

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zkušební zařízení pneumatických motorů
Testing Equipment of Pneumatic Motors

Student:

Bc. Jan Mejzlík

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Mejzlík**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T043 Hydraulika a pneumatika
Téma: **Zkušební zařízení pneumatických motorů**
Testing Equipment of Pneumatic Motors
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhněte experimentální zařízení pro měření dynamických vlastností pneumatických motorů s elastickými pracovními členy. Vypracujte:

- 1) přehled základních typů a konstrukčních provedení pneumatických motorů s elastickými pracovními členy,
- 2) rozbor možných variant konstrukčního řešení experimentálního zařízení pro měření dynamických vlastností pneumatických motorů,
- 3) návrh pneumatického a hydraulického obvodu, včetně specifikace jednotlivých prvků,
- 4) popis metodiky měření a vytvořte program pro měření a vyhodnocení sledovaných veličin,
- 5) dispoziční výkres zařízení.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanizmy Díl I. - Pneumatické prvky a systémy*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005. 275 s. ISBN 80-248-0879-X.

KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanizmy Díl II. - Řízení pneumatických systémů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2015. 94 s. ISBN 978-80-248-3778-9.

KOLEKTIV AUTORŮ. *SMC Training - Stlačený vzduch a jeho využití*. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.

BEATER, P. *Pneumatic Drives: System design, Modeling and Control*. Berlín: Springer, 2007. 323 pp. ISBN 978-3540-69470-0.

Katalogy a firemní prospekty.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem celou diplomovou prací, včetně příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užití své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Mezlík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Hlavní 4,

747 06 Nové Sedlice

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MEJZLÍK, J. *Zkušební zařízení pneumatických motorů: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2016, 60 s. Vedoucí práce: Fojtášek, K.

V rámci své diplomové práce jsem se zabýval návrhem experimentálního zařízení pro měření statických a dynamických charakteristik pneumatických motorů s elastickými pracovními členy. Do skupiny těchto motorů patří membránové motory, měchové motory a fluidní svaly. Uvedené typy motorů se od sebe značně liší svou konstrukcí i funkcí. To muselo být zohledněno při návrhu experimentálního zařízení, aby splňovalo nejen požadavky na dostatečnou tuhost, ale bylo zároveň i univerzální. V úvodu práce je proveden obecný rozbor a popis jednotlivých motorů. Dále jsou navrženy varianty konstrukčního řešení experimentálního zařízení. Následuje návrh a výpočet hydraulického a pneumatického obvodu, včetně specifikace prvků. Dle návrhu byla provedena realizace experimentálního zařízení a ověření jeho funkčnosti. V závěru práce je zpracována metodika měření a provedeno měření vybraných typů motorů.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MEJZLÍK, J. *Testing Equipment of Pneumatic Motors: Master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2016, 60 p. Thesis head: Fojtášek, K.

In terms of my thesis I dealt with the design of experimental device for measuring static and dynamic characteristics of air motors working with elastic members. The group of these motors includes diaphragm motors, bellows motors and fluid muscles. Mentioned types of motors are very different in their design and function. That must be taken into account in the design of experimental equipment to meet both the requirements for sufficient strength, but it was also the universal. The introduction is made a general analysis and description of the individual motors. Furthermore, the proposed construction solution experimental device. Following the calculation of hydraulic and pneumatic circuit, including elements of the specification. According to the proposal carried out an experimental device implementation and verification of its functionality. In the end, there is a methodology to measure and made measurements of selected types of motors.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Kamilovi Fojtáškoví, Ph.D. za rady, podněty a připomínky v průběhu zpracování této diplomové práce.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	- 9 -
1 Úvod.....	- 10 -
2 Současný stav.....	- 11 -
3 Vlastnosti stlačeného vzduchu.....	- 14 -
3.1 Tlak.....	- 14 -
3.2 Obecná rovnice stavu plynů.....	- 15 -
3.3 Průtok stlačeného vzduchu.....	- 15 -
3.4 Jednotky pro vyjádření průtoku vzduchu.....	- 16 -
4 Základní typy pneumatických motorů s elastickými prvky.....	- 16 -
4.1 Měchové motory.....	- 17 -
4.2 Membránové motory.....	- 18 -
4.3 Pneumatické svaly.....	- 19 -
5 Konstrukční provedení zkušebního zařízení.....	- 20 -
5.1 Varianta 1.....	- 20 -
5.2 Varianta 2.....	- 21 -
6 Hodnotová analýza.....	- 22 -
6.1 Vyhodnocení analýzy.....	- 26 -
7 Měřicí zařízení – varianta č. 1.....	- 26 -
7.1 Konstrukce.....	- 26 -
7.2 Pevnostní analýza.....	- 27 -
7.3 Realizace pohybu.....	- 29 -

7.4	Zatěžovací hydromotor a volba agregátu	- 29 -
7.4.1	Výpočet hydromotoru	- 30 -
7.4.2	Výpočet hydrogenerátoru.....	- 32 -
8	Senzorová zařízení	- 34 -
8.1	Siloměr LPCH 25000	- 34 -
8.2	Potenciometr.....	- 35 -
8.3	Měřicí karta MF634.....	- 36 -
8.4	Snímač tlaku	- 37 -
8.5	Regulátor tlaku	- 38 -
8.6	Snímač tlaku	- 39 -
9	Měření statických a dynamických charakteristik.....	- 40 -
9.1	Ověření funkce navrženého zařízení.....	- 42 -
	Membránový motor.....	- 43 -
	Měchový motor	- 44 -
9.2	Metodika měření.....	- 45 -
9.3	Vyhodnocení měření.....	- 47 -
10	Závěr	- 51 -
	Literatura.....	- 53 -
	Přílohy	- 55 -

Seznam použitých značek a symbolů

F	síla	[N]
I	proud	[A]
M	moment	[Nm]
Q	průtok	[m ³ /s]
R	odpor	[Ω]
S	plocha	[m ²]
T	teplota	[°C]
U	napětí	[V]
V	objem	[m ³]
f	frekvence	[Hz]
l	délka	[mm]
m	hmotnost	[kg]
ṁ	hmotnostní průtok	[kg/s]
n	otáčky	[1/min]
p	tlak	[Pa]
t	čas	[s]
v	rychlost	[m/s]
μ	účinnost	[-]

1 Úvod

V rámci své diplomové práce se budu zabývat návrhem experimentálního zařízení, pro určení statických a dynamických vlastností pneumatických motorů s elastickými pracovními členy. Jedná se o motory, které obsahují určitou elastickou část a pro přenos energie je využito jako pracovní médium stlačený vzduch. Mezi tyto motory můžeme zařadit měchové motory, membránové motory a fluidní svaly.

V práci bude proveden přehled těchto motorů, ze kterého je patrné, že jednotlivé uvedené typy se od sebe značně liší, a to z hlediska konstrukce, ale také svou funkcí. Tento fakt musí být respektován při návrhu experimentálního zařízení, aby bylo dostatečně univerzální. Všechny zmíněné pneumatické motory jsou nízkozdvihové, vyznačují se však většími silovými účinky než klasické pneumatické motory. Je tedy nutné pro měření statických a především dynamických charakteristik zajistit odpovídající hmotnou zátěž s dostatečnou tuhostí.

Diplomová práce bude obsahovat konstrukční návrhy možnosti řešení experimentálního zařízení. Navržené varianty budou porovnány a vybrána jedna, která se bude následně realizovat. K této variantě bude navržen měřicí pneumatický, popřípadě hydraulický obvod, provedena specifikace použitých prvků a popsána metodika měření. Dále bude vytvořen program pro měření a vyhodnocení sledovaných veličin.

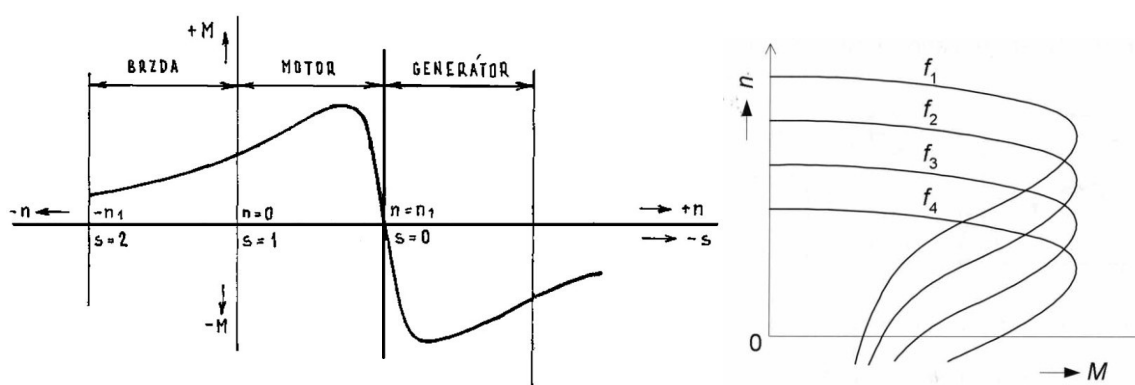
Je třeba zmínit, že již v minulosti na katedře proběhly určité pokusy o měření dynamických vlastností sledovaných motorů. Na těchto měřicích zařízení ovšem bylo možné měřit pouze statické charakteristiky, kdy při větším zatížení docházelo ke vzpírání vodících tyčí, a celková malá tuhost zařízení nezaručovala přesné výsledky naměřených hodnot. Zařízení také nebyla schopna pracovat s konstantním zatížením.

V závěru práce bude provedeno ověření funkčnosti navržené varianty řešení formou zkušebního měření. Naměřené charakteristiky budou porovnány s údaji uváděnými v katalogích výrobců.

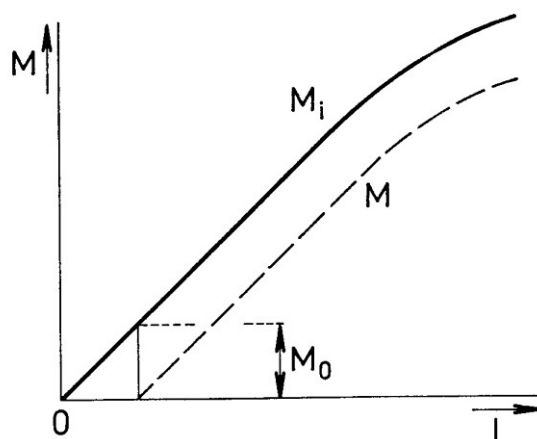
2 Současný stav

V dnešní době jsou v průmyslu nejčastěji využívané motory elektrické, hydraulické a pneumatické. Každý z výše uvedených typů se vyznačuje jiným druhem využití pro jednotlivé aplikace.

U elektrických motorů je široká nabídka motorů od nejmenších výkonů až po megawattové výkony elektromotorů. Elektromotory mohou být stejnosměrné (komutátorové, bezkomutátorové, krokové) řízené nejčastěji pulzní šířkovou modulací, a střídavé neboli indukční (synchronní, asynchronní) řízené frekvenčním měničem. Tyto motory pracují s velmi vysokou účinností a většinou mají tvrdou momentovou charakteristiku Obr. 2.1 a Obr. 2.2. Všechny elektrické motory jsou z vlastního principu rotační a k přímočarému pohybu dochází pomocí mechanických převodníků (závitová tyč atd.). [1]

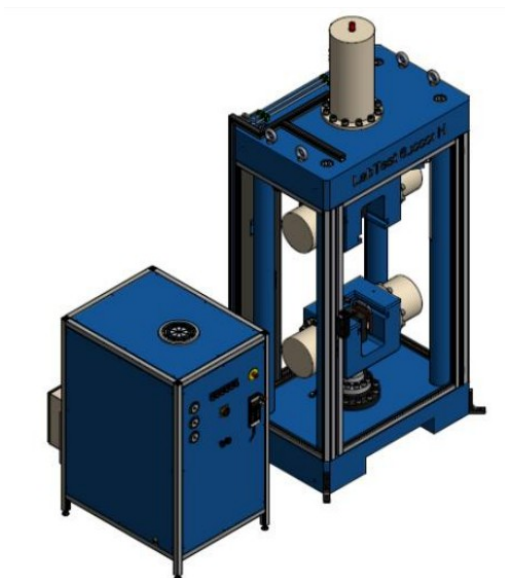


Obr. 2.1 Momentová charakteristika asynchronního stroje [2]

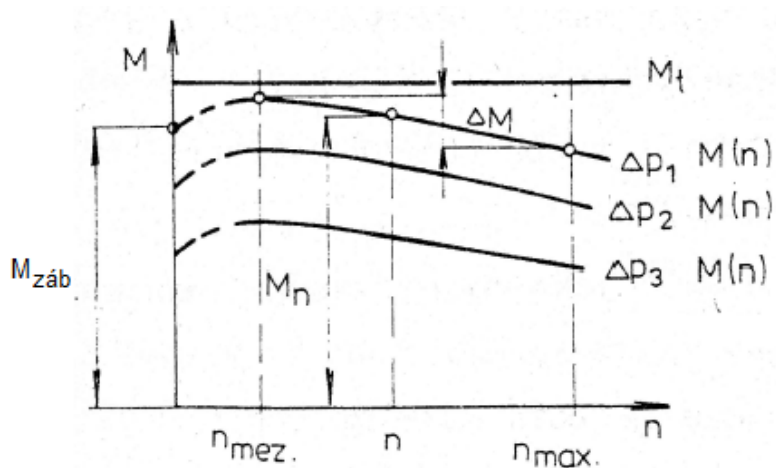


Obr. 2.2 Momentová charakteristika stejnosměrného motoru s cizím buzením [2]

U hydraulických pohonů se vyskytují kromě rotačních hydromotorů také přímočaré motory, kde je stlačená kapalina napouštěna do válců, kde rozdíl tlaků na pístu způsobí posouvání pístů a pístnice. Rychlost posunu je závislá na velikosti tlakového rozdílu. Hydraulické systémy mají řadu výhod, mezi něž patří velké silové účinky, při relativně malém zastavěném prostoru. Oblasti, kde jsou hydraulické systémy využívány, jsou zkušební stroje pro zkoušky výrobků v tahu, tlaku, smyku a ohybu. Touto problematikou se např. zabývá firma LaborTech, kde u zkušebního stroje řady LaborTest H. 2 Obr. 2.3 je hydraulicky vyvozována trhací síla až 5000 kN. Teoretická i skutečná momentová charakteristika hydromotru je uvedena na Obr. 2.4.

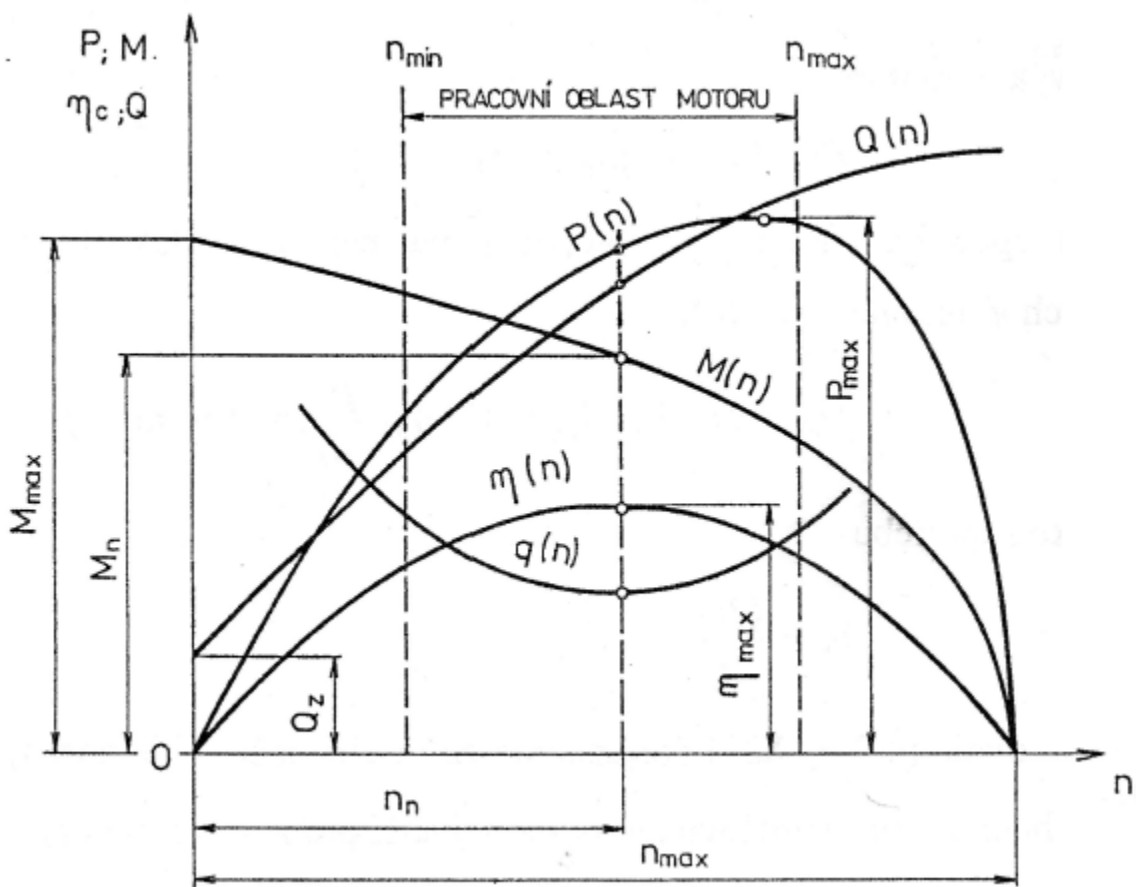


Obr. 2.3 Zkušební stroj LaborTest řady H.2 [3]



Obr. 2.4 Teoretická a skutečná momentová charakteristika hydromotru [4]

Pneumatické motory z hlediska konstrukce a funkce využívají podobných principů jako motory hydraulické. Pracovním médiem není kapalina, ale vzdušina, obvykle stlačený vzduch. Jeho fyzikální vlastnosti mají vliv na výsledné charakteristiky. Maximální pracovní tlak je výrazně nižší než u hydraulických systémů a nabývá hodnot do 1 MPa, což má za následek podstatně nižší výstupní síly. Přímočaré pneumatické motory nacházejí uplatnění především při manipulaci, ve výrobních linkách v různých oblastech průmyslu. Rotační pneumatické motory se pro své malé rozměry a hmotnost velmi často využívají jako pohon ručního nářadí. Komplexní charakteristika pneumatických rotačních motorů je uvedena na Obr. 2.5. Výhodou pneumatických motorů je čistota provozu, možnosti pracovat v prostředí s nebezpečím výbuchu a vysoká rychlost pracovních pohybů.



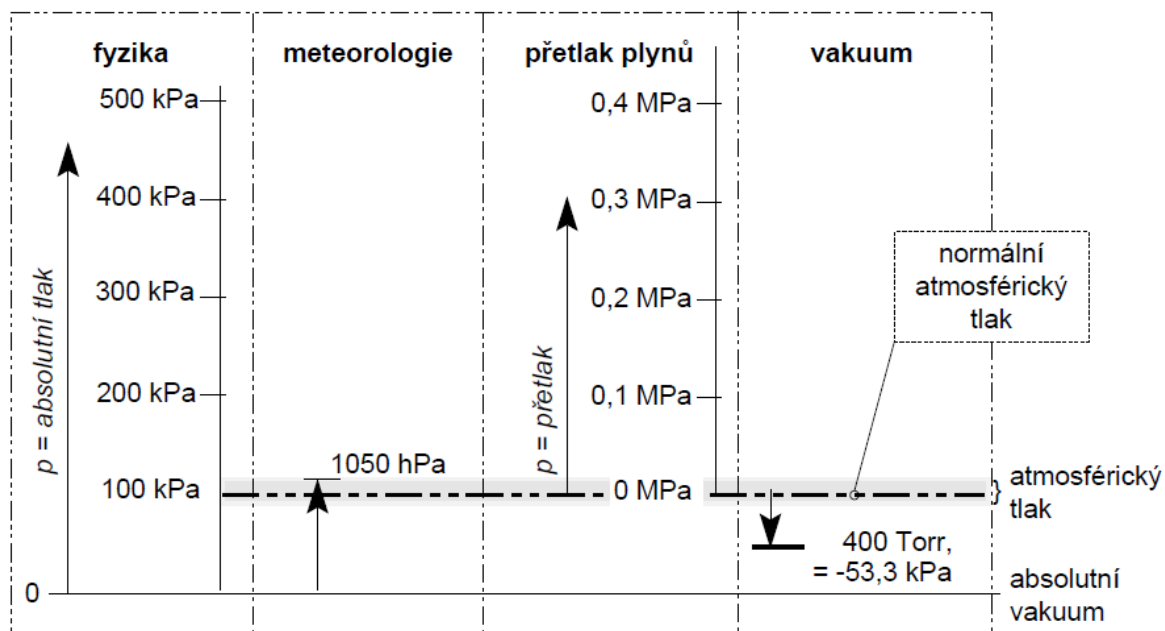
Obr. 2.5 Komplexní charakteristika pneumatických motorů [17]

3 Vlastnosti stlačeného vzduchu

3.1 Tlak

Zeměkoule je obklopena vrstvou vzduchu, tzv. atmosférou. Tlak vzduchu se mění s nadmořskou výškou podle meteorologických podmínek (tlaková výše, tlaková níže). Atmosférický tlak je dán hmotností vzduchu, kterou působí na zemský povrch. Na hladině moře je atmosférický tlak $p = 101\,325\text{ Pa}$. Až do nadmořské výšky 2 000 m klesá atmosférický tlak přibližně o 1 % na každých 100 m výšky. Na vrcholu hory Mount Everest (8 848 m) je atmosférický tlak přibližně $p = 33\,000\text{ Pa}$. Ve výšce 1 000 km je atmosférický tlak téměř roven nule $p = 0,0\text{ Pa}$.

Jako absolutní tlak p_{abs} označujeme stav, kdy se jedná o údaj vztažený k hranici absolutního vakua. Vakuum, nebo také podtlak (tlak pod úrovní atmosférického tlaku) se využívá v tzv. vakuové technice, např. pro manipulaci s díly, při výrobě svítidel, termosek a v řadě dalších aplikací. Na Obr. 3.1 jsou znázorněny různé obory a jednotky Tab. 3.1 používané pro měření tlaku, které vychází z normálního atmosférického tlaku vzduchu $p = 101\,325\text{ Pa}$ (0,101325 MPa). V praxi se jako referenční tlak používá hodnota $p = 0,1\text{ MPa}$.



Obr. 3.1 Rozdělení tlaků [5]

Tab. 3.1 Tlakové veličiny a jejich přepočít [5]

	název jednotky	značka	převod jednotek
nové jednotky tlaku	Pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m ²
	megapascal	MPa	1 MPa = 10 ⁶ Pa = 10 bar
	kilopascal	kPa	1 kPa = 1 000 Pa = 10 mbar
	hektopascal	hPa	1 hPa = 100 Pa = 1 mbar
staré jednotky tlaku	bar	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa = 0,1 MPa
	milibar	mbar	1 mbar = 10 ⁻³ bar = 100 Pa
	kilopond na čtverečný centimetr	kp/cm ²	1 kp/cm ² = 98 066 Pa = 0,981 bar
	metr vodního sloupce	m H ₂ O (m v.s.)	1 m H ₂ O = 98 066 Pa = 0,981 bar
	technická atmosféra	at	1 at = 98 066 Pa = 0,981 bar
	fyzikální atmosféra	atm	1 atm = 101 325 Pa
	Torr (mm rtuťového sloupce)	Torr (mm Hg)	1 Torr = 133,3224 Pa (1 bar = 750 Torr)
anglosaské jednotky tlaku	libra na čtverečný palec	p.s.i. (lb./sq. in.)	1 p.s.i. = 6 894,74 Pa (1 bar = 14,5 p.s.i.)
	libra na čtverečnou stopu	lb./sq. ft.	1 lb./sq. Ft. = 47,8802 Pa

3.2 Obecná rovnice stavu plynů

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (3.1)$$

Výpočet podle této rovnice bere v úvahu změny teploty a je teoretickým základem pro konstrukci a výběr pneumatických zařízení. Všechny rovnice stavu plynů uvažují s objemem v normálních krychlových metrech (m_n^3), který má hmotnost 1,293 kg při teplotě 0°C.

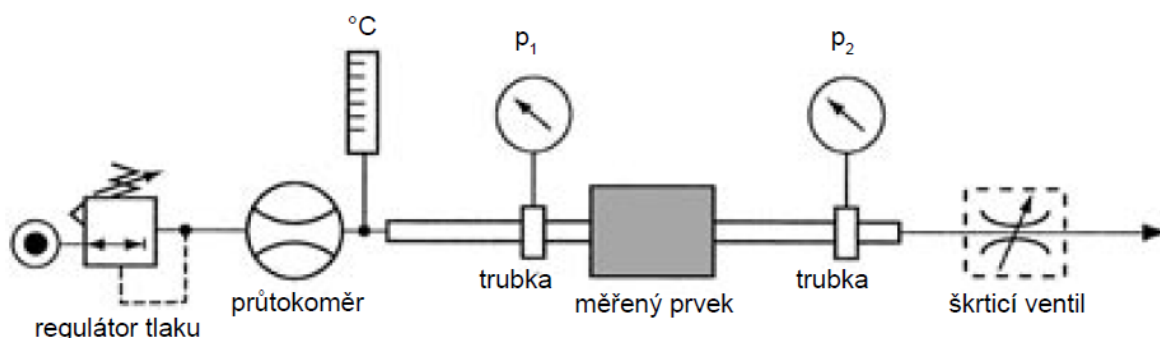
3.3 Průtok stlačeného vzduchu

Průtok je, po tlaku vzduchu, druhou veličinou důležitou k určení velikosti pneumatických prvků. Je to objem vzduchu, který proteče průřezem daného prvku za jednotku času. Průtok se uvádí v l/min , l/s , m^3/h nebo v m^3/s .

3.4 Jednotky pro vyjádření průtoku vzduchu

Normální průtok Q_n (ISO 6358). Firma SMC udává průtok jako „normální průtok Q_n “ podle normy ISO 6358, který se udává v l_n/min . Tím je odpovídající objem vzduchu s atmosférickým tlakem při teplotě $20\text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 65 %.

Normální průtok Q_n je definován jako: objem vzduchu, který proteče měřeným prvkem Obr. 3.2, kdy tlak vzduchu na vstupu do prvku je $p_1 = 0,6\text{ MPa}$ a tlak na výstupu z prvku je $p_2 = 0,5\text{ MPa}$. Na výstupu potrubí je škrtecí ventil, kterým se nastaví požadovaný tlakový spád $\Delta p = p_1 - p_2 = 0,6\text{ MPa} - 0,5\text{ MPa} = 0,1\text{ MPa}$.



Obr. 3.2 Měření průtoku vzduchu měřicím prvem [5]

Trubky měřicí trati na vstupu a na výstupu mají přesně stanovené délky a průměry. Je-li teplota měřeného média vyšší nebo nižší, než normou předepsaných $20\text{ }^\circ\text{C}$, je nutné změřený průtok násobit koeficientem pro příslušnou teplotu. Opravné koeficienty jsou uvedeny v Tab. 3.2.

Tab. 3.2 Koeficienty pro přepočet na jinou teplotu

Teplota média [$^\circ\text{C}$]	-20	-10	0	10	30	40	50	60
Koeficient	1,08	1,06	1,04	1,02	0,98	0,96	0,95	0,94

4 Základní typy pneumatických motorů s elastickými prvky

Jak již bylo řečeno, navrhované experimentální zařízení bude sloužit pro měření statických a dynamických vlastností pneumatických motorů s elastickými pracovními členy. Elastický pracovní člen (měch, membrána) je obvykle pryžový a při práci motoru dochází ke kontaktu dvou pružných prostředí (pryž – stlačený vzduch). Jednotlivé typy

motorů, které patří do této skupiny, se od sebe navzájem odlišují, a to jak z hlediska konstrukce, tak i funkce.

4.1 Měchové motory

Jsou to jednočinné pneumatické lineární motory, které jsou vyrobeny ze dvou kovových desek a pružné gumy, která je vyztužená. Bývají axiálně symetrické, zpětný chod motoru je zajištěn zatížením břemene a koncová poloha je zajištěna mechanickými dorazy. Na rozdíl od ostatních pneumatických motorů nejsou měchové motory vybaveny pohyblivými kovovými částmi (hřidel atd.), takže nedochází ke tření, a tím je zajištěn plynulý chod motoru už od nízkých rychlostí posunu. To má také výhodu v možnosti vzájemného naklopení přírub až o 30° oproti klasickým pneumatickým motorům, kde je zapotřebí dokonalého vetknutí vedení. Díky absenci pohyblivých částí má měchový motor vysokou schopnost tlumení vibrací a nežádoucího chvění. Toho je využíváno jak v mobilních aplikacích, tak například v laboratořích, kdy je nutné tlumení u laboratorních stolů od vnějšího chvění.

Měchové motory Obr. 4.1 se mohou skládat na sebe (až třikrát) Tab. 4.1, a tím značně zvýšit operační zdvih. Ke kontaktu může dojít pouze v kovových přírubách, které jsou k tomu určené. Naopak na elastických částech je třeba zabránit kontaktu s jinými předměty, protože zde dochází k pracovnímu nárůstu nebo zmenšení pracovního prostoru. Měchové motory jsou určeny k malým zdvihům o relativně nízkém tlaku, ale generují velké silové účinky. Jsou jednoduché konstrukce bez nároků na údržbu s možností práce v prašném prostředí.

Tab. 4.1 Technické parametry měchových motorů firmy Aventics [6]

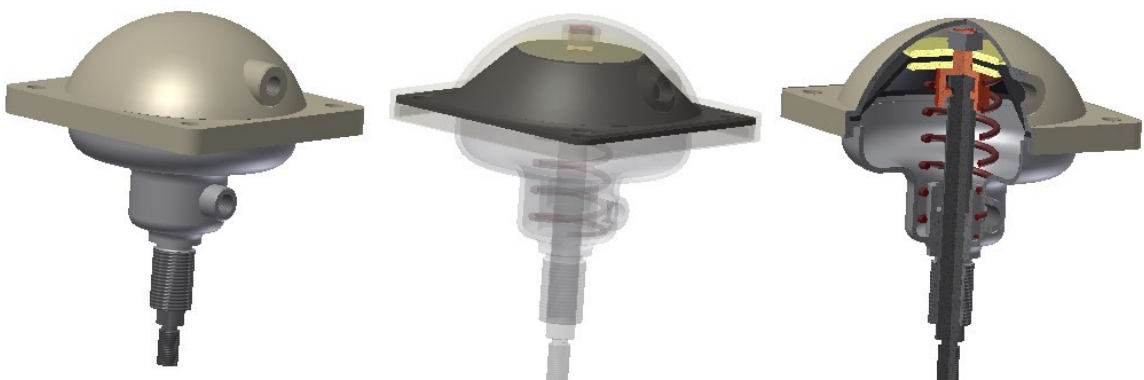
Parametry		Provedení		
		Jednodílný	Dvoudílný	Trojdílný
Minimální zdvih	[mm]	50 ÷ 155	70 ÷ 700	110 ÷ 395
Pracovní tlak	[MPa]	0 ÷ 0,8	0 ÷ 0,6 ÷ 0,8	0 ÷ 0,8
Průměr krytu	[mm]	90 ÷ 287	90 ÷ 420	228 ÷ 287
Generovaná síla	[kN]	5,5 ÷ 50	2,1 ÷ 197	17 ÷ 52
Úhel naklopení	[°]	10 ÷ 20	15 ÷ 25	15 ÷ 30
Hmotnost	[kg]	0,9 ÷ 5,9	1,1 ÷ 28,5	5,9 ÷ 8
Provozní teplota média	[°C]	-40 ÷ 70	-40 ÷ 70	-40 ÷ 70



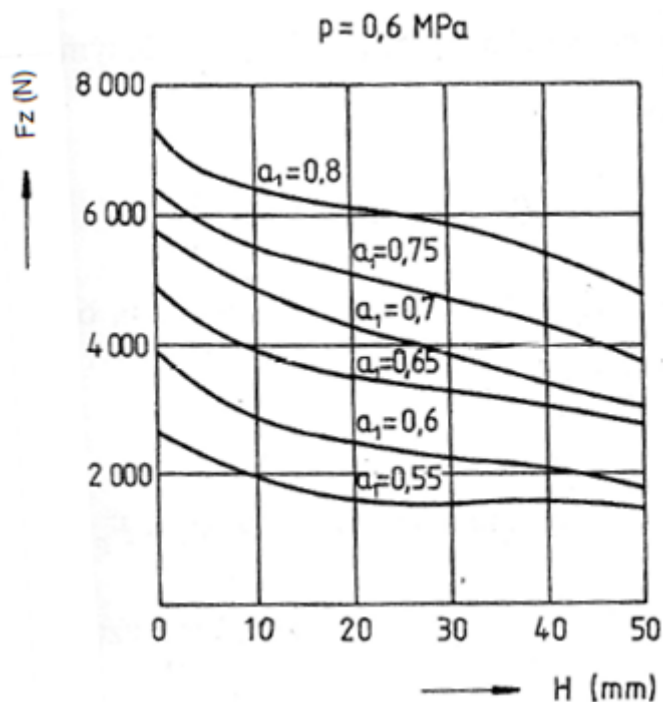
Obr. 4.1 Měchový jednodílný motor [7]

4.2 Membránové motory

Jsou to lineární pneumatické motory s elastickými prvky, pracující na principu rozpínání vzduchu, který působí na membránu, na kterou je připevněna pístnice. Pracují s relativně malými zdvihy a velkými silami vzhledem ke konstrukční velikosti Obr. 4.3. Vyrábějí se buď jako jednočinné, kdy je motor na jedné straně vybaven silnou pružinou Obr. 4.2, nebo jako dvojčinné. Membrána je vyráběna z pryže vyztuženou textilií, upevněnou mezi dvěma polovinami kovového tělesa. Membrány jsou buď ploché, kde ale dochází při větším zdvihu k velké změně efektivní plochy, nebo jako tvarované (zvlněné). Zdvih zvlněných membrán je přibližně dvojnásobný oproti klasickým plochým membránám.



Obr. 4.2 Membránový jednočinný motor [8]



Obr. 4.3 Závislost síly membránového motoru na zdvihu [17]

Tab. 4.2 Základní parametry membránových motorů [8]

Parametry		Provedení	
		Jednočinný	Dvojčinný
Provozní tlak	[MPa]	0,2 ÷ 0,8	
Teplota média	[°C]	-20 ÷ 70	
Zdvih	[mm]	40 ÷ 100	
Průměr pístu	[mm]	50 ÷ 250	40 ÷ 250
Síla	[kN]	1,6 ÷ 25	2,8 ÷ 25
Síla na pružinu	[kN]	0,13 ÷ 2,75	–
Hmotnost	[kg]	1 ÷ 22	2,6 ÷ 21,6

4.3 Pneumatické svaly

První zmínky o pneumatickém umělém svaly jsou z 30. let 20. století od vědce S. Garsaiva, kdy se jednalo o pryžovou trubku na několika místech omotanou ocelovými kroužky. Princip pneumatického svaly je relativně jednoduchý, kdy do svaly přivedeme tlakový vzduch, a při expanzi plynu dochází k roztažení elastických částí svaly, který se zároveň začíná zkracovat. Při změně délky koná sval práci. Jeden z nejčastěji používaných pneumatických svalů, McKibbenův Obr. 4.4, se skládá z pryžové trubice vzájemně opletené vlákny polyamidu, které tvoří pantografické mechanismy. Díky tomuto překřížení

dochází při změně tlaku ve svalu ke zvětšení nebo zmenšení průměru svalů a tím i ke změně délky. Způsob opletení hadice má velký vliv na smyková tření ve svalů, které ovlivňuje hysterezi svalů. Příkladem může být Kokoljův pneumatický sval, který na rozdíl od McKibbenova pneumatického svalů má v místě překřížení opletových vláken pevné spoje.

Změnou stylu opletu dochází ke změně expanze, kdy při radiálním nebo axiálním orientovaném opletu je omezena svalová deformace, např. do koule nebo do sféry.

Všechny druhy pneumatických svalů jsou vybaveny koncovkami buď z oceli, nebo slitiny hliníku, které slouží k uchycení svalů k poháněnému mechanismu, dále s vedením a upevnění samotného vaku. [9]



Obr. 4.4 Opletení McKibbenova svalů [9]

5 Konstrukční provedení zkušebního zařízení

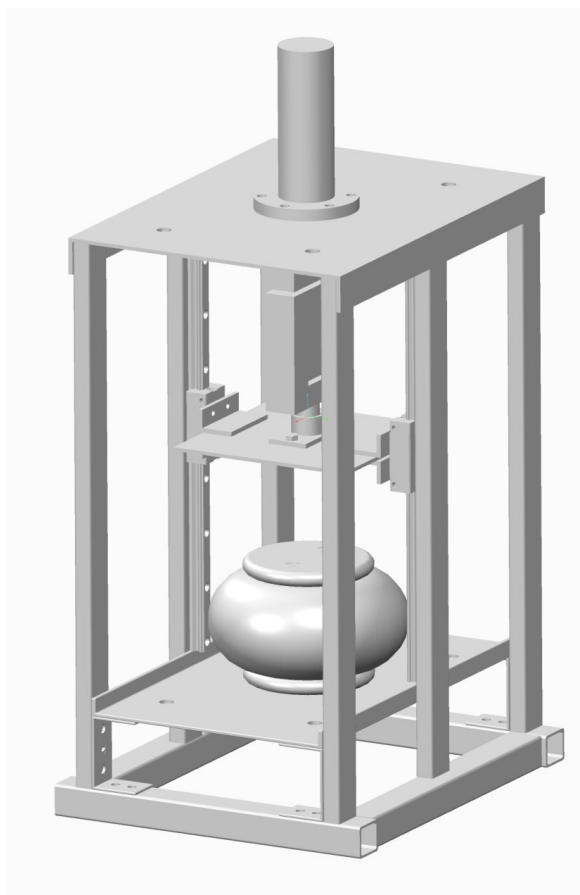
Cílem této diplomové práce, bylo navrhnout univerzální měřicí zkušební zařízení pro měření statických a dynamických vlastností pneumatických motorů s elastickými pracovními členy, vypracovat řídicí program a metodiky měření.

Při konstrukčním návrhu se vycházelo z poznatků získaných na starém měřicím zařízení, určeném jen pro měření statických charakteristik, který měl řadu nedostatků, např. malou tuhost či nedostačující zatěžující motor, který nahrazoval hmotnou zátěž. Při návrhu bylo bráno v potaz také to, aby měřicí zařízení bylo univerzální a bylo schopno pracovat s více druhy testovaných motorů. Pro prvotní testování byly vybrány membránové a měchové motory, ke kterým se v budoucnu přidají fluidní svaly a ostatní klasické pneumatické motory.

5.1 Varianta 1

První konstrukční návrh řešení zkušebního zařízení Obr. 5.1, je uvažován jako šroubovaná případně svařovaná konstrukce, kdy hlavní silové účinky na zkoušený

pneumatický motor budou působit ve svislé ose. Hlavní rám je z ocelových trubek obdélníkového profilu. Na horní část rámu je připevněna montážní deska, na kterou je upevněn šrouby hydraulický válec, jakožto hlavní generátor silových působení na zkoušené prvky. Na spodní desce je přimontován testovaný pneumatický motor, ten je z horní strany připevněn na středovou desku, která je připevněna ke dvěma vedením, která zajišťují plynulý pohyb a omezují vychýlení způsobené zatížením. Ke středové desce je ze shora připevněn siloměr, pro měření silového účinku, ten je dále připevněn k samotné pístnici hydraulického válce. Spodní plošina je variabilně nastavitelná pro několik výšek dle druhu testovaného motoru, kdy pro větší měchové motory je výhodnější umístění v dolní poloze a ušetřený prostor slouží jak pro zástavbu testovaného motoru, tak pro měřicí zařízení. V opačném případě, kdy je testován membránový motor, který má většinu konstrukčních částí pod montážní deskou je tato deska připevněna v horní poloze.

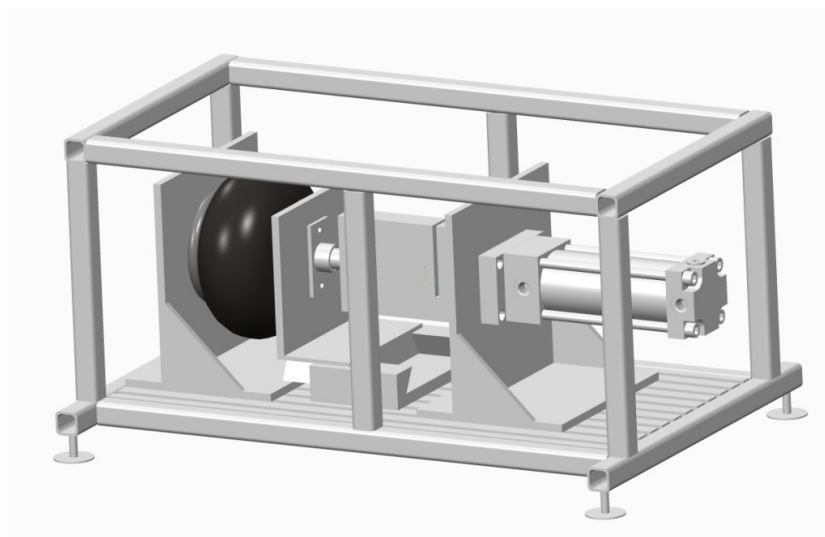


Obr. 5.1 Varianta č. 1 zkušebního stroje

5.2 Varianta 2

Druhá varianta Obr. 5.2 má svařovanou rámovou konstrukci, která má ve spodní desce drážky tvaru opačného T. To umožňuje rychlé a jednoduché montování pracovních

částí. V tomto případě jsou zde namontovány tři části, na kterých jsou upevněny pneumotory, a pracovní středová deska. Prvky jsou zde upevněny tak, že hlavní silové účinky působí v horizontální rovině. To může mít za následek vychýlení krajních prvků, které jsou upevněny pouze z jedné strany, vlivem gravitačních sil. Celá sestava je svařovaná, což neumožňuje případnou variabilitu testovaných motorů a celé zařízení, krom částí umístěných na drážkované desce, je nerozebíratelné, a tudíž pro případnou změnu pracoviště to generuje nemálo problémů, od rozměrových po hmotnostní.



Obr. 5.2 Varianta č. 2 zkušebního stroje

6 Hodnotová analýza

Hodnotící kritéria

Pro hodnotovou analýzu bylo vybráno pět hodnotících kritérií, pro které bude určena jejich hodnotící váha.

Tab. 6.1 Hodnotící kritéria [10]

označení kritéria	kritérium	charakteristika kritéria
k1	hmotnost	celková hmotnost
k2	druh motoru	tvrdost charakteristiky
k3	výroba	složitost sestavní a mobilita
k4	rozložení hmoty	pracovní osa
k5	cena	cena komponent a montáže

Hodnoty kritérií

Hodnoty kritérií jsou klíčovou zásadou pro aplikaci hodnotové analýzy. Byla zvolena následující stupnice hodnocení: Tab. 6.2

Tab. 6.2 Hodnoty kritérií [10]

úroveň	hodnota
Vysoká	6
Dobrá	5
Průměrná	4
Nízká	3
Nevyhovující	2
Nepříznivý stav	1

Určení významnosti metodou trojúhelníkových párů

Každé kritérium bylo porovnáno s ostatními a bylo určeno, zda má větší či menší váhu. Dle toho byl vypočítán počet voleb „v“. Toto porovnání bylo provedeno ve dvou zhotoveních dvěma nezávislými lidmi, aby byla zachována objektivita při hodnocení.

Tab. 6.3 Metoda párových kritérií – první porovnání [10]

Porovnávané páry kritérií				počet voleb v
<i>k</i> 1	<i>k</i> 1	<i>k</i> 1	<i>k</i> 1	1,5
<i>k</i> 2	<i>k</i> 3	<i>k</i> 4	<i>k</i> 5	
	<i>k</i> 2	<i>k</i> 2	<i>k</i> 2	1,5
	<i>k</i> 3	<i>k</i> 4	<i>k</i> 5	
		<i>k</i> 3	<i>k</i> 3	3,5
		<i>k</i> 4	<i>k</i> 5	
			<i>k</i> 4	0,5
			<i>k</i> 5	3

Tab. 6.4 Metoda párových kritérií – druhé porovnání [10]

Porovnávané páry kritérií				počet voleb v
k1	k1	k1	k1	1,5
k2	k3	k4	k5	
	k2	k2	k2	0,5
	k3	k4	k5	
		k3	k3	2
		k4	k5	
			k4	2,5
			k5	3,5

Významnost kritérií

Pro vypočtené volby „v“ byla zvolena významnost kritéria, kdy pro nejvyšší hodnotu volby je významnost nejvyšší s hodnotou 2, a pro ostatní kritéria je jejich významnost dopočítaná pomocí lineární křivky, kdy jsou známy dva okrajové body, nejvyšší významnost kritérium s nejvyšším počtem voleb, a nejnižší významnost kritérium s nejnižším počtem voleb.

Tab. 6.5 Významnost kritérií [10]

Významnost kritérií	
Nejvyšší	2
Nejnižší	1

Významnosti jednotlivých analýz

Tab. 6.6 Váha významnosti jednotlivých kritérií [10]

	průměr	váha významnosti	pořadí
<i>k1</i>	1,5	1,6	3 – 4
<i>k2</i>	1	1,3	5
<i>k3</i>	2,25	1,75	2
<i>k4</i>	1,5	1,6	3 – 4
<i>k5</i>	3,25	2	1

Hodnocení jednotlivých variant

Jednotlivé varianty byly hodnoceny pomocí úrovně kritéria vynásobeným váhou významnosti. Dílčí hodnoty pro jednotlivé varianty byly sečteny a porovnány mezi sebou, kdy vyšší hodnota znamená výhodnější variantu.

Tab. 6.7 Porovnání jednotlivých variant

	Varianta 1	Varianta 2
K1	4	3
	6,4	4,8
K2	6	4
	7,8	5,2
K3	6	2
	10,5	3,5
K4	4	3
	6,4	4,8
K5	4	4
	8	8
výsledek	39,1	26,3

6.1 Vyhodnocení analýzy

Z analýzy lze vidět, že vítězná je první varianta. Rozhodujícím kritériem byla složitost sestavní konstrukce a její možná mobilita, kdy se ukázaly výhody sešroubované sestavy. Vítězná varianta bude dále zpracována a popsána níže.

7 Měřicí zařízení – varianta č. 1

Měřicí zařízení bylo konstruováno s velkým ohledem na mobilitu celého zařízení, tzn., že veškeré napojení konstrukčních částí jsou šroubová. Toto hledisko je důležitým faktorem pro případnou změnu jak silových zařízení (senzory), tak samotných zkoušených pneumatických motorů. Nevýhodou tohoto řešení je náchylnost k nesouososti a nedodržení kolmosti při sestavování. Zároveň je nutné šroubová spojení dotáhnout takovým momentem, aby k přenosu sil nedocházelo smykovým napětím mezi konstrukcí a šroubem, ale aby silový účinek byl přenášen třením mezi spojovanými prvky.

7.1 Konstrukce

Samotnou konstrukci Obr. 7.1 tvoří normalizované výrobky uzavřených profilů čtvercových a uzavřených profilů typu U. Základnu tvoří dvojice čtvercových profilů o velikosti 40 mm a tloušťce stěny 3 mm. Ty jsou pak upevněny ke dvěma profilům U opět o tloušťce 3 mm. Na tuto základnu je připevněna šestice čtvercových profilů, kdy rohové vzpěry mají tloušťku stěny 3 mm a středové 1,5 mm. K těmto vzpěrám je připevněna spodní i horní pracovní deska, obě s tloušťkou stěny 10 mm. Na spodní desce jsou připraveny otvory pro připevnění měchových motorů různých velikostí, tak i membránových motorů. Ze spodu jsou na desce navařeny dvě horizontální vzpěry, které slouží ke snížení deformace při zatížení. Na horní desce je umístěn hydromotor a upevněn pomocí šesti šroubů. Veškeré konstrukční části jsou k sobě přišroubovány pomocí otevřeného profilu L 50 vždy pomocí čtyř šroubů. Mezi dvěma svislými vzpěrami jsou dvě konzole pro připevnění senzoru polohy.

Tab. 7.1 Prvky použité pro konstrukci

Základní prvky rámu stroje			
Množství [ks]	Označení průřezu	Norma	Hmotnost [kg]
2	<i>TR 4HR 40x3 – 480</i>	ČSN 42 6925.1	3,2
2	<i>U 40x40x2 – 370</i>	ČSN 42 5570	1,3
4	<i>TR 4HR 40x3 – 730</i>	ČSN 42 6925.1	10,8
2	<i>TR 4HR 40x1,5 – 730</i>	ČSN 42 6925.1	2,6
26	<i>L 50x4</i>	ČSN 42 5541.1	0,9
1	<i>PLO 280x450x10</i>	ČSN 42 5522.01	10,4
1	<i>PLO 360x450x10</i>	ČSN 42 5522.01	12,5

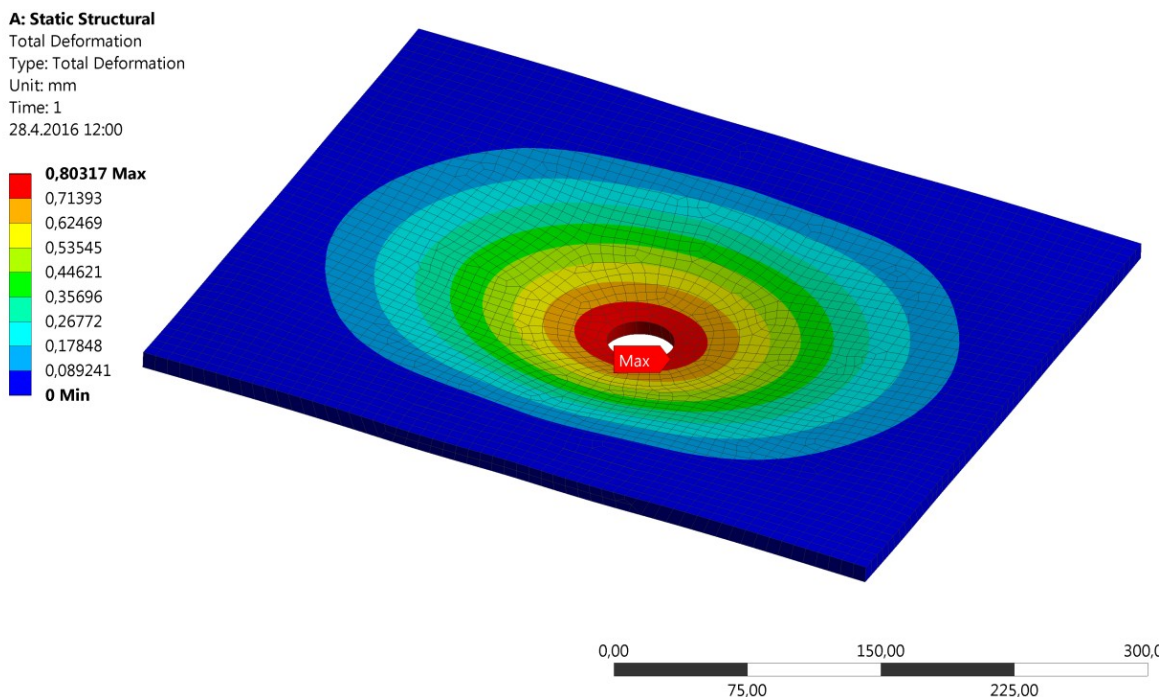


Obr. 7.1 Šroubová konstrukce zkušebního zařízení

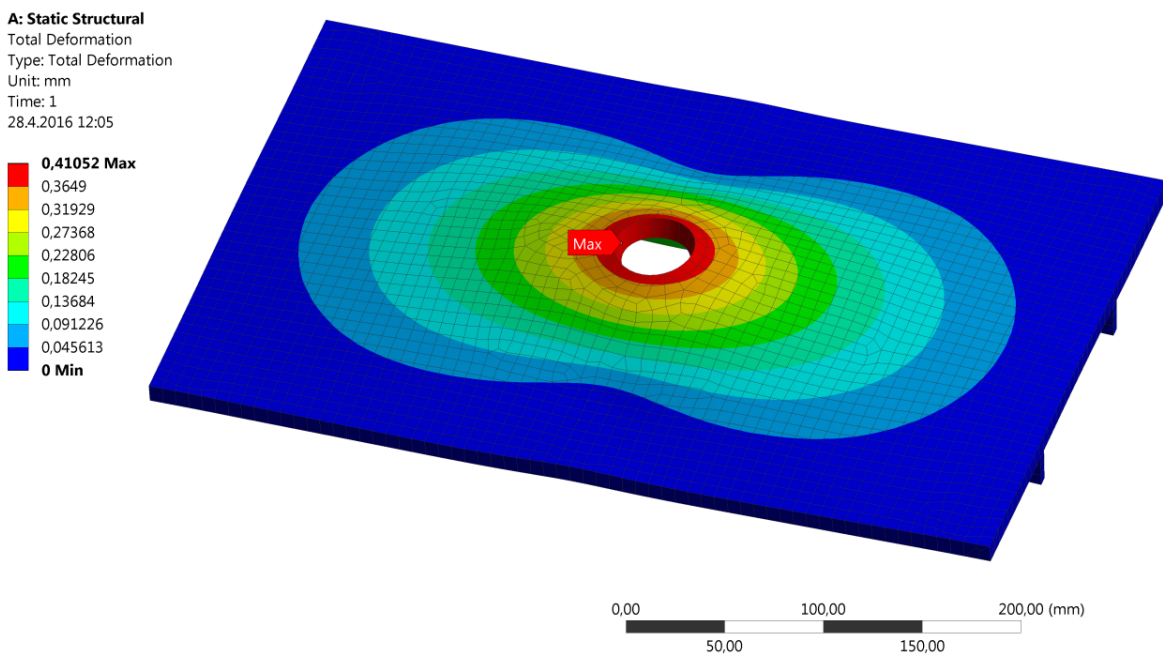
7.2 Pevnostní analýza

Zda byla konstrukce zařízení správně navržena, byla pevnostně zkontrolována na statické zatížení v programu ANSYS. Kontrola napětí a deformace byla zaměřena na horní a dolní desku, na které jsou upevněny testované a zátěžové motory Obr. 7.2 a Obr. 7.3.

Analýza byla nastavena pro zatížení 20000 N, působící v ose zařízení, kde působí také zatěžující motor.



Obr. 7.2 Deformace horní desky

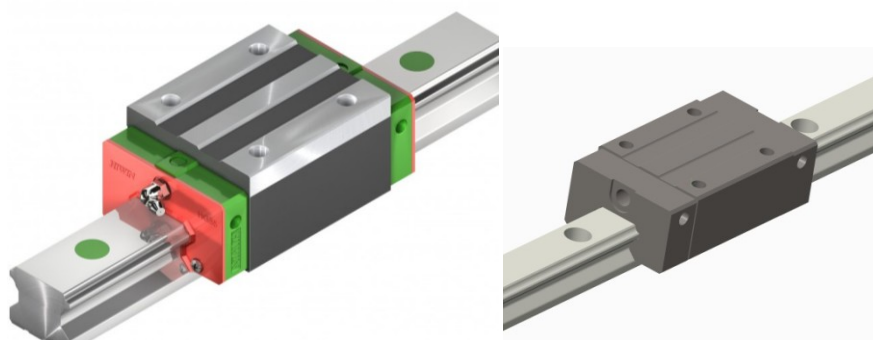


Obr. 7.3 Deformace dolní desky

Jak je vidět z výsledných obrázků, deformace v nejkritičtějších místech nepřekročí hodnotu 1 mm , což lze považovat za dostačující a na samotné měření tyto minimální hodnoty nebudou mít relevantní vliv.

7.3 Realizace pohybu

Aby zařízení bylo možné považovat za plně funkční, bylo zapotřebí zajistit, aby při zatěžování konstrukce při měření, kdy měřený a zatěžující motor působí proti sobě, nedocházelo ke tření v místech, kde se nachází středová deska s připevněným pohybovým senzorem. Toho je docíleno použitím lineárního kuličkového vedení Obr. 7.4. Toto vedení je rozděleno na dvě části, kolejnice typu R, která má pomocné průchozí díry s roztečí 60 mm pro snadné připevnění ke konstrukci pomocí imbusových šroubů M6. Délka kolejnice je 500 mm , aby byl zajištěn dostatečný rozsah měřených motorů. Na kolejnici je kuličkové vedení QHH20 se čtyřmi oběžnými řadami. Vypadnutí kuliček z vedení zabraňuje ochranná lišta, zadržující kuličky v oběžné dráze. Toto vedení je připevněno na konstrukci na vnitřní straně středových konzol. Pomocí dvou úchytů je k vozíku připevněna i samotná středová deska.



Obr. 7.4 Lineární kuličkové vedení QHH20 s kolejnicí typu R [11]

7.4 Zatěžovací hydromotor a volba agregátu

Již v Kap. 5 bylo zmíněno, že u původního měřicího zařízení byla zajištěna dostatečná tuhost zatěžovacího (pneumatického měchového) motoru, který při měření nahrazuje hmotnou zátěž. Jako zdroj statického a dynamického zatížení bude sloužit hydromotor o malém zdvihu. Maximální pracovní zatížení je 20000 N a pracovní tlak přibližně 10 MPa .

Výpočet:

Tab. 7.2 Hodnoty pro výpočet HM

Zvolené a požadované hodnoty zařízení:			
Pracovní zatížení	F	20000	[N]
Pracovní tlak motoru	p	10000000	[Pa]
Účinnost hydromotoru	μ_m	0,95	[-]
Účinnost hydrogenerátoru	μ_g	0,91	[-]
Rychlost posuvu	v	0,1	[m/s]
Otáčky elektromotoru	n	1445	[1/min]

7.4.1 Výpočet hydromotoru

Pro zjištění minimálního průměru pístu vycházíme ze základní rovnice pro výpočet napětí, kdy známe zvolenou sílu F , potřebný tlak p , který je navýšen o účinnost hydromotoru μ_m .

$$S_1' = \frac{F}{p * \mu_m} = \frac{20000}{10000000 * 0,95} = 0,002105 \text{ m}^2 \quad (7.1)$$

$$\phi D' = \sqrt{\frac{4 * S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,0021}{\pi}} = 0,05177 \text{ m} = 51,77 \text{ mm} \quad (7.2)$$

Z vypočítaného předběžného průměru pístu válce byla vybrána nejbližší hodnota normalizovaného průměru pístů.

Volím průměr pístu válce $\phi D = 50 \text{ mm}$

Nyní pro zvolený průměr pístu je třeba znovu provést výpočet pro zjištění hodnoty tlaku p , který bude jiný vlivem rozdílu ploch vypočteného a zvoleného průměru pístu válce ϕD .

$$S_1 = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0,05^2}{4} = 0,001963 \text{ m}^2 \quad (7.3)$$

$$p = \frac{F}{S * \mu_m} = \frac{20000}{0,001963 * 0,95} = 10722017 \text{ Pa} \quad (7.4)$$

Pro vypočítaný tlak byl zvolen maximální tlak p_{max} , přibližně o 12% vyšší a bude nastaven na pojistném ventilu.

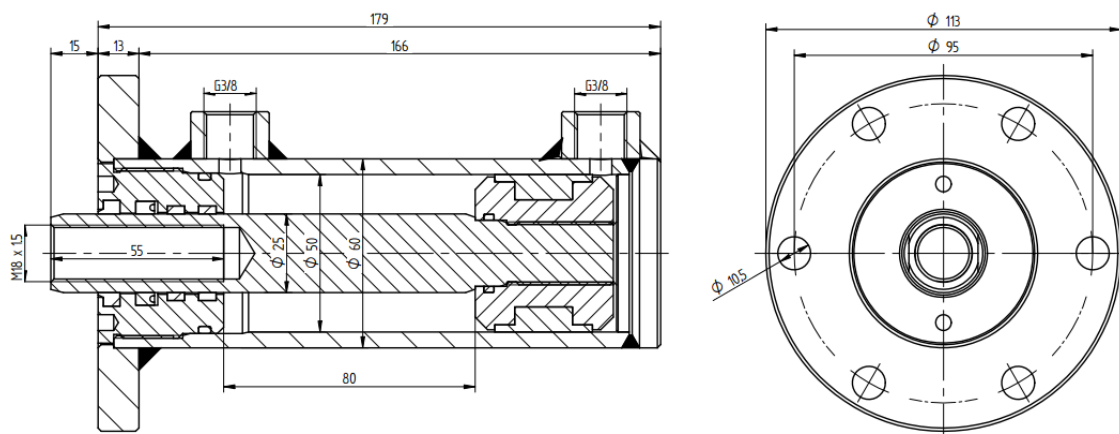
$$\text{Volím } p_{max} = 12 \text{ MPa}$$

Pro výpočet objemu motoru je třeba zvolit délku jeho zdvihu l , a pro vypočtené parametry najít vhodný model.

S ohledem na měřené pneumatické motory s elastickými pracovními členy, které se dají značit jako nízko zdvihové, volím zdvih pístu $l = 80 \text{ mm}$

$$V_m = \frac{\pi * D^2}{4} * l = \frac{\pi * 0,05^2}{4} * 0,08 = 157079 \text{ mm}^3 = 157 \text{ cm}^3 \quad (7.5)$$

Dle vypočtených parametrů byl zvolen hydromotor **HM1 50x25 – 80 PAG** Obr. 7.5 od firmy AVHB. Motor má poměr ploch $S_1/S_2 = 1.33$. HM je s přípojovací přírubou o průměru 113 mm pro šest šroubů, na roztečném průměru 95 mm . Velikost při vysunutém stavu je 274 mm a při zasunutém stavu 194 mm . K připojení k tlakovému systému slouží přípojky $G3/8"$. Celková váha HM je $3,5 \text{ kg}$.



Obr. 7.5 Hydromotor HM1 50x25 – 80 PAG [12]

7.4.2 Výpočet hydrogenerátoru

Pro výpočet hydrogenerátoru byla zvolena rychlost posuvu pístu HM $v = 0,1 \text{ m/s}$, dle této podmínky bude vypočítán průtok Q_g hydrogenerátoru HG, který je roven průtoku Q_m hydromotoru HM.

$$Q_g = Q_m = S_1 * v = 0,001963 * 0,1 = 0,0001963 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 11,78 \text{ dm}^3/\text{min} \quad (7.6)$$

Potřebná velikost V_g byla vypočtena pomocí průtoku Q_g a zvolených otáček elektromotoru.

$$V_g = \frac{Q_g}{n} = \frac{11,78 * 1000}{1445} = 8,15 \text{ cm}^3 \quad (7.7)$$

Na základě průtoku Q_g v HG a maximálního tlaku v obvodu byl vypočítán potřebný příkon elektromotoru P , který bude pohánět HG.

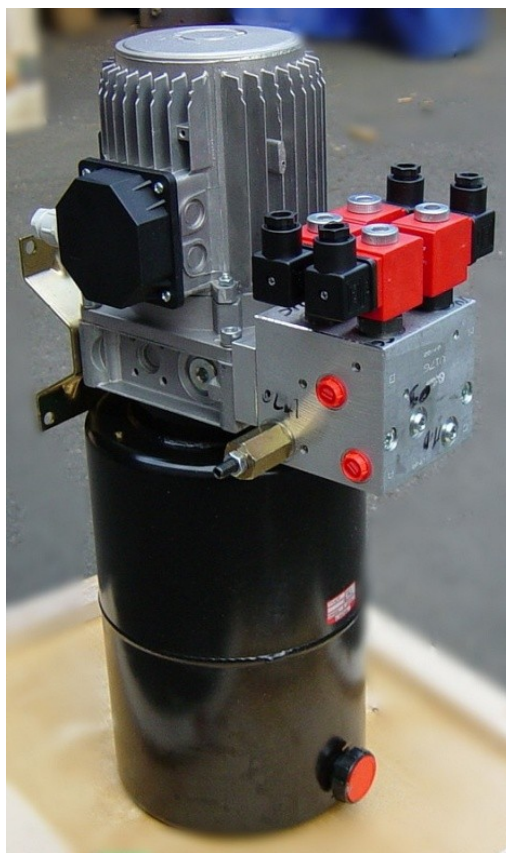
$$P = \frac{Q_g * p_{max}}{\mu_g} = \frac{11,78 * 12000000}{60000 * 0,91} = 2589,2 \text{ W} \quad (7.8)$$

Pracovní kapalinou je hydraulický olej OH – MH 46, který je uložen v nádrži poblíž hydrogenerátoru. Nádrž je dimenzovaná na třetinový průtok systémem a objemem kapaliny v hydromotoru HM.

$$V_n = 0,3 * Q_g + V_m = 0,3 * 11,78 + \frac{157}{1000} = 3,7 \text{ dm}^3 \quad (7.9)$$

Agregát je zvolen od firmy Hykom Obr. 7.6. Tento agregát v sobě zahrnuje nádrž o objemu 5 dm^3 , zubový HG s pracovním tlakem 12 MPa a průtokem $10,5 \text{ dm}^3/\text{min}$, výstupem jsou dvě přípojky G1/4". HG je poháněn třífázovým elektromotorem o výkonu 3 kW . Rozměry agregátu jsou $660 \times 215 \times 280 \text{ mm}$. Agregát sice nesplňuje podmínku vypočteného průtoku a rychlost posuvu klesne z původních $0,1 \text{ m/s}$ na $0,09 \text{ m/s}$, ale tento pokles je zanedbatelný a pro potřeby testovacího zařízení je rychlost vysouvání dostačující.

Tento kompaktní mini agregát s malými zástavbovými rozměry byl navržen a dimenzován s ohledem na umístění experimentálního zařízení. Do budoucna je uvažováno, že experimentální zařízení bude umístěno v laboratoři pneumatických mechanismů, ve které není k dispozici žádný zdroj tlakové kapaliny. V případě umístění zařízení do laboratoře hydrauliky, bude použit lokální agregát od firmy Parker



Obr. 7.6 Hydraulický miniagregát [13]

8 Senzorová zařízení

Aby bylo možné vyhodnotit měření na zkušebním zařízení, je potřeba, aby bylo vybaveno potřebnými měřicími prvky. Senzory mohou být analogové, kdy je měření kontinuální a měřená veličina je měřena přímo nebo digitální, diskrétní a měřená veličina je většinou nepřímo měřena a je pak převáděná přes A/D převodník na elektrický signál, který zaznamenává měřicí karta na řídicím PC.

8.1 Siloměr LPCH 25000

Pro měření silového účinku zatěžování testovaného motoru je použit nízkoprofilový diskový snímač LPCH Obr. 8.1. Jedná se o tenzometrický snímač určený pro měření tahových i tlakových sil. Aplikovat se dá jako váhy pro sila, násypky, zásobníky, váhy dopravníků, závěsné váhy, testovací zařízení, nízkoprofilové váhy. Jeho předností je kompaktní provedení a malá výška, snadná montáž a odolné provedení. V našem případě je vybrán typ LPCH 25000, který má nosnost až 25000 kg s bezpečným přetížením až 150% jmenovité hmotnosti. Tento snímač pracuje s pracovním napětím 5 – 15 V AC/DC s 4 - pinovým konektorem M12, který je dále napojen na měřicí kartu. Senzor je přimontován na polohovatelnou středovou desku pomocí 12. šroubů a je přímo napojen na pístnici hydromotoru.

Tab. 8.1 LPCH diskový snímač specifikace [14]

Technické parametry tenzometrického snímače LPCH 25000			
Jmenovitá nosnost	25 000 kg	Bezpečné přetížení	150 % jm. nosnosti
Výstupní signál	2 V ± 0,2 mV/V	Napájecí napětí	5 až 15 V AC/DC
Chyba opakovatelnosti	< 0,02 %	Materiál snímače	Ušlechtilá ocel
Rozsah pracovních teplot	−35 až 65 °C	Klasifikace krytí	IP67



Obr. 8.1 LPCH 25000 [14]

8.2 Potenciometr

Pro měření polohy byl vybrán lineární potenciometr MELPH 250 s měřicím rozsahem 250 mm Obr. 8.2. Senzor pracuje na principu změny pracovního odporu při posunutí jezdc. Výstupním signálem může být proud nebo napětí. Senzor je vyroben z hliníkového čtvercového profilu, na kterém z jedné strany je posuvný jezdec a na konci senzoru je standardní 4 – pinový konektor. Senzor se vyznačuje výborným teplotním rozsahem a opakovatelností měření.

Tab. 8.2 MLEPH 200 [15]

Technické parametry snímače polohy MELPH			
Měřicí rozsah	250 mm	Materiál snímače	Hliník
Chyba opakovatelnosti	< 0,01 mm	Rozsah pracovních teplot	-20 až 80 °C
Výstupní signál	4 – 20mA, 0 – 10V	Klasifikace krytí	IP 53
Napájecí napětí	15 – 30 V DC	Počet cyklů	100 mil.
Max. rychlost posunu	< 1,5 m/s		



Obr. 8.2 MELPH 250 [15]

8.3 Měřicí karta MF634

Tato multifunkční *O/I* karta od firmy HUMUSOFT Obr. 8.3, má 32 bitovou vnitřní strukturu pro zajištění maximálně možné propustnosti, kdy analogová část obsahuje 8 14.bitových *A/D* převodníků, kdy vzorkování probíhá zároveň a 8 14.bitových *D/A* převodníků se synchronizovanou aktualizací výstupu. Na digitální část je možno napojit 4 inkrementální senzory a 4 čítače/časovače pro měření impulzů, frekvencí, generování *PWM* (pulzní šířková modulace) atd. Čítače pracují s rozlišením 32 bitů s frekvencí 50 *MHz*. Tato měřicí karta je ovládaná přes program Matlab. Karta je vhodná pro měření stejnosměrného napětí, vibrací, přechodových jevů, monitorování a řízení procesů, simulací v reálném čase, měření polohy, servosystémů, atd.



Obr. 8.3 MF634 HUMUSOFT [16]

Tab. 8.3 Specifikace měřicí karty [16]

Technické specifikace			
Analogový vstup:		Analogový výstup:	
Kanály	8	Kanály	8
A/D převodník	14 bit	Výstupní rozsah	+ – 10 V
Vstupní rozsah	+ – 10 V	Výstupní proud	5 mA max
Vstupní odpor	1010 Ω	Doba ustálení	31 μs
Režim spouštění	Software, časovač, externě		
Digitální I/O		Časovač/čítač	
Vstupní kanály	8	Počet kanálů	4
výstupní kanály	8	rozlišení	32 bit, 20 ns
		mody	PWM, čítač, generátor pulzů
encoder vstup		Ostatní	
vstupní kanály	4	spotřeba energie	400mA (+3V), 700mA (+12V)
vstupy	A,B, index	pracovní teplota	0° – 50°C
vstupní frekvence	max 2,5 MHz	konektor	2xDB – 37 F
rozlišení	32 bit	rozhraní	PCI Express x1

8.4 Snímač tlaku

Pro snímání tlaku vzduchu v membránovém nebo měchovém motoru je použit tlakový snímač od firmy *SMC ISE 40-01-62* Obr. 8.4. Jedná se o digitální snímač s displejem, zobrazující aktuální hodnotu.



Obr. 8.4 Snímač tlaku SMC ISE 40-01-62L [19]

Tab. 8.4 Základní parametry talkového snímače

Pracovní rozsah	$-0,1 \div 1 \text{ MPa}$	Doba odezvy	$< 2,5 \text{ ms}$
Přesnost rozlišení	$\pm 0,2$ naměřené hodnoty	Výstupní signál	$1 \div 5 \text{ V}$
Napájecí napětí	$12 \div 24 \text{ V DC}$		

8.5 Regulátor tlaku

Pro regulaci řízení tlaku membránových a měchových motorů je využito proporcionálního regulátoru tlaku. Tento ventil udržuje nastavenou hodnotu tlaku v obvodu danou analogovým signálem z řídicího PC. Proporcionální redukční ventil je použit od firmy *Bosch Rexroth 516 012 0620*

Obr. 8.5. Ventil je řízen jedním elektromagnetem a v základní poloze je aretován pružinou. Ventil typu 3/3 je obousměrný z důvodu odpouštění přebytečného vzduchu z testovaného motoru.



Obr. 8.5 Proporcionální redukční ventil [8]

Tab. 8.5 Základní parametry proporcionálního regulátoru tlaku

Pracovní tlak	$0 \div 0,6 \text{ MPa}$
Maximální tlak	$0,8 \text{ MPa}$
Hystereze	$0,02 \text{ MPa}$
Napájecí napětí	24 V DC
Vstupní signál	$0 \div 10 \text{ V}$
Výstupní signál	$4 \div 20 \text{ mA}$

8.6 Snímač tlaku

Pro měření tlaku v hydraulické části měřicího obvodu je využit snímač tlaku od firmy Hydac *HDA 4446 – A – 250 000* Obr. 8.6. Jedná se o elektronické zařízení pro měření tlaku na principu deformace membrány z nerezové oceli a je napojeno na přijímací kartu HMG 3000, taktéž od firmy Hydac.



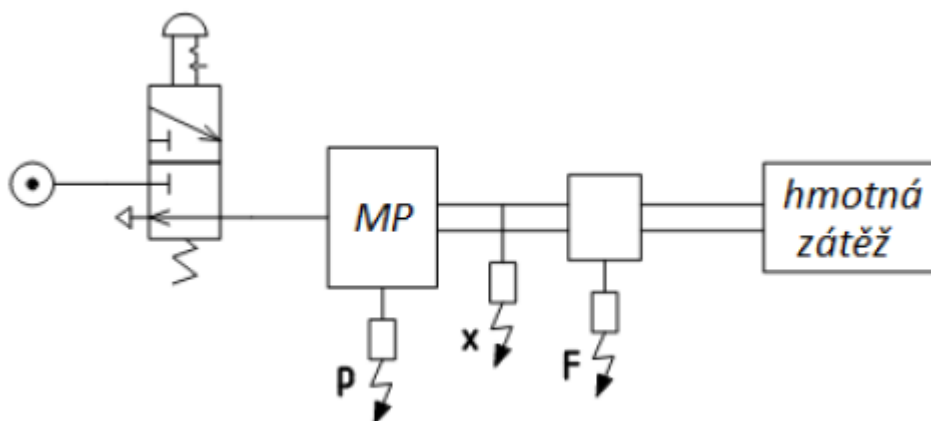
Obr. 8.6 Snímač tlaku HDA 4446 -A- 250000 [20]

Tab. 8.6 Technické specifikace snímače tlaku HDA 4446-A-250000

Měřicí rozsah	$0 \div 25 \text{ Mpa}$
Maximální tlak	40 MPa
Napájecí napětí	$0 \div 30 \text{ V DC}$
Výstupní signál	$4 \div 20 \text{ mA}$

9 Měření statických a dynamických charakteristik

Při měření statických charakteristik vycházíme ze skutečnosti, že testovaný motor je zatěžován hmotnou zátěží, která má konstantní hodnotu a měřenými veličinami jsou síla F , kterou působí hmotná zátěž na měřený motor v závislosti na změně polohy zdvihu motoru x , a tlak p v měřeném motoru, který musí být konstantní. Tato měření se opakují pro další hodnoty hmotné zátěže a řadu testovaných pneumatických motorů. V případě dynamických charakteristik, jsou uvedené veličiny v čase proměnné a je třeba regulovat (řídit) tlak v měřeném motoru, nebo měnit velikost hmotné zátěže, v závislosti na typu měření.

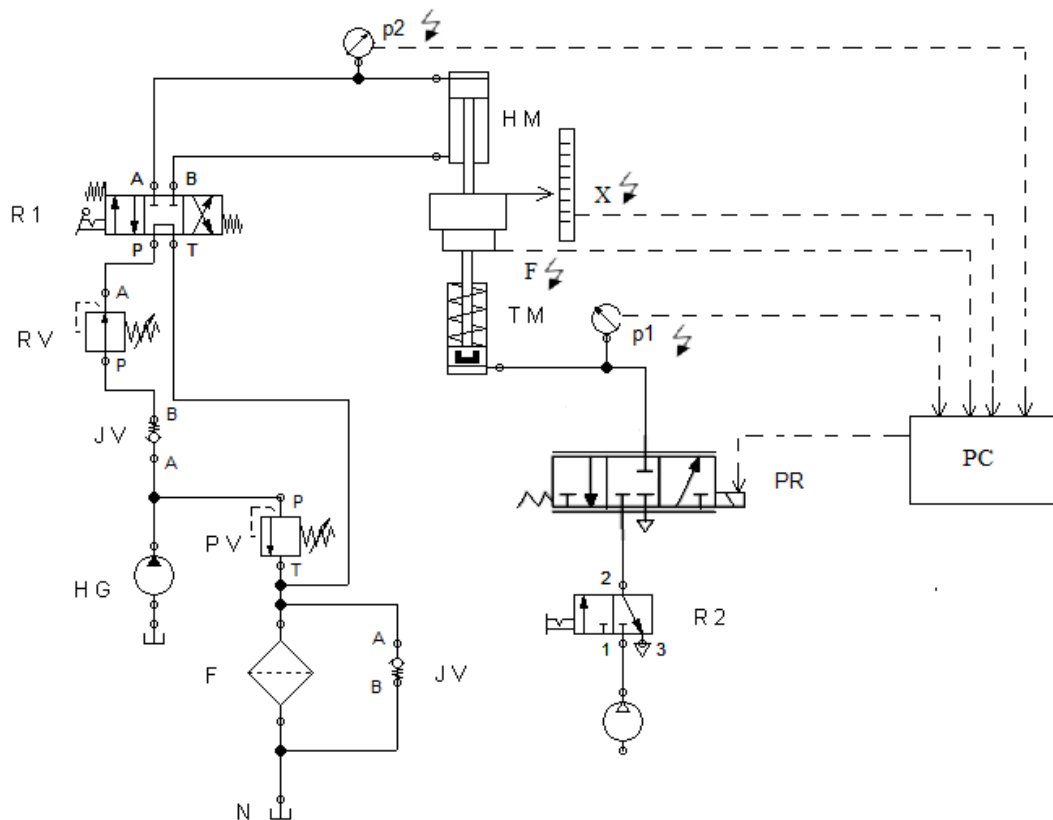


Obr. 9.1 Princip měření statické charakteristiky [8]

V mém případě jsou měřené prvky MP membránové a měchové motory, kdy hmotnou zátěž nahrazuje hydraulický přímočarý motor, takže změnu zatížení lze rychle a jednoduše měnit nastavením pojistného ventilu. Pohyb hydromotoru je zajištěn hydraulickým agregátem, který je dimenzován a popsán výše.

Samotné schéma testovacího obvodu Obr. 9.2 je rozděleno na dvě části - pneumatickou a hydraulickou. Pneumatická část je napojena na centrální rozvod tlakového vzduchu o tlaku $0,6 MPa$ a přes rozváděč $R2$ je ovládán testovaný měchový nebo membránový motor TM . Aby byl zajištěn konstantní tlak v pneumatickém motoru, je v obvodu sériově řazen proporcionální regulátor tlaku PR s obousměrným tokem, protože oba pneumatické motory jsou jednočinné a je nutno zajistit vypouštění vzduchu při reverzním pohybu. Hydraulický obvod je zajištěn miniagregátem HG , viz kapitola 7.2, který dodává tlakovou kapalinu o maximálním tlaku $12 MPa$, který omezuje pojistný

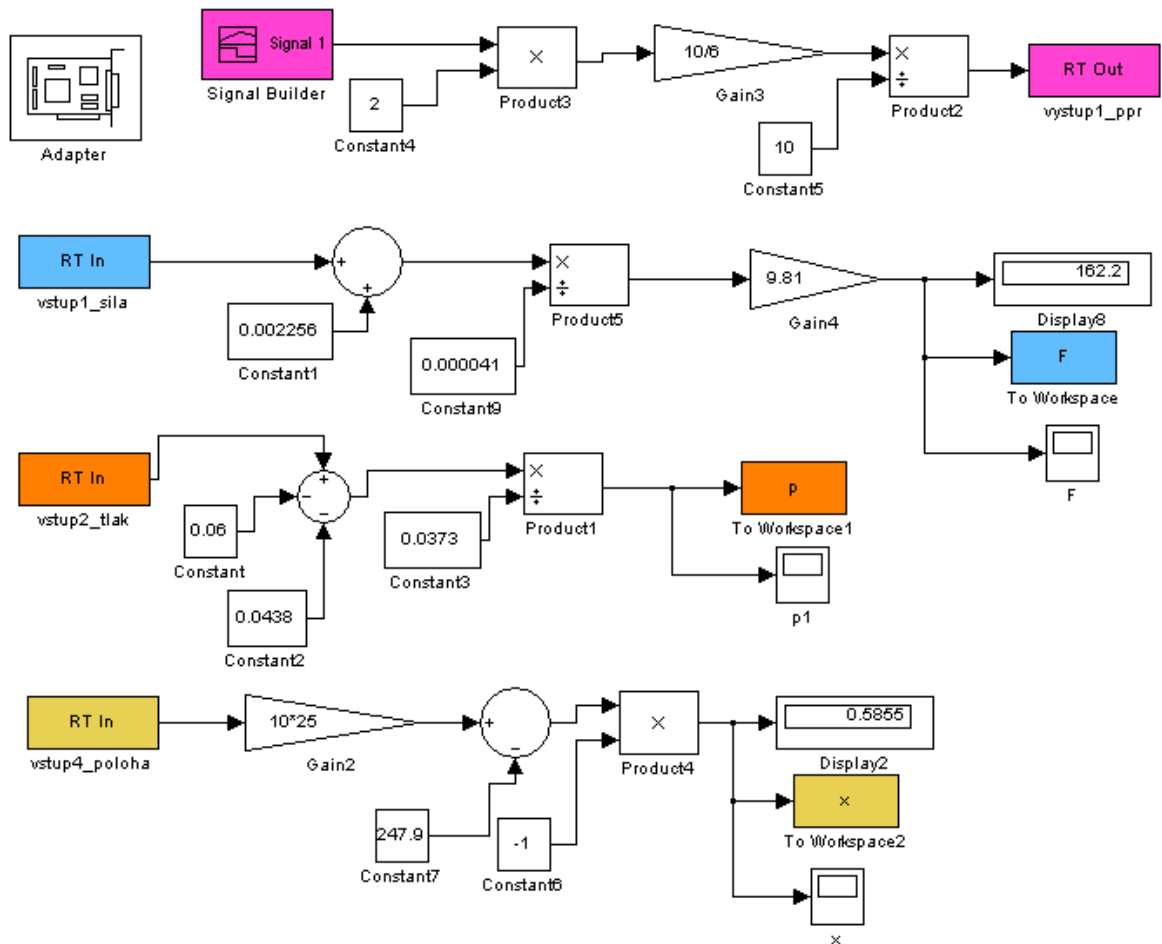
ventil *PV*. Aby bylo měření správné, musí být zatěžující síla od hydromotoru po dobu delšího měření konstantní. Tuto podmínku zajišťuje redukční ventil *RV*. Hydraulický motor *HM* je dvojitý a jeho ovládání je zajištěno pomocí rozváděče 4/3 ovládaného tlačítkem *R1*. Pro měření dynamických charakteristik by bylo zapojení obdobné, jen by bylo nutné regulovat tlak buď v měřeném motoru *TM* pomocí *PR*, nebo na hmotné zátěži *HM*. V případě regulace na hmotné zátěži by byl redukční ventil *RV* nahrazen proporcionálně řízeným redukčním ventilem.



Obr. 9.2 Schéma zapojení pneumatického a hydraulického obvodu

R1 – rozváděč 4/3 ovládaný tlačítkem, *RV* – redukční ventil,
HM – zátěžový hydraulický motor přímočarý, *HG* – hydrogenerátor,
PV – pojistný ventil, *F* – filtr, *JV* – jednosměrný ventil, *N* – nádrž,
R2 – rozváděč 3/2 ovládaný ručně, *PR* – proporcionální regulátor tlaku,
TM – testovaný pneumatický motor

Pro měření statických i dynamických charakteristik motorů s elastickými prvky byl vytvořen řídicí program v Matlab Simulink Obr. 9.3



Obr. 9.3 Řídicí program v Maltab Simulink

Pomocí vytvořeného programu lze snímat a vyhodnocovat měřené veličiny, konkrétně sílu F , zdvih pístnice měřeného motoru x a tlak v měřeném motoru p_1 . Jak bylo popsáno výše, při měření statických charakteristik se udržuje konstantní tlak na měřeném motoru. Tento tlak je řízen pomocí proporcionálního regulátoru tlaku a jeho hodnota je nastavena konstantním průběhem v bloku Signal Builder. Pro měření dynamických charakteristik je možné v tomto bloku zadat jakýkoliv průběh signálu, a tím regulovat tlak v měřeném motoru.

9.1 Ověření funkce navrženého zařízení

Aby byly potvrzeny úvahy a návrhy uvedené v předcházejících kapitolách, je potřeba ověřit funkci navrženého zařízení. Toho lze nejlépe dosáhnout provedením zkušebních měření pneumatických motorů s elastickými pracovními členy. V rámci ověření funkčnosti navrženého zařízení byly pro zkušební měření vybrány dva konstrukčně odlišné motory s elastickými členy.

Membránový motor

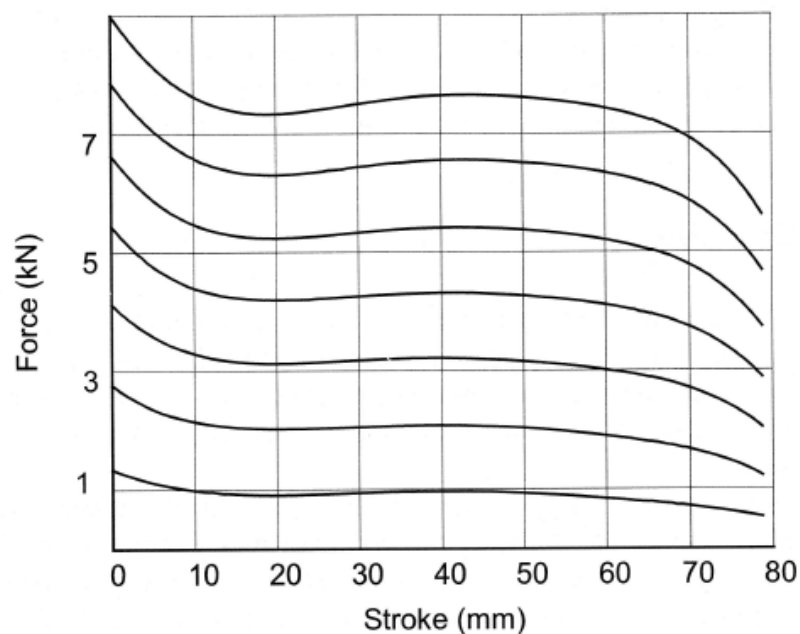
Jedná se o jednočinný membránový motor Obr. 9.4 ze série 102 s vnějším průměrem pístnice 113 mm a zdvihem 50 mm . Základní parametry membránového motoru jsou uvedeny v Tab. 9.1. Obecné charakteristiky membránového motoru jsou uvedeny na Obr. 9.5

Tab. 9.1 Základní parametry membránového motoru Bosch Rexroth 1020200000

Provozní tlak	$0,2 \div 0,8\text{ MPa}$	Síla na vysunutí pístu	6000 N
Teplota média	$-20 \div 70\text{ °C}$	Síla na pružinu	$100 \div 650\text{ N}$
Zdvih	50 mm	Hmotnost	$5,6\text{ kg}$
Průměr pístu	113 mm		



Obr. 9.4 Membránový motor Bosch Rexrot 1020200000 [8]



Obr. 9.5 Statické charakteristiky membránových motorů [22]

Měchový motor

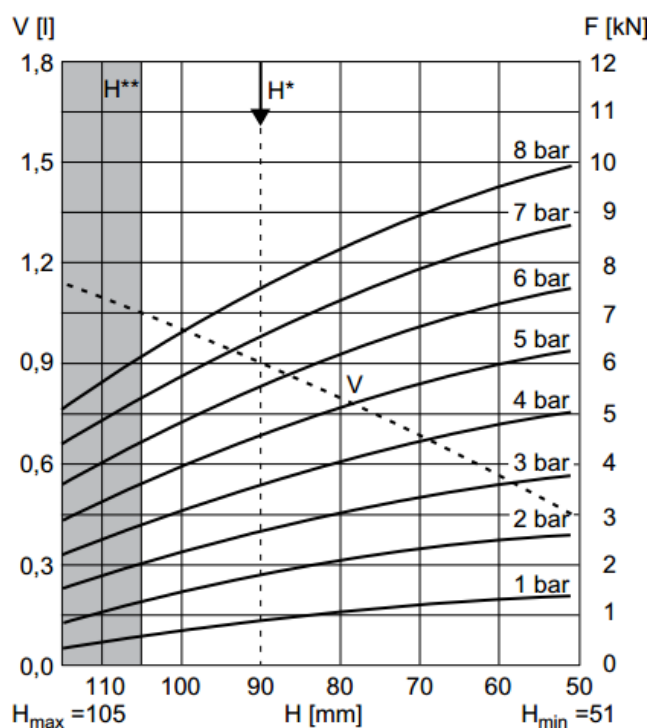
Jedná se o měchový bezpečnostní motor Obr. 9.6 ze série BCP s průměrem víka 108 mm a efektivním zdvihem 54 mm . Základní parametry měchového motoru Bosch Rexroth 0822419002 v Tab. 9.2 a Obr. 9.7

Tab. 9.2 Základní parametry měchového motoru Bosch Rexroth 0822419002

Provozní tlak	$0 \div 0,8\text{ MPa}$	Průměr krytu	108 mm
Teplota média	$-40 \div 70^{\circ}\text{C}$	Síla	$4,5 \div 7,5\text{ kN}$
Zdvih	54 mm	Hmotnost	$1,2\text{ kg}$
Úhel naklonění	$10 \div 20^{\circ}$		



Obr. 9.6 Měchový motor Bosch Rexroth 0822419002 [8]

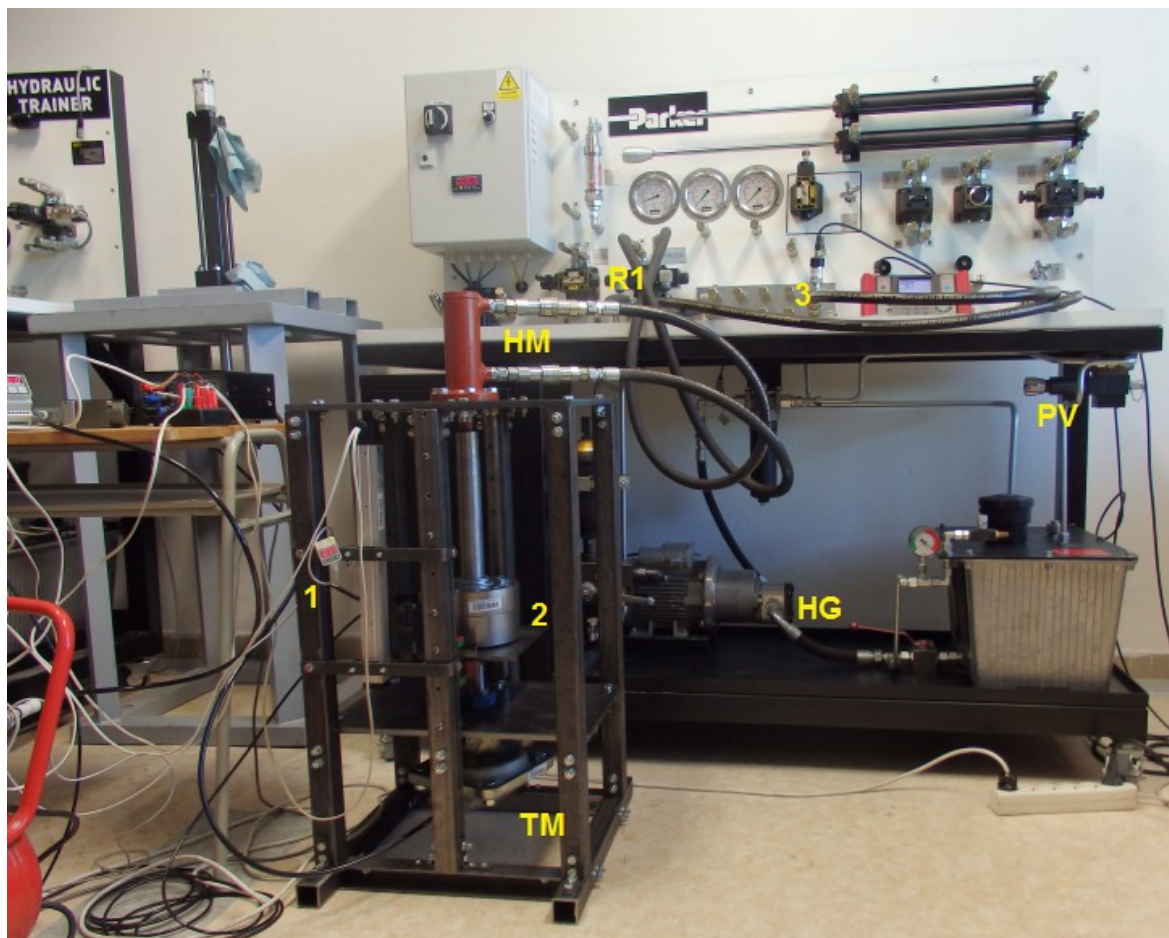


Obr. 9.7 Závislost zdvihu na síle pro motor Bosch Rexroth 0822419002 [21]

9.2 Metodika měření

Metodika měření je popsána na zkušebním měření membránovém motoru Obr. 9.8 a Obr. 9.9. Při tomto měření byl v hydraulické části využit výukový stend Parker. U měření statických charakteristik je udržován konstantní tlak p_1 v měřeném motoru TM . Toho je docíleno nastavením požadovaného tlaku v řídicím programu, který zasílá přes měřicí kartu 5 signál na proporcionální regulační ventil PR . V hydraulické části obvodu se na pojistném ventilu PV nastaví požadovaná hodnota tlaku p_2 a při vzájemném působení

hydraulického motoru *HM* a testovaného motoru *TM* zjišťujeme silové účinky pomocí snímače 2 a posunutí pístnice snímačem 4. Na začátku měření je tlak p_2 na pojistném ventilu *PV* nastaven na minimální hodnotu a postupně se zvyšuje, čímž dochází k vysouvání pístnice *HM*. Takto lze docílit různých konstantních hodnot zatížení, pro které se provádějí jednotlivá měření při různém zdvihu měřeného motoru. Délka jednoho měření je 30 sekund, přičemž hodnoty použité pro tvorbu charakteristik jsou zaznamenávány pouze z posledních 10 sekund měření z důvodu ustálení na konstantní polohu.

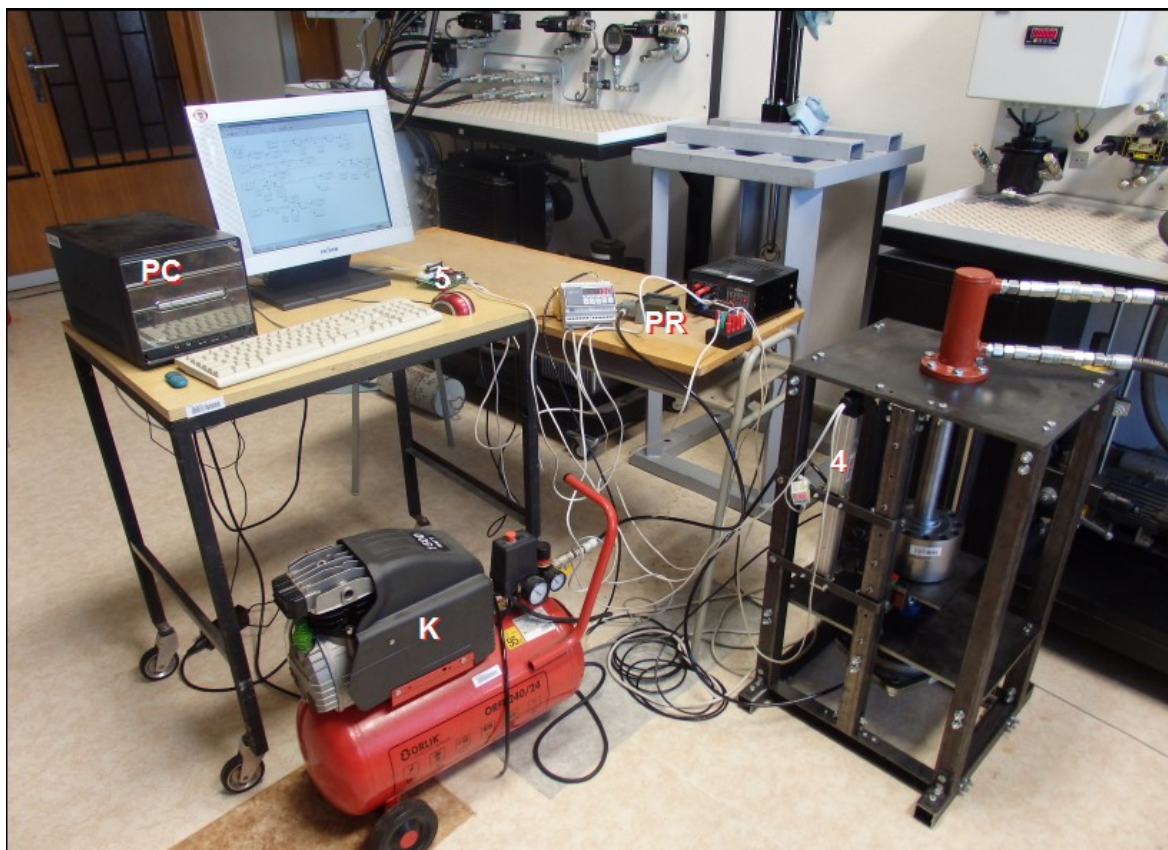


Obr. 9.8 Popis měřicího zařízení

*R1 – rozvaděč, HM – hydromotor, HG – hydrogenerátor, PV – pojistný ventil,
TM – testovaný motor, 1 – snímač tlaku p_1 , 2 – snímač síly, 3- snímač tlaku p_2*

Při měření dynamických charakteristik je zapojení obvodu stejné. V řídicím programu se nastaví změna tlaku v měřeném nebo zatěžujícím motoru. Délka měření se zvolí podle charakteru zatížení.

Snímané hodnoty tlaku vzduchu, síly, a polohy jsou přes měřicí kartu odesílány do *PC*, kde jsou následně zpracovány ve formě statických a dynamických charakteristik.



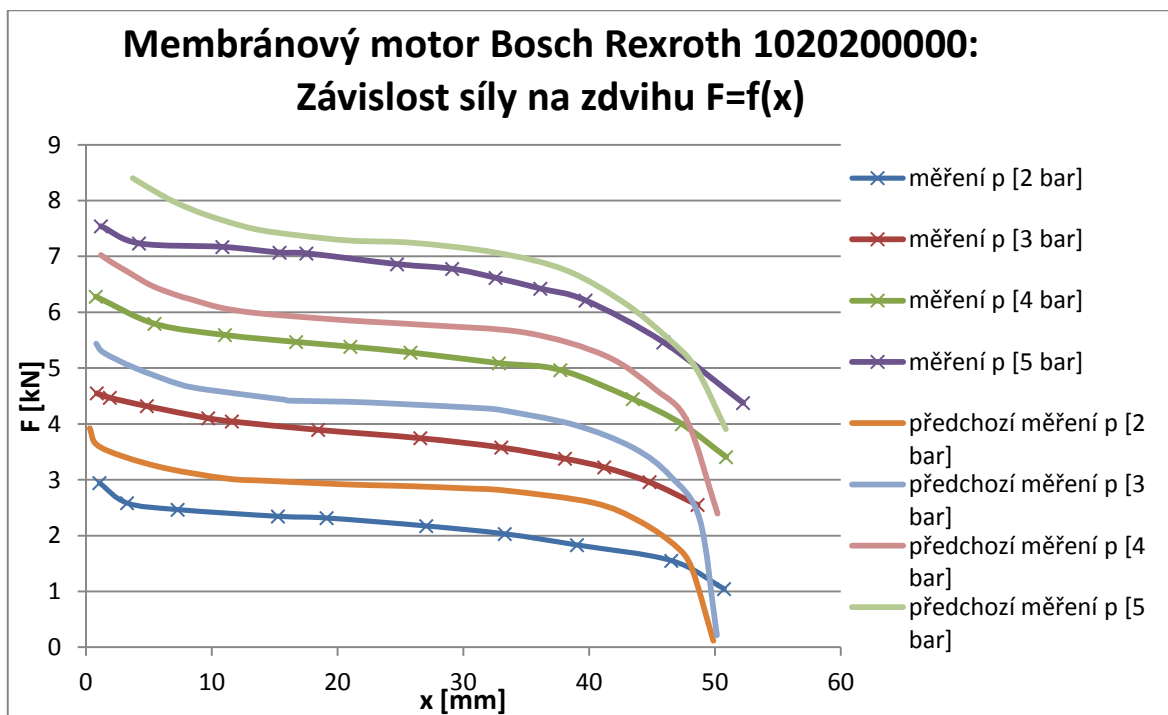
Obr. 9.9 Popis měřicího zařízení

PC – řídicí počítač, K – kompresor, PR – proporcionální regulátor tlaku, 4 – snímač polohy, 5 – měřicí karta

9.3 Vyhodnocení měření

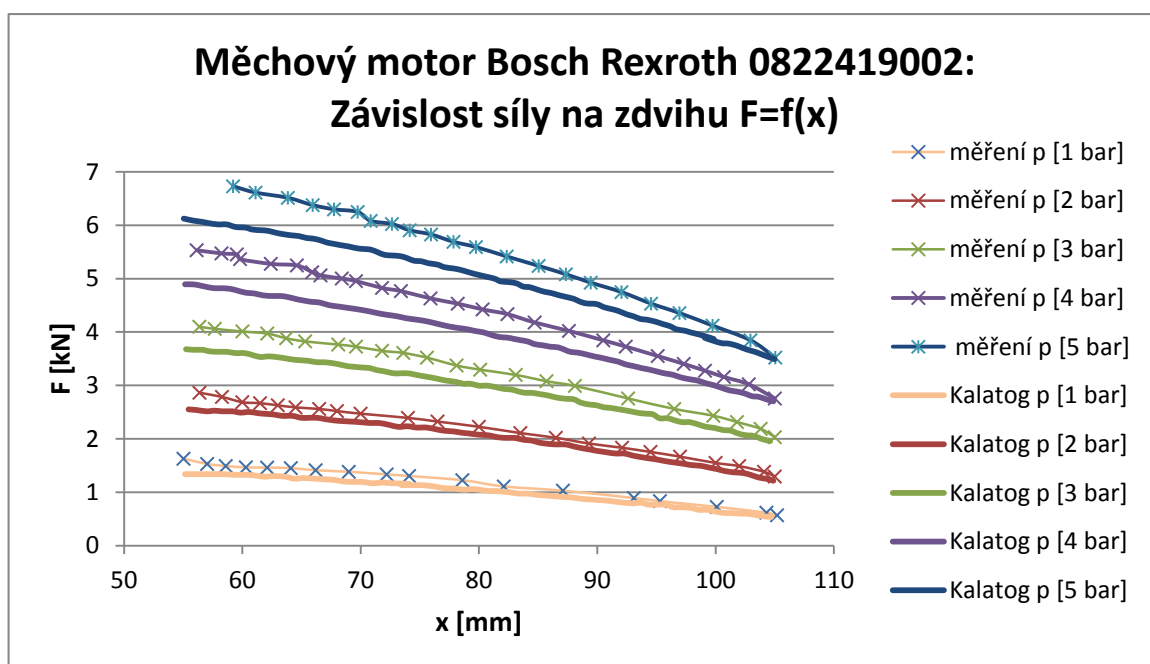
Popis měření statických charakteristik byl uveden v předcházející kapitole, metodika je pro oba měřené motory stejná. U membránového motoru není v katalogu výrobce uvedena žádná výstupní charakteristika, pouze síla na vysunutí pístu. Naměřené hodnoty jsou tedy porovnány s hodnotami, které byly na katedře naměřeny již v minulosti Obr. 9.10.

Z porovnání je zřejmé, že naměřené hodnoty vycházejí nižší, přibližně o 500 N. Tato odchylka mohla být způsobena ne zcela vhodně zvoleným snímačem síly, jehož měřicí rozsah je $0 \div 250000 \text{ N}$. Snímač také nebyl před měřením zkalibrován. Nicméně svým průběhem se charakteristiky příliš neliší. Kompletní naměřená data jsou uvedeny v přílohách 1 – 5.



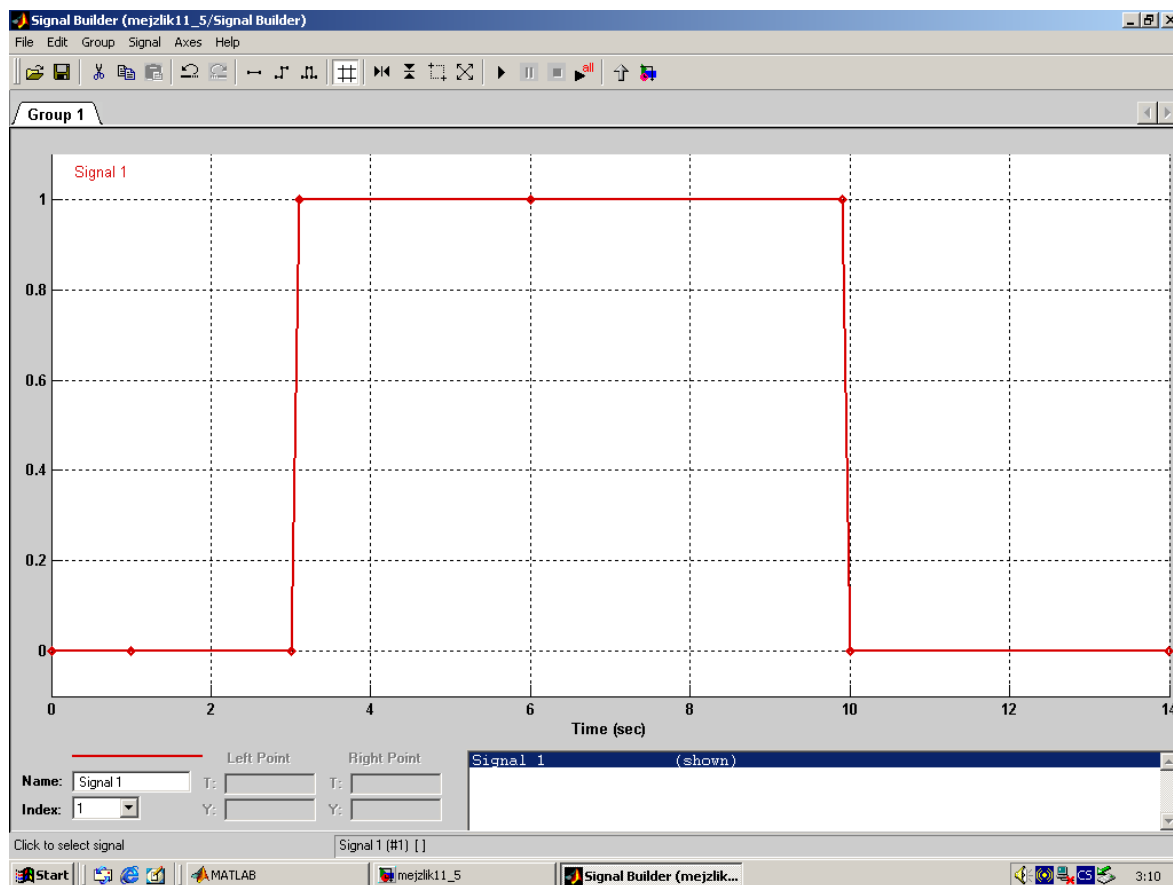
Obr. 9.10 Membránový motor Bosch Rexroth 102020000 v porovnání s předchozím měřením

U měření měchového motoru je v katalogu výrobce uvedena statická charakteristika, naměřené hodnoty tedy byly porovnány s těmi katalogovými Obr. 9.11. V tomto případě, jsou naměřené hodnoty vyšší než katalogové, pro odůvodnění této odchylky by musela být provedena série více měření, ideálně na větším počtu motorů stejného typu.



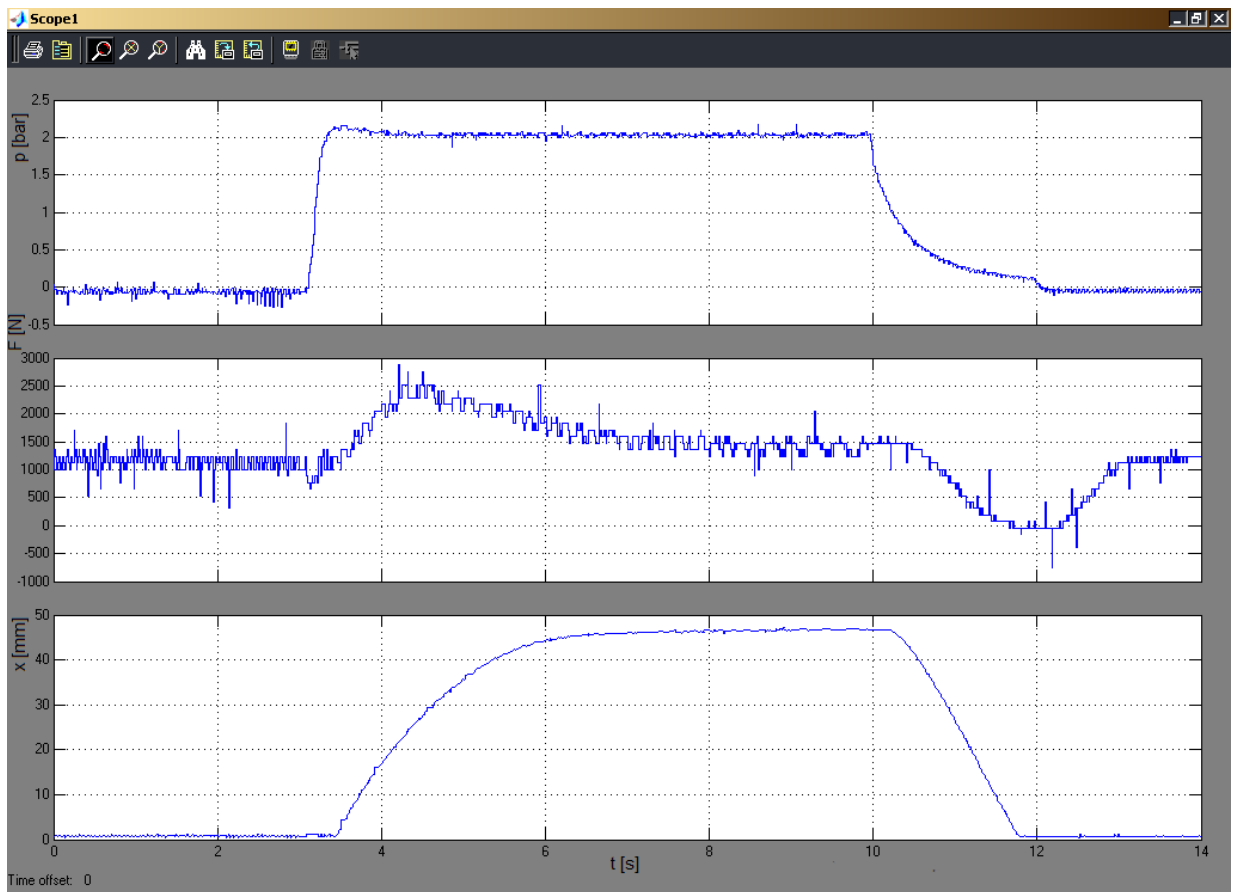
Obr. 9.11 Měchový motor Bosch Rexroth 0822419002 v porovnání s katalogovými hodnotami

Pro měření dynamických charakteristik byl vytvořen řídicí signál Obr. 9.12, který řídí tlak v testovaném motoru. Měření probíhalo 14 sekund, kdy ve 3. sekundě skokově došlo k nárůstu tlaku p_l v měřeném motoru. Čas nárůstu tlaku z minimální hodnoty na maximální byl $0,1$ s. V čase 10 s došlo opět skokově k poklesu tlaku na minimální hodnotu.



Obr. 9.12 Průběh řídicího signálu pro měření dynamických charakteristik

Průběhy tlaku p_l , síly F a zdvihu x v závislosti na čase t , zobrazené v programu Matlab Simulink jsou uvedené na Obr. 9.13. Z průběhu síly je patrná poměrně výrazná oscilace kolem střední hodnoty, což potvrzuje úvahu o nevhodně zvoleném snímači síly. K ustálení síly na konci zdvihu motoru dojde po méně než 1 s, což považují za dostatečné a zvolenou hmotnou zátěž lze použít pro měření dynamických charakteristik pneumatických motorů. Rychlost vysouvání a zasouvání obou motorů je možno regulovat škrtícími ventily.



Obr. 9.13 Průběh tlaku, síly a zdvihu při dynamickém zatížení

10 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval návrhem experimentálního zařízení pro měření statických a dynamických charakteristik pneumatických motorů s elastickými pracovními členy. Byly navrženy dvě varianty konstrukce experimentálního zařízení, z nichž byla vybrána dle hodnotové analýzy lepší varianta řešení. Vybraná varianta splňuje požadavky na univerzálnost konstrukce, což bylo podmínkou pro měření mnohdy velmi konstrukčně odlišných pneumatických motorů s elastickými pracovními členy. Jedná se o vertikální šroubovanou konstrukci, která byla pevnostně zkontrolována na statické zatížení v programu ANSYS a pro tuto variantu byla vypracována výkresová dokumentace, Viz. přílohy.

Kromě již zmíněné univerzálnosti konstrukce bylo nutné zajistit také dostatečnou tuhost hmotné zátěže při měření. Toho bylo docíleno volbou zatěžujícího hydraulického motoru, jehož návrh a výpočet je v práci také uveden. Pro případné umístění experimentálního zařízení v laboratoři pneumatických mechanismů byl navržen kompaktní hydraulický agregát. Následně byl proveden popis funkce hydraulického i pneumatického obvodu, a také specifikace snímací techniky. Pro řízení celého experimentálního zařízení byl naprogramován řídicí program v Matlab Simulink, kterým lze přes vstupně-výstupní kartu sledovat a zaznamenávat měřené veličiny tlaku, polohy a síly. Pomocí programu lze také regulovat tlak v měřeném popřípadě zatěžujícím motoru.

Po zkompletování všech návrhů bylo přistoupeno k samotné realizaci experimentálního zařízení a byla vypracována metodika měření. K ověření funkčnosti navrženého zařízení bylo provedeno zkušební měření na dvou pneumatických motorech – konkrétně na membránovém a měchovém motoru. Výsledky měření statických charakteristik byly porovnány s údaji uvedenými v katalogu výrobce daného motoru a jsou součástí této práce. Dále bylo provedeno zkušební měření dynamiky membránového motoru skokovou změnou tlaku v měřeném motoru. Z výsledku je patrné, že zvolený hydraulický motor je dostatečně tuhý a pro měření dynamických vlastností pneumatických motorů ho lze použít. V případě měření tlumícího účinku měchových motorů, by bylo nutné regulovat tlak v zatěžujícím motoru, a tedy i velikost hmotné zátěže, k čemuž by byl využit hydraulický proporcionální regulátor tlaku. V rámci zkušebního měření byl maximální tlak v měřeném motoru $0,5 \text{ MPa}$ z důvodů omezených možností v měřicí laboratoři. Nicméně navržené experimentální zařízení lze označit za plně funkční a vhodné pro měření statických i dynamických charakteristik nejen pneumatických motorů

s elastickými pracovními členy, ale vzhledem k univerzálnosti konstrukce také klasických nízkozdvihových pneumatických motorů.

V budoucnu je plánována tvorba matematických modelů, které by popisovaly dynamické chování pneumatických motorů s elastickými pracovními členy. Navržené experimentální zařízení bude sloužit k verifikaci vytvořených matematických modelů, jelikož žádný z výrobců těchto motorů obdobné informace neuvádí.

Literatura

- [1] ROUBÍČEK, O., *Řízení rychlosti otáčení indukčního motoru* 2005. [online]. <http://elektrika.cz/data/clanky/rizeni-rychlosti-otaceni-indukcniho-motoru>
- [2] ČERMÁK, J., *Asynchronní stroje – konstrukce, princip funkce a řízení*. [online].: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/asynchronni-stroje-konstrukce-princip-funkce-a-rizeni/>
- [3] LABORTECH, *Servohydraulické statické zkušební stroje* [online]. <http://www.labortech.cz/produkty/zkusebni-stroje/zkusebni-stroje-servo-hydraulicke-rada-h/labtest-6xxxxh2-do-5000kn/>
- [4] PAVLOK, B., HRUŽÍK, L., BOVA, M., *Hydraulická zařízení strojů* [online]: VŠB – TU Ostrava, 2007, s. 132: <http://www.338.vsb.cz/PDF/hydraulicke-zarizeni-stroju.pdf>
- [5] SMC Training, kolektiv autorů.
- [6] Bellow actuator with cover. Rexroth pneumatics, 2016.: http://www.aventics.com/pneumatics-catalog/Pdf.cfm?Language=EN&Variant=internet&file=en/pdf/PDF_g4761_en.pdf
- [7] Bellows cylinders. Direct Industry [online].: <http://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/bellows-cylinder-95407.html>
- [8] FOJTÁŠEK, K., *Modelování a experimentální ověření chování elastických pneumatických pracovních prvků*. Ostrava, 2013. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav KOPÁČEK, CSc.
- [9] KOČIŠ, P., KNOFLÍČEK, R., *Umělé svaly: Pneumatické svaly*. MM průmyslové spektrum [online]. 2016: <http://www.mmspektrum.com/clanek/umele-svaly-cast-2-pneumaticke-svaly.html>
- [10] MELČÁK, J., *Efektory modulárního manipulátoru a jejich automatická výměna*. Ostrava, 2015. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Václav Krys, Ph.D.
- [11] HIWIN: *Lineární vedení*.: http://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/kulickove-vedeni/rada-gh/27_qhh
- [12] AVHB: *Hydraulické válce*.: <http://www.avhb.cz/menu/hydraulicke-valce/hydraulicke-valce/>
- [13] Hydraulické agregáty. Hykom hydraulics [online]. <http://charvat-hykom.cz/katalog/Hydraulicke%20agregaty/>

- [14] LPCH - *Nízkoprofilový diskový snímač*.: <http://www.format1.cz/soubor-lpch-30-.pdf>
- [15] Linear potentiometers: MELPH.: <http://www.megatron.cz/download/MELPH.pdf>
- [16] Data Acquisition Boards: MF634 - PCI Express multifunction I/O card.: <http://www.humusoft.cz/datacq/mf634/>
- [17] KOPÁČEK, J., *Pneumatické mechanismy: Díl I*. Ostrava, 2002.
- [18] KOPÁČEK, J., *Pohony a převody*. 2. vyd. [i.e. 3. vyd.]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2780-3.
- [19] SMC Corporation ISE40-01-62L. *Allied Electronics* [online].: <http://www.alliedelec.com/smc-corporation-ise40-01-62l/70070955/>
- [20] Electronic Pressure Transmitter. *Hydac* [online].: <http://www.hyprox.fi/datasheets/HDA4400.pdf>
- [21] Aventics: *Měchový válec s krytem, série BCP*. Laatzten, 2016.: http://www.aventics.com/pneumatics-catalog/Pdf.cfm?Language=CS&Variant=internet&file=cs/pdf/PDF_g4761_cs.pdf
- [22] BEATER, P., *Pneumatic Drives: System Design, Modelling and Control*. Berlin: Springer, 2007. ISBN - 10 3-540-69470-6.

Přílohy

Příloha 1 Hodnoty statických charakteristik pro membránový motor Bosch Rexroth 102020000 z předchozích měření

Příloha 2 Naměřené hodnoty statických charakteristik pro membránový motor Bosch Rexroth 102020000

Příloha 3 Statické charakteristiky membránového motoru Bosch Rexroth 102020000 v porovnání s hodnotami z předchozího měření

Příloha 4 Naměřené hodnoty statických charakteristik měchového motoru Bosch Rexroth 0822419002

Příloha 5 Statické charakteristiky měchového motoru Bosch Rexroth 0822419002 v porovnání s katalogovými hodnotami

Výrobní výkresy:

Příloha 6 MEJ0006-01 Měřicí zařízení

Příloha 7 MEJ0006-01-03 Deska horní

Příloha 8 MEJ0006-01-04 Deska spodní

Elektronická přílohy:

Příloha 9 3D model měřicího zařízení

Příloha 10 Naměřené a katalogové hodnoty měřených motorů

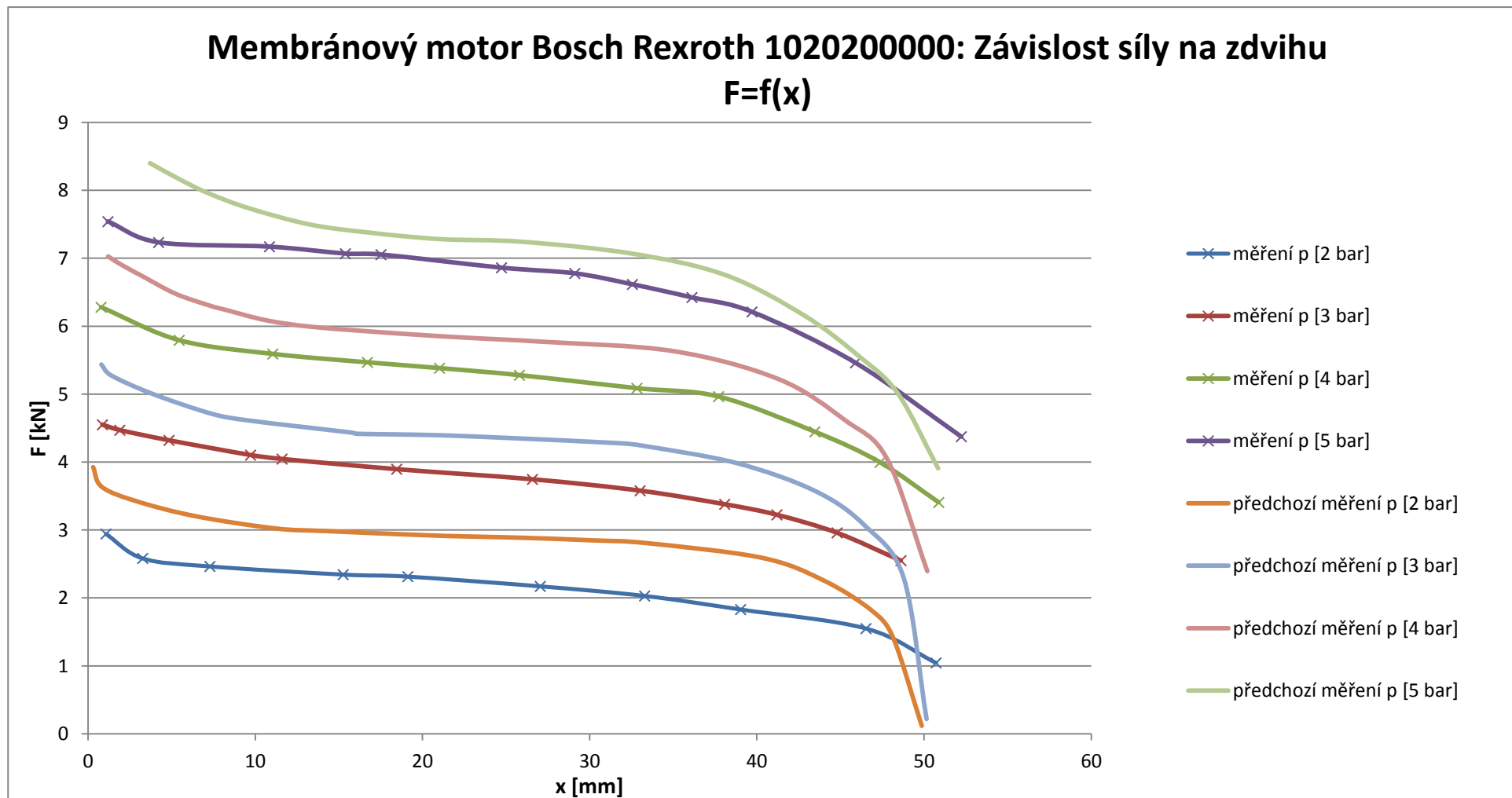
Příloha 11 Video záznam z měření dynamických charakteristik

Příloha 1 Hodnoty statických charakteristik pro membránový motor Bosch Rexroth 102020000 z předchozích měření

předchozí měření p [2 bar]		předchozí měření p [3 bar]		předchozí měření p [4 bar]		předchozí měření p [5 bar]	
x [mm]	F [N]	x [mm]	F [N]	x [mm]	F [N]	x [mm]	F [N]
49,87	117,7614	50,15	215,8959	50,2	2394,482	50,85	3905,753
48,16	1413,137	48,78	2296,347	47,8	4043,141	48,45	5004,86
46,92	1805,675	46,47	3061,796	45,3	4612,322	46,13	5554,413
44	2257,094	43,5	3572,096	41,3	5220,755	42,8	6162,847
40,3	2590,751	38,8	3984,261	35	5632,92	38,13	6751,654
33,4	2806,647	33,2	4239,41	27,2	5770,309	32,6	7065,684
30,3	2845,901	31,7	4278,664	22,7	5829,189	25,95	7242,326
25,98	2885,154	24,9	4357,172	18,8	5888,07	21,03	7281,58
22,6	2904,781	20,8	4396,426	13,55	5986,205	16,72	7379,714
20	2924,408	16,13	4416,053	10,7	6084,339	13,24	7497,476
14,3	2983,289	15,7	4435,679	8,2	6241,354	9,66	7732,999
11,2	3022,543	9,6	4612,322	7,3	6300,235	7,27	7948,895
6,5	3199,185	7,41	4710,456	5,23	6476,877	5,6	8145,164
3	3415,081	3,85	5004,86	3,27	6732,027	3,7	8400,313
0,84	3630,977	1,36	5279,636	1,95	6908,669		
0,3	3925,38	0,8	5436,651	1,2	7026,43		

Příloha 2 Naměřené hodnoty statických charakteristik pro membránový motor Bosch Rexroth 1020200000

měření p [2 bar]			měření p [3 bar]			měření p [4 bar]			měření p [5 bar]		
x [mm]	F [N]	p _{PV} [MPa]	x [mm]	F [N]	p _{PV} [MPa]	x [mm]	F [N]	p _{PV} [MPa]	x [mm]	F [N]	p _{PV} [MPa]
50,72	1044	0,578	48,62	2550	13,32	50,88	3406	17,62	52,23	4375	22,48
46,53	1550	0,858	44,8	2959	15,26	47,37	3996	20,84	45,9	5462	27,96
39,03	1830	1,106	41,2	3224	16,48	43,47	4446	22,73	39,71	6211	31,38
33,29	2030	1,209	38,08	3379	17,31	37,71	4964	24,82	36,12	6423	32,5
27,05	2171	1,334	33,02	3579	18,14	32,83	5087	25,55	32,56	6616	33,26
19,13	2314	1,425	26,58	3746	18,86	25,8	5279	26,58	29,11	6777	33,8
15,26	2344	1,43	18,46	3895	19,68	21,02	5383	26,99	24,73	6861	34,41
7,29	2464	1,483	11,6	4045	20,5	16,71	5468	27,58	17,52	7054	35,16
3,27	2582	1,525	9,72	4103	20,66	11,05	5592	28,31	15,39	7068	35,54
1,07	2942	1,577	4,84	4320	21,63	5,45	5794	29,62	10,85	7170	36,35
			1,9	4470	22,49	0,78	6280	32	4,22	7233	38,34
			0,86	4550	22,84				1,19	7540	40



Příloha 4 Naměřené hodnoty statických charakteristik měchového motoru Bosch Rexroth 0822419002

měření p [1 bar]		měření p [2 bar]		měření p [3 bar]		měření p [4 bar]		měření p [5 bar]	
x [mm]	F [N]	x [mm]	F [N]	x [mm]	F [N]	x [mm]	F [N]	x [mm]	F [N]
105,20	568,98	105,00	1294,92	105,01	2030,67	105,01	2756,61	105,05	3521,79
104,30	618,03	104,10	1383,21	103,81	2187,63	102,81	3021,48	102,95	3845,52
100,10	725,94	102,00	1491,12	101,81	2315,16	100,71	3158,82	99,75	4120,20
95,30	833,85	100,00	1549,98	99,81	2432,88	99,11	3276,54	96,95	4355,64
93,10	892,71	97,00	1667,70	96,51	2560,41	97,31	3404,07	94,55	4532,22
87,10	1030,05	94,50	1755,99	92,61	2756,61	95,11	3551,22	92,05	4748,04
82,10	1108,53	92,10	1834,47	88,11	2992,05	92,41	3727,80	89,45	4924,62
78,60	1226,25	89,30	1912,95	85,71	3080,34	90,51	3845,52	87,35	5081,58
74,10	1304,73	86,50	2020,86	83,11	3198,06	87,61	4022,10	85,05	5238,54
72,20	1334,16	83,50	2109,15	80,11	3296,16	84,71	4179,06	82,35	5415,12
69,00	1383,21	80,00	2226,87	78,11	3374,64	82,41	4336,02	79,75	5591,70
66,20	1412,64	76,50	2324,97	75,61	3521,79	80,31	4424,31	77,85	5689,80
64,10	1451,88	74,00	2393,64	73,61	3610,08	78,21	4532,22	75,95	5827,14
62,10	1461,69	70,00	2472,12	71,81	3649,32	75,91	4630,32	74,15	5905,62
60,30	1466,60	68,00	2521,17	69,61	3727,80	73,41	4767,66	72,65	6023,34
58,60	1491,12	66,50	2560,41	68,11	3767,04	71,81	4826,52	70,85	6082,20
57,03	1530,36	64,50	2589,84	65,31	3825,90	69,61	4954,05	69,75	6248,97
55,03	1628,46	63,00	2629,08	63,71	3884,76	68,41	5003,10	67,75	6298,02
		61,50	2668,32	62,11	3973,05	66,61	5061,96	65,95	6376,50
		60,00	2687,94	60,01	4012,29	65,91	5120,82	63,85	6513,84
		58,28	2786,04	57,67	4061,34	64,61	5248,35	61,12	6611,94
		56,38	2864,52	56,37	4100,58	62,41	5277,78	59,22	6729,66
						59,81	5366,07		
						59,54	5454,36		
						58,24	5473,98		
						56,14	5532,84		

