součástek a průtoku plynu ventilem bylo možné sestrojit matematický model ventilu, viz Obr. 13. Model proporcionálního tlakového ventilu VPPM na Obr. 13. je připojen na matematický model tlakové nádoby, aby byla ověřena jeho platnost.



Obr. 13. Simulační schéma matematického modelu plnění tlakové nádoby proporcionálním ventilem v prostředí Simulink

V Grafu 16. je znázorněna simulace průběhu tlaku uvnitř tlakové nádoby při plnění v čase pomocí ventilu VPPM. Z grafu je vidět velmi dobrá shoda naměřených a vypočtených hodnot tlaku uvnitř tlakové nádoby.



Graf 16. Závislost tlaku uvnitř tlakové nádoby v čase, simulace průběhu plnění matematickým modelem ventilu VPPM

## 6 Závěr

Pneumatické svaly díky své jedinečné konstrukci vybízejí k řešení náročných technických úloh. Způsoby aplikace pneumatických svalů se stávají velice diskutovaným tématem na vědeckých konferencích a je jim věnována velká pozornost. Pneumatické svaly dokážou vyvinout až desetkrát větší osovou sílu, než pneumatické válce se stejným průřezem a nejen díky tomu můžou být použity na netradičních místech, jako jsou náhrady lidských těl, náhony robotů a pohony manipulátorů. Ve vědeckých pracích se můžeme s pneumatickými svaly setkat jako se zařízeními sloužícími ke snížení vibrací zkoumané soustavy. Pro tuto práci byl použit průmyslově vyráběný fluidní sval FESTO, aby bylo možné dosažené výsledky porovnávat i s jinými výzkumnými pracovišti.

Při zkoumání vlastností umělých pneumatických svalů byl zmapován objem svalu, čímž byly zpřesněny stávající matematické modely umělého pneumatického svalu, které popisují výslednou axiální sílu v pneumatickém svalu. Objem pneumatického svalu v matematických modelech vystupuje na prvním místě a je jedním z hlavních faktorů, podílejících se na velikosti výsledné axiální síly, kterou sval vyvine při svém zkrácení. Vnitřní objem svalu byl popsán navrženou prostorovou funkcí s ověřením její platnosti od naměřených dat. Odchylka od měření nepřesahuje 5 %. Pro nalezení způsobu, jak zobecnit metodiku popisu objemu pneumatického svalu, by do budoucna mohla být věnována další práce, která by vyřešila popis objemu v závislosti na celkové délce svalu. Zkoumání této problematiky by mohlo v budoucnu usnadnit aplikaci velmi dlouhých svalů pro manipulátory usnadňující lidskou námahu v těžkém průmyslu. Pro inspiraci popisu objemu u dlouhých svalů by mohly posloužit výsledky, ke kterým bylo dospěno při provádění analýzy obrazu, kdy byl zkoumán vnější objem svalu jak pro dlouhý, tak pro krátký typ pneumatického svalu.

Dalším přínosem této disertační práce je zmapování mechanických vlastností materiálu stěny pneumatického svalu. Výzkumu mechanických vlastností stěny pneumatického svalu muselo předcházet prozkoumání orientace kordu vyztužujících nití kompozitního materiálu svalu a také prozkoumání jejich geometrickému uspořádání. Na základě této analýzy bylo možné provést zkoušku prostým tahem na vzorcích z hlavních směrů a následně provést dynamické zkoušky. Při dynamických zkouškách byla vyjádřena velikost energie, která je umořena ve stěně svalu při zatěžování. Při zatěžování vzorků byly pozorovány makroskopické děje, ke kterým dochází ve stěně svalu při zatěžování. Při nadměrném zatěžování dochází k oddělování nití vyztužujícího kordu pryže a tím k přetržení vzorků. Ke stejnému výsledku může dojít i u pneumatického svalu při

překročení zatěžující síly nebo při překročení životnosti svalu. Jelikož u vzorků pryže v kolmém směru docházelo při dynamickém zatěžování k přetržení vzorků z pryže, byla nalezena metoda, kterou by bylo možné v budoucnu stanovit Mooney-Rivlinovy konstanty materiálového modelu. Tyto konstanty se vyskytující v matematickém modelu pneumatického svalu nedestruktivní metodou pomocí zařízení ARAMIS od firmy Gon mbH.

Součástí práce bylo vytvoření zkušebního standu na Katedře aplikované kybernetiky TUL, na které byla prozkoumána hystereze pneumatického svalu a vliv zahřívání svalu při dynamickém zatěžování. Měření hysterezních smyček může být v budoucnu velmi přínosné při navrhování pneumatického svalu jakožto zdroje síly pro manipulátory. Znalosti o hysterezních smyčkách zabrání odchylkám při regulaci polohy manipulátoru.

V práci byl zpracován problém termodynamiky u pneumatických svalů, jelikož tato problematika je doposud minimálně zmapována. Matematický model popisující termodynamiku uvnitř pneumatického svalu byl odvozen pomocí analogie pneumatickým motorem s přímočarým který počítá se změnu teploty. Tento matematický model byl doplněn o dosažené výsledky v oblasti popisu objemu svalu a měření teploty stěny svalu, čímž byl model zpřesněn od dosavadních zjednodušení. Dosažené výsledky nebylo možné ověřit na reálném pneumatickém svalu. Termodynamický děj probíhající uvnitř pneumatického svalu je téměř nezmapovaný a zcela obecný. Proto jej lze doporučit pro budoucí práci se zaměřením na danou problematiku a řešit problém jako stabilitu balonku při plnění. Eventuelně posoudit, zda li je žádoucí mít pro průmyslovou aplikaci tak přesný model a zda li uvedený popis není dostatečný.

Součástí této práce je rozsáhlá analýza proporcionálního redukčního tlakového ventilu VPPM, který byl použit při výrobě měřícího standu na Katedře aplikované kybernetiky TUL. Průtokové a dynamické vlastnosti ventilu VPPM mají zásadní vliv na výsledné chování pneumatického svalu, proto jim byla věnována zvýšená pozornost. Při studijních pobytech v zahraničí na Finské Univerzitě Aälto bylo objasněno chování ventilu, které tamním kolegům činilo potíže při výzkumu pneumatických svalů. Hlavní příčinou potíží s použitím uvedeného ventilu jsou dopravní zpoždění ventilu na řídící impuls, která jsou popsána v kapitole 4.4. Díky dopravním zpožděním ventilu VPPM u reálné soustavy dochází k posunu řízené a řídící veličiny do fáze. Bylo zjištěno, že ventil VPPM je vhodný pro regulaci do frekvence ~10 [Hz] a pro vyšší frekvence by bylo vhodnější užít rychlejší selenoidní ventil FESTO MHE2-MS1-5/2-M7. Ověření platnosti matematického modelu ventilu proběhlo pomocí srovnání simulace napouštění tlakové nádoby matematickým modelem s naměřenými hodnotami.

## Seznam literatury

## Tištěné zdroje:

- Ahn, K.K., Anh, H.P.: A new approach for modelling and identification of the pneumatic artificial muscle manipulator based on recurrent neural networks. Journal of Systems and Control Engineering. December 2007, Vol. 221, No. 8, str. 1101 – 1121, DOI: 10.1243/09596518JSCE432.
- [2] Aschemann, H., Prabel, R., Schindele, D.: Nonlinear Control of an Electro-Pneumatic clutch for Truck Applications using Extended Linearisation Techniques. The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power. Tampere Finlad, May 18 – 20, 2011, str. 125 – 136, ISBN: 978-952-15-2518-6.
- [3] Balátě, J.: Vybrané statě z automatického řízení. Vysoké učení technické v Brně. 1996, ISBN 80-214-0793-X.
- Beater, P.: Pneumatic Drivers System Design, Modelling and Control. Springer Berlin Heidelberg New York. str. 171 – 181, ISBN-10 3-540-69470-6.
- [5] Bonet, J., Profil, M.L.: Nonlinear Viscoelastic Constitutive Modeling of a Continuum. European Congress on Computation Methods in Applied Scienes and Engineering. Barcelona, 11-14 September 2000, str. 1 14.
- [6] Bonet, J.: Large strain Viscoelastic Constitutive Models. International Journal of Solids and Structures 38, 2001, str. 2953 – 2968.
- [7] Carbonell, P., Jiang, Z.P., Repperger, D.W.: A Fuzzy Backstepping Controller for a Pneumatic Muscle Actuator System. International Symposium on Inteligent Control, September 2001, str. 353 – 358 ISBN: 0-7803-6722-7.
- [8] Cerha, J.: Hydraulické a pneumatické mechanismy I. Technická univerzita v Liberci. Únor 2010, str. 317, ISBN 978-80-7372-560-0.
- [9] Cerha, J.: Hydraulické a pneumatické mechanismy II. Technická univerzita v Liberci. Leden 2008, str.189, ISBN 978-80-7372-297-5.
- [10] Cerda, A.M., Bowler, C.J., Caldwell, D.G.: Adaptive Position Control of Antagonistic Pneumatic Muscle Actuators. Proceeding IROS '95 Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots. Vol.1, str. 378 – 383, ISBN: 0-8186-7108-4.
- [11] Cirkl, D.: Modelling of Damping Force of Dynamically Loaded Specimenn of Polyurethane Foam in Dependence on its Density. Shock and Vibration 17 (2010), str. 373–381, ISSN 1070-9622.
- [12] Cirkl, D.: Modelling of Damping Force of Polyurethane Foam in Dependence on its Temperature. 10th International conference on Vibrational Problems, Sept. 5th-8th 2011, Springer proceedings in Physics 139, str. 664 – 669, ISBN 0930-8989.
- [13] Davis, S., Caldwell, G. D.: Braid Effects on Contractile Range and Friction Modeling in Pneumatic Muscle Actuators. The International Journal of Robotics Research. 2006, Vol. 25, No 4, str. 359 – 369.

- [14] Daerden, F., Lefeber, D.: The Concept and Design of Pleated Pneumatic Artificial Muscles. International Journal of Fluid Power. 2001, Vol. 2, No. 3, str. 41 – 50.
- [15] Daerden, F.: Conception and Realization of Pleated Pneumatic Artificial Muscles and their use as Compliant Actuation Elements. Vrije Universiteit Brussel. 1999, PhD Thesis.
- [16] Daerden, F., Lefeber, D., Verrelst, B., Ham, R. van.: Pleated Pneumatic Artificial Muscles: Actuators for Automation and Robotics. IEEEASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings Cat No01TH8556 (2001). July 2001, Vol. 2, str. 738 – 743, ISBN: 0780367367.
- [17] Dvořák, V., Šulc, J., Urbášek, J.: Návod na cvičení. Technická univerzita v Liberci. 2005, ISBN 80-7083-917-1.
- [18] Dongjun, S., Xiyang, Yeh., Oussama, K.: Variable Radius Pulley Design Methodology for Pneumatic Artificial Muscle-based Antagonistic Actuation Systems. Intelligent Robots and Systems. September 2011, str 1830 – 1835, ISBN: 978-1-61284-454-1.
- [19] Giorgi, R. De., Bideaux, E., Sesmat, S.: Using inverse model for determining orifice mass flow rate characteristics. 6th Int. Symp. on Fluid Power. November 7-10 2005, Tsukuba, Japan, str.380 – 385.
- [20] Giorgi, R. De., Bideaux, E., Sesmat, S.: Thermal Model of a Tank for Simulation and Mass Flow Rate Characterization Purposes. 7th Int. Symp. on Fluid Power. September 15-18 2008, Tsukuba, Japan, str.225 – 230.
- [21] Gonzalez, C.R., Woods, E.R., Eddins, L. S.: Digital Image Processing Using MATLAB<sup>®</sup>, 2004, New Jersey, USA, str. 246 – 483.
- [22] Hannaford, B., Winters, J. M., Chou, C.P., Marbot, P.H.: The Anthroform Biorobotic Arm: A System for the Study of Spinal Circuits. Annals of Biomedical Engineering. March 1995, Vol. 23, Issue 4, str. 399 – 408.
- [23] Hesselroth, T., Sarkar, K., Smagt, van der P. P., Schulten, K.: Neural Networks Control of a Pneumatic Robot Arm. IEEE Transactions On Systems Man And Cybernetics. 1994, Vol. 24, Issue 1, str. 28 – 38, ISSN: 00189472.
- [24] Hesse, S.: The Fluidic Muscle in Application 150 practical examples using the Pneumatic muscle. Festo. str. 144.
- [25] Holzapfel, G.A., Gasser, T.C.: A viscoelastic model for fiber-reinforced composites at finite strains: Continuum basis, computational aspects and applications. Biomech preprint series. July 2000, Paper No 2, str. 1 38.
- [26] Honkola, K. P., Kajaste, J., Pietola, Matti.: Principle of Active Vibration Damping Using Pneumatic McKibben Type Muscle Actuator. 7th International Fluid Power Conference Aachen, Germany 22.3. - 24.3.2010, ISBN: 978-3-940565-90-7.
- [27] Chou, C.P., Hannaford, B.: Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial, IEEE Transactions on Robotics and Automation, February 1996, Vol. 12, No 1, str. 90 – 102.

- [28] International Standard ISO 6358. 1989 Pneumatic Fluid Power Components using Compressible Fluids -Determination of Flow-rate Characteristics, str. 1 15.
- [29] Kawashima, K., Ishii, Y., Funaki, T., Kagawa, T.: Determination of Flow Rate Characteristics of Pneumatic Solenoid Valves Using an Isothermal Chamber. Journal of Fluids Engineering. March 2004, Vol. 126, Issue 2, str. 273 – 280, DOI: 10.1115/1.1667888.
- [30] Klute, G. K.: Actuators for Biorobotic Systems. University of Washington. 1999, Washington D.C, Doctoral Tesies.
- [31] Klute, G. K., Hannaford, B.: Fatigue Characteristics of McKibben Artificial Muscle Actuators. IEEERSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Innovations in Theory Practice and Applications Cat No98CH36190 (1998). 1998, Vol. 3, str. 1776-1781, ISBN: 0780344650.
- [32] Klute, G. K., Hannaford, B.: Accounting for Elastic Energy Storage in McKibben Artificial Muscle Actuators. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. June 2000, Vol. 122, str. 386-388.
- [33] Klobouček, J., Stianko, M.: Základy aplikované kybernetiky (Cvičení). Technická univerzita v Liberci. 2007.
- [34] Krejčíř, O.: Pneumatická vibroizolace. Vysoká škola strojní a textilní v Liberci. 1986, str. 223, Doktorská disertační práce (DrSc.).
- [35] Kopecký, L., Šolc, F.: McKibbenův pneumatický sval v robotice. AT&P Journal. 2003, Vol. 2, str. 62 – 64, ISBN 1335-2237.
- [36] Kopečný, L.: McKibbenův pneumatický sval modelování a použití v hmatovém rozhraní. Vysoké učení technické v Brně, 2009, disertační práce.
- [37] Kuroshita, K., Sekiguchi, Y., Oshiki, K., Oneyama, N.: Development of New Test Method for Flow-rate Characteristics of Pneumatic Components. In Power Tansmission and Motion Control. Sept. 2004, str. 243 – 256.
- [38] Kutějová, L.: Syntetický sval. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 2008, bakelářská práce.
- [39] Nahm, H.T.: Mechanical properties of the composite material with elastomeric matrix reinforced by textile cords. Technická univerzita v Liberci. 2004, disertační práce.
- [40] Nevrlý, J.: Úvod do modelování pneumatických systémů. Česká strojnická společnost, Ústřední odborná sekce Hydraulika a pneumatika. 2003, Praha, ,1. Vydání náklad 40 výtisků, str. 79, ISBN 80-02-01549-5.
- [41] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů. Montanex a.s., 1999, str. 276, ISBN 80-7225-030-2.
- [42] Olehla, M., Němeček, S.: Základy aplikované kybernetiky. Technická univerzita v Liberci. 2003, Liberec, str. 162, ISBN 80-7083-755-1.
- [43] Rektorys, K.: Přehled užité matematiky I. Karel Rektorys a spolupracovníci. 1995, Praha, Czech Republic, str. 165, ISBN 80-85849-92-5.
- [44] Repperger, D.W., Johnson, K.R., Phillips, C.A.: A VSC Position Tracking System Involving a large Scale Pneumatic Muscle Actuator. Proceeding of the

37th IEEE Conference on Decision & Control Tampa. December 1998, Vol. 4, str. 4302 – 4307, ISBN: 0-7803-4394-8.

- [45] Richer, E., Hurmuzlu, Y.: A High Performance Pneumatic Force Actuator System Part 1 - Nonlinear Mathematical Model. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control. September 2000, Vol. 122, No.3, str. 416 – 425.
- [46] Rubber, vulcanized or thermoplastic Determination of tensile stress-strain properties ČSN ISO 37, Český normalizační úřad, 2006, str. 1 28.
- [47] Schulte, H. F.: The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics. National Academy of Sciences-National Research Council. 1961, Washington D.C, str. 94 – 115.
- [48] Smagt, P. der Patrick van, Groen, F., Schulten, K.: Analysis and Control of a Rubbertuator Arm. Biological Cybernetics. 1996, Vol. 75, No.5, str. 433 – 440.
- [49] Szépe, T., Sárosi, J.: Model Based Open Looped Position Control of PAM Actuator. Intelligent Systems and Informatics (SISY). September 2010, str. 607 – 609, ISBN: 978-1-4244-7394-6.
- [50] Thanh, T.D.C., Ahn, K.K.: Intelligent Phase Plane Switching Control of Pneumatic Artificial Muscle Manipulators with Magneto-rheological Brake. Mechatronics. 2006, Vol. 16, Issue 2, str. 85 – 95, ISSN: 09574158.
- [51] Thongchai, S., Goldfarb, M., Sarkar, N., Kawamura, K.: A Frequency Modeling Method of Rubbertuators for Control Application in an IMA Framework. American Control Conference. Vol. 2, str. 1710 – 1714, ISBN: 0-7803-6495-3.
- [52] Thanh, D. X.: Hadicová pneumatická pružina. Vysoká škola strojní a textilní v Liberci. 1987, str. 107, Kandidátská disertační práce (CSc).
- [53] Tondu, B., Lopez, P.: Modelling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators. IEEE Control System Magazine. August 2002, Vol. 20, No. 2, str. 15 – 38, DOI:10.1109/37.833638.
- [54] Tsagarakis, N., Caldwell, D.G.: Improved Modelling and Assessment of pneumatic Muscle Actuators, International Conference on Robotics & Automation, April 2000, San Francisco, str. 3641 – 3646.
- [55] Udawatta, L., Priyadarshana, P. G. S., Witharana, S.: Control of Pneumatic Artificial Muscle for Bicep Configuration using IBC. Third International Conference on Information and Automation for Sustainability (2007), 2007, str. 35 – 39, ISBN: 9781424418992.
- [56] Urban, R.: Modelování konstrukčních prvků z pryže vyztužené nitěmi. Technická univerzita v Liberci. 2004, disertační práce.
- [57] Vaňous, P.: Základní identifikace a řízení pneumatických svalů. VŠCHT Praha. 2003, str. 600 607, ISBN 80-7080-526-9.
- [58] Verrelst, B., Vanderborght, B., Ham, R. van., Beyl, P., Lefeber, D.: Novel Robotic Applications using Adaptable Compliant Actuation. An Implementation Towards Reduction of Energy Consumption for Legged

Robots. Mobile Robotics, Moving Intelligence. December 2006, str. 513 – 534, ISBN 3-86611-284-X.

[59] Zeller, M., Sharma, R.; Schulten, K.: Motion Planning of a Pneumatic Robot using a Neural Network. IEEE Control Systems Magazine. Jun 1997, Vol. 17, Issue 3, str. 89 – 98, DOI: 10.1109/37.588194.

### Internetové zdroje:

[60] Čidla SOE..., optoelektronická, [online]. [cit. 25.5.2012]. Dostupné na internetu:

<<u>http://www.festo.com/cat/cs\_cz/data/doc\_cs/PDF/CZ/SOEX\_CZ.PDF</u>>

- [61] Fluidní svaly DMSP/MAS, [online]. [cit. 25.5.2012]. Dostupné na internetu: <<u>http://xdki.festo.com/xdki/data/doc\_ENGB/PDF/EN/DMSP-MAS\_EN.PDF</u>>
- [62] Janeček, J.: Aproximace přechodových charakteristik metodou prof. Strejce. Katedra řídící techniky, 2000, [online]. [cit. 25.5.2012]. Dostupné na internetu:

<<u>http://www.mti.tul.cz/files/zky/Strejc.pdf</u>>

- [63] Proporcionální redukční ventily MPPE/VPPE/MPPES, [online].
   [cit. 25.5.2012]. Dostupné na internetu:
   <a href="http://www.festo.com/cat/cs">http://www.festo.com/cat/cs</a> cz/data/doc cs/PDF/CZ/VPPM CZ.PDF>
- [64] Rolling lobe actuator with plastic connection parts type SK 37-8 P02,
   [online]. [cit. 29.3.2013]. Dostupné na internetu:
   <a href="http://213.164.133.30/catalog/ShowBalgPDF/SK%2037-8%20P02.pdf">http://213.164.133.30/catalog/ShowBalgPDF/SK%2037-8%20P02.pdf</a>

# Publikační činnost

- Varga, Z., Moučka, M.: Mechanic of Pneumatic Artificial Muscle. Journal of Applied Science in the Thermodynamics and Fluid Mechanics, January 2009 Vol. 3, No 2/2009, str. 1 – 6, ISSN 1802-9388.
- [2] Varga, Z., Honkola, P. K., Moučka, M.: Comparison between Muscle Volume Models and Measurements. The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power. May 2011, Tampere, Finland, Vol. 4, ISBN 978-952-15-2521-6.
- [3] Keski-Honkola, P., Varga, Z., Professor Matti Pietola.: Magnetorheological fluidic muscle as semi-active damper. The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power. May 2011, Tampere, Finland, Vol. 3, ISBN 978-952-15-2520-9.
- [4] Varga, Z., Keski-Honkola. P.: Determination of Flow Rate Characteristic for Pneumatic Valves. Experimental fluid mechanics 2011. Jičín (Czech Republic), 22nd - 25th November 2011, Conference proceedings are listed in ISI-Web of Knowledge ISBN 978-80-7372-784-0.
- [5] Varga, Z., Keski-Honkola. P.: Determination of flow rate characteristics for pneumatic valves. EPJ Web of Conferences. 2012, Volume 25, pages/rec.No 01096, ISSN 2100014X.
- [6] Varga, Z., Keski-Honkola, P.: Mathematical Model of Pneumatic Proportional Valve. Journal of Applied Science in the Thermodynamics and Fluid Mechanics – v tisku.
- [7] Varga, Z., Keski-Honkola, P.: Viscoelastic Properties of Artificial Pneumatic Muscle, 8th International Fluid Power Conference Dresden. March 2012, Conference Proceedings, Vol. 1, str. 203 – 212.

# Profesní životopis

Doktorand:	Ing. Zdeněk Varga
Adresa:	20. října 1982 Čeperka, Nerudova 283, 533 45 Opatovice nad Labem
Vzdělání:	
Od 2007 - doposud	Technická univerzita v Liberci - Fakulta strojní
	Katedra aplikované kybernetiky
	Obor: Výrobní systémy a procesy
	Zaměření: Aplikovaná kybernetika
2002 - 2007	Technická univerzita v Liberci - Fakulta strojní
	Katedra aplikované mechaniky
	Obor: Aplikovaná mechanika
	Zaměření: Strojní inženýrství
1998 - 2002	Střední průmyslová škola Hradec Králové
	Studijní obor: Strojírenství
	Zaměření: Aplikace výpočetní techniky
Pracovní zkušenosti:	
2011 - doposud	SAS Autosystemtechnik s.r.o. A Joint Venture between
	Continental and Faurecia Vývoj E-checků (testerů) pro
	testování cockpitů.
2007 - 2011	KAMAX Turnov s.r.o.
	Stáž v Itálii: technická podpora zákazníkovi
	Stáž v Belgii: zavedení vzorkování přes portál zákazníka
	Spolupráce s výzkumným oddělením F+E v KAMAX
	Homberg při návrhu šroubových spojů
2010 – doposud	Spolupráce s Univerzitou Aälto - Finsko
	Stáž ve Finsku: Navázání spolupráce a měření
	v hydrodynamické laboratoří
2006 - 2007	SOR Libchavy
	Měření vibrací a hluku
<u>Jazyky:</u>	
Angličtina	aktivně
Němčina	pasivně