

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

Porovnání užitečných vlastností siloměrů

2017

Kamil Moudrý

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 10.7.2017

.....

podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi při psaní bakalářské práce pomáhali. Hlavní poděkování patří vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Davidu Burianovi, Ph.D. za vedení, věnovaný čas, cenné poznámky, podněty a pomoc při testování siloměrů. Dále bych chtěl poděkovat lidem, kteří se podíleli na výrobě konstrukce měřicího mechanismu. Poslední poděkování patří mé rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

## Anotace

<i>Jméno autora:</i>	Kamil Moudrý
<i>Název BP:</i>	<b>Porovnání užitečných vlastností siloměrů</b>
<i>Rozsah práce:</i>	67 stran, 48 obrázků, 4 tabulky
<i>Akad. rok vyhotovení:</i>	2016/2017
<i>Ústav:</i>	Ústav výrobních strojů a zařízení
<i>Vedoucí BP:</i>	Ing. David Burian Ph.D.,
<i>Konzultant:</i>	Ing. Jan Machyl Ph.D.,
<i>Zadavatel tématu:</i>	ČVUT FS, Ú12135
<i>Využití:</i>	Znalost náchylnosti siloměrů na parazitní momenty. Usnadnění výběru měřicího zařízení. Možnost proměření dalších siloměrů.
<i>Klíčová slova:</i>	měření, nejistoty, siloměry, parazitní moment, tenzometr;
<i>Anotace:</i>	Bakalářská práce se zabývá problematikou měření sil. Porovnání výhod a nevýhod různých typů siloměrů. Na základě mechanického schématu a vyrobené konstrukce bylo provedeno měření náchylnosti na parazitní moment tří siloměrů. Z výsledků byla zjištěna kvalita a přesnost testovaných siloměrů od různých výrobců.

## Annotation

<i>Author:</i>	Kamil Moudrý
<i>Title of bachelor dissertation:</i>	<b>Load cells use properties comparison</b>
<i>Extent:</i>	67 p., 48 fig., 4 tab.
<i>Academic year:</i>	2016/2017
<i>Department:</i>	Department of Production Machines and Equipment
<i>Supervisor:</i>	Ing. David Burian Ph.D.,
<i>Consultant:</i>	Ing. Jan Machyl Ph.D.,
<i>Submitter of the Theme:</i>	CTU - Faculty of Mechanical Engineering
<i>Application:</i>	Knowledge of the load cell susceptibility to parasitic moments. Facilitating the selection of the measuring device. Possibility to measure other load cells.
<i>Key words:</i>	measurement, uncertainty, load cells, parasitic moment, strain gauge;
<i>Annotation:</i>	The bachelor thesis deal with measurement of forces. Comparing advantages and disadvantages of different types of load cells. Based on the mechanical scheme and construction, was done measurement of the susceptibility on the parasitic moments of the three load cells. The results showed the quality and accuracy of the tested load cells from different producers.

## Obsah

1	CÍL PRÁCE.....	8
2	MĚŘENÍ SIL.....	9
2.1	Senzory a fyzikální principy měření sil.....	9
2.2	Tenzometrie.....	10
2.3	Principy.....	15
3	SILOMĚRY A PRUŽNÉ ČLENY.....	18
3.1	Porovnání vlastností vybraných siloměrů.....	25
4	CHYBY A NEJISTOTY.....	29
4.1	Chyby měřicích přístrojů.....	29
4.2	Chyby měření.....	30
4.3	Nejistoty měření.....	32
5	ČINITELÉ OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST MĚŘENÍ PROVÁDĚNÉ POMOCÍ ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ A TENZOMETRICKÝCH SILOMĚRŮ.....	35
6	METODIKA A MECHANISMUS PRO MĚŘENÍ PARAZITNÍCH MOMENTŮ.....	39
6.1	Metodika měření.....	39
6.1.1	Mechanické schéma.....	39
6.1.2	Statické řešení.....	40
6.1.3	Schéma měření.....	44
6.1.4	Konstrukce mechanismu.....	44
7	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ.....	46
7.1	Měření siloměru S-35.....	46
7.2	Měření siloměru Lorenz messtechnik typ K-25.....	51
7.3	Měření siloměru GTM série K 20kN.....	56
7.4	Vyhodnocení měření.....	59
8	ZÁVĚR.....	62
9	SEZNAMY.....	64
9.1	Seznam obrázků.....	64
9.2	Seznam tabulek.....	65
9.3	Seznam příloh.....	65
9.4	Literatura.....	66

## Seznam použitých veličin a jednotek

C	[°]	teplota - Celsia
f	[Hz]	frekvence
m	[g]	hmotnost
l	[m]	délka
F	[N]	síla
R	[Ω]	odpor
S	[m <sup>2</sup> ]	průřez
ρ	[Ω*m]	rezistivita
Z	[Ω]	impedance
ε	[-]	deformace
M <sub>o</sub>	[Nm]	ohybový moment
σ	[Pa]	ohybové napětí
W	[m <sup>3</sup> ]	průřezový modul v ohybu
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti
τ	[Pa]	smykové napětí
K	[°]	teplota – Kelvin
M	[-]	měřicí rozsah
TP	[-]	definovaná třída přesnosti
δ	[-]	chyba
n	[-]	počet naměřených hodnot
k	[-]	koeficient rozšíření
M <sub>s</sub>	[Nm]	ohybový moment v bodě S

# 1 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je seznámení se základními principy měření sil. Principů měření sil je mnoho. Cílem je porovnání možností při měření, popsání výhod a nevýhod různých způsobů, které se využívají pro měření sil. Každé měření je zatíženo určitou chybou a nejistotou. Cílem práce je popsání chybového a nejistotového systému. Porovnání těchto systémů a popis vyhodnocení konkrétních chyb a nejistot. Způsob jejich výpočtu a možnosti minimalizace či odstranění těchto vlivů vstupujících do měření. Dalším cílem je seznámení se základy tenzometrie a druhy tenzometrů. Popis a porovnání tenzometrů je důležitou součástí měření sil, jelikož každý druh tenzometru má jiné podmínky použití, vlastnosti, výhody a nevýhody. Způsob zapojení tenzometrů je dalším důležitým parametrem při měření sil. Porovnání pružných členů a snímačů síly je důležitá část této práce. Jelikož každý pružný člen má své výhody a různé druhy uplatnění. Hlavním cílem práce je zjištění chyby vstupující do měření pomocí siloměru, který je zatížen mimo jeho měřicí osu. Tato chyba se nazývá parazitní moment. Ovlivnění parazitním momentem je v literatuře od výrobců siloměrů málo popsáno. Někteří výrobci tento údaj neuvádí vůbec. Zásadní částí bakalářské práce je tedy navrhnutí mechanického schématu, podle kterého bude možné měřit parazitní moment působící na siloměr. Podle tohoto schématu je navrhnout model v 3D programu, který je vyroben a zkonstruován. Na této konstrukci je možné měřit parazitní momenty vstupující do siloměru. V praktické části je provedeno měření parazitních momentů na třech typech siloměrů od různých výrobců. Z vyhodnocení měření bude určena citlivost siloměrů na parazitní moment.



## 2 MĚŘENÍ SIL (1) (2) (3) (4)

Síla je veličina působící všude okolo nás. Měření sil se provádí v různých oblastech: při vědeckých a vývojových činnostech, při měření na zkušebních zařízeních, měření sil při průmyslové výrobě, ve stavebnictví, dopravě, ale i pro běžné použití. V každém odvětví jsou požadavky na přesnost přístrojů a přesnost měření různé. Přímé měření není z technického pohledu možné. Principy měření vychází z fyzikálních účinků síly. Z tohoto důvodu se měření síly provádí pomocí měření deformace tělesa, přes které vede silový tok, který je vyvolaný působící silou.

### 2.1 Senzory a fyzikální principy měření sil

- a) **Senzory s pružným deformačním členem** - měření probíhá na principu převodu deformace vyvolané silou na měřitelné hodnoty mechanického napětí. Na deformační člen je přilepen odporový tenzometr, který zaznamenává působící deformaci.
- b) **Senzory síly s převodem deformace na výchylku** – využívá se pružných členů, které vyvolávají co největší změnu polohy určitého bodu. Polohu daného bodu pak zjišťujeme pomocí indukčních a kapacitních senzorů.
- c) **Piezoelektrické senzory** – fungují na principu piezoelektrického jevu, při kterém dochází k deformaci krystalu. Využívají se nejčastěji pro měření proměnných sil.
- d) **Magnetoelastické senzory** – princip takových snímačů je měření změny permeability při deformaci feromagnetických materiálů. Vyvolaná změna permeability je úměrná mechanickému napětí. Předností takových senzorů je masivní provedení snímače a jednoduché konstrukční provedení. Jejich nevýhody jsou v působení tepelných vlivů a magneticko-mechanické hystereze. Tyto vlivy snižují přesnost měření.
- e) **Rezonanční snímače sil** – základní princip snímačů je závislost mechanické rezonanční frekvence pružného prvku na poměrné deformaci vyvolané působením síly. Pro buzení kmitů se využívá

nepřímý piezoelektrický jev nebo proměnné elektrostatické přitažlivé síly.

- f) Senzory síly s optickým snímáním** – senzory fungující pomocí deformace vlákna, kterým paprsek prochází. Mechanická deformace vlákna má za následek změnu vlastností šíření světelného toku. Další možností je měření pomocí deformace povrchu, který je snímán vysoce citlivou kamerou.

Technické parametry senzorů popisují statické a dynamické vlastnosti.

### 1) Statické parametry

- a) citlivost
- b) práh citlivosti
- c) dynamický rozsah
- d) reprodukovatelnost
- e) rozlišitelnost
- f) aditivní a multiplikativní chyby
- g) linearita

### 2) Dynamické parametry

- a) parametry časové odezvy
- b) časová konstanta
- c) šíře frekvenčního pásma
- d) rychlost číslicového přenosu
- e) parametry šumu

## 2.2 Tenzometrie

Při měření tenzometrem se využívá závislost mechanického napětí na deformaci. Při pevném spojení tenzometru s měřenou součástí se na nalepeném tenzometru projevuje poměrné prodloužení a stejné změny jako u snímané součástky, popřípadě pružné části siloměru. Dochází tak ke změně délky a průřezu vodičů a tím se mění odpor tenzometru. Z této změny se může zjistit hodnota deformace. Tenzometry se využívají pro vážní systémy v potravinářském, chemickém či těžebním průmyslu. Další použití tenzometrů je v oblastech experimentálního měření napětí, sil, tlaků či krouticích momentů.

Mezi hlavní přednosti odporových tenzometrů patří:

- dálkový přenos měřených hodnot
- snadné zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot
- možnost měření statických a dynamických namáhání ve vysokých frekvencích

- malá hmotnost – malé ovlivnění měřeného objektu hmotností tenzometru
- možnost měřit na zakřiveném povrchu
- vysoký teplotní rozsah, při kterém lze provádět měření (od -270°C do +950°C)
- snadná aplikace na měřený objekt

**Strunové senzory** – pracují na závislosti vlastní frekvence struny na síle, která napíná danou strunu ve směru její osy. Hodnota vlastní frekvence se určí ze vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{m l}} \quad (2.1)$$

$f_0$  je vlastní frekvence struny [Hz]

$F$  je síla napínající strunu [N]

$l$  je délka struny [m]

$m$  je hmotnost struny [g]

Strunové tenzometry se nejčastěji používají při měření mechanického napětí velkých objektů. Tento princip je využíván především ve stavebnictví.

**Odporové tenzometry** – odporové tenzometry fungují na principu změny elektrického odporu vodiče o délce  $l$ , průřezu  $S$  a rezistivity  $\rho$ . Změnu odporu  $\Delta R$  získáme ze vztahu:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.2)$$

$R$  je odpor vodiče [ $\Omega$ ]

$\Delta l$  je změna délky vodiče [m]

$\Delta S$  je změna průřezu vodiče [ $m^2$ ]

$\Delta \rho$  je změna rezistivity [ $\Omega \cdot m$ ]

Při měření pomocí odporových tenzometrů je nutné zajistit mikrostrukturální stálost, aby nedošlo ke zničení senzoru.

Použití odporových tenzometrů: součást siloměrů pro měření sil, tlaku, krouticího momentu, kmitavého pohybu, rychlosti průtoku, měření mechanického napětí strojů.

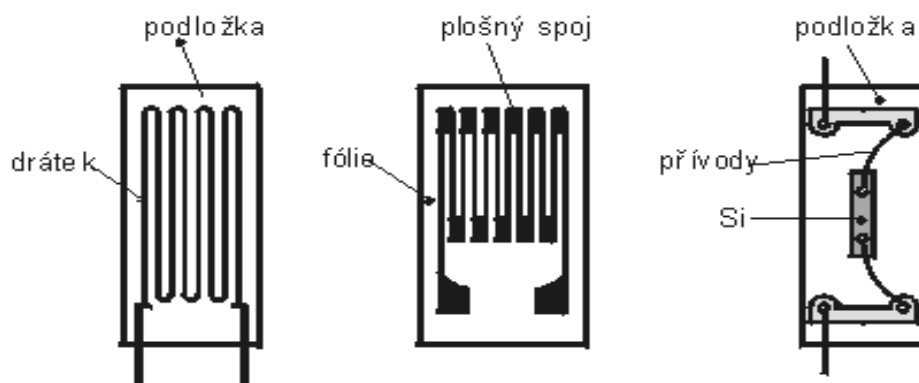
I.) **Kovové tenzometry** – vyrábí se z materiálů, u kterých se vyskytují minimální změny mikrostruktury. Další důležitá vlastnost materiálu je nízký teplotní součinitel odporu. Při výrobě kovových tenzometrů se nejčastěji využívají slitiny: konstantan (57Cu, 43 Ni), karma (73Ni, 20Cr), platina – wolfram (92Pt, 8W). Při měření poměrné deformace není dobré překročit hodnotu 0,3%.

1) **Drátkové tenzometry** – dnes méně používané typy k měření, vydrží velký rozsah teplot a velké deformační účinky, průměr používaného drátku je kolem 0,01mm

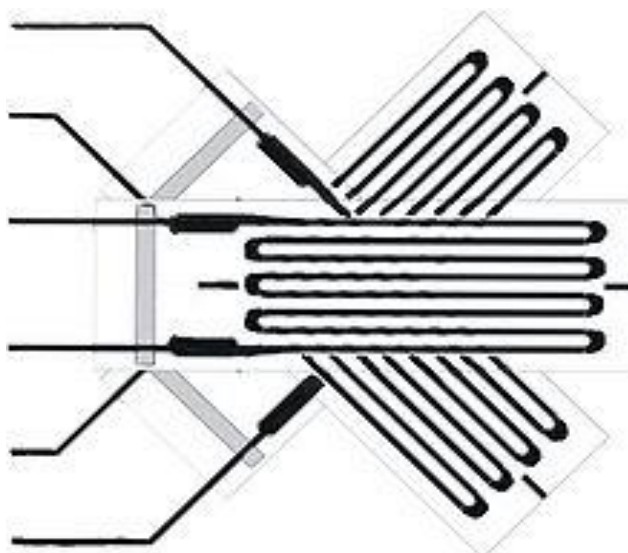
a) Lepené s podložkou – teplotní rozsah od  $-270^{\circ}\text{C}$  až do  $+950^{\circ}\text{C}$

b) Bez podložky

c) S volnou mřížkou – drátky tenzometru nejsou přilepené k podkladu. Drátek je upevněný mezi úchyty. Při zahřátí dochází k změně délky drátku a tím k změně odporu. Využívají se jako součást senzorů tlaku nebo síly. Náročné na výrobu.

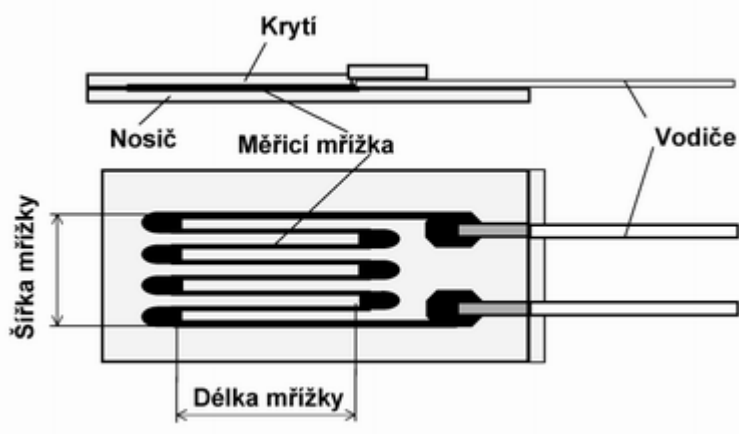


Obrázek 1 Kovové tenzometry - porovnání (4)



Obrázek 2 Tenzometrická růžice (5)

- 2) **Fóliové tenzometry** – v dnešní době nejčastěji využívané kovové tenzometry, využívá se kovová fólie o minimální tloušťce 5  $\mu\text{m}$ , která je připevněna k nosné izolační vrstvě. Největší měřená deformace je 0,5%. Dnešní výrobní technologií lze vytvořit ekvivalenty k drátkovým tenzometrům s lepšími měřicími vlastnostmi. Pomocí konstrukce je u fóliových tenzometrů dosahováno lepšího odvodu tepla než u drátkových tenzometrů. Díky této vlastnosti je možné použít větší proudové zátěže a dosáhnout tak větších výstupních hodnot. Fóliové tenzometry mají lepší mechanickou stabilitu a vyšší přesnost měření



Obrázek 3 Fóliový tenzometr (6)

- 3) **Vrstvové tenzometry** – používají se pro senzory měřící tlak. Bývají nejčastěji umístěny přímo na membráně. Mají podobné vlastnosti jako fóliové tenzometry. Při měření však dosahují lepší teplotní a časové stálosti.

### **Instalace tenzometru:**

Příprava měrného objektu – očištění hrubých nečistot z místa plánovaného k instalaci siloměru.

Rozměření umístění tenzometru – naměření místa pro připevnění. Důležité rozměření okolního prostoru pro snazší manipulaci při úpravě povrchu. Kontrola zda nebude tenzometr a jeho připojené vedení omezovat funkčnost ostatních součástí.

Hrubá úprava povrchu – povrch zbavíme jemnějších nečistot, rzi a povrchového nátěru.

Jemná úprava povrchu – jemnými smirkovými papíry se odstraní zbytky povrchových vad.

Příprava místa pro nalepení tenzometru – naměření přesné polohy umístění tenzometru na vyčištěný a připravený povrch.

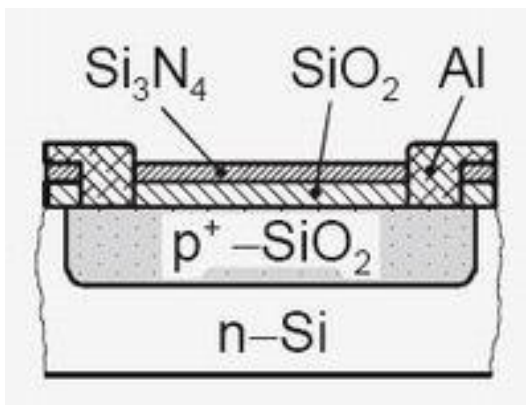
Odmaštění a očištění povrchu – finální příprava místa pro nalepení tenzometru. Očištění pomocí roztoků určených výrobcem tenzometru. Poté proběhne vlastní nalepení tenzometru pomocí lepidla.

**II.) Polovodičové tenzometry** – vytvořeny páskem vyříznutým z monokrystalu polovodiče.

Hlavní výhody

- Vysoký součinitel citlivosti
- Vysoká únavová životnost
- Velké rozsahy pracovních teplot
- Velký odpor měřicího obvodu
- Druhy: monokrystalické

difuzní odpory vytvořené na Si substrátu



Obrázek 4 Polovodičový tenzometr (7)



Obrázek 5 Polovodičový snímač Kistler (8)

## 2.3 Principy

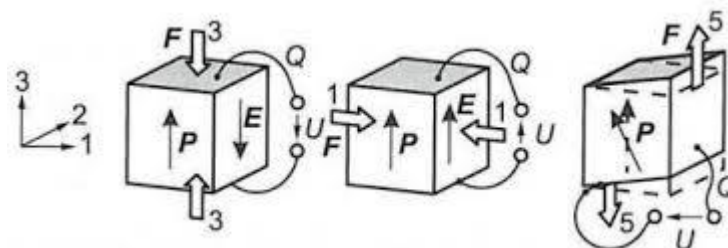
- 1) **Deformace měrného tělesa** – působením sil na těleso dochází k deformaci. Z velikosti této deformace se vypočítá velikost působící síly. Princip spočívá ve využití fyzikálních účinků síly působící na měřící prvek. Tyto siloměry mají širokou škálu rozsahu od 10N až po jednotky MN. Rozsahy siloměrů se liší podle způsobu provedení siloměru a jeho využití. Používají se materiály s minimální teplotní roztažností a dobrou teplotní vodivostí, za účelem dosažení stejné teploty v celém měřicím tělese. Nejčastěji využívaný materiál snímačů je ocel nebo hliník.
- 2) **Piezelektrický jev** – schopnost krystalu generovat elektrické napětí pokud dochází k jeho deformaci. Princip tohoto jevu funguje i naopak, kdy se krystal deformuje vlivem elektrického pole. Piezelektrický jev probíhá

u krystalů s jistou strukturou krystalové mřížky. Tento jev nastane v závislosti na středu symetrie krystalové mřížky. Při vyhodnocování jevu lze využít znalostí z oboru pružnosti a pevnosti, díky kterým můžeme analyzovat mechanické jevy, které se zde vyskytují. V senzorech využívajících piezoelektrický jev se mechanické napětí zavádí kolmo na elektrody, rovnoběžně s jejich rovinou nebo se využívá smyková deformace (viz Obrázek 6 a 7). Nejpoužívanější materiály pro piezoelektrický jev jsou:

- a) monokrystaly – SiO<sub>2</sub> (krystal křemene), TGS (triglycinsulfát), LiTaO<sub>3</sub> (titaničitan lithia)
- b) polykrystalické keramické materiály – BaTiO<sub>3</sub> (titaničitan barnatý), PbTiO<sub>3</sub> (titaničitan olovnatý)
- c) organické polymery – PVDF (polyvinylidenflourid)

Materiál	Curieho teplota	$\epsilon_r$	Piezoelektrická citlivost [10 <sup>-12</sup> C/N]			Pyroelektrická citlivost	
			podélná d <sub>33</sub>	příčná d <sub>31</sub>	smyková d <sub>15</sub>	k <sub>Q</sub> [C/(K.m <sup>2</sup> )]	k <sub>U</sub> [V/(K.m <sup>2</sup> )]
křemen	-	4,5	2,3		4,6	-	-
TGS	618	30	5,7	-3	26	3,5.10 <sup>-4</sup>	1,3.10 <sup>6</sup>
LiTaO <sub>3</sub>	120	45	374	-150	550	2. 10 <sup>-4</sup>	0,5. 10 <sup>6</sup>
BaTiO <sub>3</sub>	340	1000	374	-171	584	4. 10 <sup>-4</sup>	0,05. 10 <sup>6</sup>
PbTiO <sub>3</sub>	470	200	51	-6,1	45	2,3. 10 <sup>-4</sup>	0,4. 10 <sup>6</sup>
PVDF	205	12	30	-20	-	0,4. 10 <sup>-4</sup>	0,4. 10 <sup>6</sup>

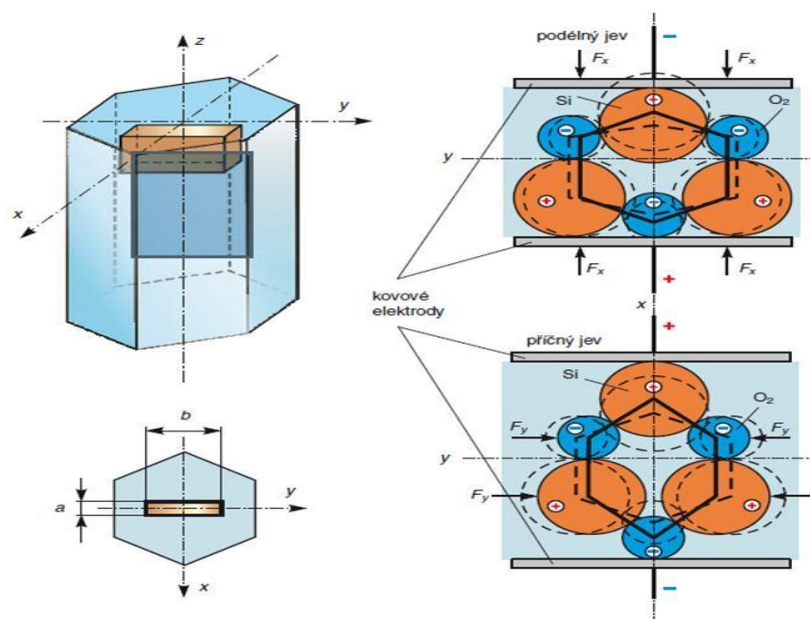
Tabulka 1 Vlastností piezoelektrických materiálů



Obrázek 6 Podélný, příčný a stříhový piezoelektrický jev (2)



Nejznámější a nejpoužívanější piezoelektrickou látkou je krystal křemene



Obrázek 7 Krystal křemene, příčný a podélný jev (9)

Rozsah měření je od jednotek až po stovky kN. Přesnost snímačů je cca 1%. Měření je ovlivněno tepelnými vlastnostmi materiálu, neboť při vysokých teplotách dochází ke ztrátě piezoelektrických vlastností. Přechodová teplota je charakteristická pro daný materiál a nazývá se Curieova teplota. Při překročení ztrácí materiál skokově své piezoelektrické vlastnosti. Po následném ochlazení pod Curieovu teplotu už látka nevykazuje piezoelektrické vlastnosti.

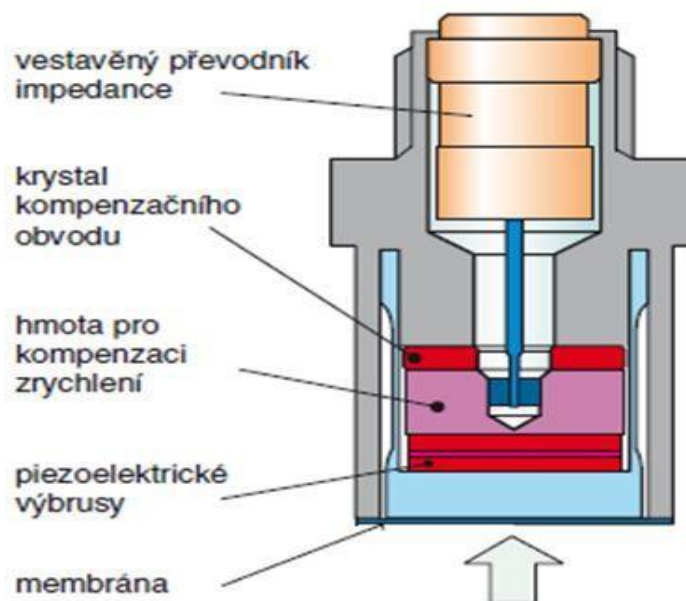
Snímače síly fungující na piezoelektrickém principu měření síly musí být konstruovány tak, aby nedocházelo k působení ohybových momentů na krystal, které by jej mohly porušit. Piezoelektrické krystalové rezonátory jako senzory, fungují na principu závislosti vlastního rezonančního kmitočtu senzoru na různých fyzikálních veličinách. Posun rezonančního kmitočtu lze vyjádřit jako funkci např. tlaku, deformace, síly. Tyto snímače se využívají především k měření rychle se měnících silových zatížení. Při použití senzorů pro proměnnou sílu se při výpočtech využívá mechanická impedance  $Z_m(j\omega)$ , pro harmonicky se měnící síly  $F(j\omega)$  a rychlost  $v(j\omega)$  se vypočítá ze vztahu:

$$Z_m(j\omega) = \frac{F(j\omega)}{v(j\omega)} \quad (2.3)$$

Při nahrazení senzoru síly hmotnostmi  $m_1$ ,  $m_2$ , a tuhostí  $K_s$ . Se výsledná síla  $F_s$ , která je měřena senzorem rovná posunu  $m_1$  a  $m_2$ . Výsledný vztah je poté:

$$F_s = vZ_{mt} = m_2 \frac{dv}{dt} \rightarrow \frac{F_s(j\omega)}{F_t(j\omega)} = 1 + \frac{j\omega m_2}{Z_{mt}(j\omega)} \quad (2.4)$$

$Z_{mt}$  je impedance struktury



Obrázek 8 Schéma uspořádání piezoelektrického snímače tlaku (9)

### 3 SILOMĚRY A PRUŽNÉ ČLENY (2) (3) (1) (10) (12) (13)

#### Siloměry

Zařízení sloužící k snímání statické a pomocí vhodných přípravků i dynamicky se měnící tahové, tlakové i taho-tlakové síly. Pomocí siloměrů se měří i velikost krouticího momentu. Měřicí rozsahy siloměrů se pohybují od setin kN až po tisíce kN. Siloměr je snímač, který převádí působící sílu na měřitelný elektrický signál. Tento signál může být změna napětí, změna proudu nebo frekvence.

Rozdělení senzorů sil podle principu:

Převod  $F \rightarrow \varepsilon$  – přímý – převod  $\varepsilon$  na: náboj (piezoelektrické)

změnu magnetických vlastností

změnu optických vlastností

- pružný člen – druh deformace  $\varepsilon$ : ohyb

tah, tlak

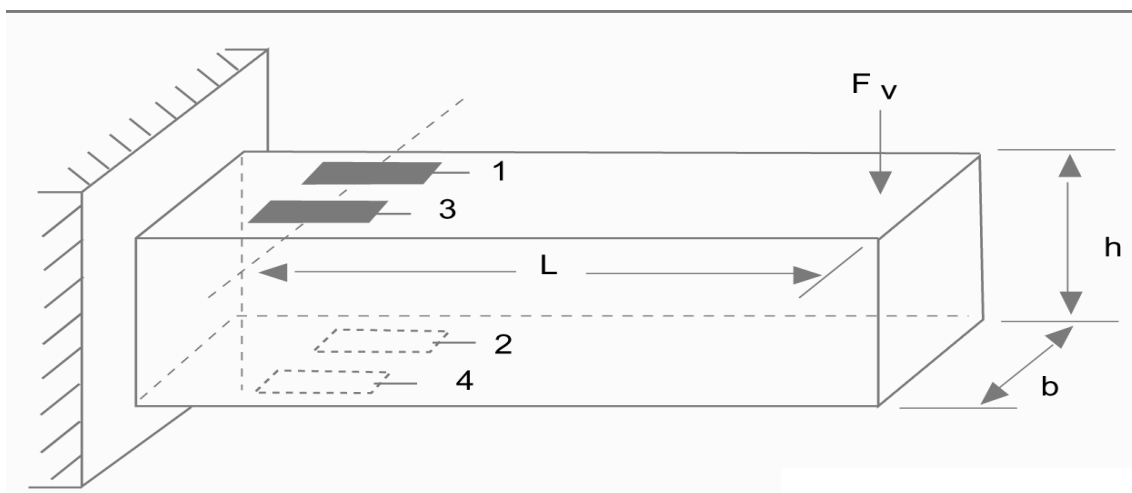
smyk

krut

..

### Pružné (deformační) členy

Jsou základním prvkem senzorů síly. Působící síla na tyto členy vyvolá mechanické napětí, které způsobí deformaci. Deformace pružného členu vytvoří poměrné prodloužení, které je možné měřit. V tomto případě se nejčastěji využívají odporové tenzometry.



Obrázek 9 Ohybový pružný člen (2)

Na obrázku je zakreslené umístění čtyř tenzometrických snímačů. Pomocí takto umístěných tenzometrů, které se zapojí do můstku a následně do vyhodnocovacího zařízení, lze vypočítat ohybový moment  $M_o$ , který je způsobený silou  $F$  působící na rameni  $L$ .

Pro tento typ nosníku platí vztahy:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_o}{W_o E} = \frac{F \cdot L}{W_o}, \quad W_o = \frac{h \cdot b^2}{6} \quad (3.1)$$

$\varepsilon$  je deformace

$\sigma$  je ohybové napětí [Pa]

$M_o$  je ohybový moment [Nm]

$W_o$  je průřezový modul v ohybu [m<sup>3</sup>]

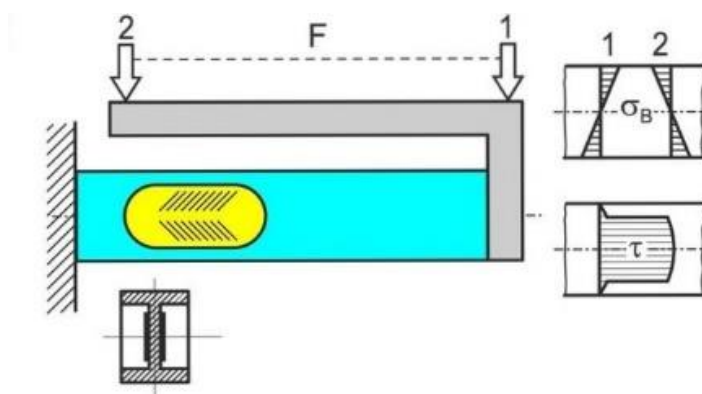
$F$  je působící síla [N]

$E$  Youngův modul pružnosti [Pa]

Umístění tenzometrů se liší podle provedení pružného členu a způsobu jeho zatížení.

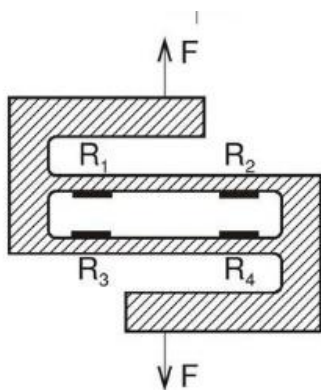
### **Rozdělení podle tvaru pružných členů:**

- 1) pružný člen s namáháním ve smyku** – slouží pro měření smykového napětí  $\tau$ . Toto napětí je maximální v ose nosníku a v tomto místě je ohybové napětí  $\sigma_B$  rovno nule (viz Obrázek 10). Tenzometry jsou umístěny v blízkosti neutrální osy a měří superpozici ohybového a smykového napětí. Nosník profilu I zmenšuje velikost  $\sigma_B$ . Při umístění tenzometrů pod úhlem 45° se měří pouze smykové napětí  $\tau$ . Tento typ má dobrou linearitu a není tak náchylný k cizímu zatížení, zejména k bočnímu.



Obrázek 10 Pružný člen s namáháním ve smyku (3)

- 2) pružný člen typu S** – slouží k měření tlakových nebo tahových sil, které působí na vnějších ramenech písmene S. Tenzometry přilepené uvnitř otvorů, které jsou zakryty víkem, jsou chráněny před okolními vlivy. Tenzometry jsou zapojeny v centrální snímací oblasti do plného Wheatstoneova můstku. Pružný člen typu S má, při oboustranném zatížení, minimální citlivost na zatížení mimo osu a tedy na parazitní momenty, které při měření vznikají. Malé délky ramen mají však za následek vznik geometrické nelinearity.

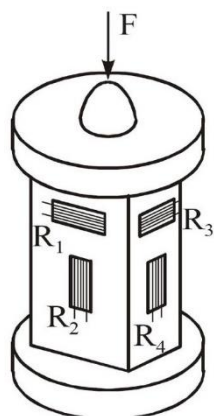


Obrázek 11 Pružný člen typu S (2)



Obrázek 12 Siloměr typu S (12)

- 3) pružný člen sloupcový** (též označován jako kanystrový) – patří mezi nejrozšířenější měřicí zařízení pro měření tlaku. Tenzometry jsou zapojeny do plného můstku. Dvojice  $R_1$  a  $R_3$  měří příčnou deformaci. Teplotní koeficient Youngova modulu pružnosti  $E$  se kompenzuje přidavným odporem. Ohybové namáhání, které by bylo rušivé, se odstraní použitím kulového členu na vrchní stranu sloupcového členu.

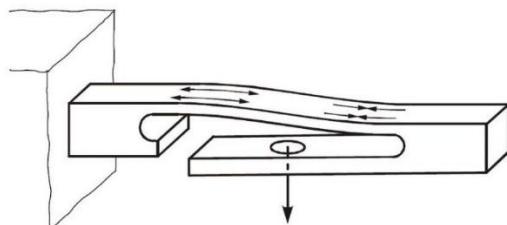


Obrázek 13 Pružný člen sloupcový (2)



Obrázek 14 Siloměr typu sloupcový člen (13)

- 4) pružný člen pro senzory hmotnosti** – tyto senzory mají minimální výrobní náklady a hodí se tak pro hromadnou výrobu. Základním tvarem těchto senzorů je “přeložený” nosník. Při zatížení vzniká tahová i tlaková deformace na vrchní straně nosníku. Na této straně se nalepí plný můstek tenzometrických snímačů, kterými je vznikající deformace měřena.

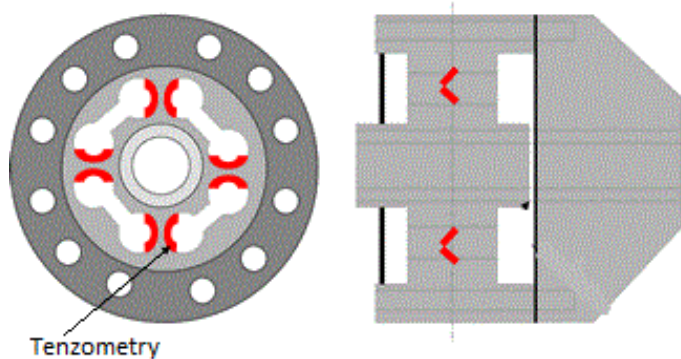


Obrázek 15 Pružný člen nosník (2)



Obrázek 16 Siloměr typu nosník (14)

- 5) pružný člen kruhového typu** – je proveden tak, aby se maximalizoval účinek smyku. Tenzometry jsou přichycené ke snížené části nosníku a jsou spojeny pod úhlem 45°. Siloměr má dobrou linearitu a není tak citlivý na jiné zatížení, zejména na boční.



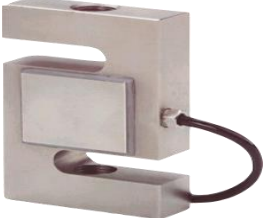


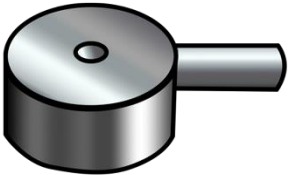

Tenzometry

Obrázek 17 Smykový snímač (15)


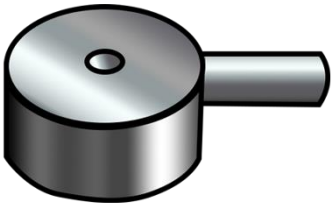


Obrázek 18 Siloměr - pružný člen smykový (16)

**Tabulkové porovnání siloměrů**

Typ siloměru	Přesnost	Nelinearita	Hystereze	Opakovatelnost	Kolísání nulové hodnoty
<p>Siloměr typu S</p> 	0,05%	0,05%	0,02%	0,01%	1%
<p>Sloupcový siloměr</p> 	0,1%	0,1%	0,03%	0,02%	1%
<p>Nosníkový siloměr</p> 	0,03%	0,03%	0,02%	0,02%	1%
<p>Miniaturní siloměr</p> 	0,03%	0,15%	0,05%	0,05%	2%
<p>Nízkoprofilový siloměr</p> 	0,1%	0,2%	0,1%	0,05%	1%

Tabulka 2 Porovnání siloměrů

Typ siloměru	Zatížení	Přichycení k objektu	Ochrana proti přetížení	Použití
	Tah Tlak	Pomocí dvou šroubů	Ano (vybrané modely)	Zkušební nástroje, jeřábové váhy, měření sil
	Tlak	Pomocí šroubu	Ano	Měřicí systémy nákladních aut, zásobníkové váhy
	Tah Tlak	Pomocí jednoho nebo dvou šroubů na jedné straně nosníku	Ne	Vážicí systémy, podlahové váhy
	Tah Tlak	Pomocí šroubu s vnějším závitem	Ne	V prostorech prostorově omezených
	Tah Tlak	Pomocí většího počtu šroubů po obvodu siloměru	Ano	Váhové systémy nádrží, nákladních aut, experimentální měření sil

Tabulka 3 Porovnání siloměrů



### 3.1 Porovnání vlastností vybraných siloměrů

Tato kapitola se zabývá vlastnostmi tří vybraných siloměrů, na kterých bude provedeno praktické měření. Jedná se o siloměr od české firmy LUKAS, a siloměry německých firem GTM a LORENZ Messtechnik.

#### **GTM SERIE K 20kN (17)**

Snímač síly s rotačně symetrickým deformačním členem. Využití tenzometrických snímačů firmy GTM. Působící síla je kompletně zachycena a nevznikají hluchá místa. Díky použití rotačně symetrických tenzometrů je minimalizováno působení rušivých sil a ohybových momentů, které vznikají při excentrickém zatížení.

#### **Výhody a použití:**

Pro statické i dynamické měření sil v tahu a tlaku.

Neomezená mez únavy při  $\pm 80\%$  jmenovitého zatížení.

Hermeticky uzavřený.

Necitlivý vůči změně působení síly.

Jednoduché upevnění. Různé možnosti připojení.

#### **Vybrané technické údaje:**

Třída přesnosti	0,02
Měřicí rozsah síly	1-100%
Chyba linearity	0,02%
Vliv ohybového momentu	$<0,003\%/N.m$
Vliv krouticího momentu	$0,005\%/N.F$
Jmenovitý rozsah napětí	5-20 V
Hmotnost	1 Kg
Dovolené přetížení	150%
Bezpečné přetížení	300%
Dovolený teplotní rozsah	10 až 60°C
Bezpečný teplotní rozsah	-40 až +120°C



Obrázek 19 Siloměr GTM série K 20kN (17)

**LUKAS – TENZO siloměr S-35 (18)**

Siloměr určený pro přesné měření statických i dynamických sil. Použití fóliových tenzometrů.

**Vlastnosti siloměru:**

Vysoká odolnost proti parazitním zatížením (boční zatížení, krouticí moment, chybový moment)

Malý výškový rozměr umožňující vytváření malých testovacích zařízení.

Malá nelinearita

Velká tuhost siloměru

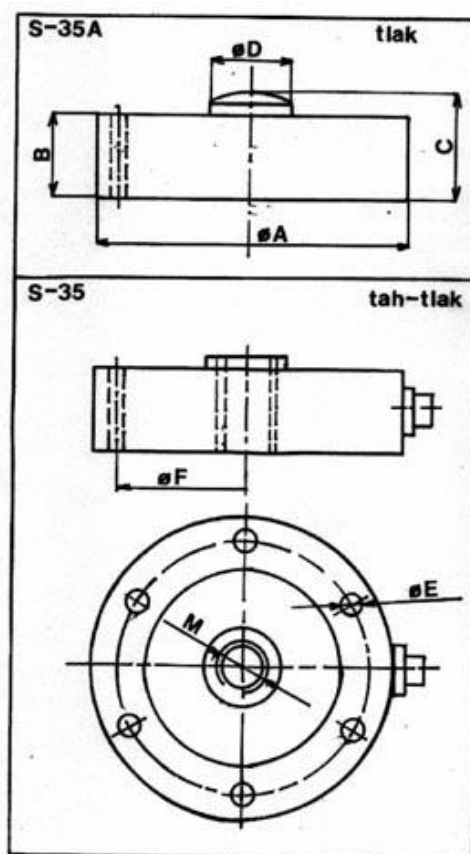
Barometrická kompenzace pomocí membrán

**Vybrané technické údaje:**

Jmenovité zatížení	3 – 200kN
Jmenovitý měřicí signál	12 – 21mV
Sloučená chyba	0,05 – 0,08%
Teplotní rozsah – kompenzovaný	-10 až 40°C
- bezpečný	-20 až +60°C
Reprodukovatelnost	0,02%
Vliv teploty – na nulovou hodnotu	0,02%/10K
- na měřicí signál	0,05%/10K
Nelinearita	0,02 – 0,05%



Obrázek 20 Siloměr S-35 (18)



Obrázek 21 Siloměr S-35 (18)

**Lorenz messtechnik K-25 (14)**

Senzor síly S-typu. Siloměr K-25 je určen pro měření malých a středně velkých rozsahů sil. Využívá se pro určování tahových a tlakových sil. Jeho součástí je mechanický doraz, který slouží proti přetížení a následnému poničení siloměru.

**Vybrané technické údaje:**

Třída přesnosti	0,1 – 0,2
Rozsah měření	0,02 – 50kN
Rozšířený rozsah teplot	-40 až 150°C
Dovolené přetížení	130%
Tolerance citlivost	$<\pm 0,1$
Referenční teplota	23°C
Boční odolnost proti silám	50%



Obrázek 22 Lorenz type k 25 (14)

## 4 CHYBY A NEJISTOTY (19) (7) (2) (1) (11)

Důležitým elementem při měření sil jsou chyby a nejistoty. V reálném světě neexistuje měření, které by bylo možné provádět bez jakékoli chyby a nejistoty. Výsledek měření je ovlivněn nejistotami každé součásti měřicího řetězce. Velký podíl na chybě a nejistotě měření má zvolený měřicí přístroj.

### 4.1 Chyby měřicích přístrojů

#### Typy měřicích přístrojů

Mechanické – tyto přístroje jsou vybaveny mechanickým ukazatelem, který na stupnici zobrazuje hodnotu měřené veličiny.

Elektronické – s mechanickým ukazatelem na stupnici.

- s převodem na digitální vyhodnocení. Přístroje s převodem na digitální výstup obsahují číslicový převodník, který převede velikost měřené veličiny na číselnou hodnotu. Tuto hodnotu můžeme odečíst na displeji integrovaném v měřicím přístroji nebo na připojeném zařízení.

#### Přesnost a chyby přístrojů

Přesnost přístroje je vlastnost, která udává, že za stanovených podmínek, je přístroj schopný ukazovat pravou hodnotu měřené veličiny. Pravou hodnotu není možné zjistit bez odchylek. Ty jsou způsobeny chybou odečtu, chybou přístroje nebo špatným provedením měření. Vyhodnocení přesnosti u přístrojů je rozdílné pro mechanické a elektronické měřicí přístroje. U mechanických přístrojů se přesnost vyjadřuje pomocí třídy přesnosti, která udává relativní chybu, která se vypočítá z absolutní chyby, vyjádřenou v procentech a vztaženou k maximálnímu rozsahu měřicího přístroje. Přesnost měření závisí na citlivosti přístroje, jemnosti dělení stupnice a také na správném odečtu polohy ukazatele na stupnici. Přesnost elektronických přístrojů se popisuje pomocí procentové nejistoty, která

vznikne při čtení a z rozsahu přístroje. V tomto případě se tyto dvě hodnoty sečtou.

U analogových přístrojů je chyba definovaná vztahem:

$$\Delta p = \frac{TP}{100} \cdot M \quad (4.1)$$

Kde: TP – definovaná třída přesnosti

M – měřicí rozsah

U digitálních přístrojů se chyba přístroje  $\Delta p$  určuje maximální odchylku, která může vzniknout mezi naměřenou hodnotou a hodnotou skutečnou. Chybu určíme ze vztahu:

$$\Delta p = \frac{\delta_1}{100} \cdot x + \frac{\delta_2}{100} \cdot M \quad (4.2)$$

Kde:  $\delta_1$  – chyba z odečtené hodnoty

$\delta_2$  – chyba rozsahu

M – největší hodnota měřicího rozsahu

## 4.2 Chyby měření

Chyba měření je rozdíl mezi skutečnou hodnotou měřené veličiny a hodnotou zjištěnou při měření. Žádné měření není tak dokonalé, aby nebylo zatížené chybou a tak se měřená hodnota pouze přibližuje k hodnotě skutečné. Na velikosti chyby závisí přesnost použitého měřicího přístroje a přesnost zvolené měřicí metody.

- 1) Hrubé chyby** – vznikají výjimečnou příčinou. Jejich původ může způsobit špatné zapsání výsledku, porucha měřicího přístroje, špatně nastavené podmínky měření, nevhodná volba typu měření. Tyto chyby je zapotřebí odstranit a měření opakovat, aby nedošlo k hrubému ovlivnění výsledku
- 2) Systematické chyby** – chyba, které vzniká nepřesností přístroje a použitím zvolené měřicí metody. Její hodnota je při opakování měření neměnná. Známe-li její příčinu, můžeme ji pomocí matematických operací korigovat, nebo úplně odstranit.

- 3) Náhodné chyby** – vznikají náhodnými rušivými elementy, které ovlivňují výslednou hodnotu měření. Náhodnou chybu nelze stanovit z jednoho měření, a proto je nutné provést větší počet opakování za účelem odstranění chyb. Minimální počet opakování, které umožní statistické zpracování je 5-10. Na druhou stranu více než 100-násobné opakování už výrazně nezpřesňuje výsledek.

### **Absolutní a relativní chyba**

- 1) Absolutní chyba ( $\Delta y$ )** – rozdíl mezi naměřenou hodnotou ( $y$ ) a skutečnou hodnotou ( $x$ )

Výpočtový vztah:

$$\Delta y = y - x \quad (4.3)$$

- Skutečná hodnota nelze při měření nikdy absolutně zjistit, z tohoto důvodu se nahrazuje tzv. konvenčně pravou hodnotou. Její velikost lze získat z přesnějšího měření, aritmetickým průměrem hodnot z většího počtu opakování nebo pomocí teoretických výpočtů.

- 2) Relativní chyba ( $\delta y$ )** – poměr absolutní chyby ( $\Delta y$ ) k okamžité hodnotě měřené veličiny ( $x$ )

Výpočtový vztah:

$$\delta y = \left( \frac{\Delta y}{x} \right) * 100 (\%) \quad (4.4)$$

- Ze vztahu vychází, že relativní chyba je tím větší, čím nižší je měřená hodnota

- 3) Třída přesnosti** – vyjadřuje maximální relativní chybu vztahenou na rozsah přístroje

### 4.3 Nejistoty měření

Nejistota měření je parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině. Hodnota nejistoty se přiřazuje k výsledku se znaménkem  $\pm$ . Nejistota měření vyjadřuje interval, ve kterém se nachází skutečná hodnota měřené veličiny s určitou pravděpodobností. Nejistota měření nezávisí jen na přesnosti použitých přístrojů, ale i na zvolené metodě měření a na náhodných vlivech, které se nedají předem vyloučit. V porovnání s výše uvedenými chybami, které vznikají při měření, je výpočet a určování nejistot modernější a komplexnější metodou při posuzování měření. Uvažujeme nejistoty všech činitelů, které ovlivňují měření. Činitele ovlivňující nejistotu jsou: fyzikální jevy, které vstupují do měření – nejistota etalonu – nejistota kalibrace - měřidlo – nejistota měřicího řetězce - rušivé vlivy při měření.

#### Typy nejistot

NEJISOTA TYPU A/B	$u_A/u_B$
KOMBINOVANÁ NEJISTOTA	$u_C$
KOEFICIENT NEJISTOTY TYPU A	$k_A$
ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA TYPU A a KOEFICIENT ROZŠÍŘENÍ	$u_S = k_u \times u_C$

Tabulka 4 Typy nejistot

- a) Standardní nejistota typu A ( $u_A$ )** – nejistoty způsobeny náhodnými chybami, jejichž příčina není vždy známa. Tato nejistota se stanovuje z opakovaného měření za dodržení stejných podmínek. Při větším počtu opakování se velikost nejistoty snižuje.

Vyhodnocování nejistoty typu A: Odhad výsledné hodnoty pro počet měření  $n$  ( $n > 1$ ) je vyjadřován aritmetickým průměrem:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.5)$$

$\bar{x}$  je aritmetický průměr naměřených hodnot

$n$  je počet naměřených hodnot

$x_i$  jsou jednotlivé naměřené hodnoty



Nejistota se poté určí jako výběrová směrodatná odchylka této hodnoty podle vztahu:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.6)$$

$u_A$  je standardní nejistota typu A

$n$  je počet opakování

$\bar{x}$  je aritmetický průměr naměřených hodnot

$x_i$  jsou jednotlivé naměřené hodnoty

**b) Standardní nejistota typu B ( $u_B$ )** – nejistoty způsobené známými příčinami. Tato nejistota nezávisí na počtu opakování. Jde o nedokonalosti zapříčiněné měřicími přístroji, použitou měřicí metodou, konstantami a měřicími podmínkami.

Vyhodnocení nejistot typu B: Při určování nejistoty se využívají:

- údaje výrobce měřicí techniky (technické parametry použitého zařízení, např. třída přesnosti elektromechanického (ručkového) měřicího přístroje nebo dvojice konstant charakterizujících chybu číslicového měřicího přístroje, například teploměru)
- zkušenosti z předchozích měření
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a techniky
- údaje získané při kalibraci a z certifikátů
- nejistoty referenčních údajů v příručkách

Pro každý z výše uvedených zdrojů nejistot se určí dílčí nejistota typu B -  $u_{bi}$ . Výsledná nejistota se poté určí ze vztahu:

$$u_b = \sqrt{(u_{b1}x)^2 + (u_{b2}x)^2 + (u_{b3}x)^2 \dots} \quad (4.7)$$

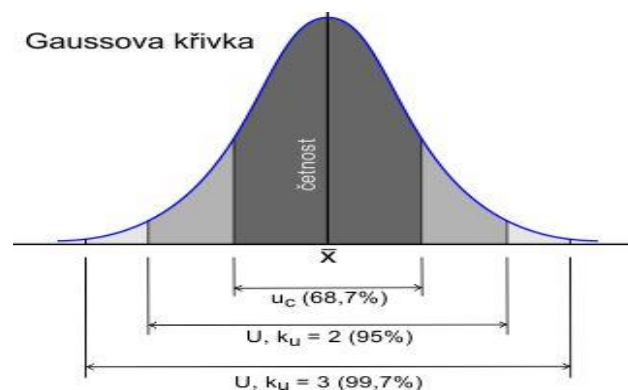
**c) Kombinovaná standardní nejistota** - udává interval, ve kterém se s velkou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny. V praxi se dává této nejistotě při vyhodnocování výsledků přednost před použitím pouze nejistoty typu A nebo B.

Jelikož se její hodnota získává z obou typů nejistot, dostaneme při měření přesnější výsledek. Určí se pomocí vztahu:

$$u_c = \sqrt{(u_A)^2 + (u_B)^2} \quad (4.8)$$

**d) Rozšířená standardní nejistota** – pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty v intervalu udaném standardní nejistotou je 68% (viz Obrázek 23). Rozšířená standardní nejistota se získá rozšířením kombinované standardní nejistoty. Rozšířená nejistota poté zvětšuje interval, ve kterém se skutečná hodnota nachází. U rozšířené nejistoty je nutné uvádět i hodnotu koeficientu rozšíření. Pro hodnotu koeficientu  $k_u=2$  se pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty zvedá na 95%. Pro hodnotu  $k_u=3$  se pravděpodobnost blíží 100%. Tento typ nejistoty se spočítá ze vztahu:

$$u_s = k_u \times u_c \quad (4.9)$$



Obrázek 23 Gaussova křivka (20)

## Zdroje nejistot

Zdroji nejistot se rozumí veškeré vlivy, které mohou svým působením ovlivnit průběh měření a tím zvětšují rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Na výskyt nejistot má vliv mnoho faktorů:

- Nepřesnost měřidel, přístrojů (kalibrační nejistota)
- Chyba čtení
- Nedostatečná znalost měřicích podmínek (teplota, vlhkost)
- Vliv lidského faktoru
- Nesprávné použití měřidel
- Špatně připravený tvar a povrch měřeného tělesa
- Nevhodně zvolená měřicí metoda

## 5 ČINITELÉ OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST MĚŘENÍ PROVÁDĚNÉ POMOCÍ ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ A TENZOMETRICKÝCH SILOMĚRŮ (7) (19) (1)

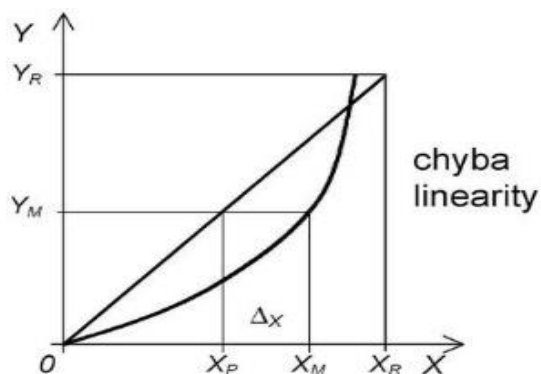
- **Směrová citlivost tenzometru** – je popisována jako poměr citlivosti při deformaci ve směru hlavní osy a kolmo na ni. Rozměr tenzometrických vodičů je ve směru namáhání maximální, aby bylo docíleno vysoké citlivosti na namáhání v podélném směru a aby došlo k potlačení vlivu namáhání v kolmém směru. Nejvíce se směrová citlivost projevuje u drátkových tenzometrů.

- **Tečení (creep)** – při působení konstantním zatížením na tenzometr dochází po čase ke ztrátě citlivosti. Chyba tečení se projeví změnou měřicího signálu za konstantních podmínek a daného časového intervalu od zavedení konstantní síly.

- **Vlhkost** – ovlivňuje kvalitu měření a může způsobit chybu. Při měření ve velmi vlhkém prostředí, může dojít k proniknutí vlhkosti pod izolaci a změnit odpor mezi měřeným místem a tenzometrem. Po nalepení tenzometru je potřeba jej překrýt ochrannou vrstvou, která zamezí působení vlhkosti na měřicí části.

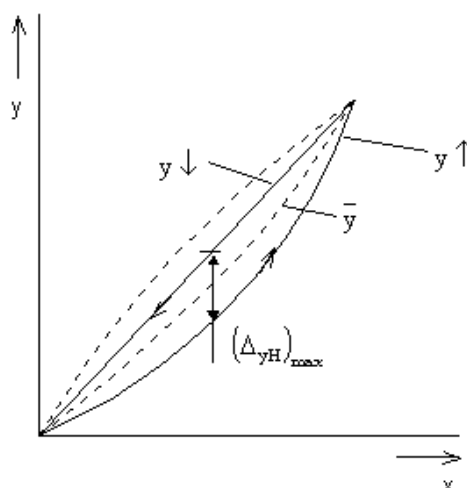
- **Vliv magnetického pole** – proměnné magnetické pole je vytvářeno elektrickým napětím v mřížce tenzometru a přívodních kabelech. Magnetické pole může mít negativní vliv na přesnost měření. Tento jev lze potlačit dostatečným stíněním v měřícím obvodu.

- **Chyba linearity** – odchylka naměřeného průběhu výstupní veličiny od předpokládaného ideálního lineárního průběhu závislosti měřicího signálu na zatížení.



Obrázek 24 Chyba linearity (8)

- **Chyba hysterese** – hysterese je označení pro chování dynamického systému, kdy výstupní veličina je závislá na vstupní veličině, ale také na předchozím jevu.

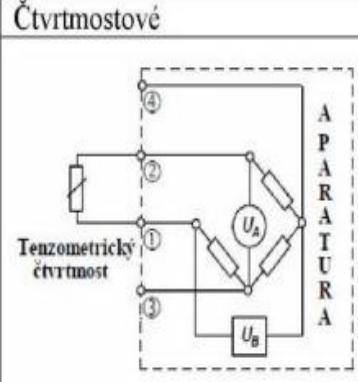
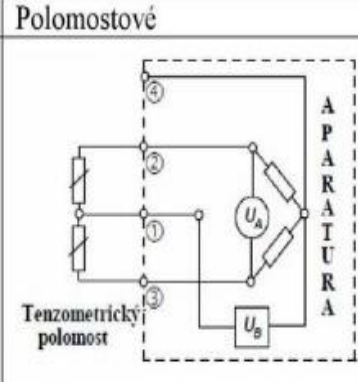
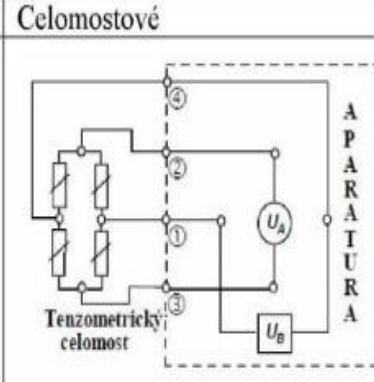


Obrázek 25 Chyba hysterese (7)

- **Deformační citlivost** (tenzometrická konstanta) – vyjadřuje citlivost tenzometru. Citlivost je udávána jako hlavní parametr u tenzometrů. U kovových tenzometrů je konstanta  $k=2$ . U polovodičových dosahuje rozmezí -170 až 200.

- **Teplotní závislost** – odpor tenzometru je teplotně závislý. Tenzometr má jinou teplotní roztažnost než měřený objekt. Závislost mezi teplotními roztažnostmi charakterizuje teplotní součinitel odporu. Teplotní závislost můžeme kompenzovat použitím teplotně samokompensovaných tenzometrů. U těchto typů lze za pomoci změn chemického složení, tepelného a

mechanického zpracování minimalizovat teplotní deformaci v určitém rozsahu teplot. K takovým tenzometrům jsou dodávány grafy od výrobce, ze kterých můžeme určit teplotní závislost. Další metodou je kompenzace pomocí charakteristik tenzometru. V tomto případě je součinitel odporu úměrný součinu tenzometrické konstanty a rozdílu teplotních součinitelů roztažnosti materiálu měřicí části tenzometru a měřeného objektu. Častým způsobem kompenzace je zapojení tenzometru do tzv. plného nebo polovičního můstku

Čtvrtmostové	Polomostové	Celomostové
		
<p>Nejjednodušší za stálých okolních podmínek Nemožnost teplotní kompenzace Nutné samokompenzační tenzometry</p>	<p>Možnost teplotní kompenzace Dvojnásobná citlivost Časté zapojení</p>	<p>Úplná teplotní kompenzace (pro identické tenzometry na stejné teplotě) Čtyřnásobná citlivost Prostorově náročné</p>

Obrázek 26 Způsoby zapojení do můstku (19)

**- Teplotní rozsah** – u tenzometrů se udává:

- a) Rozsah teplot, při kterých můžeme provádět přesná měření
- b) Vliv změny teplot a její kolísání při měření

Rozsah teplot dosahuje u kovových tenzometrických senzorů hodnot od  $-270^{\circ}\text{C}$  do  $950^{\circ}\text{C}$ . Správná funkce závisí na kompenzaci chyb vznikající teplotní dilatací. U fóliových tenzometrů se udává rozsah od  $-250^{\circ}\text{C}$  do  $300^{\circ}\text{C}$ . Rozsah se mění v závislosti na použitém materiálu tenzometru, měřicí mřížky, podložky, lepidla, spojů, atd. Při vyšších teplotách nad  $600^{\circ}\text{C}$  se tenzometry využívají pouze k dynamickým měřením.

- **Teplotně-samokompenzované tenzometry** – pomocí změny chemického složení a změn tepelného a mechanického zpracování lze minimalizovat teplotní deformace v určitém rozsahu teplot. K takovým typům tenzometrů jsou přikládány grafy, ze kterých se vyčte teplotní závislost.

- **Dynamické namáhání tenzometrů**

– podmínky měření: a) znalost únavových a lomových vlastností

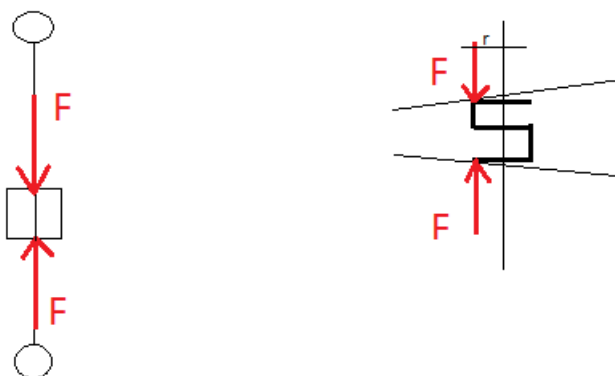
b) znalost mezní frekvence, při které je měření spolehlivé

- **Velikost procházejícího proudu** – při protékání elektrického proudu dochází k zahřívání vodivých součástí a tím i ke změnám jejich vlastností. Je důležité volit správnou velikost zvoleného proudu v měřicím obvodu nebo je možné přejít na pulsní napětí.

- **Parazitní moment**

Provést měření se stoprocentní přesností výsledku je nemožné, jelikož se při měření vyskytují parazitní vlivy, které ovlivňují přesnost měření a způsobí, že měření je zatíženo určitou chybou, kterou je snaha minimalizovat.

Vliv parazitního momentu je u siloměrů udáván pouze u některých výrobců a jeho popis bývá nedostatečný nebo žádný. Hlavní měřicí směr siloměrů leží v jeho ose. Parazitní moment vzniká při zatížení mimo osu siloměru. Toto zatížení může být způsobeno nesprávným uchycením siloměru, nedostatečným prostorem na měřicím zařízení, nebo nerovností povrchu, ke kterému je siloměr připevněný.



Obrázek 27 Parazitní moment

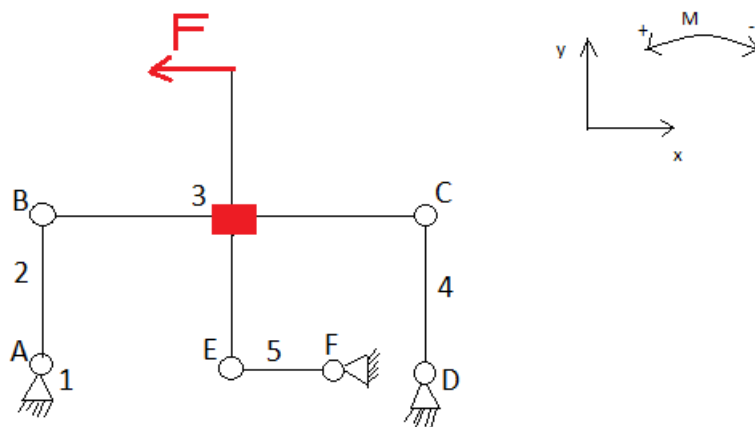
## 6 METODIKA A MECHANISMUS PRO MĚŘENÍ PARAZITNÍCH MOMENTŮ (21) (22)

### 6.1 Metodika měření

Metodika měření zahrnuje navrhnutí zařízení, na kterém bude možné zatěžovat siloměr pouze pomocí momentu. Síla na proměřovaný siloměr tedy nebude působit v ose siloměru, ale kolmo na rameno umístěné v ose siloměru. Z tohoto důvodu je zapotřebí navrhnout mechanické schéma a konstrukci, pomocí které bude možné měření uskutečnit. Cílem měření je porovnání siloměrů a jejich citlivosti právě na parazitní momenty.

#### 6.1.1 Mechanické schéma

Cílem mechanického schématu je sestavit soustavu těles, ve které v místě uložení siloměrů působí na siloměr pouze moment vyvolaný pomocí síly  $F$ . Síla  $F$  je zavedena tak, aby zatěžovala siloměr přes rameno. V místě, kde je umístěný siloměr, tak vznikne požadovaný moment. Návrh mechanismu (Obr. 28) je soustava tvořená z pěti těles a uložení je provedeno pomocí šesti rotačních vazeb.



Obrázek 28 Mechanismus

Při řešení mechanického modelu je zapotřebí určit pohyblivost a statickou určitost soustavy. Každé volné těleso v prostoru má tři stupně volnosti. Pomocí výpočtu stupňů volnosti získáme pro  $n = 0$  soustavu nepohyblivou a staticky určitou. Pro  $n > 0$ , (1,2,...), je soustava pohyblivá s jedním, dvěma či více stupni

volnosti, staticky určitá. Pro  $n < 0, (-1, -2, \dots)$ , je soustava nepohyblivá, jednou dva a vícekrát.

Výpočet počtu stupňů volnosti vychází ze vztahu:

$$n = 3(u - 1) - 3vp - 2(r + p + v) - 1o \quad (6.1)$$

Kde:  $n$  – počet stupňů volnosti

$u$  – počet členů soustavy

$vp$  – počet pevných vazeb

$r$  – počet rotačních vazeb

$p$  – počet posuvných vazeb

$v$  – počet valivých vazeb

$o$  – počet obecných vazeb

### 6.1.2 Statické řešení

Cílem statického řešení je vyšetření reakcí ve vazbách a vyřešení přídatných silových účinků tak, aby soustava byla v dané poloze v rovnováze. Při statickém řešení soustav těles se silové účinky rozdělují na: akční, reakční, vnější a vnitřní. Při výpočtu se využije vlastnosti nezatížených binárních členů. Nezátížený binární člen je takový člen soustavy těles, na který nepůsobí žádná vnější síla. V nezátíženém binárním členu se dvěma rotačními vazbami, vznikají ve vazbách dvě reakce opačného směru na jedné nositelce. Tyto reakce musí splňovat podmínku rovnováhy. Z toho plyne, že nezátížený binární člen přenáší pouze síly ležící na spojnici středů rotačních vazeb.

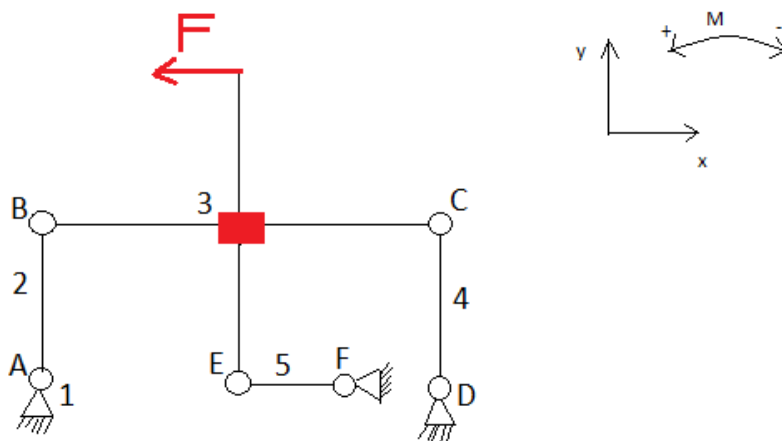
Počtení řešení rovnováhy rovinných soustav těles

1. Návrh mechanického modelu
2. Určení pohyblivosti a statické neurčitosti soustavy
3. Uvolnění jednotlivých těles soustavy
4. Sestavení rovnovážných rovnic
5. Rozbor řešitelnosti a řešení soustavy rovnic
6. Rozbor získaných výsledků



### 1. Návrh mechanického modelu

Mechanický model je tvořen pěti tělesy, které jsou spojeny šesti rotačními vazbami. Hlavní cíl je navržení takového mechanismu, ve kterém bude na siloměr působit pouze zaváděný moment pomocí síly  $F$ .



Obrázek 29 Mechanický model

### 2. Určení pohyblivosti a statické určitosti soustavy

Výpočet stupňů volnosti:

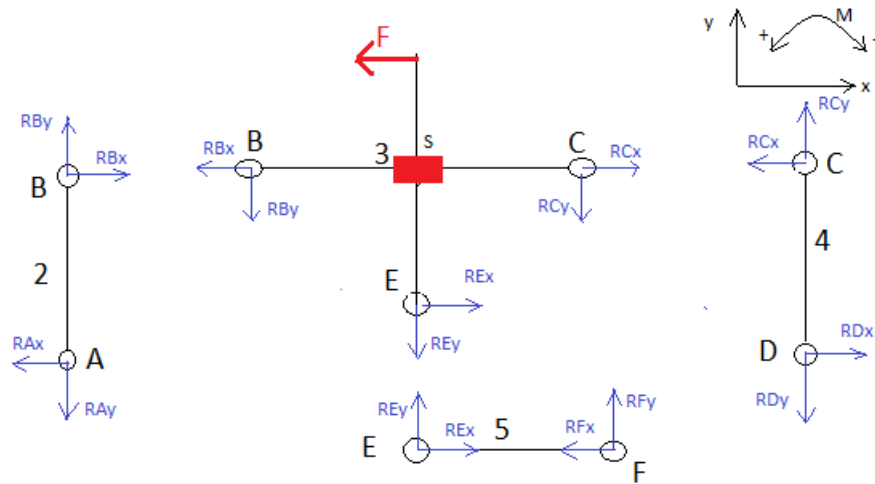
$$n = 3(5 - 1) - 3 * 0 - 2(6 + 0 + 0) - 1 * 0 \quad (6.2)$$

$$n = 12 - 12 = 0^\circ \text{ volnosti}$$

Soustava má  $0^\circ$  stupňů volnosti a je tak staticky určitá

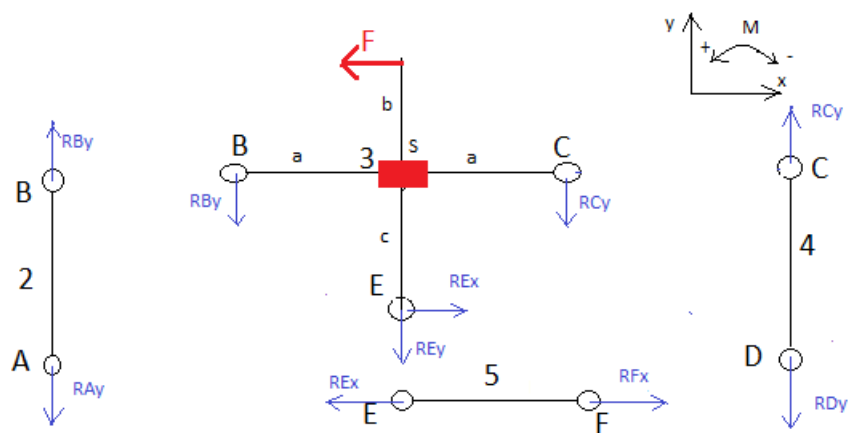
### 3. Uvolnění jednotlivých těles soustavy

Uvolněním těles vzniknou v rotačních vazbách reakce působící ve směru  $x$  a  $y$ . Reakce jsou pojmenovány pomocí bodů ve kterých působí a pomocí směru jejich účinku.



Obrázek 30 Mechanický model – uvolnění

Po využití vlastnosti nezátížených binárních členů 2,4,5 se soustava zjednoduší:



Obrázek 31 Mechanický model - zjednodušení

Z vlastností soustavy a podmínek rovnováhy získáme některé reakce:

$$R_{Bx} = 0$$

$$R_{Ax} = 0$$

$$R_{Cx} = 0$$

$$R_{Dx} = 0$$

$$R_{Fy} = 0$$

$$R_{Ey} = 0$$

#### 4. Sestavení rovnovážných rovnic

Neznámé reakce soustavy jsou:  $RA_y$ ,  $RBy$ ,  $RC_y$ ,  $RD_y$ ,  $RF_x$ ,  $RE_x$

Rovnovážné rovnice soustavy jsou:

- Člen 2. I.  $RBy - RA_y = 0$
- Člen 3. II.  $x: -F + RE_x = 0 \rightarrow F = RE_x$
- III.  $y: -RBy - RC_y - RE_y = 0$
- IV.  $M_s: F \times b + RE_x \times c + RBy \times a - RC_y \times a = 0$
- Člen 4. V.  $RC_y - RD_y = 0$
- Člen 5. VI.  $RF_x - RE_x = 0$

#### 5. Rozbor řešitelnosti a řešení soustavy rovnic

Soustava má šest rovnovážných rovnic pro šest neznámých reakcí. Soustavu rovnic je tedy možné matematicky vyřešit. Rovnice lze zapsat v maticovém tvaru  $Ax = b$

$$\begin{matrix} & & A & & x & & b \\ \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 * a & -1 * a & 0 & 2 * c * b & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} RA_y \\ RBy \\ RC_y \\ RD_y \\ RE_x \\ RF_x \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 0 \\ F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Řešení soustavy:

Pomocí programu na řešení matic.

Hodnost matice = 6.  $\rightarrow$  matice má řešení

Pomocí Leibnizova pravidla je výsledek pro moment působící v bodě S:

$$M_s = F * c + F * d \quad (6.3)$$

F je působící síla [N]

a je délka ramen od siloměru k rotační vazbě

c je délka ramene [m]

b je délka ramene [m]

### 6.1.3 Schéma měření

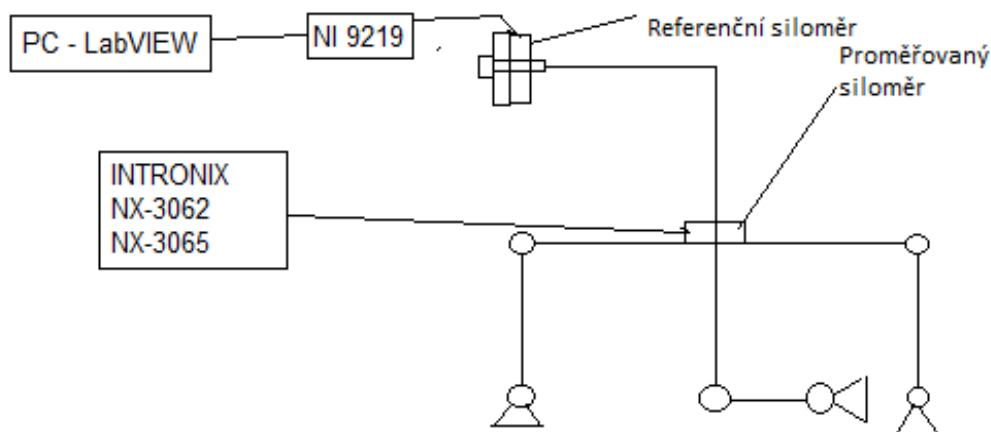
Signál získaný z referenčního siloměru vstupoval do měřicího modulu NI 9219, který připojený siloměr napájí a zároveň zpracovává jeho signál. Zpracovaný signál je poté pomocí USB propojen do programu LabVIEW v PC. Software LabVIEW od společnosti National Instruments umožňuje zpracování dat získaných při testování a měření pomocí siloměrů.

Signál z testovaných siloměrů vstupoval do vyhodnocovacího zařízení INTRONIX NX-3062 respektive INTRONIX NX-3065.

Jako referenční siloměr je použit *Lukas S-35 3 kN*. Pomocí přitahování a povolování šroubu, který je vešroubován do siloměru se zavádí síla kolmá na měřicí osu proměřovaného siloměru. Referenční siloměr je zatěžován v hlavní měřicí ose a nepůsobí na něj žádné parazitní momenty.

Proměřované siloměry jsou:

- Lukas typ: S-35 10kN
- GTM typ: serie K 20kN
- Lorenz messtechnik typ: K-25 20kN



Obrázek 32 Schéma zapojení

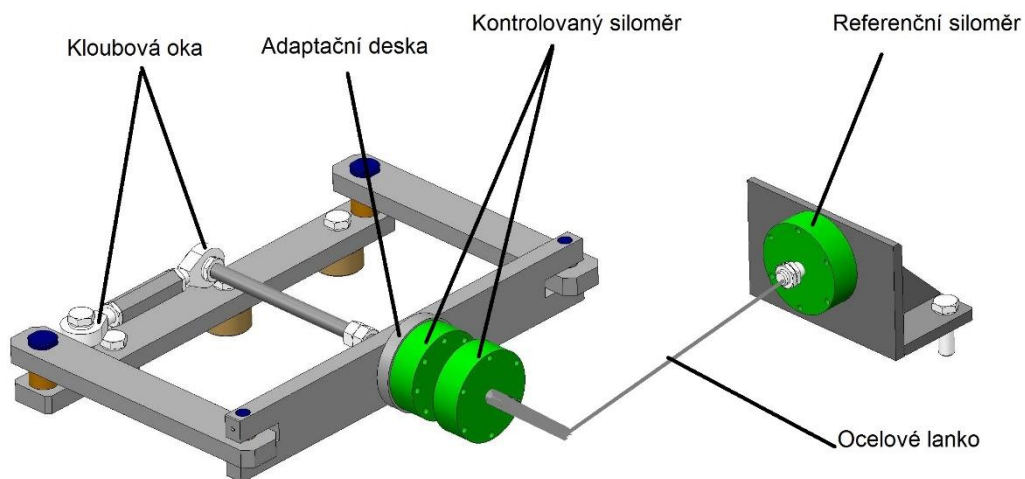
### 6.1.4 Konstrukce mechanismu

Pro změření citlivosti siloměrů na parazitní momenty je zapotřebí navrhnout a vyrobit držák siloměrů takový, který bude odpovídat navrženému mechanismu. Mechanismus pro měření parazitních momentů musí splňovat podmínky vycházející z návrhu mechanického modelu. Uložení pomocí rotačních vazeb neumožňuje přenášení rušivých sil, které by ovlivňovaly měření. Rotační uložení

je realizováno pomocí čtyř čepů a dvou kloubových ok. Kloubová oka umožňují nastavení polohy proměřovaného siloměru do správného směru tak, aby osa siloměru byla kolmo na osu referenčního siloměru.

Držák je konstruován tak, aby šel upevnit do stolu, na kterém je možné provést měření. Rozměry stolu jsou 750 x 1020 mm. Stůl má pět T drážek s roztečí 160 mm, které slouží k uchycení požadovaných součástí.

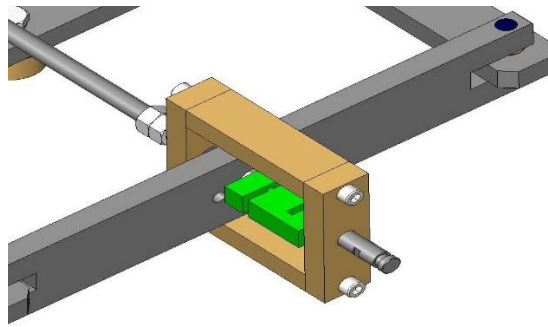
Referenční siloměr je uchycen ke konzoli, která je připevněná pomocí šroubů ke stolu s T drážkami. Pomocí šroubu umístěného v referenčním siloměru je do soustavy zaváděna síla, která na proměřovaném siloměru vytvoří parazitní moment.



Obrázek 33 Mechanismus pro měření parazitních momentů

### Uchycení siloměru typu S

Pro uchycení siloměrů typu S bylo zapotřebí vyrobit držák, do kterého bude možné siloměr přichytit a půjde s ním nastavit siloměr do správného směru, který bude kolmý na referenční siloměr. Držák se skládá ze čtyř dílů sešroubovaných k sobě a vede kolem základní desky. Do držáku je zašroubovaný díl, který slouží k upevnění lanka propojeného ke konzoly. Přes toto lanko vede do soustavy zavedená síla z referenčního siloměru a vnáší do soustavy sílu, která na rameni  $b + c$  vytvoří zatěžovací moment.



Obrázek 34 Uchycení siloměru typu S

## 7 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Praktické měření probíhalo ve dnech 28.6. – 30.6. 2017 v laboratoři, která se nachází na ústavu výrobních strojů a zařízení. Mechanismus byl přišroubován k základnímu stolu pomocí tří šroubů M16 a konzola pro referenční siloměr pomocí dvou šroubů M16. Siloměry byly přichyceny a zapojeny do vyhodnocovacích zařízení podle schématu. Referenční siloměr zatěžovaný osovou silou byl propojen pomocí karty NI 9219, která byla pomocí USB kabelu spojena do PC. V programu LabVIEW se na monitoru ukazovala aktuální síla působící na siloměr. Proměřované siloměry byly připojeny k vyhodnocovacímu zařízení INTRONIX NX-3062 nebo INTRONIX NX-3065. Do siloměrů se vnášela síla v rozmezí 0 až 400N v rozestupu po 50N. Siloměry byly proměřovány vzestupnou a následně sestupnou silou. V každém směru proběhly tři měření.

Pro siloměry LUKAS S-35 a GTM série K bylo použito zařízení INTRONIX NX-3062.

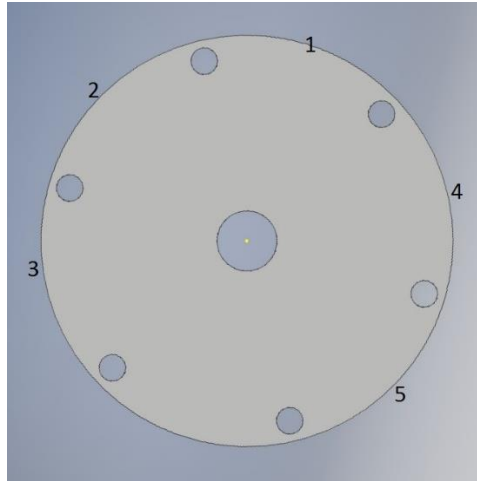
Pro siloměr Lorenz Messtechnik K-25 bylo použito zařízení INTRONIX NX-3065.

### 7.1 Měření siloměru S-35

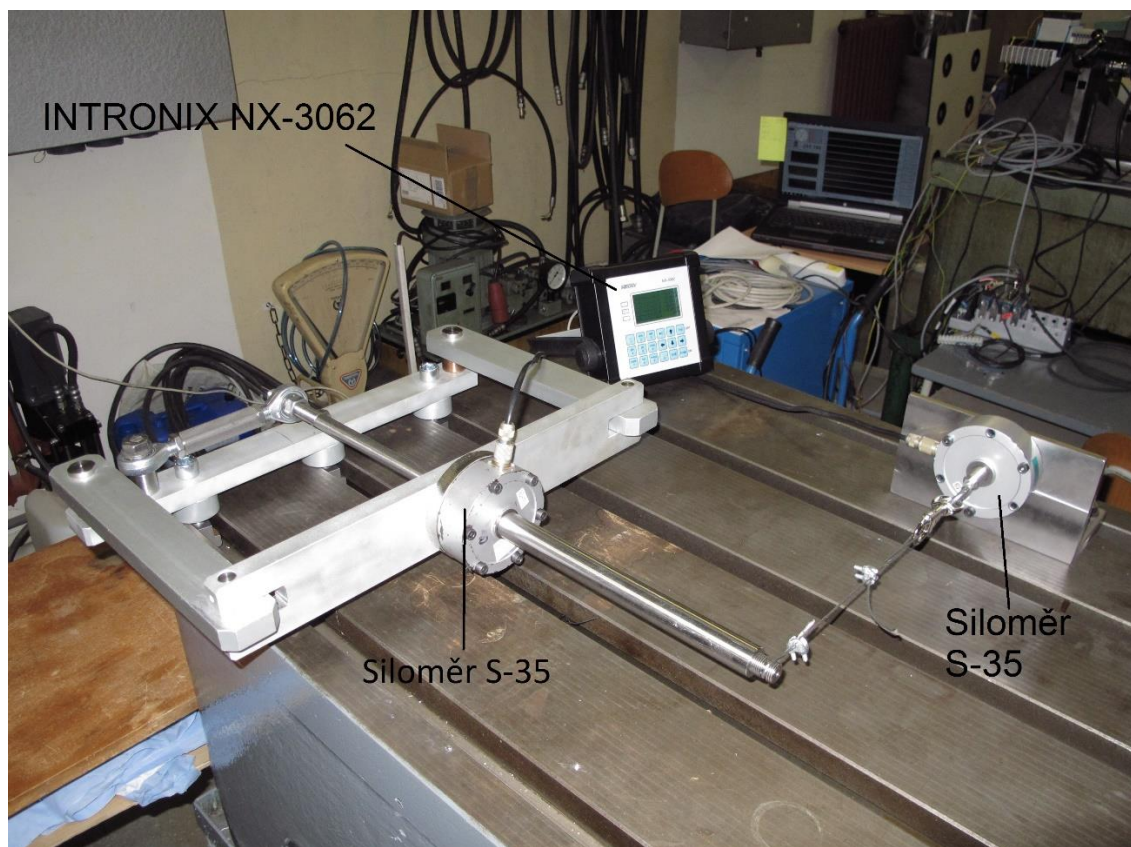
Prvním testovaným siloměrem byl siloměr od českého výrobce LUKAS typ S – 35 10kN. Siloměr využívá fóliové tenzometry. Výrobce udává vysokou odolnost siloměru proti parazitním zatížením.

Siloměr uchycený pomocí šesti šroubů byl proměřen v pěti natočeních. Použité vyhodnocovací zařízení INTRONIX NX-3062, připojené pomocí konektoru do siloměru. Polohy byly určeny pomocí natočení konektoru (viz

Obrázek 35). Čísla na obrázku znázorňují směr, kterým byl konektor natočen při daném měření. Do siloměru je vnášena síla pomocí ocelového lanka přes páku a přes referenční siloměr LUKAS S-35 3kN.

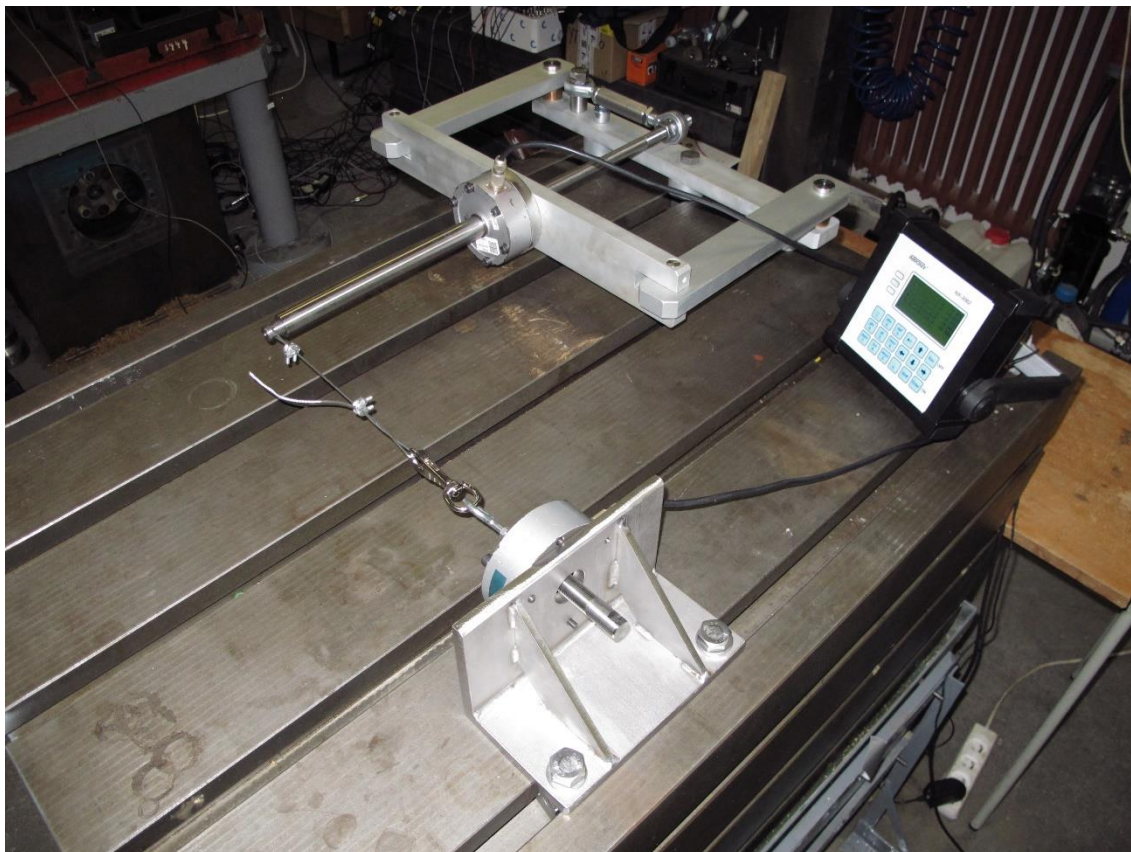


Obrázek 35 Polohy natočení konektoru



Obrázek 36 Měření siloměr S-35





Obrázek 37 Měření siloměru S-35

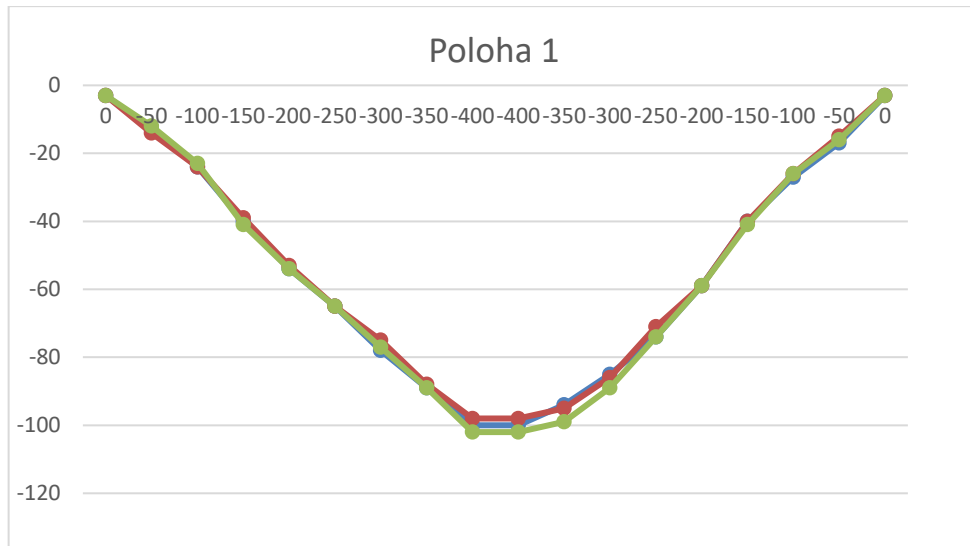


Obrázek 38 Měření siloměru S-35

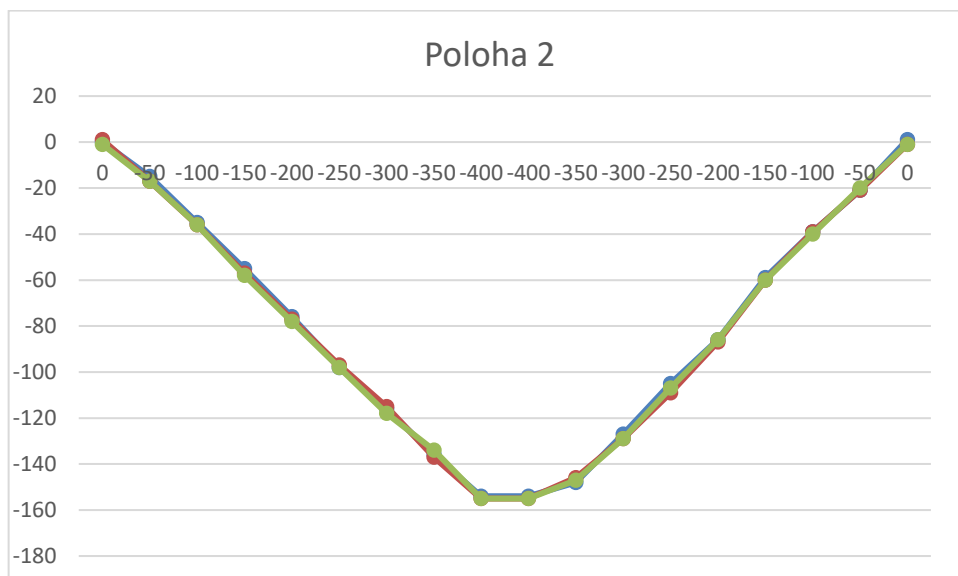


Následující grafy ukazují směrovou citlivost siloměru. Siloměr byl v každé poloze proměřen ve třech opakováních.

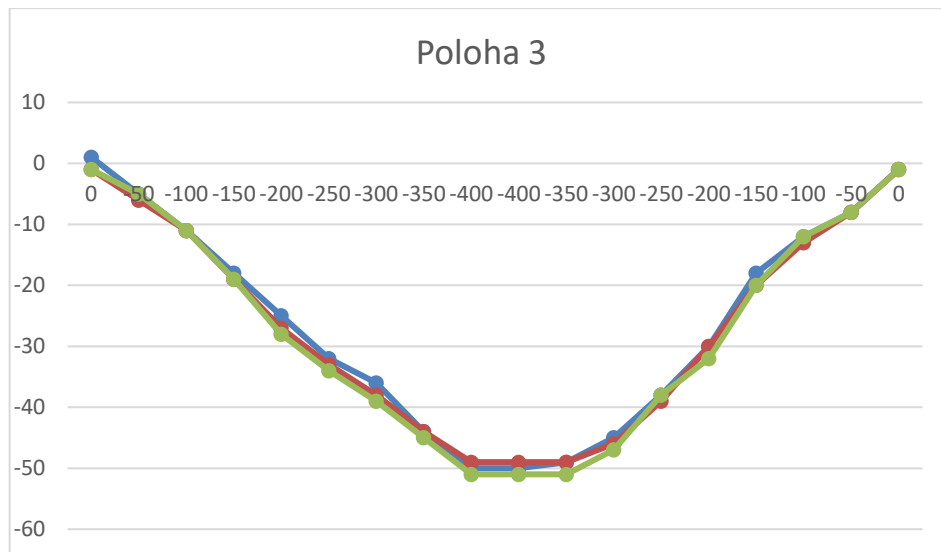
Poloha 1 – natočení konektoru vpravo nahoru – 13°



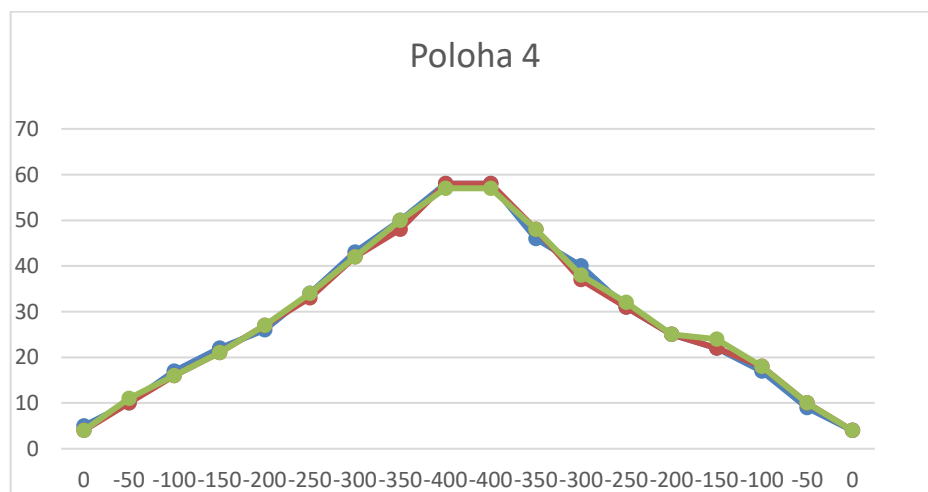
Poloha 2 – natočení konektoru vlevo nahoru – (-17°)



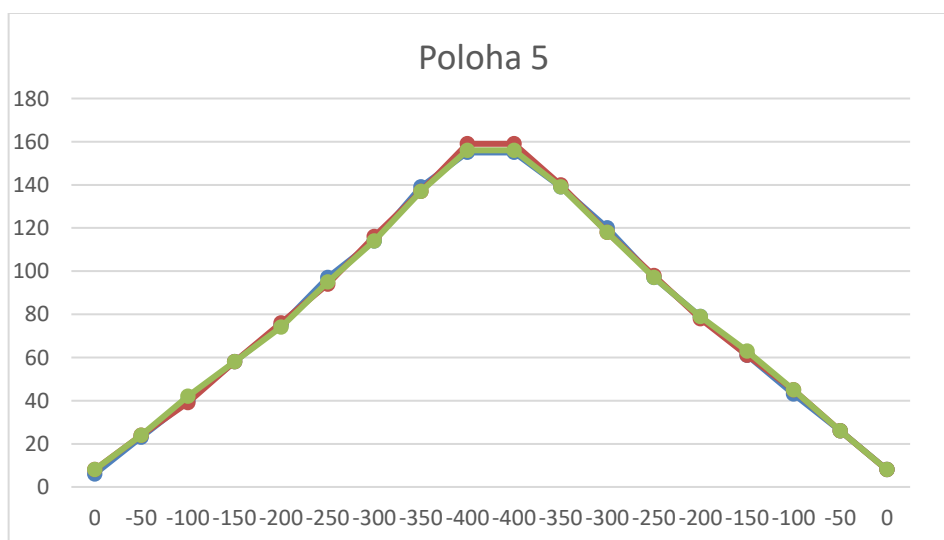
Poloha 3 – natočení konektoru vlevo – (-50°)



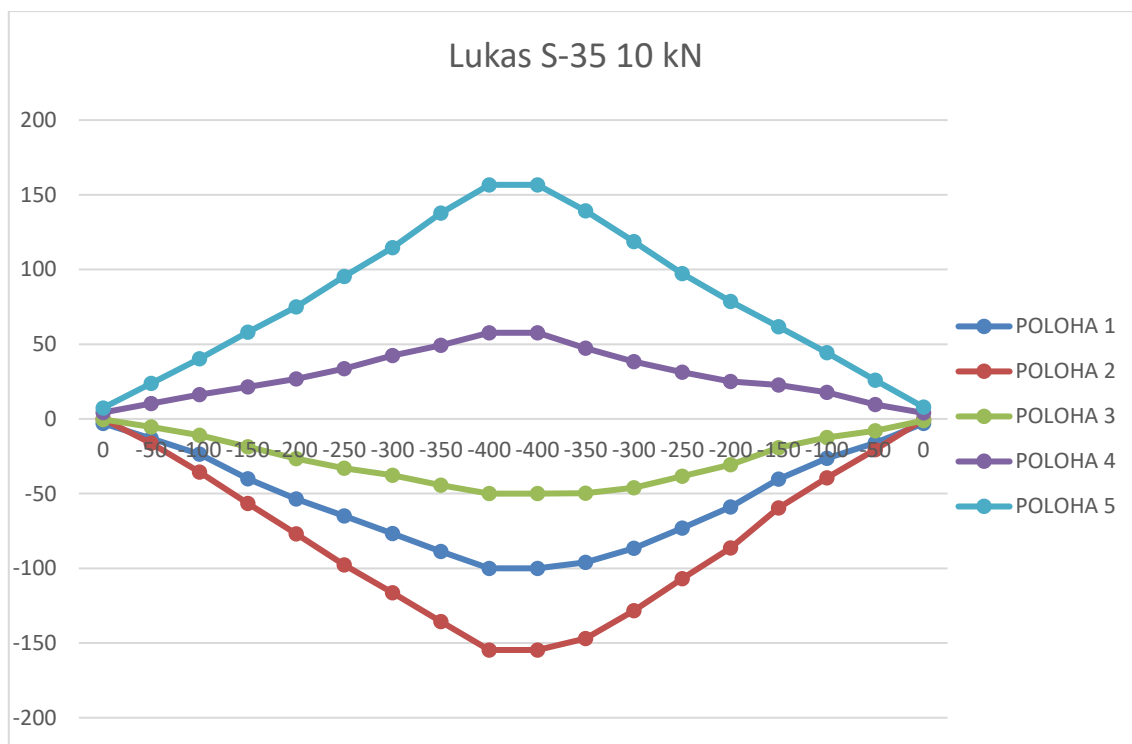
Poloha 4 – natočení konektoru vpravo – 40°



Poloha 5 – natočení konektoru vpravo dolů – 73°



Po změření každého směru 3krát byl proveden průměr těchto hodnot a jejich výsledky vloženy do jednoho grafu. Z obrázku 40 lze vyčíst, že siloměr udává v každém směru jiné hodnoty. Bylo tedy důležité proměřit siloměr ve všech možných směrech, aby se projevila směrová citlivost na parazitní moment. Z grafu lze také vyčíst, že polohy 3 a 4, které mají natočení konektoru rozdílné o  $180^\circ$  dosahují podobných hodnot s kladným a záporným znaménkem.

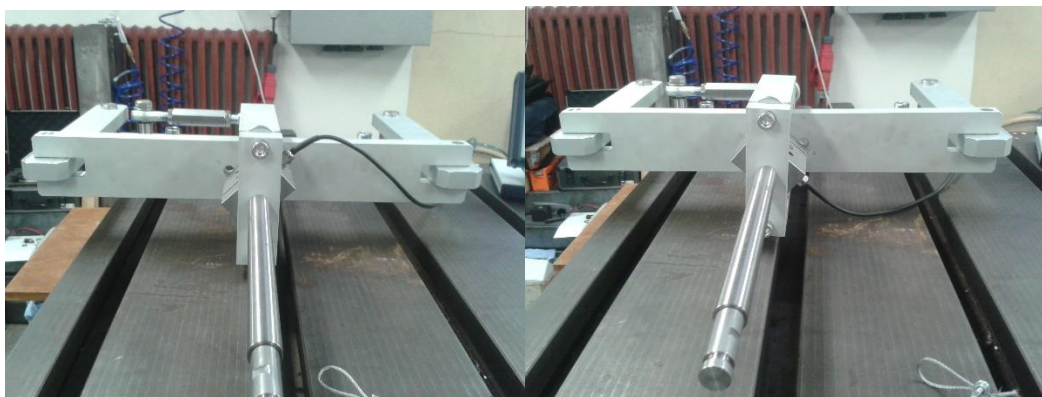
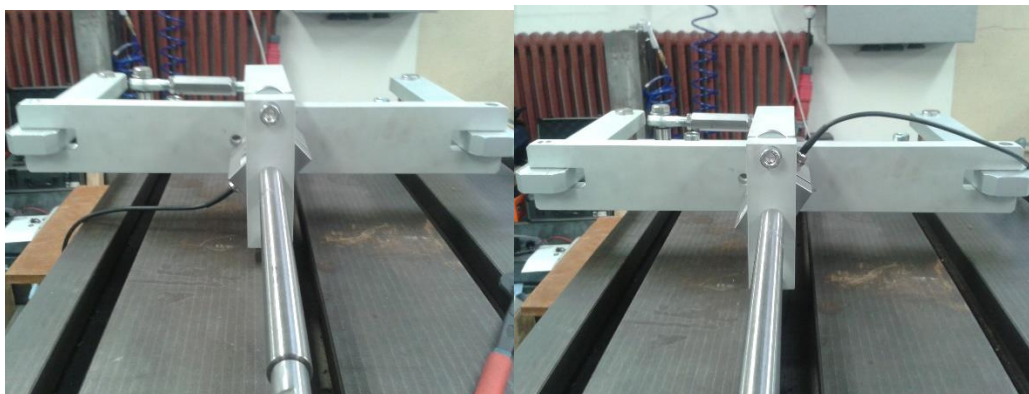


Obrázek 39 LUKAS S-35 10kN

## 7.2 Měření siloměru Lorenz messtechnik typ K-25

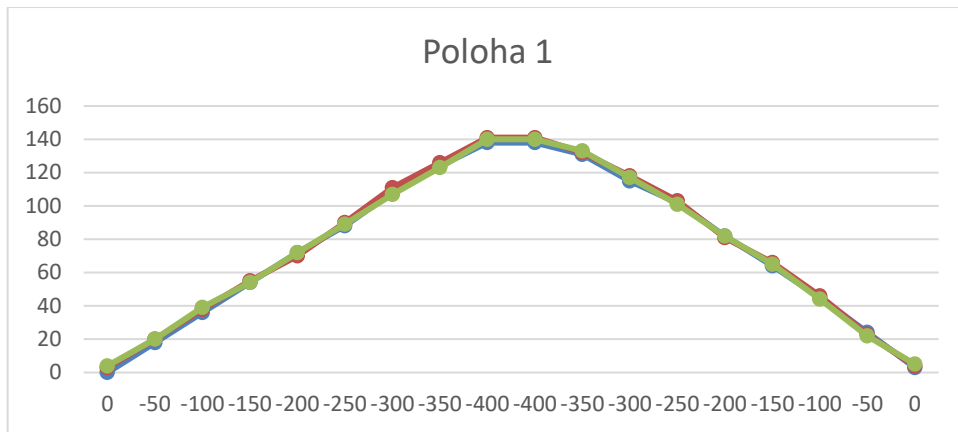
Druhým testovaným siloměrem byl siloměr od německé firmy Lorenz messtechnik. Siloměr typu S byl přichycen pomocí přidavného držáku zkonstruovaného tak, aby se mohl připojit k základní konstrukci měřicího zařízení. Použité vyhodnocovací zařízení INTRONIX NX-3065 připojené pomocí konektoru do siloměru. Siloměr byl proměřen v osmi směrech určených pomocí polohy konektoru. V pravých polohách konektoru:  $15^\circ$ ;  $22,5^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $67,5^\circ$

V levých polohách konektor:  $-15^\circ$ ;  $-22,5^\circ$ ;  $-45^\circ$ ;  $-67,5^\circ$

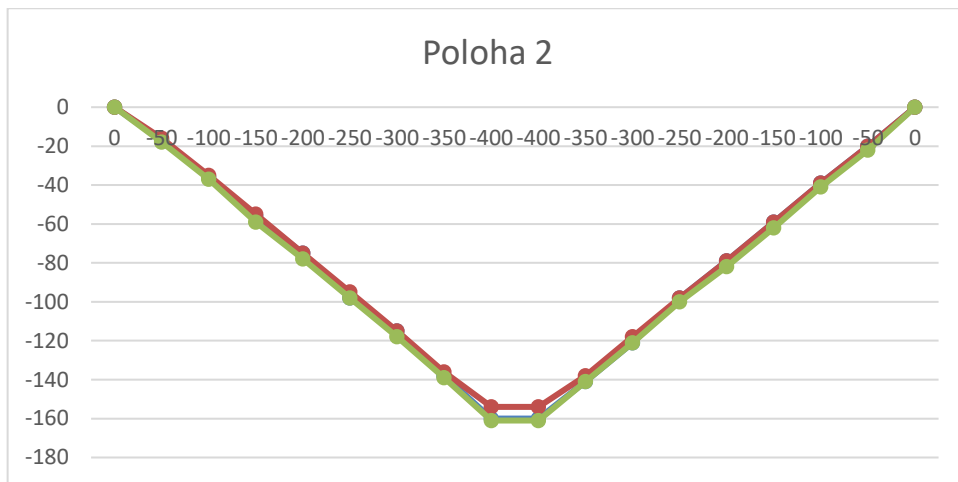
Obrázek 40 Natočení siloměru  $-45^\circ$ Obrázek 41 Natočení siloměru  $-22,5^\circ$ Obrázek 42 Natočení siloměru  $22,5^\circ$ Obrázek 43 Natočení siloměru  $67,5^\circ$ Obrázek 44 Natočení siloměru  $-67,5^\circ$ Obrázek 45 Natočení siloměru  $15^\circ$ 

Hodnoty, které siloměr vykazoval pro každou měřenou polohu, lze vyčíst z následujících grafů. Grafy ukazují změřené hodnoty v každé poloze pro tři opakování.

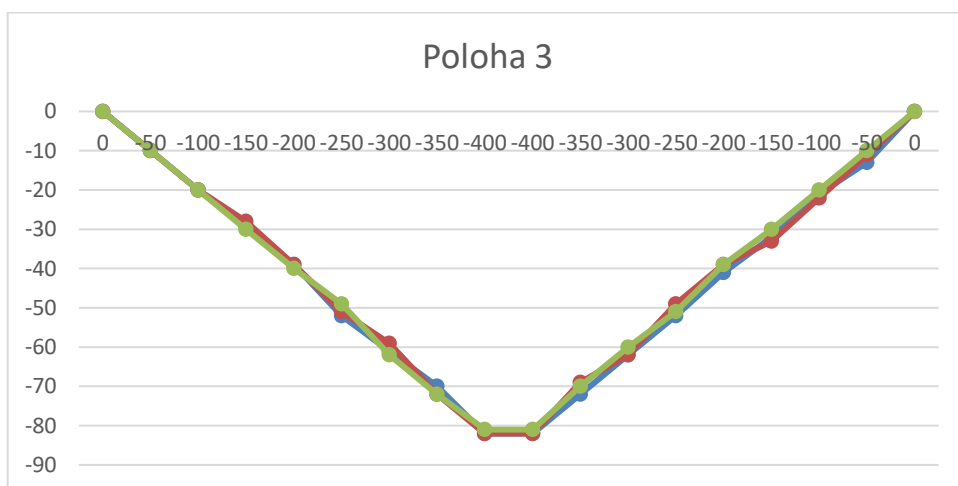
Poloha 1 – natočení konektoru vpravo vodorovně 45°



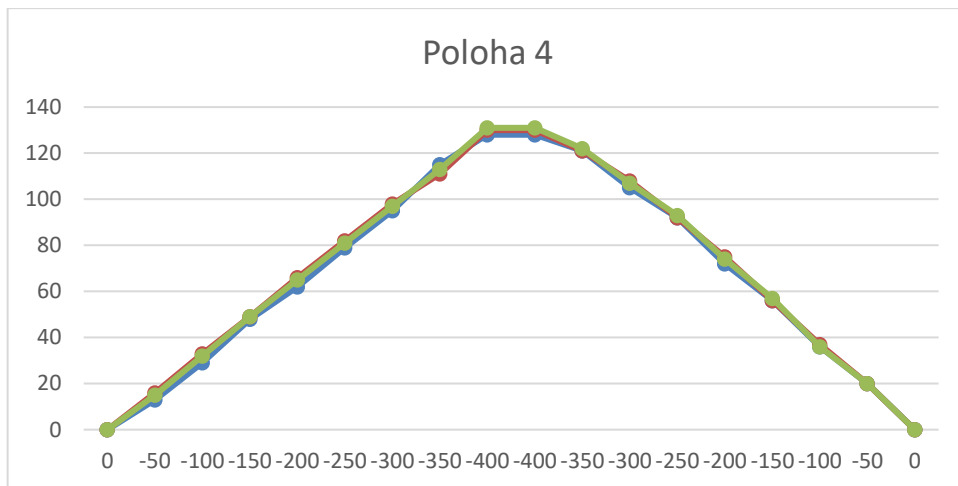
Poloha 2 – natočení konektoru vlevo vodorovně - 45°



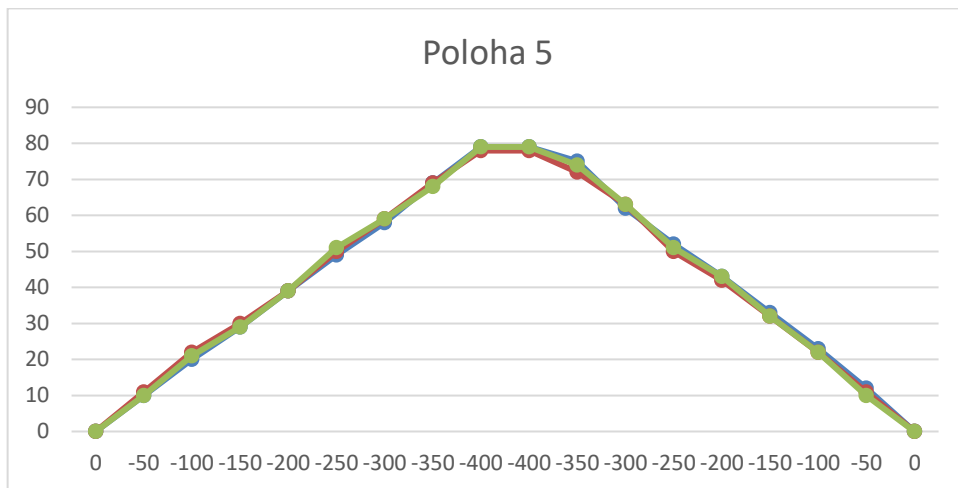
Poloha 3 – konektor vlevo nahoru -22,5°



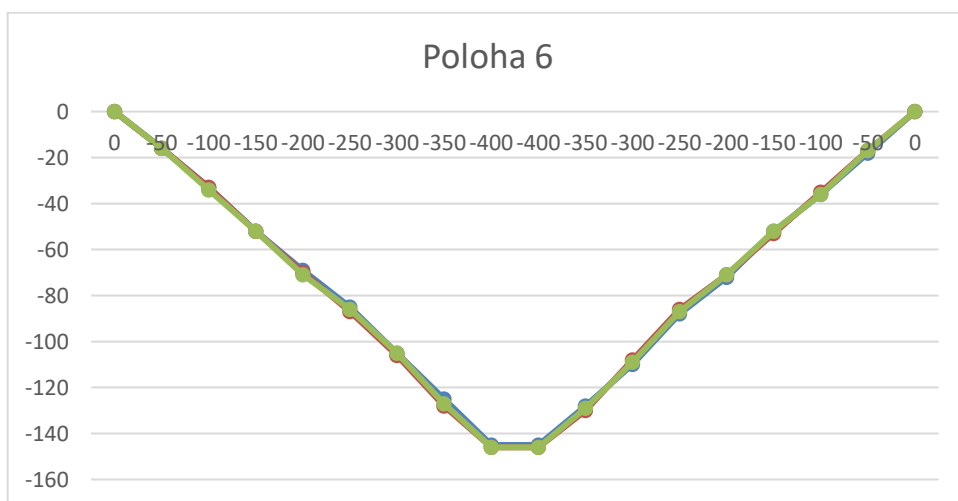
Poloha 4 – konektor vpravo nahoru 22,5°



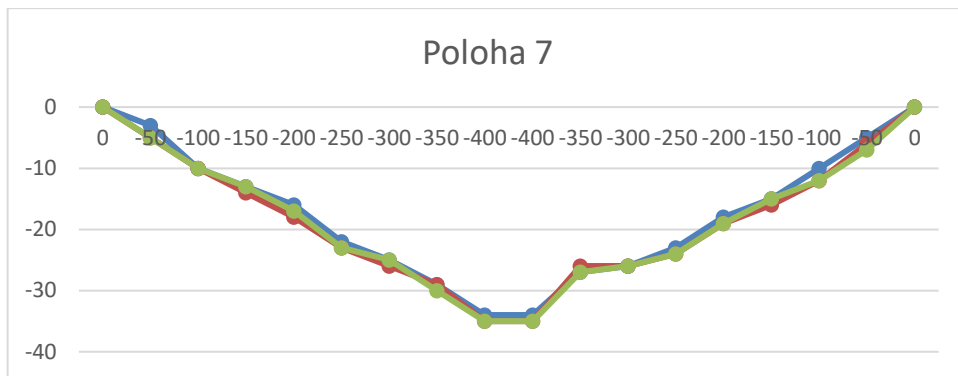
Poloha 5 – konektor vpravo dolů 67,5°



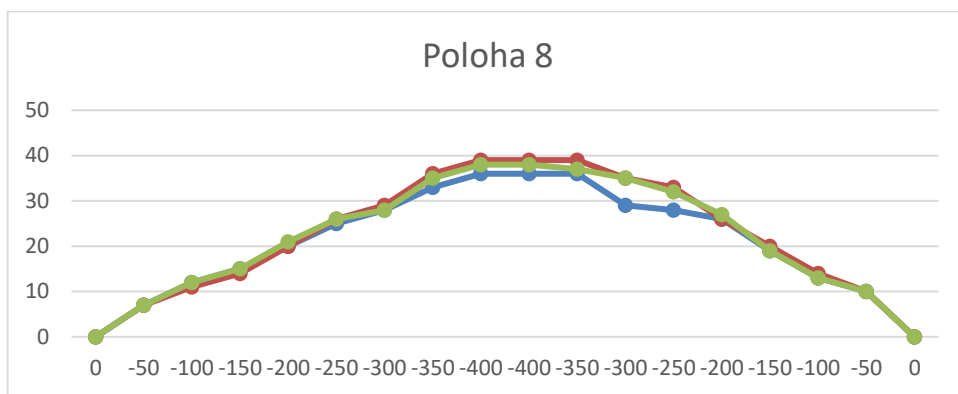
Poloha 6 – konektor vlevo dolů -67,5°



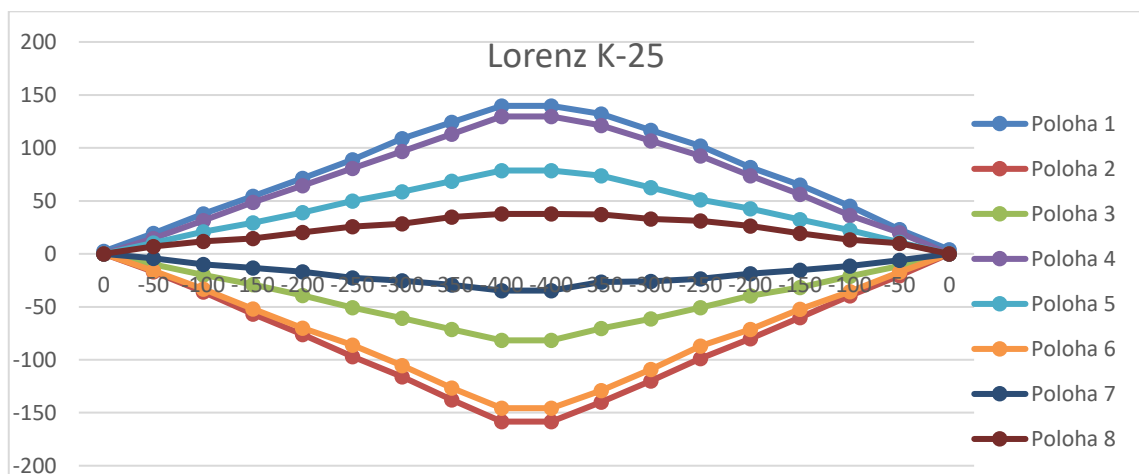
Poloha 7 – konektor nahoře u držáku – vlevo -15°



Poloha 8 – konektor nahoře u držáku – vpravo 15°



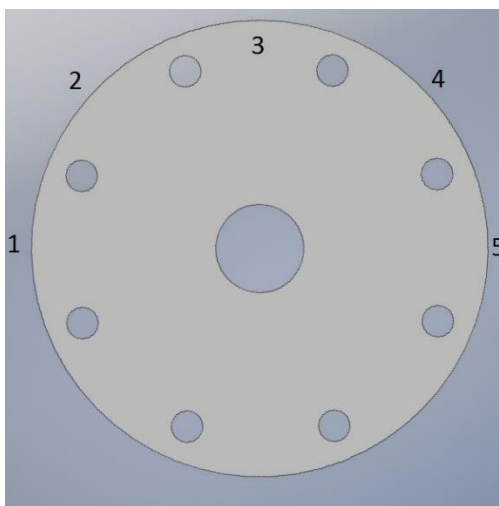
Po změření každého směru 3krát byl proveden průměr těchto hodnot a jejich výsledky vloženy do jednoho grafu. Z toho grafu lze vyčíst, že i tento typ siloměru udává v každém směru jiné hodnoty. Směrová citlivost je ze společného grafu zřejmá. I tento typ siloměru ukazuje, že pootočením o 180° dosahuje podobných hodnot s opačným znaménkem.



Obrázek 46 Lorenz K-25 20kN

### 7.3 Měření siloměru GTM série K 20kN

Posledním zkoušeným siloměrem je siloměr od německé firmy GTM. Siloměr pochází ze série K. Maximální hodnota siloměru je 20kN. Siloměr byl ke konstrukci přichycený pomocí osmi šroubů. K závitové tyči, použité u siloměru LUKAS S-35, byl siloměr připevněn pomocí redukce závitu z M20 x 1,5 na závitovou tyč se závitem M16 x 1,5. Vyhodnocení u tohoto siloměru bylo provedeno stejným zařízením jako u siloměru LUKAS, tedy INTRONIX NX – 3062. Siloměr byl proměřen v pěti natočeních. Zbývající tři natočení nebyly kvůli délce konektoru možné změřit. Konektor v těchto natočeních kolidoval se základovou deskou. Měřený směr byl určován pomocí polohy připojeného konektoru.

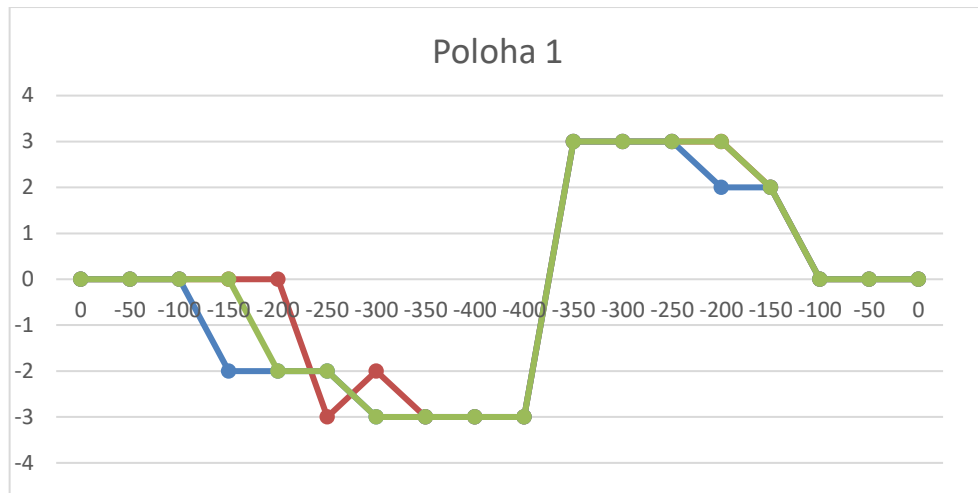


Obrázek 47 Polohy konektoru

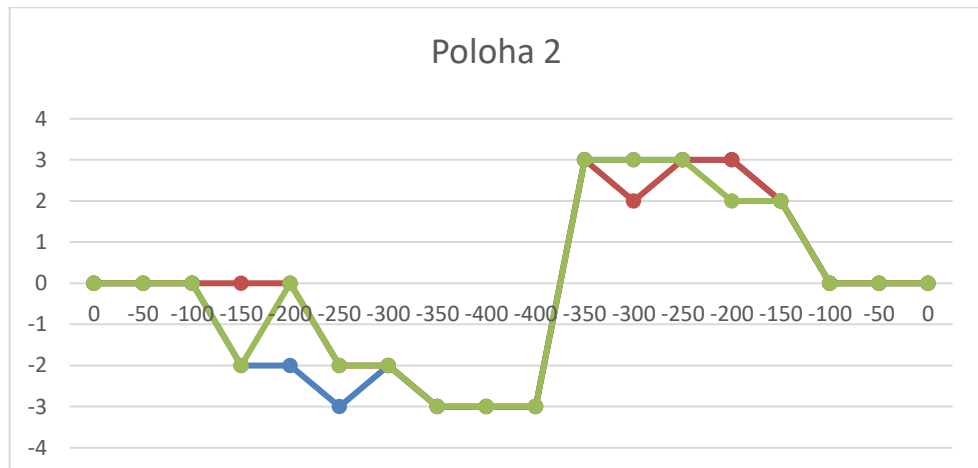
Hodnoty, které siloměr vykazoval pro každou měřenou polohu, lze vyčíst z následujících grafů. Grafy ukazují změřené hodnoty v každé poloze pro tři opakování. Skokové změny hodnot jsou způsobeny nejmenší digitalizovanou hodnotou měřicího zařízení.



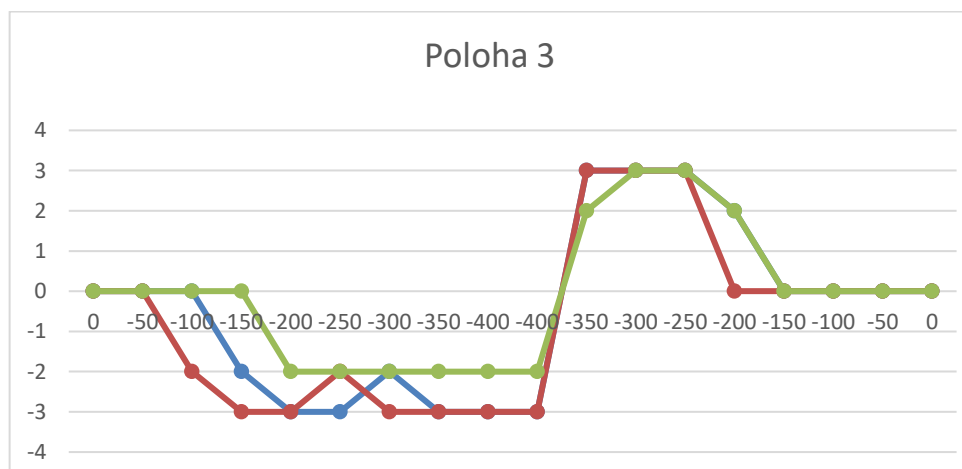
Poloha 1 – konektor vlevo -45°



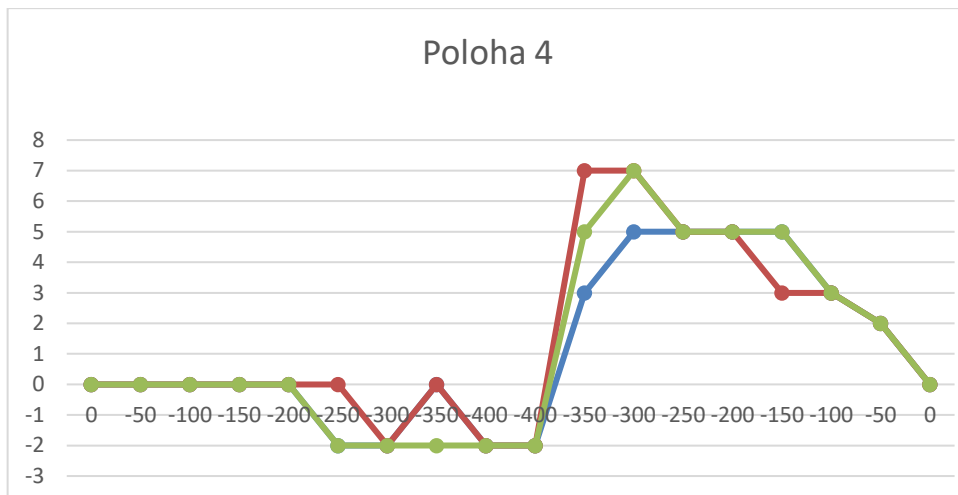
Poloha 2 – konektor vlevo nahoru -22,5°



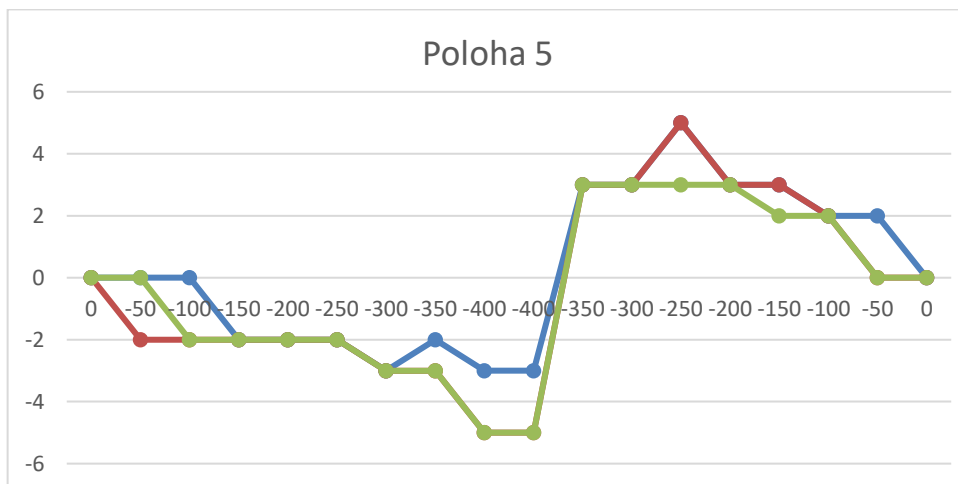
Poloha 3 – konektor nahoru 0°



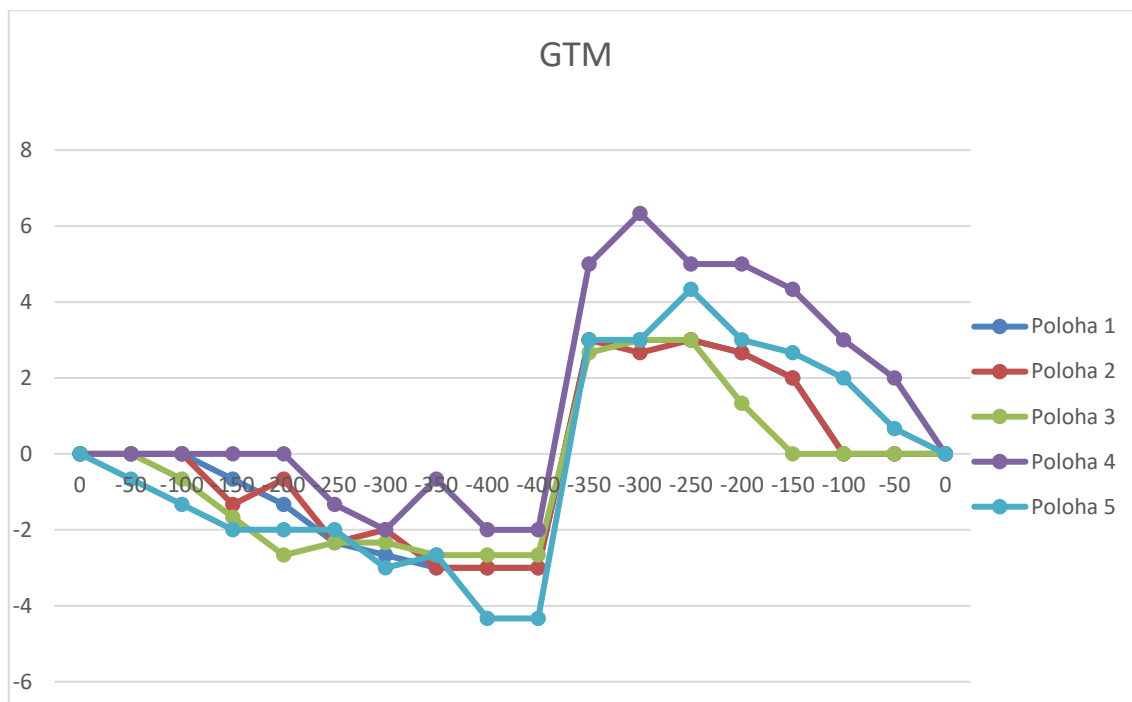
Poloha 4 – konektor vpravo nahoru 22,5°



Poloha 5 – konektor vpravo 45°



Po změření každého směru 3krát byl proveden průměr těchto hodnot a jejich výsledky vloženy do jednoho grafu. Z toho grafu lze vyčíst, že posledně proměřovaný siloměr dosahuje nejlepších výsledků. V každém proměřovaném směru udává siloměr téměř totožné hodnoty. Při zatěžení udává siloměr záporné hodnoty. Po odlehčení přeskočí zobrazovaná hodnota na kladné hodnoty. Směrová citlivost se v proměřovaných směrech téměř nevyskytuje. Náchylnost na vliv parazitního momentu je minimální.



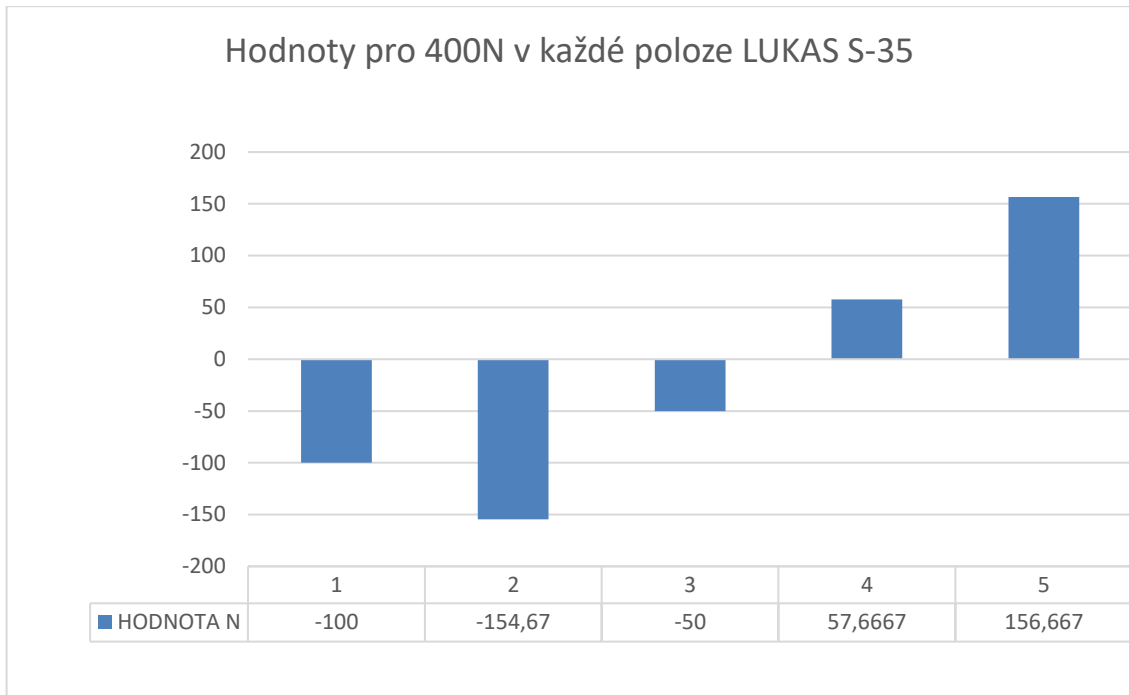
Obrázek 48 GTM série K

## 7.4 Vyhodnocení měření

Každý ze siloměrů byl proměřen ve všech možných směrech, který dovolil připojený konektor. Pomocí otáčení siloměrů byla zjištěna směrová citlivost a náchylnost na parazitní moment v daném směru. Z následujících grafů je vidět v jakém směru dosahoval každý siloměr nejvyšší hodnoty. Grafy jsou vytvořeny pro maximální proměřovanou sílu 400N na referenčním siloměru.

### LUKAS S-35

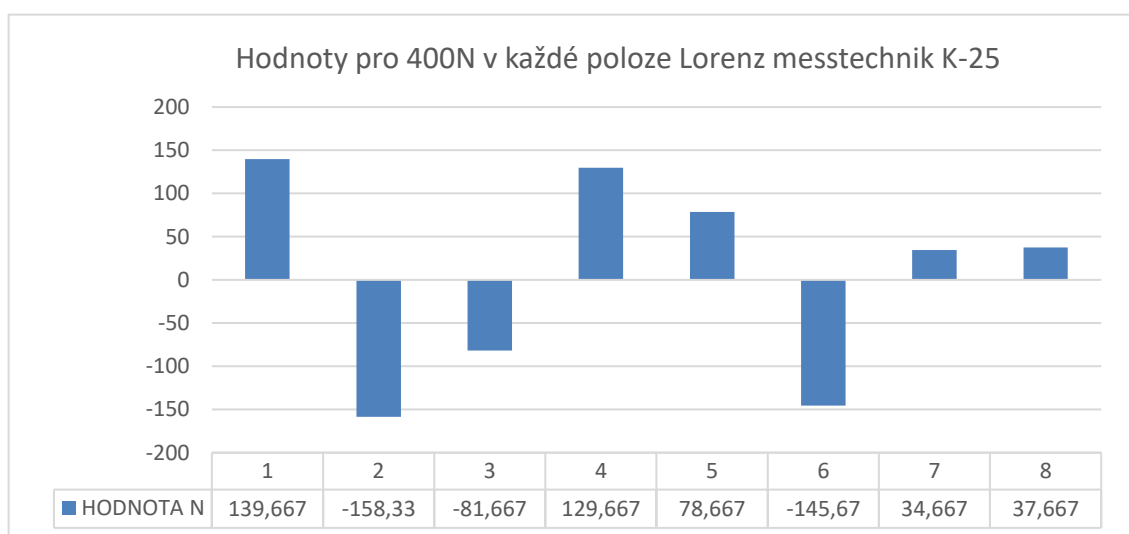
Z grafu pro siloměr českého výrobce LUKAS S-35, při maximálním zatížení, je patrná směrová citlivost siloměru v proměřovaných polohách. Také u toho siloměru jsou maximální dosahované hodnoty přes 150N a rozdíly v proměřených směrech dosahují až 100N



Lorenz messtechnik K-25

Z grafu pro siloměr od firmy Lorenz messtechnik vychází hodnoty pro maximální zatížení velice rozdílné. Největší kladná hodnota dosahuje téměř 140N v poloze 1. Nejvyšší záporné hodnoty jsou naměřeny v poloze 2, která je o 180° otočena proti poloze 1. Rozdíly hodnot přesahují i přes hranici 100N.

Poloha 1 45°      Poloha 2 -45°      Poloha 3 -22,5°      Poloha 4 22,5°  
 Poloha 5 67,5°      Poloha 6 -67,5°      Poloha 7 -15°      Poloha 8 15°



GTM série K

Z grafu pro siloměr od firmy GTM vychází hodnoty pro maximální zatížení téměř shodné. Rozdíly se pohybují v rozsahu jednotek N

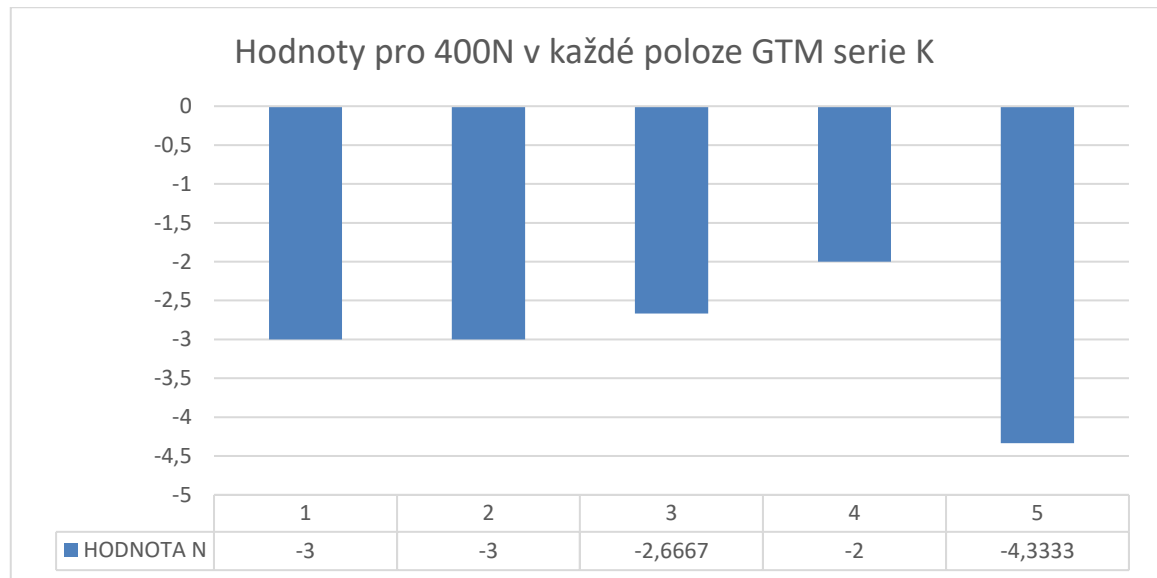
Poloha 1 -45°

Poloha 2 -22,5°

Poloha 3 0°

Poloha 4 22,5°

Poloha 5 45°



## 8 ZÁVĚR

V bakalářské práci proběhlo seznámení se základními metodami a možnostmi měření sil. Jsou zde popsány výhody a nevýhody jednotlivých principů. Následuje popis pružných deformačních členů, který zahrnuje vlastnosti a možnosti využití těchto prvků pro měření sil. Další část práce je zaměřena na metodiku vyhodnocování měření. Jsou zde uvedeny vlivy vstupující a ovlivňující měření. Chyby a nejistoty jsou důležitou součástí práce s měřením a vyhodnocením výsledků.

V praktické části je navrženo mechanické schéma pro měření parazitních momentů vstupujících do siloměru při zatížení mimo osu. Z výpočtu rovnovážných rovnic vychází, že siloměr je zatížen pouze požadovaným momentem, který se zavede pomocí působící síly. Ze schématu byl vytvořen návrh konstrukce v 3D programu Inventor. Konstrukce splňuje podmínky pro uchycení jak kruhových siloměrů, tak i siloměrů typu S pomocí přidavného držáku. Pro každou část konstrukce byl zhotoven výrobní výkres a součásti se nechaly vyrobit.

Po smontování držáku bylo provedeno experimentální měření v laboratoři ústavu výrobních strojů a zařízení. Pomocí držáku se proměřily tři typy siloměrů od různých výrobců. LUKAS TENZO z České republiky, GTM a Lorenz messtechnik z Německa. Siloměry byly proměřeny ve všech natočeních, které dovolilo umístění připojeného konektoru.

Citlivost na parazitní moment se u siloměru S-35 a K-25 projevovala vysokými hodnotami. U těchto dvou typů se hodnoty měnily při pootočení siloměru. Siloměr od firmy GTM vykazoval při zatížení parazitním momentem téměř nulové hodnoty a to ve všech měřených směrech. V porovnání pro nejvyšší hodnoty zatížení (400N) dosahovaly siloměry těchto hodnot: S-35 až 160N, K-25 až 161N, GTM série K pouhých 7N. Z tohoto měření je jasné, že siloměr od firmy GTM je z proměřovaných siloměrů nejméně náchylný na působení parazitních momentů. V porovnání s ostatními siloměry jsou hodnoty až 23x menší. Z tohoto experimentu vychází jako nejkvalitnější siloměr od firmy GTM série K, který v korelaci s vyšší pořizovací cenou splní požadavky na co nejpřesnější měření.

Výsledky z bakalářské práce mohou být v praxi využity v oboru měření sil. Jelikož volba měřicího zařízení je základem pro správné a přesné měření, je dobré znát vlastnosti siloměru. Další využití může přinést konstrukce vyrobená pro měření parazitních momentů. Při výrobě dalších přípravků, které bude možné ke konstrukci připojit, může být provedeno testování dalších typů siloměrů.

## 9 SEZNAMY

### 9.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 Kovové tenzometry - porovnání (4).....	12
Obrázek 2 Tenzometrická růžice (5) .....	13
Obrázek 3 Fóliový tenzometr (6).....	13
Obrázek 4 Polovodičový tenzometr (7).....	15
Obrázek 5 Polovodičový snímač Kistler (8).....	15
Obrázek 6 Podélný, příčný a stříhový piezoelektrický jev (2) .....	16
Obrázek 7 Krystal křemene, příčný a podélný jev (9).....	17
Obrázek 8 Schéma uspořádání piezoelektrického snímače tlaku (9).....	18
Obrázek 9 Ohybový pružný člen (2).....	19
Obrázek 10 Pružný člen s namáháním ve smyku (3).....	20
Obrázek 11 Pružný člen typu S (2).....	21
Obrázek 12 Siloměr typu S (12).....	21
Obrázek 13 Pružný člen sloupcový (2).....	21
Obrázek 14 Siloměr typu sloupcový člen (13) .....	21
Obrázek 15 Pružný člen nosník (2).....	22
Obrázek 16 Siloměr typu nosník (14).....	22
Obrázek 17 Smykový snímač (15).....	22
Obrázek 18 Siloměr - pružný člen smykový (16).....	22
Obrázek 19 Siloměr GTM série K 20kN (17) .....	26
Obrázek 20 Siloměr S-35 (18).....	27
Obrázek 21 Siloměr S-35 (18).....	27
Obrázek 22 Lorenz type k 25 (14) .....	28
Obrázek 23 Gaussova křivka (20) .....	34
Obrázek 24 Chyba linearity (8).....	36
Obrázek 25 Chyba hystereze (7).....	36
Obrázek 26 Způsoby zapojení do můstku (19).....	37
Obrázek 27 Parazitní moment.....	38
Obrázek 28 Mechanismus .....	39
Obrázek 29 Mechanický model.....	41
Obrázek 30 Mechanický model – uvolnění .....	42
Obrázek 31 Mechanický model - zjednodušení.....	42



Obrázek 32 Schéma zapojení .....	44
Obrázek 33 Mechanismus pro měření parazitních momentů.....	45
Obrázek 34 Uchycení siloměru typu S.....	46
Obrázek 35 Polohy natočení konektoru.....	47
Obrázek 36 Měření siloměr S-35.....	47
Obrázek 37 Měření siloměru S-35.....	48
Obrázek 38 Měření siloměru S-35.....	48
Obrázek 39 LUKAS S-35 10kN.....	51
Obrázek 40 Natočení siloměru -45° .....	52
Obrázek 41 Natočení siloměru -22,5° .....	52
Obrázek 42 Natočení siloměru 22,5° .....	52
Obrázek 43 Natočení siloměru 67,5° .....	52
Obrázek 44 Natočení siloměru -67,5°.....	52
Obrázek 45 Natočení siloměru 15°.....	52
Obrázek 46 Lorenz K-25 20kN.....	55
Obrázek 47 Polohy konektoru .....	56
Obrázek 48 GTM série K .....	59

## 9.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti piezoelektrických materiálů.....	16
Tabulka 2 Porovnání siloměrů.....	23
Tabulka 3 Porovnání siloměrů.....	24
Tabulka 4 Typy nejistot.....	32

## 9.3 Seznam příloh

Elektronické: CD

## 9.4 Seznam literatury

1. VLK, Miloš, a další. Experimentální mechanika. [Online] 2003. [Citace: 8. 6 2017.] Dostupné z: [http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni\\_mechanika.pdf](http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf).
2. ĎAĎO, Stanislav. *Senzory a měřicí obvody*. Praha : ČVUT, 1999. 80-01-02057-6.
3. RIPKA, Pavel, a další. *Senzory a převodníky*. Praha : ČVUT, 2011. 978-80-01-04696-8.
4. ELUC. *Snímače mechanického namáhání - odporové tenzometry*. [Online] [Citace: 20. 3 2017.] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1588>.
5. *Měření tlaku*. [Online] [Citace: 20. 3 2017.] Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k42-tlak.htm>.
6. WIKIPEDIE. *Tenzometr*. [Online] 2017. [Citace: 5. 3 2017.] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tenzometr>.
7. Automatizace.hw.cz. *Senzorika*. [Online] 1997-2014. [Citace: 5. 3 2017.] Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/images/foletermoclaniky/smallstruktura.gif>.
8. Automatizace.hw.cz. *Senzorika*. [Online] 1997-2014. [Citace: 5. 3 2017.] Dostupné z: [http://automatizace.hw.cz/images/polovodtermoclaniky/smallkremikovy\\_tenzometr.jpg](http://automatizace.hw.cz/images/polovodtermoclaniky/smallkremikovy_tenzometr.jpg).
9. Kistler. *Force Sensors from Kistler*. [Online] 2017. [Citace: 5. 6 2017.] Dostupné z: [https://www.kistler.com/cz/en/products/components/force-sensors/#3\\_component\\_force\\_link\\_fx\\_fy\\_fz\\_fz\\_up\\_to\\_30\\_k\\_n\\_6\\_74\\_klbf\\_934\\_7\\_c](https://www.kistler.com/cz/en/products/components/force-sensors/#3_component_force_link_fx_fy_fz_fz_up_to_30_k_n_6_74_klbf_934_7_c).
10. ELUC. *Snímače mechanického namáhání - piezoelektrický jev*. [Online] [Citace: 20. 3 2017.] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1590>.
11. SCHOVÁNEK, Petr a HAVRÁNEK, Vítězslav. *Chyby a nejisoty měření*. [Online] [Citace: 25. 3 2017.] Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejisoty.pdf>.
12. FUTEK. *Load cell*. [Online] 1998-2016. [Citace: 4. 5 2017.] Dostupné z: <http://www.futek.com/product.aspx?t=load>.
13. Applied Measurements Ltd. *Load Cells*. [Online] 2004-2017. [Citace: 5. 6 2017.] Dostupné z: <http://www.appmeas.co.uk/load-cells-and-force-sensors.html>.
14. LORENZ MESSTECHNIK. *Tension and Compression Force Sensors*. [Online] [Citace: 4. 5 2017.] Dostupné z: [http://www.lorenz-messtechnik.de/english/products/tension\\_force/k-25.php](http://www.lorenz-messtechnik.de/english/products/tension_force/k-25.php).
15. OMEGA. *Technical learning*. [Online] [Citace: 20. 3 2017.] Dostupné z: <http://www.omega.com/technical-learning/types-of-load-cells.html>.

16. INTERTECHNOLOGY. *Single Ended Beam Load Cells From Revere Transducers, Vishay Precision Group*. [Online] [Citace: 13. 5 2017.] Dostupné z: [http://www.process-controls.com/intertechnology/Revere\\_Transducers/indexSEB.htm](http://www.process-controls.com/intertechnology/Revere_Transducers/indexSEB.htm).
17. GTM. *Snímač síly*. [Online] 2017. [Citace: 4. 5 2017.] Dostupné z: <http://www.gtm-gmbh.com/cz/produkty/snimac-sily.html>.
18. LUKAS TENZO. *Tenzometrický siloměr S-35/ S-35 A*. [Online] 2016. [Citace: 4. 5 2017.] Dostupné z: <http://www.lukas-tenzo.cz/?i=219/tenzometricky-silomer-s-35-s-35-a>.
19. Katedra měření, ČVUT v Praze. *Měření síly tenzometrickým můstkem*. [Online] 2008-2015. [Citace: 18. 3 2017.] Dostupné z: [http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/old/cviceni/09%20tenzometr/09\\_mereni\\_sily.pdf](http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/old/cviceni/09%20tenzometr/09_mereni_sily.pdf).
20. Zkoušení stavebních hmot a výrobků. *Nejistota měření - postup stanovení*. [Online] [Citace: 5. 3 2017.] Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=nejjistota\\_postup](http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=nejjistota_postup).
21. STEJSKAL, Vladimír, BŘEZINA, Jiří a KNĚZŮ, Jiří. *Mechanika I*. Praha : ČVUT, 1998. 80-01-01888-1.
22. STEJSKAL, Vladimír, BŘEZINA, Jiří a KNĚZŮ, Jiří. *Mechanika I: řešené příklady*. Praha : ČVUT, 2003. 80-01-02703-1.
23. LOADSTARS SENSORS. *What is a Load cell?* [Online] 2017. [Citace: 4. 4 2017.] Dostupné z: <http://www.loadstarsensors.com/what-is-a-load-cell.html>.
24. Katedra měření, ČVUT v Praze. *Přenos měření*. [Online] 2008-2015. [Citace: 15. 3 2017.] Dostupné z: [http://measure.fel.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38emc/EMC-Predn\\_1tisk.pdf](http://measure.fel.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38emc/EMC-Predn_1tisk.pdf).
25. e-automatizace. *Aditivní a multiplikatívni chyby*. [Online] [Citace: 4. 5 2017.] Dostupné z: [http://www.e-automatizace.cz/ebooks/senzory/a\\_m\\_chyby.html](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/senzory/a_m_chyby.html).