

# **Návrh kalibrace šesti-složkového silově-momentového snímače**

The Design of the Calibration of the  
Six-Component Force-Torque Sensor

Bc. Miroslav Pálka

---

Diplomová práce  
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav automatizace a řídicí techniky  
akademický rok: 2006/2007

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav PÁLKA**  
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Návrh kalibrace šesti-složkového silově-momentového snímače.**

Zásady pro vypracování:

1. Šesti-složkové snímače osových posunutí a úhlových pootočení, princip činnosti, současný stav technologie.
2. Použití šesti-složkového snímače osových posunutí a úhlových pootočení při měření sil a momentů, pojem kalibrační matice.
3. Analýza chyb, vznikajících při měření šestisložkových snímačů.
4. Metody testování šesti-složkových snímačů.
5. Návrh testovacího zařízení na testování šesti-složkových snímačů osových posunutí a úhlových pootočení a šesti-složkových snímačů sil a momentů.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


1. SÁSIK, J., **Viaczložkové snímače síl a momentov, Bratislava:Meranie, testovanie a kalibrácia. Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, 2000. ISBN 80-227-1438-0.**
2. SONKA, M., HLAVAC, V., BOYLE, R., **Image Processing, Analysis, and Machine Vision. 2. vyd. PWS Publishing, Pacific Grove, 1999. ISBN 0-534-95393-X.**
3. KVASNICA, M., **Multi Degrees-of-Freedom Modular Sensory Systems for Measurement, Robotics and Human-Machine Interaction. Proceedings of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics - 7th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis SCI'2001-ISAS, July 2001, Orlando, Florida, USA.**
4. PÁLENIČÁŘ, R. – HALAJ, M., **Calibration of multicomponent force-torque sensors. Proceedings of the Eight International Symposium on Measurement and Control in Robotics, Czech Republic, ISMRC, 1998**
5. PÁZMAN, A., **Základy optimalizácie experimentu. 1. vyd. Bratislava, VEDA, 1980**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Milan Kvasnica, CSc.**  
Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2007**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2007**

Ve Zlíně dne 13. února 2007

  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*ředitel ústavu*

## ABSTRAKT

Práce pojednává o současném stavu technologie v oblasti šesti-složkových snímačů osových posunutí a úhlových pootočení a jejich aplikace pro určení působících sil a momentů, dále o principu činnosti uvedených snímačů včetně chyb a nejistot měření. Hlavním tématem této práce je návrh univerzálního kalibračního zařízení na šesti-složkové silově-momentové snímače, které umožňuje i měření při dynamickém zatěžování pro více složek současně. Uvedena jsou dvě řešení a jejich porovnání.

Klíčová slova:

Šesti-složkový silově-momentový snímač, kalibrační matice, tenzometr odporový, tenzometr piezoelektrický, optoelektronické měření osových posunutí a úhlových pootočení, optoelektronické měření síly a momentu, chyby měření, nejistota měření.

## ABSTRACT

Diploma thesis deals with current state of the art in technology in the field of the six-component sensory system for the measurement of axial shiftings and angular displacements with application for the force-torque measurement, their principles of the activity including the measurement errors and measurement uncertainty. Diploma thesis is focused on the design of universal calibration equipment for the six-component force-torque sensors allowing the measurements of their parameters while the multi-component dynamic loading. There are introduced two variants of the design and the comparison of their properties.

Keywords:

Six-component force-torque sensor, calibration matrix, resistance strain gauge, piezoelectric strain gauge, optoelectronic measurement of axial shiftings and angular displacements, optoelectronic measurement of forces and torques, measurement error, measurement uncertainty.

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Mgr. Ing. Milanu Kvasnicovi, CSc. za odborné vedení mé diplomové práce, za zapůjčení odborné literatury a za odborné rady. Zároveň bych chtěl poděkovat své přítelkyni za trpělivost a morální podporu při tvorbě této práce.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....  
Podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ŠESTISLOŽKOVÉ SNÍMAČE OSOVÝCH POSUNUTÍ A ÚHLOVÝCH POOTOČENÍ, PRINCIP ČINNOSTI, SOUČASNÝ STAV TECHNOLOGIE</b> .....	<b>10</b>
1.1 TENZOMETRICKÉ ODPOROVÉ SNÍMAČE .....	10
1.1.1 Fyzikální podstata .....	11
1.1.2 Paralelní desková struktura deformačních členů .....	14
1.1.3 Snímač robotického prstu.....	16
1.1.4 Snímač s paralelním nosníkovým mechanismem .....	18
1.1.5 Snímač na principu deformací křížových nosníků.....	22
1.1.6 Snímač tvaru dutého válce .....	22
1.2 TENZOMETRICKÉ PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE.....	23
1.2.1 Fyzikální podstata, základní zákon .....	23
1.2.2 Tenzometrický snímač AMTI .....	24
1.3 OPTICKÉ SNÍMAČE .....	26
1.3.1 Takahashiho snímač .....	26
1.3.2 Optoelektronický šesti-složkový silově-momentový snímač.....	30
<b>2 POJEM KALIBRAČNÍ MATICE</b> .....	<b>33</b>
<b>3 ANALÝZA CHYB VZNIKAJÍCÍCH PŘI MĚŘENÍ ŠESTI-SLOŽKOVÝCH SNÍMAČŮ</b> .....	<b>39</b>
3.1 CHYBY VZNIKAJÍCÍ PŘI MĚŘENÍ FYZIKÁLNÍCH VELIČIN .....	39
3.1.1.1 Statistická minimalizace náhodných chyb .....	41
3.1.1.2 Stanovení nejpravděpodobnější hodnoty měřené veličiny .....	42
3.2 NEJISTOTA MĚŘENÍ.....	43
3.3 CHYBY VZNIKAJÍCÍ PŘI ZATĚŽOVÁNÍ SNÍMAČE .....	46
3.3.1 Chyby konstrukce zatěžovacího zařízení.....	48
Chyby způsobené změnou velikosti sil $F_a$ a $\Delta F_b$ .....	48
Chyby polohy působení sil v bodech A a B.....	48
Chyby polohy bodů $Z_a$ a $Z_b$ .....	49
Chyby polohy snímače.....	50
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>51</b>
<b>4 POPIS PROBLÉMU</b> .....	<b>52</b>
<b>5 NÁVRH KALIBRAČNÍHO ZAŘÍZENÍ ŠESTI-SLOŽKOVÉHO SILOVĚ-MOMENTOVÉHO SNÍMAČE</b> .....	<b>54</b>
5.1 PRVNÍ VARIANTA NÁVRHU – KOMPLEXNÍ ŘEŠENÍ .....	54
5.1.1 Prvotní idea .....	54
5.1.2 Konstrukční detaily .....	59
5.1.3 Realizovatelné provedení .....	60

5.2	DRUHÁ VARIANTA NÁVRHU – ZJEDNODUŠENÉ ŘEŠENÍ.....	63
5.2.1	Silové působení $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ .....	65
5.2.2	Působení $M_x$ , $M_y$ , $M_z$ .....	67
<b>6</b>	<b>VLASTNOSTI NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>69</b>
6.1	NAVRHOVANÝ PRACOVNÍ POSTUP .....	70
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>71</b>
	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>80</b>

## ÚVOD

S rozvojem průmyslu a s růstem životní úrovně nastartovaném průmyslovou automatizací roste i cena lidské práce. To vede ke snaze výrobců a zaměstnavatelů na snižování výrobních nákladů. S tímto trendem je neoddelitelně spojena i snaha nahradit stále dražší lidské zdroje pomocí strojů. Začátkem minulého století dosáhly nejvyššího rozvoje výrobní automaty a po nástupu výpočetní techniky následovalo koncem minulého století hromadné nasazení robotů ve vybraných výrobních odvětvích. Neustálý konkurenční tlak podmínil vznik CIM (Computer Integrated Manufacturing), který umožňuje nejen zvyšování intenzity výroby, ale též její flexibilitu. Tento posun vede v současnosti ke konstrukci univerzálních robotických ramen schopných vykonávat samostatně, nebo ve spolupráci s člověkem, či jinými roboty, zadané pracovní úkony. Tyto robotické systémy již nelze pokládat za jednoúčelová zařízení, ale za stroje, které pomocí sensorické zpětné vazby umožňují interakci s okolím a tím jsou schopny nahradit lidskou pracovní sílu.

Zachycení a lokalizace polohy výrobku s následným uchopením pomocí chapadla robotického systému, přenesení a vložení do zaměřeného otvoru systémem oko-ruka vymeziло další významný pokrok v historii lidské tvořivé činnosti. Zavedení sensorické zpětné vazby bylo podmíněno použitím počítačového systému, pracujícího s rychlostí řádově  $10^5$  operací/sek., potřebných pro výpočet konfigurace stavů robota s pěti stupni volnosti v reálném čase v časovém limitu nejméně  $10^{-1}$  s, což umožňuje měnit parametry trajektorie koncového efektoru robota 10x za sekundu. To se stalo reálným až koncem 60-tých let minulého století jako výsledek pokroku ve výpočetní technice. Kromě polohové adaptivity potřebné pro zaměření a sledování polohy objektu je zde zapotřebí ještě silově momentová adaptivita pomocí šesti-složkového silově-momentového snímače vloženého do zápěstí robotické ruky. Silově-momentová zpětná vazba umožňuje napodobit cítění a následnou koordinaci pohybů lidské ruky při vkládání objektu do předem zvoleného otvoru.

S těmito požadavky přichází i nutnost znát co nejlépe silově momentové účinky okolí, které působí na robota a opačně. K tomuto účelu slouží snímače síly a momentu umístěné v robotických kloubech, prstech, nebo chodidlech. Jsou mnohdy jedinou odezvou z vnějšího prostředí robota. S přibývajícím počtem aplikací, roste i potřeba snadné a rychlé kalibrace těchto snímačů sil a momentů. Úkolem této práce je navrhnout konstrukční řešení zařízení na kalibraci šesti-složkových silově-momentových snímačů.



## I. TEORETICKÁ ČÁST

# 1 ŠESTISLOŽKOVÉ SNÍMAČE OSOVÝCH POSUNUTÍ A ÚHLOVÝCH POOTOČENÍ, PRINCIP ČINNOSTI, SOUČASNÝ STAV TECHNOLOGIE

V robotických systémech rozeznáváme dva základní způsoby využití snímačů. Jsou to snímače vnitřní a vnější zpětné vazby. Snímače vnitřní zpětné vazby jsou zakomponovány do robotických kloubů, převodovek a jiných míst robota a umožňují nám přesné řízení konfigurace jeho stavů. Jedná se převážně o optoelektronické inkrementální čítače, snímače indukčnosti, nebo optické. Snímače vnější zpětné vazby se používají za účelem získání informace o okolním prostředí a o dynamice jeho změn. Převážně se jedná o optoelektronické kamerové systémy a o aplikace snímače síly a kroutícího momentu na rozhraní člověk-stroj. Právě těm posledním – snímačům síly a kroutícího momentu, přesněji šesti-složkovým silově-momentovým snímačům a jejich kalibraci je věnována tato práce.

Princip těchto snímačů je ve většině případů založen na mechanické deformaci elastické struktury, na niž jsou připevněny senzory vyhodnocující jednotlivé složky elastické deformace způsobené vlivem silově-momentového působení. Tvar této elasticky deformovatelné struktury se liší u různých typů snímačů, v závislosti na jejich principu, konstrukci a na požadavcích na jejich vlastnosti, jako jsou například citlivost, přesnost, linearita, dynamický rozsah, dynamické zkreslení.

Dále jsou uvedeny jednotlivé principy snímání silově-momentové informace a jejich struktura.

## 1.1 Tenzometrické odporové snímače

Tenzometrické odporové snímače jsou nejrozšířenější snímače síly a kroutícího momentu. Jsou vhodné pro jednoúčelová přesná měření deformací vlivem sil, tlaků i momentů působících na pevná tělesa. Využívají závislosti změny odporu vodiče na změně jeho průřezu a délky vlivem mechanické deformace. Tyto změny elektrického odporu jsou však velmi malé, řádově  $\mu\Omega$ . Proto je při tenzometrickém měření využíváno zapojení čtyř aktivních tenzometrů do plného měřicího můstku.

V případě odporových tenzometrů rozlišujeme dvě základní skupiny

- Tenzometry kovové – drátkové, fóliové, napařované
- Tenzometry polovodičové – monokrystaly, difúzní odpory

Každá z obou skupin má své výhody i nevýhody. Tenzometry polovodičové mají až 60x větší citlivost, kdežto kovové fóliové tenzometry mají mnohem lepší linearitu, teplotní i časovou stálost a jsou přesnější.

### 1.1.1 Fyzikální podstata

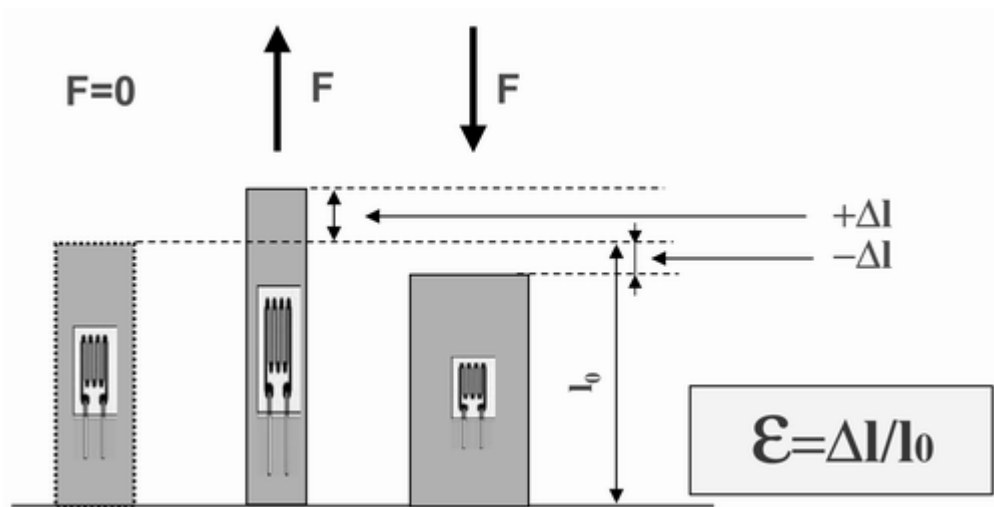
Odporový tenzometr (dále jen tenzometr) je odporový snímač, u něhož je změna elektrického odporu závislá na změnách způsobených deformací tenzometru (tj. na změnách geometrických rozměrů, na změnách krystalografické orientace tenzometru) a na změnách teploty prostředí. Pojem deformace omezíme vzhledem k malým rozměrům snímače na deformaci způsobenou tahem, nebo tlakem v mezích Hookova zákona

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (1)$$

Kde:  $\sigma$  je mechanické napětí

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \text{ relativní prodloužení, nebo zkrácení}$$

E modul pružnosti



Obr. 1: Příklad funkce tenzometru při deformaci  $\varepsilon$  protažením o  $\Delta l$  působením síly  $F \Rightarrow$  změna odporu o  $\Delta R$

Tenzometr se s výjimkou difúzních (napařovaných) typů skládá z vlastního čidla (kovový drátek, fólie, vlákno polovodiče-křemíku) a z podložky (nejčastěji papír, nebo pryskyřice). Podložka zprostředkovává přenos deformace z povrchu měřeného tělesa na vlastní čidlo a současně tvoří elektroizolační vrstvu. Podložka se na povrchu měřeného tělesa lepí speciálními lepidly (například epoxidové pryskyřice aj.). Zatmelení čidla do podložky a přilepení k tělesu je nutno provést tak, aby nastalo zanedbatelné zkreslení výsledků měření vlivem relativní deformace podložky a lepidla v daných pracovních podmínkách (teplota, vlhkost aj.) [14], [15].

Elektrický odpor homogenního tělesa (vodiče, nebo polovodiče) je dán vztahem

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

Kde:

- $\rho$  měrný odpor vodiče (Ohm.m)
- $l$  délka vodiče (m)
- $S$  průřez vodiče (m<sup>2</sup>)

Z čehož plyne, že při změně délky a průřezu prodloužením - dilatací dochází také ke zmenšení průřezu vodiče a k jeho prodloužení a tím ke zvětšení elektrického odporu vodiče.

Při změně délky a průřezu stlačením – kontrakcí dochází ke zkrácení délky vodiče a zvětšení jeho průřezu a tím také ke zmenšení jeho elektrického odporu.

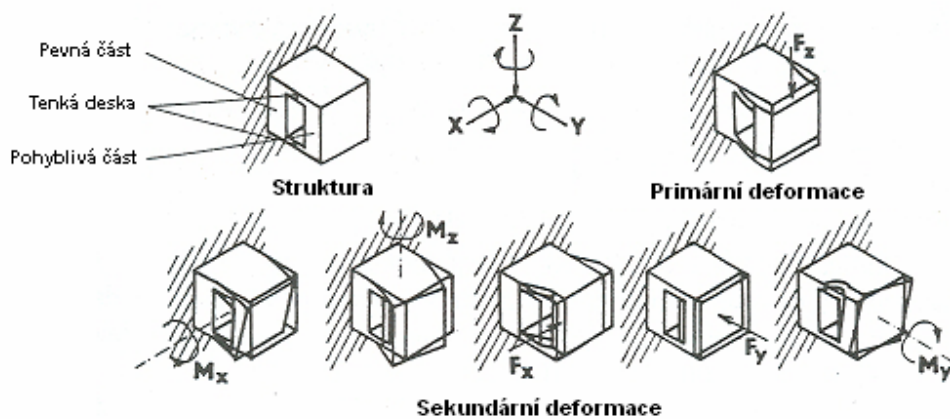
Polovodičové tenzometry mají odlišné vlastnosti a mají deformační citlivostní součinitel závislý na typu vodivosti PN přechodu. Deformační citlivost je nelineární, ovlivněná výrazně teplotou.

Kovové, nebo polovodičové tenzometry jsou přilepeny na vhodně zvolené, mechanicky exponované části elasticky deformovaného členu snímače. Tím je zajištěna nejvyšší citlivost a linearita na působící síly a momenty.

Tenzometrické odporové silově-momentové snímače dále rozdělujeme podle jejich mechanické konstrukce. Ta se liší podle jednotlivých principů. Navíc dnes každý výrobce preferuje pro dané použití různý typ těla snímače.

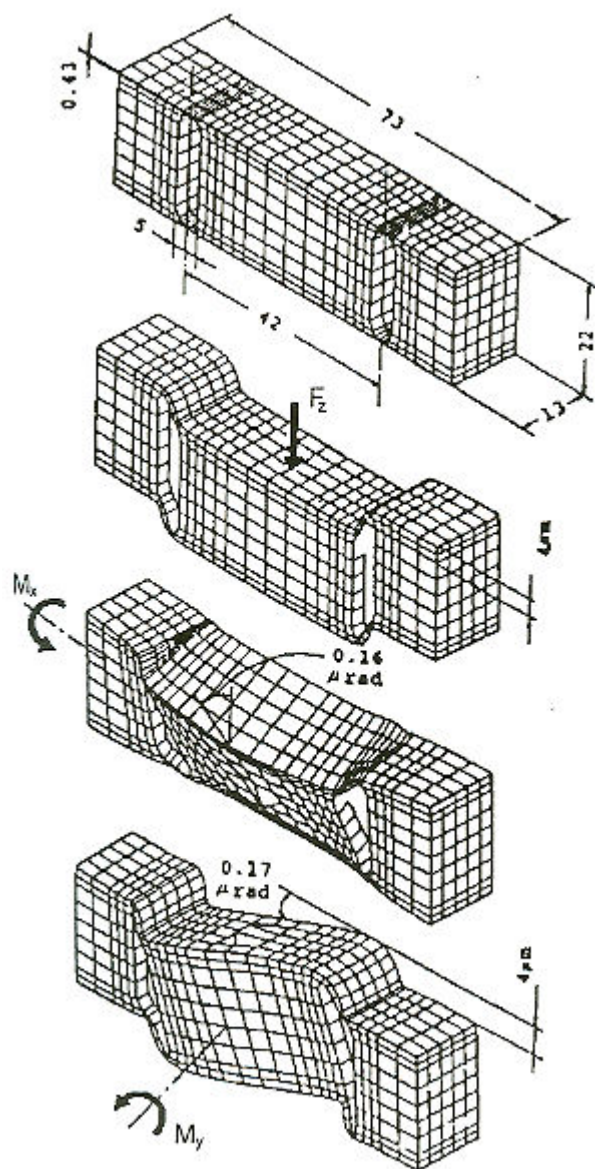
### 1.1.2 Paralelní desková struktura deformačních členů

Používá se jako jeden ze způsobů převodu vnější síly na mechanické napětí materiálu. Princip tohoto způsobu je patrný na *Obr. 2* [1]. Zde je znázorněno modulové řešení snímačů využívajících paralelní deskovou strukturu deformačních členů. Vyznačena je zde jak primární, tak i sekundární deformace, která vzniká působením jednotlivých složek zatížení.



*Obr. 2: Deformace deskové struktury*

Detailnější rozkreslení deformací vznikajících na reálném deformačním členu je patrné z *Obr. 3* [1]. Pro vypracování tohoto modelu bylo použito simulace pomocí metody konečných prvků.

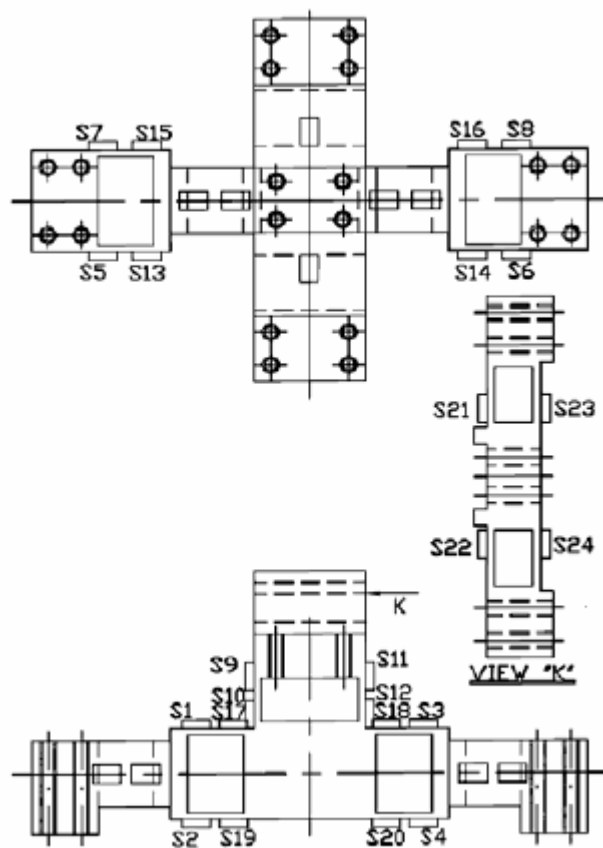


Obr. 3: Reálné deformace deformačního členu

### 1.1.3 Snímač robotického prstu

Jako jedno z praktických využití je uveden šesti-složkový snímač síly a momentu robotického prstu [5]. Tento snímač byl vyvíjen na základě poptávky po snímači vhodném pro stabilní uchopení neznámého předmětu robotickými prsty.

Jeho konstrukce je založena na principu dvojitých paralelních deskových struktur. Tělo snímače je osazeno pěti sadami tenzometrů, pro osové posunutí. Ve směru  $F_x$  jednou strukturou, pro posunutí  $F_y$  a  $F_z$  dvěma.



Obr. 4: Mechanické řešení snímače

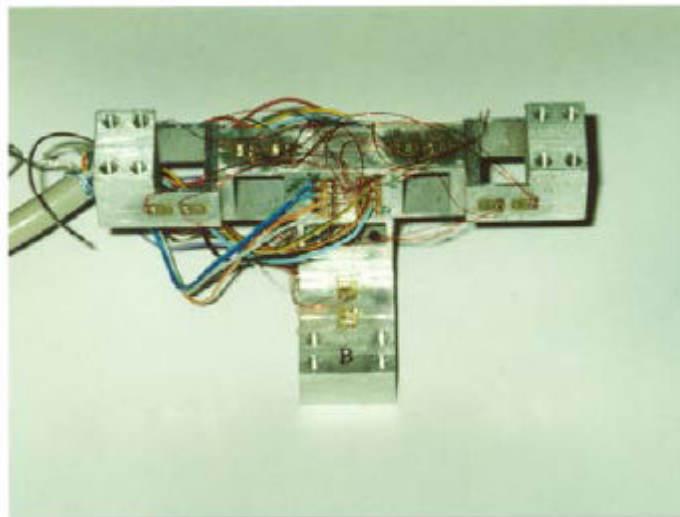
Konstrukční zatížení snímače je pro  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  maximálně 50 N,  $M_x$ ,  $M_y$  a  $M_z$  maximálně 5 Nm. Tento snímač byl testován plným zatížením ve všech osách a všech silových momentech. Během těchto měření byla zjištěna absolutní velikost interferenční chyby měření, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1: *Absolutní velikost chyb snímače.*



Sensor F/M	Vypočtené napětí ( $\mu m / m$ ) a Přeslechová chyba (%)					
	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
$F_x = 50 \text{ N}$	-	-0.44	0.63	-0.05	-1.12	0.61
$F_y = 50 \text{ N}$	-0.77	-	-1.51	-2.12	-0.64	2.50
$F_z = 50 \text{ N}$	0.10	0.90	-	-0.46	1.84	0.74
$M_x = 5 \text{ Nm}$	-0.04	1.51	1.11	-	1.03	0.74
$M_y = 5 \text{ Nm}$	-0.70	-0.22	-0.48	1.76	-	1.73
$M_z = 5 \text{ Nm}$	-0.14	-2.45	2.20	-2.67	-2.79	-

Tab. 1: Absolutní velikost chyb snímače

V průběhu dalšího testování bylo zjištěno, že rozdíl, mezi vypočtenou - teoretickou hodnotou výstupního signálu a skutečnou naměřenou odezvou není větší, než 6%. Chyba vzájemného ovlivnění mezi složkami (interference) nebyla větší, než 2,79%. Na Obr. 5 je fotografie tohoto senzoru osazeného tenzometry.



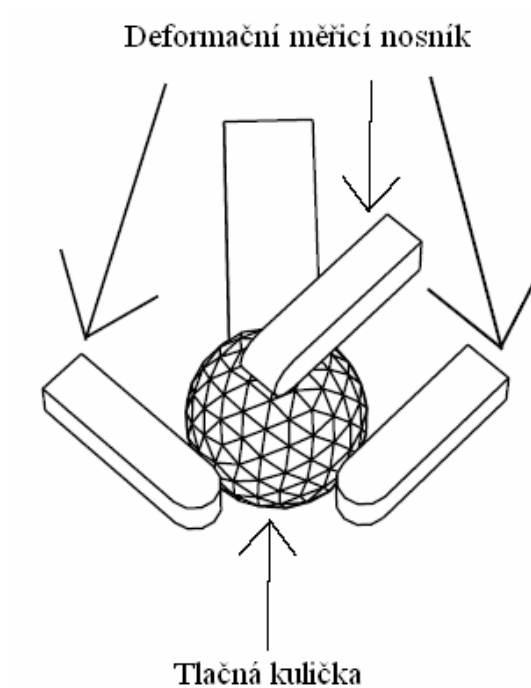
Obr. 5: Osazený snímač robotického prstu

#### 1.1.4 Snímač s paralelním nosníkovým mechanismem

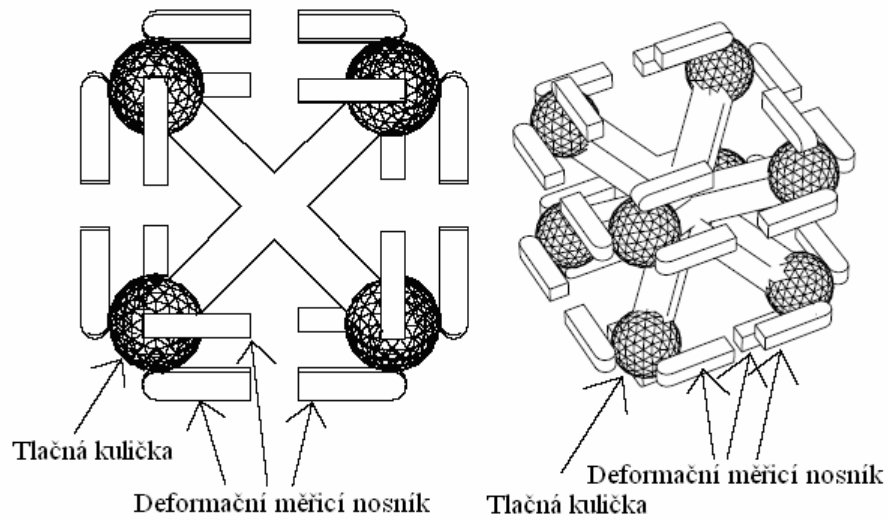
Jako další praktickou ukázkou byl zvolen šesti-složkový senzor s paralelním nosníkovým mechanismem [6]. Byl vyvinut na základě požadavku na měření reakčních sil chodidla a podložky při lidské chůzi. Základní myšlenkou tohoto snímače je paralelní nosníkový mechanismus, který odolává velkému silovému a momentovému zatížení. Hodnoty získané tímto snímačem slouží jako podklad pro návrh chodidla robota, které je tímto snímačem také osazeno. Konstrukce snímače vychází z jednoduchých myšlenek:

- Žádný z opěrných bodů nevyhodnocuje vlastní rotaci
- Každá složka převáděné síly v daném opěrném bodě je měřena samostatnou deformační jednotkou, aby se zamezilo interferenci.
- šesti-složkové silově-momentové působení je vypočítáváno z kombinací dílčích sil.

Základní princip, na němž je snímač založen je patrný z *Obr. 6*, *Obr. 7*.



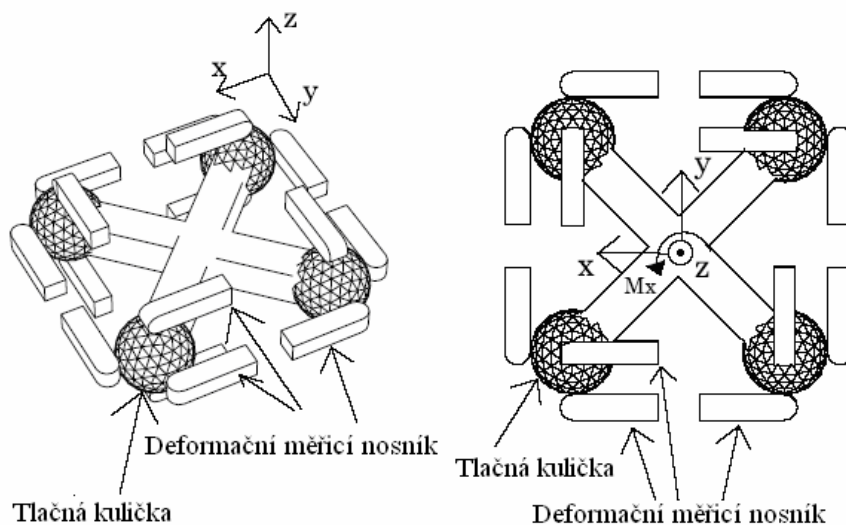
*Obr. 6: Základní měřicí bod*



Obr. 7: Mechanická struktura snímače

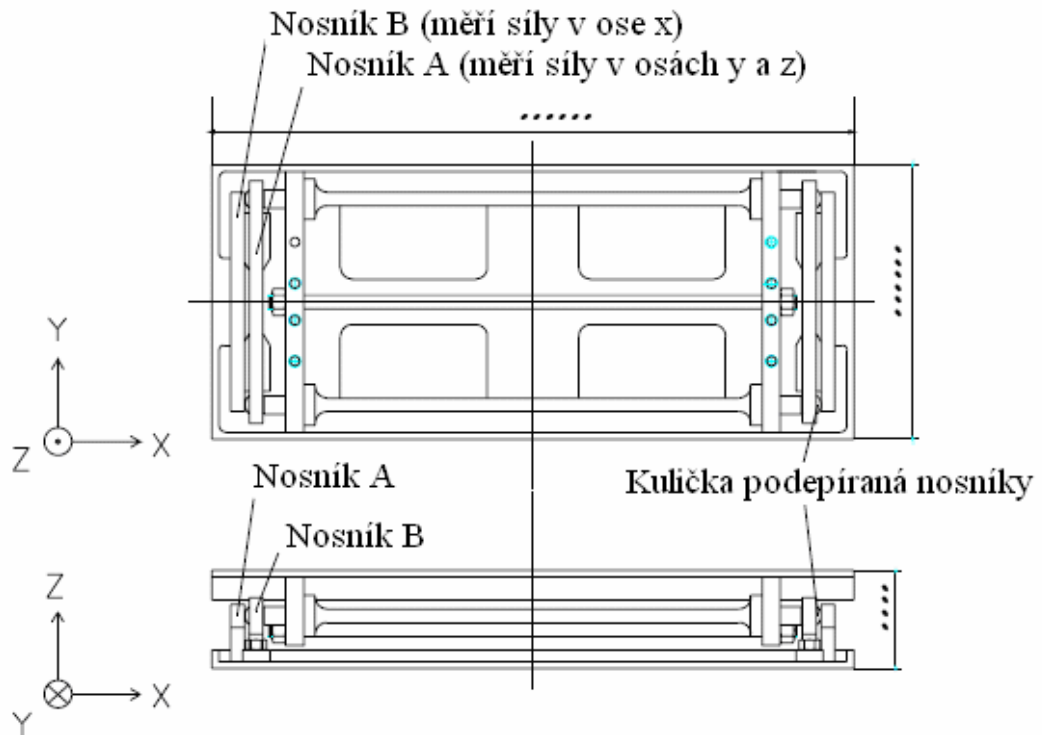
Dotekové kuličky včetně středového rámu jsou spojeny s pohyblivou částí, zatímco pružné nosníky jsou ukotveny do pevné části. Pomocí tenzometrických můstků je snímáno namáhání jednotlivých nosníků.

Zjednodušená a na výrobu podstatně levnější varianta je na Obr. 8. K této konstrukci vedl autory požadavek na cenu a velikost výsledného snímače.



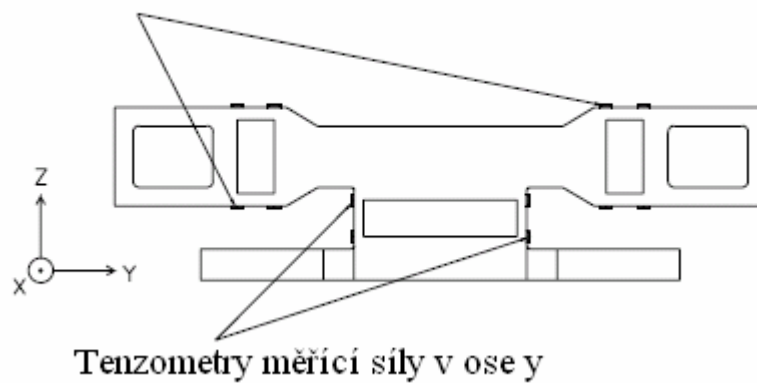
Obr. 8: Zjednodušená konstrukce

Zde je náčrt reálného řešení tohoto snímače:



Obr. 9: Reálné řešení

**Tenzometry měřící síly v ose x**



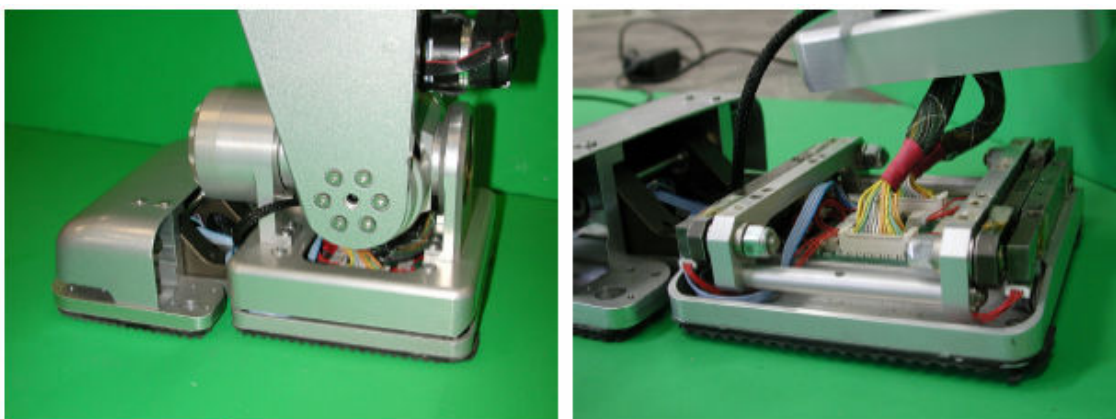
Obr. 10: Tvar nosníku měřícího silové působení ve dvou osách

Dokončený šesti-složkový silově-momentový snímač:



*Obr. 11: Použitelné provedení šesti-složkového silově-momentového snímače*

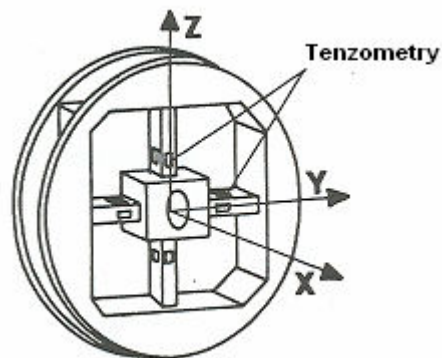
Snímačem osazená noha humanoida:



*Obr. 12: Aplikace snímače*

### 1.1.5 Snímač na principu deformací křížových nosníků

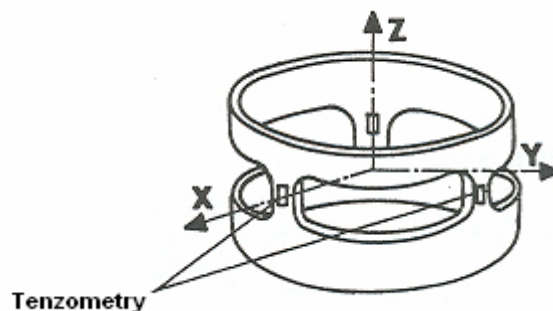
Jedná se o jeden z nejstarších principů, na nichž je založen princip šesti-složkových silově-momentových snímačů. Vztažný bod snímače je umístěn do tuhého středu vnitřní příruby nosného prstence ( Obr. 13), kde je uchycen pomocí čtyř elasticky deformovatelných členů opatřených tenzometry proti vnější přírubě. Jakákoli výchylka vnitřní příruby z nulového bodu se projeví různým zatížením jednotlivých deformačních členů a je přímo detekována příslušnou sadou tenzometrů.[1]



Obr. 13: Snímač na principu křížových nosníků

### 1.1.6 Snímač tvaru dutého válce

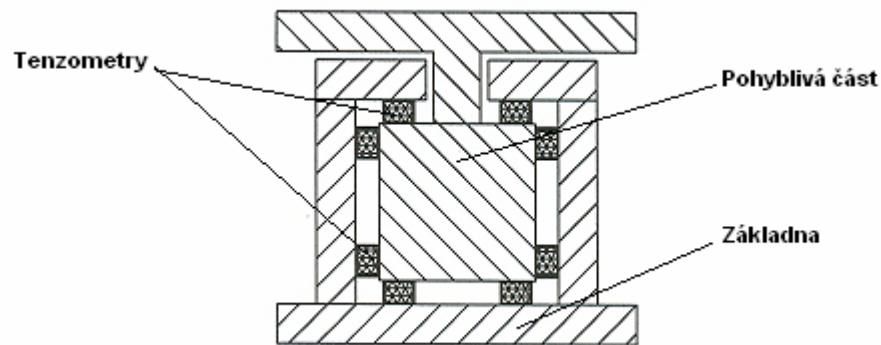
Tento typ snímače je inovací výše uvedeného. Je jednodušší na výrobu, ale náročnější pro přepočty deformací na jednotlivé složky. Jako nosný a deformační prvek současně slouží dutý válec s vyfrézovanými otvory, které svým uspořádáním tvoří trojici deformačních členů osazenou šesticí tenzometrů.[1]



Obr. 14: Snímač tvaru dutého válce

## 1.2 Tenzometrické piezoelektrické snímače

Tyto snímače jsou založeny na piezoelektrickém principu. Odpadá zde nutnost mechanického deformačního členu. Tento může být nahrazen přímo piezoelektrickým tenzometrem, který je stlačován složkou síly působící v jeho směru.



Obr. 15: Princip piezoelektrického tenzometrického snímače

### 1.2.1 Fyzikální podstata, základní zákon

Piezoelektrické tenzometry jsou v podstatě kondenzátory s dielektrikem z piezoelektrického materiálu (např. krystal křemene). Působíme-li na krystal silou, krystal se polarizuje a na elektrodách se objeví napětí, úměrné působící síle.

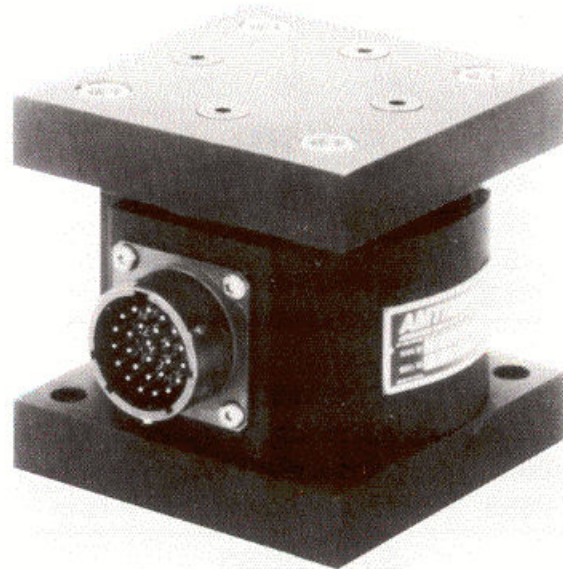
$$U = \frac{k}{C} F \quad (3)$$

Kde:	U	výstupní elektrické napětí
	k	materiálová konstanta krystalu
	C	kapacita mezi deskami snímače
	F	působící síla

Piezoelektrický tenzometr je tedy zdroj napětí s velkým vnitřním odporem. Proto se toto napětí měří zesilovačem s velkým vstupním odporem. Snímače se realizují ze dvou krystalů polarizovaných proti sobě. Při tomto uspořádání se elektrické náboje obou krystalů sčítají. Piezoelektrický tenzometr je vhodný zejména pro dynamická měření.

### 1.2.2 Tenzometrický snímač AMTI

Reálná podoba těchto snímačů je zobrazena na *Obr. 16*. Jedná se o snímač americké společnosti AMTI Advanced Mechanical Technology Inc. [21].



*Obr. 16: Piezoelektrický snímač AMTI*

Jde o výrobek z řady snímačů vyráběných pod označením MC3A. Tyto snímače se vyrábí pro zatížení 100, 250, 500 a 1000 liber. Podle údajů výrobce mají vysokou tuhost, velkou citlivost, malý přeslech, zaručenou opakovatelnost a velkou stabilitu. Doporučené zapojení těchto snímačů je ve spojení se zesilovačem AMTI. V následující *Tab. 2: Vlastnosti snímače AMTI* jsou hodnoty udávány výrobcem.

**Model:**

MC3A-X-	100	250	500	1000	
---------	-----	-----	-----	------	--

**Únosnost:**

Fz	445	1112	2225	4450	N
Fx,Fy	223	556	1112	2225	N
Mz	5,7	14,1	28,2	56.5	Nm
Mx,My	11,3	28,2	56.5	113	Nm



**Citlivost:**

Fz	1,35	0,67	0,34	0,17	$\mu\text{V} / \text{VN}$
Fx,Fy	5,4	2,7	1,35	0,67	$\mu\text{V} / \text{VN}$
Mz	265,5	132,8	66,4	33,2	$\mu\text{V} / \text{VNm}$
Mx,My	265,5	132,8	66,4	33,2	$\mu\text{V} / \text{VNm}$

**Tuhost:**

Fz	2,98	7,88	15,76	31,54	$\times 10^6 \text{ N/m}$
Fx,Fy	0,21	0,53	1,06	2,12	$\times 10^6 \text{ N/m}$
Mz	0,23	0,57	1,13	2,26	$\times 10^4$

**Nelinearita:**

Fx,Fy,Fz	0,2	0,2	0,2	0,2	$\pm 5\% \text{FSO}$
----------	-----	-----	-----	-----	----------------------

**Hystereze:**

Fx,Fy,Fz	0,2	0,2	0,2	0,2	$\pm 5\% \text{FSO}$
----------	-----	-----	-----	-----	----------------------

**Rezonanční**

Mx,My	300	500	700	1000	Hz
-------	-----	-----	-----	------	----

%FSO - %Full Scale Output

Tab. 2: Vlastnosti snímače AMTI

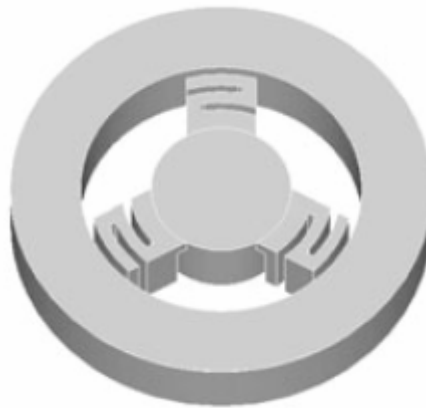
Tyto snímače jsou vhodné pro měření sil a momentů, které mění směr působení a svou velikost v čase. Použití nacházejí ve strojírenství, robotice, ergonomice, výrobních procesech, biomechanice a dynamice. Jsou schopné činnosti i v méně obvyklých aplikacích, jako převodník na rozhraní člověk-stroj u ručního ovladače - joysticku.

### 1.3 Optické snímače

Obdobně jako v případě odporových tenzometrů jde i zde o snímání výchylky určité elasticky deformovatelné struktury. Tento princip snímání nachází uplatnění všude tam, kde nelze použít klasické snímání posunutí, sil a silových momentů z nejrůznějších důvodů. Například ve zdravotnictví v rehabilitační robotice, nebo na specializovaných robotických pracovištích.

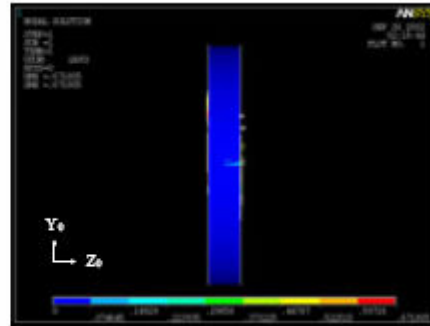
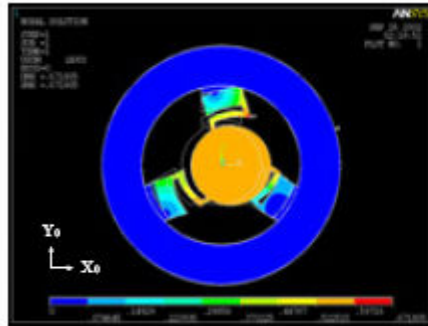
#### 1.3.1 Takahashiho snímač

V roce 2003 byl prezentován šesti-složkový nekovový snímač síly a momentu [7]. Tento snímač je koncipován tak, aby vyhovoval přísným požadavkům na elektromagnetické rušení při zkoumání činnosti lidského mozku, zejména center motorických funkcí člověka pomocí funkční Elektromagnetické Rezonance (fMRI). Z tohoto základního požadavku vyplývá že na tomto snímači může být použita žádná kovová součást. Jako mechanický deformační prvek je použito plastové mezikruží se třemi lamelovými pružinami (*Obr. 17*).

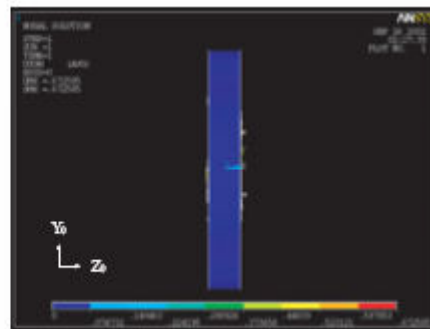
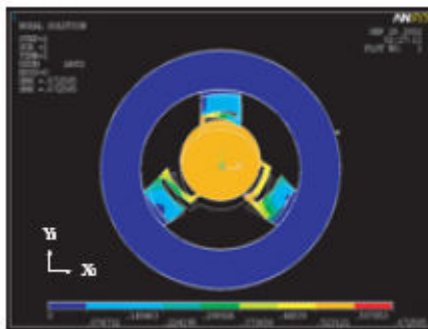


*Obr. 17: Deformační člen Takahashiho snímače*

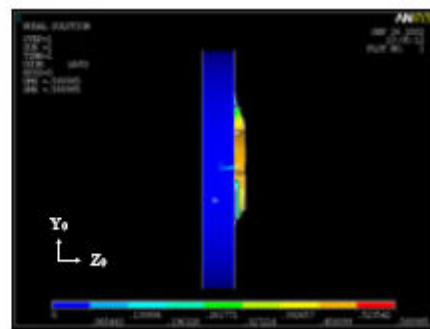
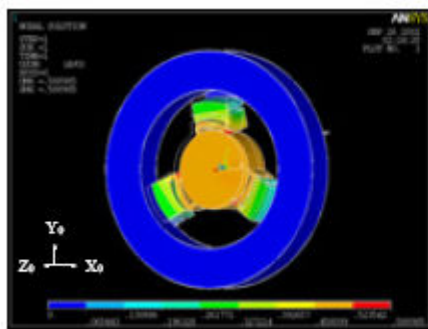
Na následujícím *Obr. 18* je vidět deformace tohoto členu při různém působení sil.



Vychýlení vlivem síly  $F_x$



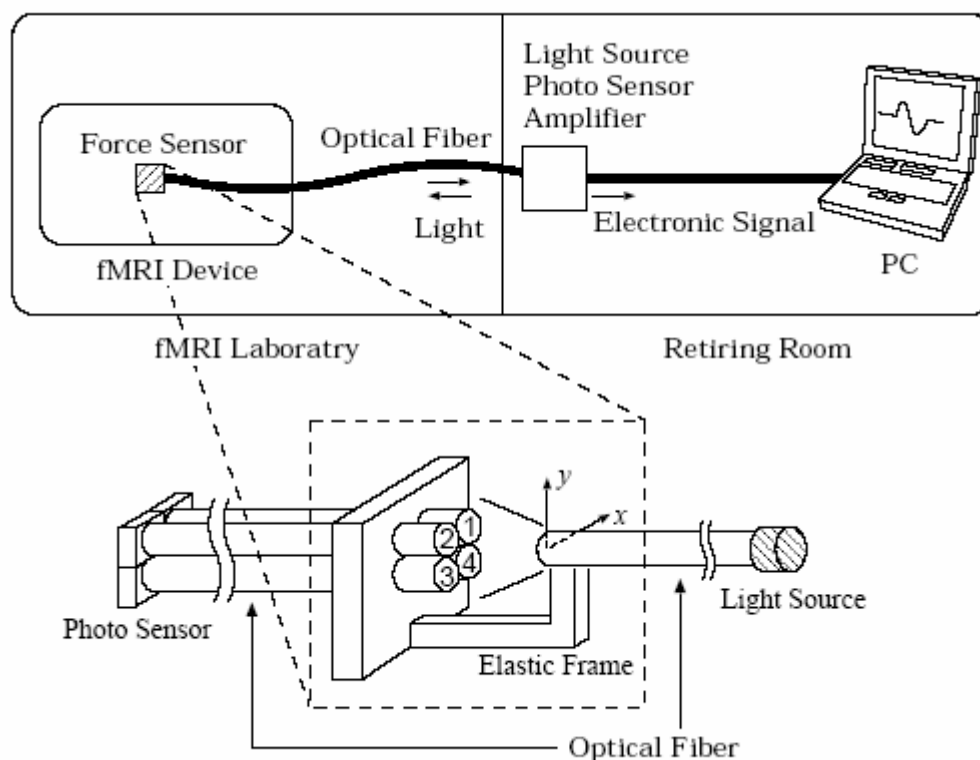
Vychýlení vlivem síly  $F_y$



Vychýlení vlivem síly  $F_z$

*Obr. 18: Rozbor deformací deformačního členu Takahashi*

Snímání vychýlení je v tomto případě zajištěno trojicí dvouosých snímačů pohybu. Každý z nich je tvořen čtveřicí optických vláken na straně snímání zdrojového světla a jedním pohyblivým vláknem, jímž je zdrojové světlo přivedeno (*Obr. 19*).



Obr. 19: Snímací princip Takahashiho snímače

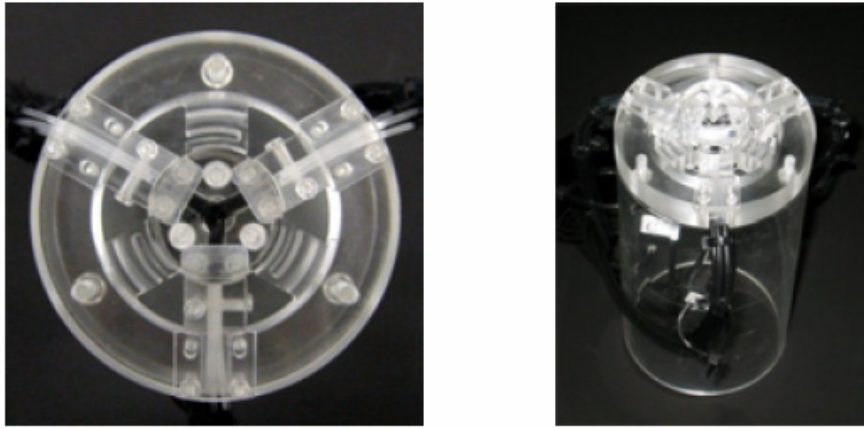
Při vývoji tohoto snímače se autorům naskytlo několik problémů. Předně bylo potřeba vyřešit zdroj konstantního světla pro buzení koncového senzoru. Po delším zkoušení bylo rozhodnuto použít LED diodu TOSHIBA TSLH180P : 8000mcd. Ta má jak vyhovující stálost světelného toku, tak i spotřebu a velikost. Pro vedení světla je použito mnohovidového vlákna KEYENCE FU-77.

Zátěž tohoto snímače může být vzhledem k použitým materiálům maximálně 30N. Chyba a přesnost snímače při plném zatížení je v Tab. 3: Přesnost optického snímače Takahashi.

	Fx	Fy	Fz
Chyba [N]	± 0,33	± 0,42	± 0,44
Přesnost [%]	± 1,1	± 1,4	± 1,5
	Mx	My	Mz
Chyba [N]	± 0,020	± 0,030	± 0,026
Přesnost [%]	± 2,0	± 3,0	± 2,6

Tab. 3: Přesnost optického snímače Takahashi

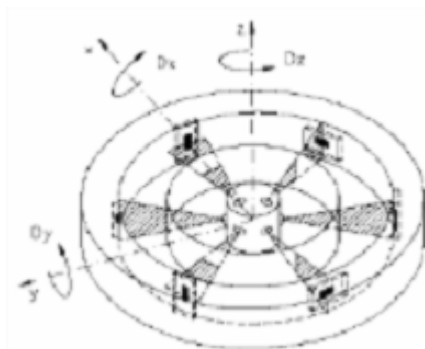
Na následující fotografii (*Obr. 20*) je konečná podoba nekovového snímače osazeného trojicí optických indikátorů vychýlení.



*Obr. 20: Dokončený Takahashiho senzor*

### 1.3.2 Optoelektronický šesti-složkový silově-momentový snímač

Šesti-složkový silově-momentový snímač byl poprvé použit v souvislosti s řešením úlohy napodobení lidské činnosti při vkládání kolíku do otvoru pomocí adaptivního robotického systému. Uvedená montážní operace byla provedena pomocí sestavy oko-ruka, přičemž činnost lidského oka byla imitována pomocí kamerového systému a záměrná činnost lidské ruky - vjem intenzity dotyku byl imitován pomocí šesti-složkového silově-momentového snímače na principu odporových tenzometrů koncem let 60-tých minulého století. Rychlost polohové adaptivity robotického systému byla závislá na dosažitelné rychlosti mikroprocesorů za účelem výpočtu konfigurace kloubových proměnných robota. Další pokrok v oblasti šesti-složkových silově-momentových snímačů byl zaznamenán ve spolupráci NASA s DLR při projektu ROTEX (1993) a byl založen na optoelektronickém principu za použití šesti laserových diod a šesti řádkových PSD - polohově citlivých snímačů (*Obr. 21*) používaný na dálkové ovládání ramena robota v experimentální kosmické laboratoři na oběžné dráze [16].

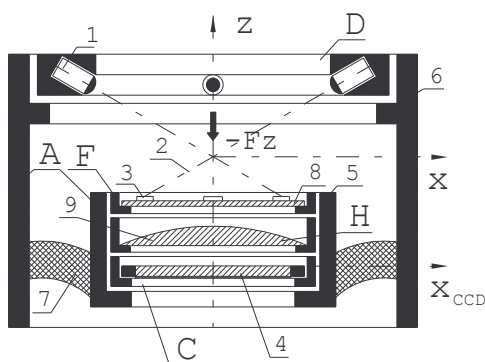


*Obr. 21: Princip DLR optoelektronického šesti-složkového silově-momentového snímače*

Měřicí systém se skládá z vnitřní a vnější části. Měřicí soustava ve vnitřním prstenci je složena z 6-ti LED diod a jejich světlo prochází 3-mi vertikálními a 3-mi horizontálními štěrbinami uspořádanými střídavě po obvodu středového prstence vždy s odstupem  $60^\circ$ . Takto vzniklé paprsky dopadají na protější vnitřní stěnu obvodového prstence, kde je v místech dopadu těchto paprsků umístěno šest polohově citlivých PSD senzorů. Tyto senzory jsou orientovány vždy kolmo na proužek světelné stopy, aby umožnily zaznamenat posunutí světelné stopy vycházející ze štěrbin vnitřního prstence. Sestava

LED diod a prstence se štěrbinami tvoří pohyblivou část snímače. Vnější prstenec s PSD snímači tvoří statickou část snímače. Obě části (vnitřní i vnější prstence) jsou soustředné a sousedí. Prstenec s PSD snímači je ukotven ve vnější části a spojen pružinami s vnitřním prstencem. Tyto pružiny zajišťují návrat vnitřní části do výchozí polohy po jejím vychýlení libovolným směrem. Signál získaný z šesti PSD snímačů je vyhodnocován pomocí inverzní transformace, umožňující vyhodnocování tří osových posunutí a tří úhlových pootočení okolo os souřadnicového systému  $x, y, z$ .

V pozdějších letech došlo k nahrazení řádkových PSD snímačů jedním plošným 2D CCD snímačem. (Obr. 22).



Obr. 22: Princip UTB optoelektronického šesti-složkového silově-momentového snímače

Podstata návrhu snímače spočívá v systému snímání a zpracování obrazové informace, při konverzi obrazu z (plošného) 2-D CCD snímače na šesti-složkovou informaci o třech osových posunutích a třech úhlových pootočeních. Obraz z 2-D CCD snímače obsahuje čtyři světelné stopy od čtyř světelných paprsků, vyzařovaných z laserů, popřípadě z laserových diod. Tyto světelné paprsky procházejí pomyslnými hranami tvaru pyramidy, přičemž 2-D CCD snímač tvoří základnu pyramidy a počátky světelných paprsků se protínají ve vrcholu pyramidy. Algoritmy na zpracování šesti-složkové informace jsou založeny na inverzní transformaci výsledné konfigurace světelných stop (obecně lichoběžníkového tvaru) vzhledem k původnímu čtvercovému tvaru světelných stop, který je vysvícen v klidové poloze na ploše 2-D CCD snímače. Tento algoritmus v podstatě určuje relativní polohu a orientaci vnořeného 2-D souřadnicového systému  $x_{CCD}, y_{CCD}$  plošného 2-D CCD snímače vzhledem k pevnému 3-D souřadnicovému systému  $x, y, z$  s

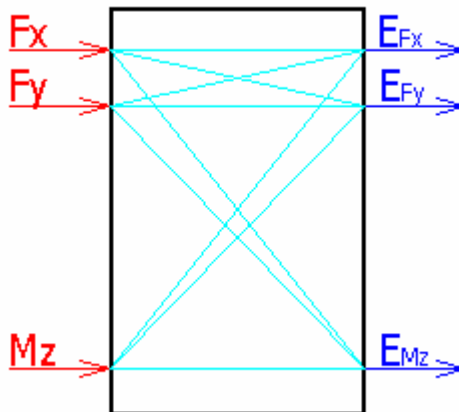
počátkem ve vrcholu pyramidy, tvořené světelnými paprsky, popřípadě světelnými rovinami. V případě konfigurace světelných rovin tvaru pyramidy je nahrazen 2-D CCD (PSD) snímač konfigurací řádkových CCD (PSD) snímačů.

Princip činnosti šesti-složkového silově-momentového snímače je zřejmý z *Obr. 22*, kde je zakreslena mechanická sestava snímače. Mechanická sestava pozůstává z modulů A-vnitřní příruby, C-plošného CCD snímače, D-sestavy laserových diod, F-matnice a H-optického objektivu. Laserové diody 1 emitují světelné paprsky 2, které tvoří hrany pomyslné pyramidy a protínají matnici 8 ve čtyřech světelných stopách 3. Jednoznačná konfigurace čtyř světelných stop se mění vlivem osových posunutí a úhlových pootočení mezi vnitřní přírubou 5 a vnější přírubou 6, které jsou spojeny elasticky deformovatelným materiálem 7. Poloha světelných stop 3 je zobrazována buď přímo bez matnice, nebo přes objektiv 9 z matnice 8 do plošného CCD snímače 4. Algoritmus na vyhodnocování šesti-složkové informace o třech osových posunutích a třech úhlových pootočeních je založen na inverzní transformaci výsledné, obecně lichoběžníkové polohy čtyř světelných stop A,B,C,D vzhledem k původní čtvercové poloze světelných stop  $A_0, B_0, C_0, D_0$  se středem  $S_0$ . Polohy světelných stop jsou zobrazovány v rovinném souřadnicovém systému  $x_{CCD}, y_{CCD}$  plošného CCD snímače. Informace o osových posunutích  $x_0, y_0, z_0$  a úhlových pootočeních  $f, q, w$  mezi vnitřní přírubou 5 a vnější přírubou 6, odpovídající silově-momentovému působení  $F_x, F_y, F_z$  a  $M_x, M_y, M_z$  je vyhodnocováno pomocí kalibrační matice, která charakterizuje vlastnosti elasticky deformovatelného prostředí [8].



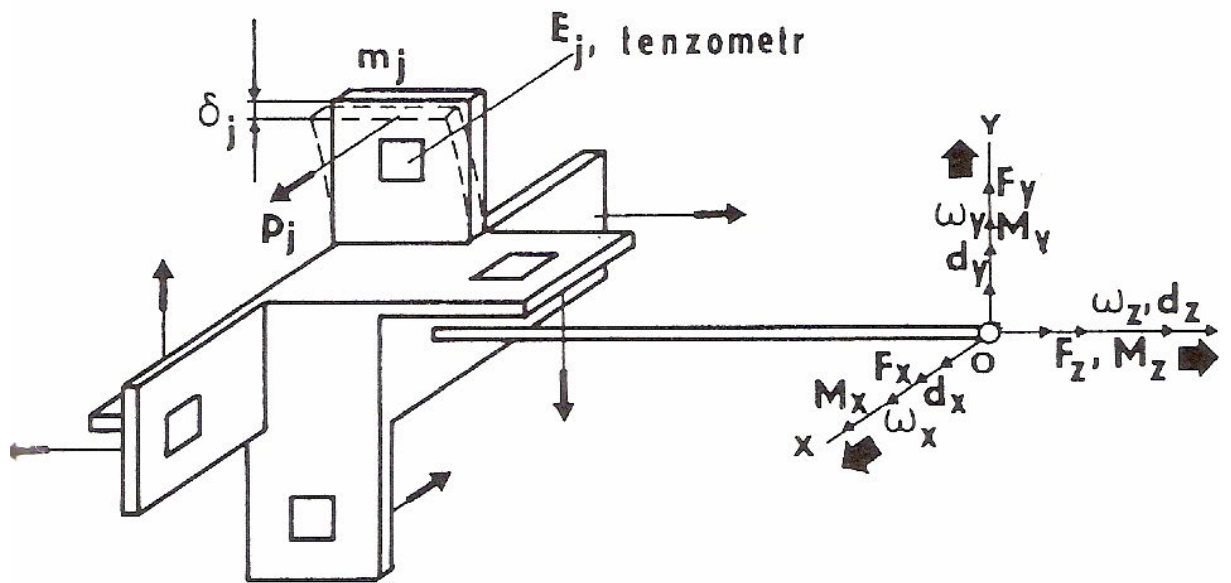
## 2 POJEM KALIBRAČNÍ MATICE

Pro správné používání jakéhokoli snímače, tedy i šesti-složkového je nutné nejprve znát jeho převodové vstupně - výstupní charakteristiky. Tyto nám udávají citlivost, přesnost a linearitu snímače v jednotlivých složkách při zatěžování. Zároveň potřebujeme u vícesložkových snímačů znát i velikost vzájemného ovlivňování mezi jednotlivými složkami (Obr.23[1]) a to z toho důvodu, že vzájemná interference sil zvyšuje nepřesnost měření. Při vhodné konstrukci deformačních členů i celého snímače při zatěžování v určeném rozsahu můžeme uvažovat o interferenci jen prvního řádu. V případě méně kvalitních snímačů, popřípadě snímačů pro určité speciální použití musíme uvažovat s interferencí vyšších řádů. Pro odstranění interference je nutné znát především její vzájemnou velikost. Všechny těchto údajů dosáhneme správnou kalibrací snímače.



Obr. 23: Interferenční působení v šesti-složkovém snímači

V dalších úvahách budeme vycházet z funkčního principu snímače VÚMA (Obr. 24[1]), kde jsou deformace elastických členů snímány v místech působení reakčních sil tenzometry.



Obr. 24: Funkční princip šesti-složkového snímače VÚMA

Výstupní signál  $E_j$  na každém tenzometrickém můstku je úměrný deformaci  $\delta_j$ , respektive reakční síle  $P_j$ , která ji vyvolá.

Pro lineární deformační členy platí

$$\delta_j = \frac{1}{cp_j} P_j \quad (4)$$

$$E_j = \frac{\wp_j}{cp_j} P_j \quad (5)$$

Kde:  $cp_j$  je koeficient tuhosti deformačního členu ve směru síly  $P_j$ , respektive momentu

$$[N.mm^{-1}, N.mm.rad^{-1}]$$

$\wp_j$  je převodová konstanta deformačního měřicího členu

$$[mV.mm^{-1}, mV.rad^{-1}]$$

$j$  počet snímaných míst  $j=1,2,3,\dots,k ; k \geq 6$

Mezi silami  $P_j$ , které zatěžují deformační členy a vektorem vnějších složek zatěžujících sil a momentů působících ve vztažném bodě  $O$  platí podmínky transformace sil a momentů podle vztahu (6)

$$F_F = HP \quad (6)$$

Kde:  $\mathbf{H}$  (6 x k) je matice koeficientů rovnic transformace pro dané uspořádání snímače

$\mathbf{P}$  (1 x k) je vektor prvků  $P$

$\mathbf{F}_F$  (1 x 6) vektor složek výsledného zatížení snímače

$$F_F = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T \quad (7)$$

$$P = (P_1, \dots, P_j, \dots, P_k)^T \quad (8)$$

Pokud označíme vektor deformací  $\mathbf{D}$

$$D = (\delta_1, \dots, \delta_j, \dots, \delta_k)^T \quad (9)$$

a vektor malých deformací ve vztažném bodě  $\mathbf{d}$

$$d = (d_x, d_y, d_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T \quad (10)$$

potom platí vztah

$$D = H^T d \quad (11)$$

Necht'  $C_P$  je diagonální matice ( $k \times k$ ) s koeficienty  $cp_j$  uspořádanými na diagonále. Kombinací vztahů (4), (6), (11) dostaneme výraz, který popisuje deformační vlastnosti snímače

$$F_F = HC_P H^T d = C_T d \quad (12)$$

Kde:  $C_T$  je matice tuhosti snímače vzhledem na zvolenou soustavu  $\mathbf{O}(x,y,z)$

$$C_T = HC_P H^T \quad (13)$$

Označme vektor výstupních signálů z tenzometrických můstků  $E_P$

$$E_P = (E_1, \dots, E_j, \dots, E_k)^T \quad (14)$$

a vektor přepočtených signálů odpovídajících složkám měřeného silového a momentového zatížení  $E_F$

$$E_F = (E_{F_x}, E_{F_y}, E_{F_z}, E_{M_x}, E_{M_y}, E_{M_z})^T \quad (15)$$

Pro přepočet těchto signálů při uvažování pružných deformací podle výše popsaných rovnic zřejmě platí vztah

$$E_P = H^T E_F \quad (16)$$

Postupným řešením dostáváme vztah pro převodové charakteristiky snímače

$$F_F = HC^* P H^T E_F = CE_F \quad (17)$$

Kde:  $C^* P$  je diagonální matice prvků  $c^*_{pj}$

$$c^*_{pj} = \frac{c_{pj}}{\varrho_j} \quad (18)$$

Ze vztahu (17) plyne, že

$$C = HC^* P H^T \quad (19)$$

$C$  (6 x 6) je matice hledaných převodových charakteristik snímače. Měření neznámého zatížení a jeho rozklad na složky v soustavě  $\mathbf{O}(xyz)$  předpokládá znalost všech prvků matice  $C$ . Rovnici (17) je možno pro potřeby kalibrace přepsat do tvaru

$$E_F = C^{-1} F_F = A F_F \quad (20)$$

Kde:  $A$  je často nazývána **kalibrační matice**.

$$A = C^{-1} \quad (21)$$

Cílem kalibrace snímače je identifikace, resp. zpřesnění prvků kalibrační matice pro příslušný snímač a reálné pracovní podmínky [10].

Kalibrační matice nám umožňuje podle vztahu (17) z každé šestice naměřených signálů  $E_F$  na výstupu snímače jednoznačně odhadnout všechny jeho měřené složky zatížení  $F_F$ . V ideálním případě je kalibrační matice diagonální.

Z provedené teoretické analýzy snímače je vidět, že vzhledem k různým teoretickým předpokladům, znalosti převodových koeficientů a konstant výpočtů, získané výsledky jen více, či méně vystihují reálné podmínky funkce snímače, které se navíc s časem mění.

### 3 ANALÝZA CHYB VZNIKAJÍCÍCH PŘI MĚŘENÍ ŠESTI-SLOŽKOVÝCH SNÍMAČŮ

#### 3.1 Chyby vznikající při měření fyzikálních veličin

Při měření fyzikálních veličin obecně, dochází k chybám. Měření mohou být prováděna staticky – v čase neproměnná, nebo dynamicky – v čase proměnná. Při měření a kalibraci vícesložkových snímačů síly a momentu síly může jít o měření statické, nebo dynamické. Při měření dochází k nepřesnostem, které souhrnně nazýváme **absolutní chybou**  $x_i$  i-tého měření.

Absolutní chybu můžeme popsat takto:

$$x_i = X_i - X = (x_h + x_s + x_n) \quad (22)$$

- Kde:
- $x_h$  **hrubá chyba** je chyba, která se značně liší od očekávané hodnoty. Může vzniknout únavou, omylem, nedopatřením, neznalostí věci ...  
Při zjištění hrubých chyb nemá smysl pokračovat.
  - $x_s$  **systemová chyba** je chyba, která má pravidelně se opakující charakter. Je závislá na použité metodě, přístrojích a podobně.  
Opakovaným měřením ji nelze potlačit
  - $x_n$  **náhodná chyba** Je výsledkem působení rušivých nahodilých vlivů.  
Pomocí statistických metod lze odvodit zákony, kterými se tato chyba řídí a odhadnout meze, v nichž (s libovolně vysokou pravděpodobností) skutečná hodnota měřené veličiny leží.
  - $X_i$  **naměřená hodnota** měřené veličiny
  - $X$  **skutečná hodnota** měřené veličiny

Na základě pokusů a pozorování bylo pro náhodné chyby zjištěno, že je možno formulovat následující zákony chyb:

1. Počet kladných i záporných chyb je srovnatelný
2. počet menších chyb převyšuje počet chyb větších
3. počet chyb je klesající funkce prosté velikosti chyby

Jestliže dané měření opakujeme  $n$ - krát, potom se v blízkém okolí  $dx$  chyby  $x$  vyskytne celkem  $dn$  měření. Potom lze definovat **absolutní přesnost**  $p$ .

$$p \equiv p(x) = \lim_{dx \rightarrow 0} \frac{dn}{dx}; dx = \left( x + \frac{dx}{2} - \left( x - \frac{dx}{2} \right) \right) \quad (23)$$

Četnost chyby  $p$  je obecně necelé číslo a je klesající funkcí velikosti chyby. Největší je pro chybu nulovou a pro rostoucí velikost chyby se blíží k nule. Protože lze očekávat, že četnost  $p$  bude při velkém počtu  $n$  měření tomuto počtu úměrná, zavádí se ještě tzv. **relativní četnost**  $\eta$ .

$$\eta(x) = \frac{p(x)}{n} \quad (24)$$

respektive

$$p(x) = n \cdot \eta(x) \quad (25)$$

Relativní četnost chyby je nezávislá na počtu měření. Nejedná se však o bezrozměrné číslo, nýbrž její veličina je převrácenou hodnotou měřené veličiny.



### 3.1.1.1 Statistická minimalizace náhodných chyb

Na základě výše uvedeného se budeme nyní věnovat minimalizaci chyb náhodných. Jedná se totiž o jediný typ chyby, který můžeme vhodným vyhodnocovacím algoritmem minimalizovat.

V dalším textu tedy pro zjednodušení budeme používat místo  ${}_n x$  pouze  $x$ .

Jak ukázal Gauss, poměrnou četnost  $\eta$  náhodných chyb lze  $x$  lze vyjádřit ve tvaru exponenciální funkce typu

$$\eta(x) = \eta_0 e^{-(hx)^2} \quad (26)$$

Podle Gaussova zákona relativní četnosti chyby pro nekonečně velký počet  $n$  měření lze vyjádřit hodnotu této četnosti  $\eta(x)$

$$\eta(x) = \frac{h}{\sqrt{x}} \cdot e^{-(hx)^2} \quad (27)$$

Kde:  $h$  **přesnost** je reálná konstanta. Jinak také míra přesnosti.

Její veličina je převrácenou hodnotou měřené veličiny .

Při hledání vyjádření parametru  $h$  zavedeme definici **střední kvadratické chyby**  $\delta$ .

$$\delta^2 = \frac{1}{n} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (28)$$

Po matematických úpravách dostaneme

$$\delta = \frac{1}{h\sqrt{2}} \quad (29)$$

Odtud lze konstatovat, že střední kvadratická chyba je nepřímo úměrná míře přesnosti.

$$\eta_0 = \frac{h}{\sqrt{\pi}} = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} = \frac{0,4}{\delta} \quad (30)$$

### 3.1.1.2 Stanovení nejpravděpodobnější hodnoty měřené veličiny

Výše uvedená úvaha počítá s nekonečně velkým počtem měření. V praxi však něčeho takového nemůžeme dosáhnout.

Uvažujme omezený počet měření  $X_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$  dané fyzikální veličiny, jejíž skutečná hodnota je  $X$ . Nejpravděpodobnější hodnotu měřené veličiny označíme  $\hat{X}$

Chyba  $i$ -tého měření je  $x_i = X_i - X$ . Pro velmi velký počet měření bude platit

$$0 = \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n (X_i - X) = n \cdot X - \sum_{i=1}^n x_i \quad (31)$$

tedy

$$\hat{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X} \quad (32)$$

Kde:  $\bar{X}$  aritmetický průměr

Vychází tedy, že i při konečném počtu  $n$  měření je aritmetický průměr  $\bar{X}$  hodnotou, která je nejpravděpodobněji rovna měřené veličině  $X$ . [4]

### 3.2 Nejistota měření

Nejistota měření je k výsledku měření přidružený parametr charakterizující rozptýlení hodnot, které lze odůvodněně pokládat za hodnotu veličiny, která je objektem měření. Tímto parametrem může být směrodatná (standardní) odchylka nebo její daný násobek. Nejistota měření obecně obsahuje řadu složek. Některé z těchto složek mohou být vyhodnoceny ze statistického rozložení výsledků měření a mohou být charakterizovány experimentální standardní odchylkou (čili experimentálně určeným odhadem této standardní odchylky). Jiné složky (které mohou být ale také charakterizovány standardní odchylkou) se vyhodnocují z předpokládaného pravděpodobnostního rozložení. Typ tohoto rozložení se určuje na základě zkušeností nebo jiných informací. K rozptýlení výsledků měření přispívají také složky nejistoty spojené s korekcemi a referenčními etalony. Analogické definice mají nejistoty údajů měřicích přístrojů, nejistoty konstant a nejistoty korekcí.

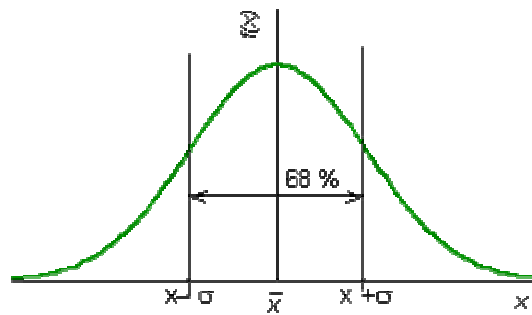
Základní kvantitativní charakteristikou nejistoty měření je **standardní nejistota**. Je to standardní (směrodatná) odchylka veličiny, pro níž je nejistota udávána. Označuje se symbolem **u** (z anglického výrazu *uncertainty*, česky nejistota).

Standardní nejistoty se podle způsobu svého vyhodnocení dělí na:

- **standardní nejistoty typu A** (označení  $u_A$ ), které jsou stanoveny z výsledků opakovaných měření statistickou analýzou série naměřených hodnot. Jejich příčiny se považují za neznámé a jejich hodnota klesá s počtem měření;
- **standardní nejistoty typu B** (označení  $u_B$ ), které jsou získané jinak než statistickým zpracováním výsledků opakovaných měření. Jsou vyhodnoceny pro jednotlivé zdroje nejistoty identifikované pro konkrétní měření a jejich hodnoty nezávisí na počtu opakování měření. Pocházejí od různých zdrojů a jejich společné působení vyjadřuje *výsledná standardní nejistota typu B*.

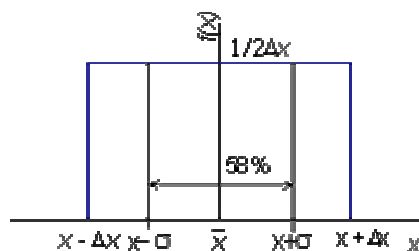
V praxi se většinou nevystačí s jedním nebo druhým typem nejistoty samostatně. Pak je za potřebí stanovit výsledný efekt kombinace nejistot měření obou typů, A i B, vyjádřený kombinovanou standardní nejistotou. *Kombinovaná standardní nejistota*  $u_C$  se získá sloučením standardní nejistoty typu A s výslednou standardní nejistotou typu B. Používá se, je-li výsledek měření získán z hodnot několika veličin, a je rovna odmocnině součtu rozptylů (variancí, disperzí) a kovariancí těchto veličin. Tyto variance a kovariance jsou násobeny váhovými koeficienty jejichž hodnoty vyjadřují, jak se výsledek měření mění se změnami těchto jednotlivých veličin. Pro standardní nejistotu typu A rovnou  $u_A$  a výslednou standardní nejistotu typu B rovnou  $u_B$  je pak **kombinovaná standardní nejistota**  $u_C$  rovna:

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (33)$$



Obr. 25: Hustota pravděpodobnosti normálního

Směrodatná odchylka (a tedy i standardní nejistota) veličiny  $x$  představuje u veličiny rozdělené podle normálního rozdělení pravděpodobností polovinu šířky intervalu, v jehož středu leží střední hodnota veličiny  $x$  a ve kterém s pravděpodobností přibližně 68 % leží každá hodnota veličiny  $x$ . Tuto situaci znázorňuje Obr. 25.



Obr. 26: Hustota pravděpodobnosti rovnoměrného rozložení pravděpodobnosti

Pokud je veličina  $x$  rozložena podle rovnoměrného rozdělení pravděpodobností a víme, že tato veličina nepřekročí interval o šířce  $2\Delta x$ , budou všechny hodnoty této veličiny ležet v intervalu  $\pm\Delta x$  okolo střední hodnoty.

V takovém případě je standardní odchylka této veličiny (čili příslušná složka standardní nejistoty typu B) rovna  $\Delta x/\sqrt{3}$ , jak plyne z vlastností rovnoměrného rozdělení pravděpodobností. Graf rovnoměrného rozdělení pravděpodobností uvádí Obr. 26.

Rovnoměrné rozdělení (rovnoměrné rozložení) pravděpodobností se při určování nejistoty měření používá v praxi velmi často. Podle doporučení uvedeného v [2] se použije tehdy, pokud o rozdělení pravděpodobnosti měřené veličiny nemáme žádné informace.

Abychom zajistili, že v pásmu jehož šířka je určena nejistotou leží větší procento hodnot než např. 68%, použijeme interval o šířce větší než  $2u$ , jehož středem je naměřená hodnota měřené veličiny. Standardní nejistotu v takovém případě vynásobíme číslem, které se nazývá **koeficient rozšíření  $k$** .

Pro normální rozdělení  $k = 2$  odpovídá situaci, že v pásmu  $2k u$  leží 95 % měřených hodnot,  $k = 3$  odpovídá situaci, že v pásmu  $3k u$  leží 99,7 % měřených hodnot.

**Rozšířená nejistota** (označená  $U$ ) je definována jako součin kombinované standardní nejistoty (33)  $u_c$  a koeficientu rozšíření  $k$ , tedy vztahem:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (34)$$

kde  $U$  je rozšířená nejistota,  $k$  je koeficient rozšíření,  $u_c$  je kombinovaná standardní nejistota a  $y$  je měřená veličina.

S rozšířenou nejistotou je nutno vždy uvést číselnou hodnotu použitého činitele rozšíření  $k$ . Hodnota koeficientu rozšíření bývá nejčastěji 2, v praxi leží v intervalu  $\langle 2, 3 \rangle$ . [3]

### 3.3 Chyby vznikající při zatěžování snímače

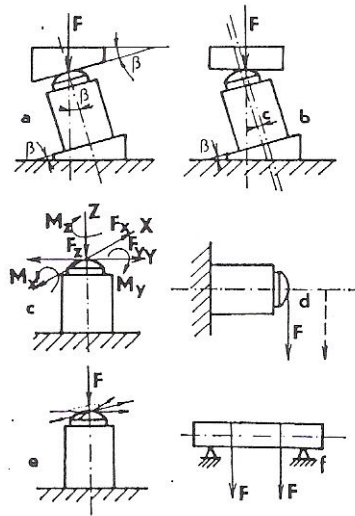
Pojem chyby a nejistoty při zatěžování snímačů má stejný význam jako pojem chyby a nejistoty při měření. Chyba zatížení snímače je obdobně jako u měření rozdílem mezi skutečným zatížením a hodnotou požadovanou na zatěžovacím zařízení. Je to tedy jedna hodnota, kdy nejistota je odhad rozsahu hodnot v němž leží skutečná hodnota zatížení.

Teoretická analýza systematických chyb [9], s nimiž se setkáváme při zatěžování případně kalibrování snímačů je neoddělitelnou součástí problematiky pojednávající o vícesložkových snímačích.

Jde o chyby, které i při opakovaných měřeních zůstávají konstantní, nebo se mění způsobem, který lze předpokládat. Známé systematické chyby zatížení vyloučíme korekcí údajů, přičemž korekce se rovnají záporným hodnotám systematických chyb. V každém případě, ať již jde o systematickou chybu neznámou, nebo nezaznamenanou, případně zaznamenanou, je možno dobře odhadnout, jakém rozsahu se hodnota této chyby nachází.

Taková analýza může též být jistým vodítkem pro návrh přesného zařízení pro kalibraci vícesložkových snímačů sil a momentů.

Na následujícím obrázku *Obr. 27* je naznačeno několik základních metod zatěžování snímačů.



Obr. 27: Metody zatěžování snímačů

- a) *Dvojklinová metoda*: příčné složky  $F_x$ ,  $F_y$  jsou úměrné zatížení  $F$  a jsou funkcí úhlu  $\beta$  a azimutu. Momentové zatížení je nulové  $M_x=M_y=M_z=0$ .
- b) *Jednoklinová metoda*: příčné složky  $F_x$ ,  $F_y$  a vazbové momenty  $M_x$ ,  $M_y$  jsou úměrné síle  $F_z$  a jsou funkcí úhlu  $\beta$  a poloměru zatěžovacího čepu.  $M_z=0$ .
- c) *Vícesložková metoda*: využívá buď nezávislé, nebo současné působení tří složek sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a tří složek momentů  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  na zatěžovaný snímač.
- d) *Metoda příčného zatížení*: síly a momenty  $F_x$ ,  $M_y$  a  $F_y$ ,  $M_x$  působí současně a  $F_y=M_z=0$ .
- e) *Vícepolohová metoda*: zatěžující momenty  $M_x$ ,  $M_y$  jsou úměrné síle  $F_z$ . Síly a moment  $F_x=F_y=M_z=0$ .
- f) *Metoda konstantního momentu*: zatěžující momenty  $M_x$ ,  $M_z$  působí nezávisle,  $F_x=F_y=F_z=M_z=0$ .

Metodu f) lze použít jen u takových snímačů, jejichž délka umožňuje aplikovat dvě příčné síly. Metody d) a e) poskytují účinky síly axiální a jiných složek sil. Tyto složky však od sebe nelze oddělit.

Pomocí metod a) b) d) a f) se asymetrické účinky zatížení získávají pootočením snímače kolem jeho hlavní osy.

Metoda c) poskytuje zatížení ve všech složkách a jejich 15-ti kombinacích braných po dvojicích, protože tyto mohou působit nezávisle. Tato metoda se zpravidla používá pro vícesložkové snímače a je jediná, z uvedených metod, která umožňuje kompletní analýzu snímače. [1]

### 3.3.1 Chyby konstrukce zatěžovacího zařízení

Při konstrukci zatěžovacího zařízení je třeba dbát abychom se pokud možno vyvarovali následujících chyb

#### Chyby způsobené změnou velikosti sil $F_a$ a $\Delta F_b$

Na obrázku *Obr. 28* udávají síly  $F_a$   $F_b$  součty ideální síly  $F_0$  a chyby  $F_a$ , resp.  $\Delta F_b$ . Sem můžeme zahrnout odchylky hmotnosti závaží, gravitačního zrychlení a nebo chyby způsobené různou délkou ramen pák při váhovém systému zatížení.

Platí vztahy:

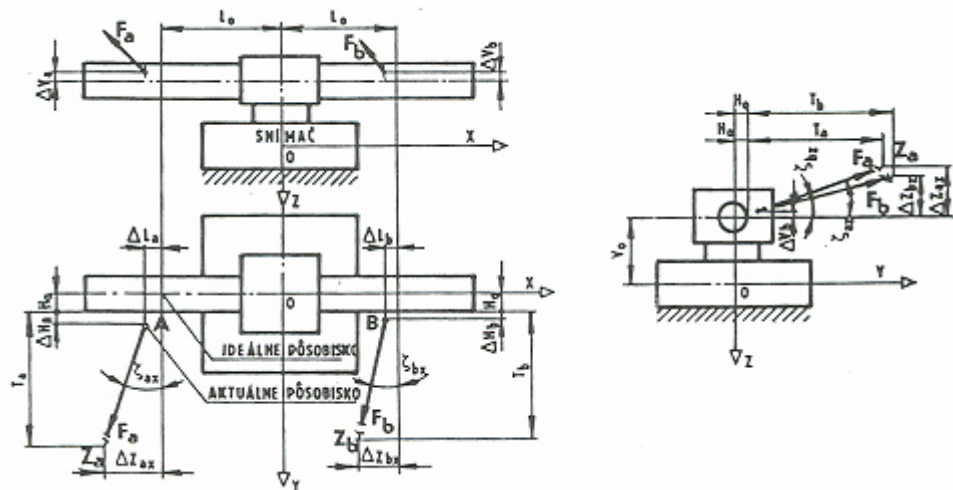
$$F_a = F_0 + \Delta F_a \quad (35)$$

$$F_b = F_0 + \Delta F_b \quad (36)$$

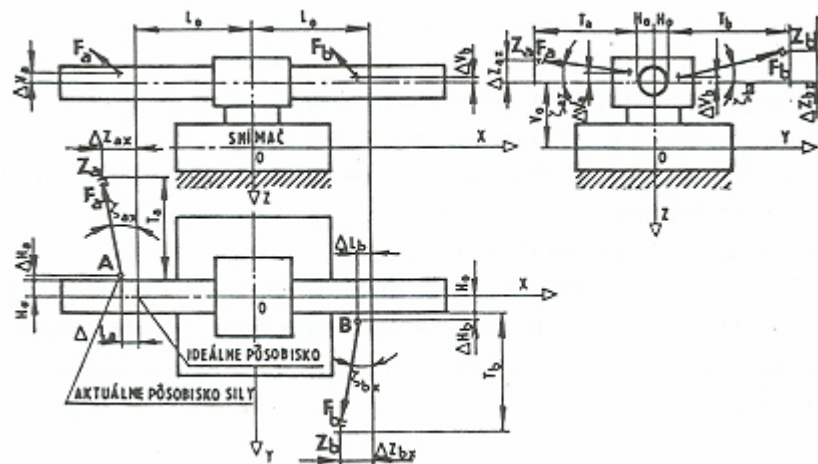
#### Chyby polohy působení sil v bodech A a B

Chyby polohy působení sil v bodech A a B, jako jsou  $\Delta L_a$ ,  $\Delta L_b$ ,  $\Delta H_a$ ,  $\Delta H_b$ ,  $\Delta V_a$ ,  $V_b$ . Jsou způsobené nepřesností při výrobě zatěžovacího zařízení, nebo nepřesného usazení zkoumaného snímače a v případě momentového působení se takto může projevit posunutí kotvy zatěžovacího zařízení vlivem silového působení v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .





Obr. 28: Silové zatížení snímače



Obr. 29: Momentové zatížení snímač

### Chyby polohy bodů Za a Zb

Chyby polohy bodů  $Z_y$  a  $Z_b$  působení sil na zatěžovacím zařízení  $\Delta Z_{ax}$ ,  $\Delta Z_{bx}$ ,  $\Delta Z_{az}$ ,  $\Delta Z_{bz}$ . Tyto chyby, stejně jako chyby v předcházejícím bodě uvažujeme v souřadnicovém systému snímače.

**Chyby polohy snímače**

Sem patří chyby posunutí souřadnicového systému snímače vzhledem k souřadnicovému systému zatěžovacího zařízení, nebo chyby pootočení souřadnicového systému snímače vzhledem k souřadnicovému systému zatěžovacího zařízení.

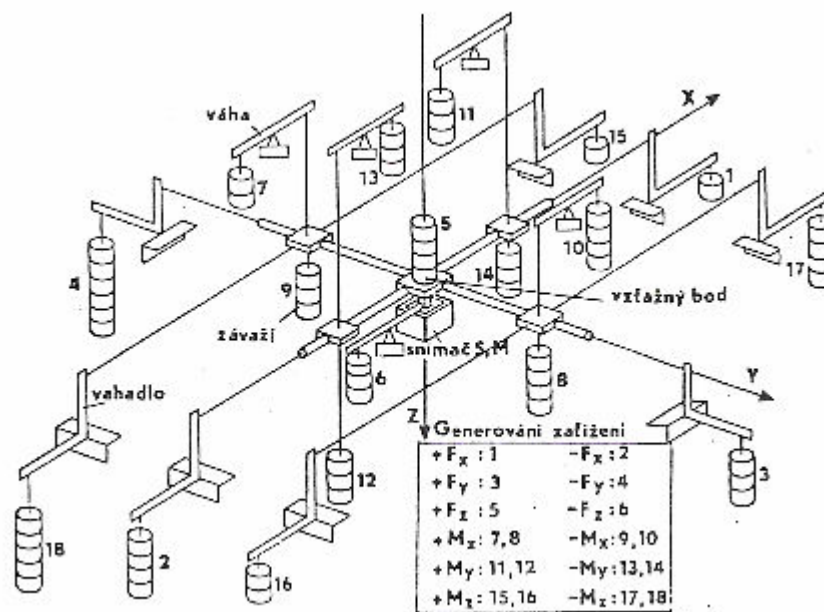
Těmito kritérii je nutno se řídit dále, při návrhu samotného zatěžovacího zařízení.

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

## 4 POPIS PROBLÉMU

Hlavním úkolem této práce je návrh zařízení na kalibraci šesti-složkových silově-momentových snímačů ve všech šesti stupních volnosti. Požadavek na toto zařízení vyplynul z potřeby přesně zjistit odezvu snímače na jednotlivé složky zatížení, nebo jejich kombinace, před použitím snímače v reálné aplikaci.

Jako podklad pro návrh zatěžovacího zařízení bylo použito zařízení založené na principu kladek a přesných závaží. Funkční schéma zatěžovacího zařízení KAM S<sub>j</sub>F je znázorněno na obrázku *Obr. 30* a konstrukčně je popsáno v [11]. Obdobné zařízení vyvinula také například společnost YAMATO SCALE Co. [12], nebo společnosti ONREA a IMGIC [13].



*Obr. 30: Funkční schéma zatěžovacího zařízení KAM S<sub>j</sub>F*

Požadované zařízení musí splňovat několik základních požadavků.

Těmi jsou:

- zatížitelnost snímače silovým působením ve 3 osách x,y,z
- zatížitelnost snímače momentovým působením kolem 3 os x,y,z
- možnost nastavení kombinací působících sil a momentů

- přesnost
- shodný vztažný bod zařízení se vztažným bodem snímače
- opakovatelnost měření
- časová stálost
- korekce vlastní hmotnosti
- geometrická symetričnost
- dostatečná mechanická tuhost
- vyrobiteľnosť

## 5 NÁVRH KALIBRAČNÍHO ZAŘÍZENÍ ŠESTI-SLOŽKOVÉHO SILOVĚ-MOMENTOVÉHO SNÍMAČE

Návrh tohoto zařízení vychází ze základních myšlenek obsažených ve výše uvedených požadavcích. Oproti zařízení KAM SjF popisovaném v [1] není pro vyvolání známých sil použito kalibrovaných závaží, ale působící síly jsou vyvolávány působením tlačných tyčí vysouvaných z opěrné konstrukce proti dosedacím plochám kotvy zatěžovacího zařízení. Tyto síly jsou kontinuálně měřeny jednoosými tenzometrickými siloměry umístěnými na konci každé výsuvné tyče a jsou opatřeny tlačnými palci. Dosud známá konstrukční řešení neumožňují dynamická měření pro více složek současně. Konstrukce tohoto zařízení je volena tak, aby ve spojení s pneumatickým, hydraulickým, nebo elektrickým pohonem dynamické měření umožňovala.

Tvar kotvy tohoto zařízení je navržen pro takový tvar šesti-složkového silově-momentového snímače, jehož rozměr nepřesáhne 100 x 100 x 100 mm a jehož vztažný bod leží ve středu jeho horní strany.

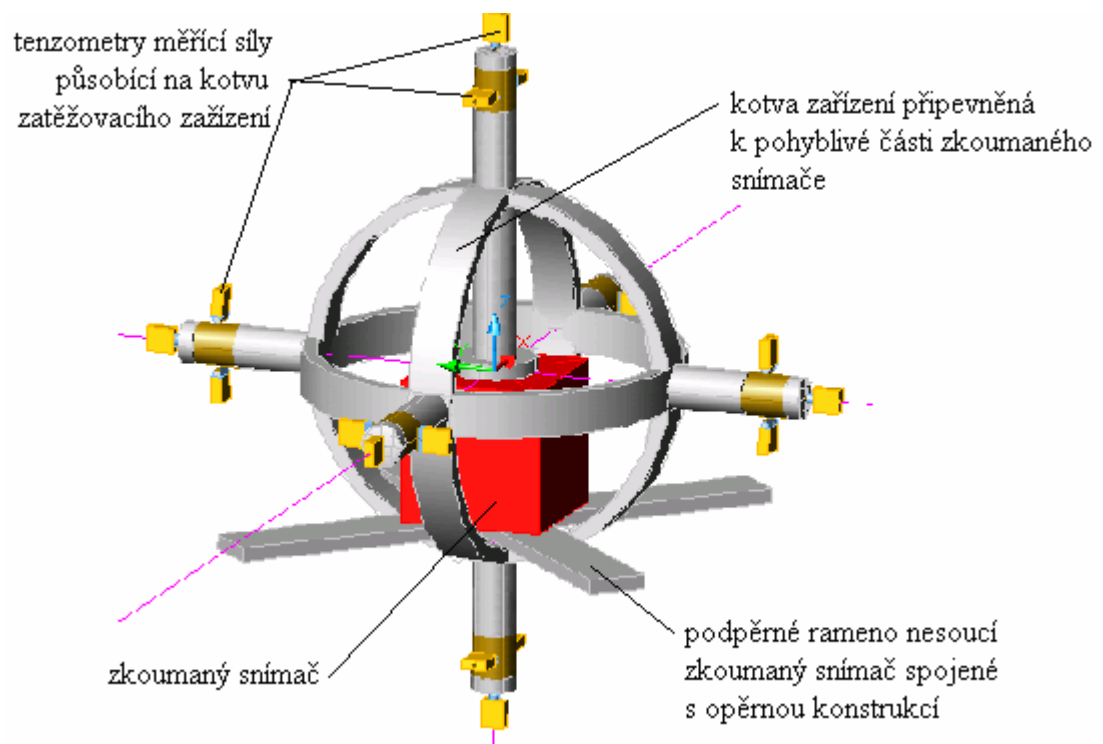
Vzhledem k náročnosti požadavků kladených na toto měřicí a kalibrační zařízení jsou zde představeny dvě konstrukční řešení, přičemž každé z nich má své výhody i nevýhody.

### 5.1 První varianta návrhu – komplexní řešení

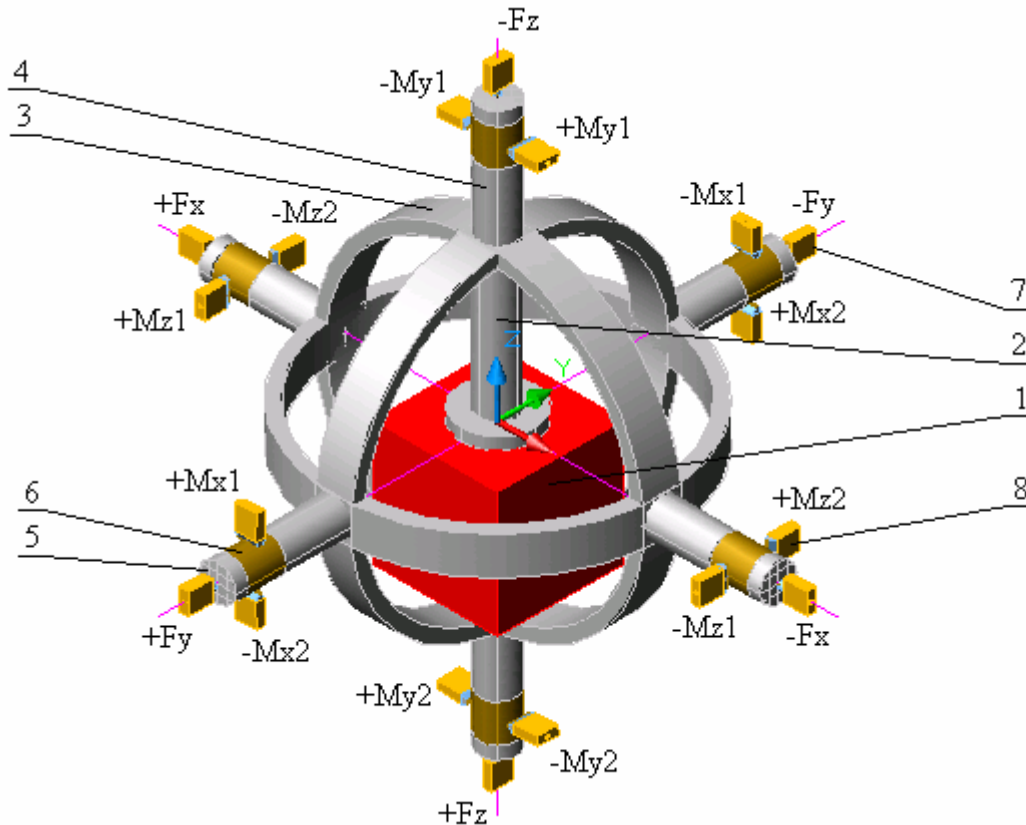
#### 5.1.1 Prvotní idea

Jde o zařízení, které umožňuje silově-momentové zatěžování snímače ve všech šesti stupních volnosti. Jediným omezením zde je velikost snímače, který se musí vejít do středové klece kotvy zařízení. Prvotní myšlenka tohoto zařízení vychází z toho, že snímač je umístěn ve středové kleci kotvy zařízení (*Obr. 31*). Spodní strana snímače je pevně spojena s opěrnou konstrukcí a pohyblivá část je osazena kotvou ve tvaru dle *Obr. 32*. Na tuto kotvu působí 18 sil, z nichž u každé je měřena její velikost pomocí jednoosého tenzometrického snímače síly. Kde velikost každé jednotlivé působící síly je možno nastavovat manuálně pomocí jemného závitu a matice, nebo automaticky pomocí řízeného pohonu (hydraulicky, pneumaticky, elektricky) zajišťujícího vysouvání tlačné tyče.

Z těchto sil jich šest působí ve směrech os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a zbývajících dvanáct utváří silové dvojice nutné pro zajištění rotací kolem těchto os protínajících se ve vztažném bodě snímače.



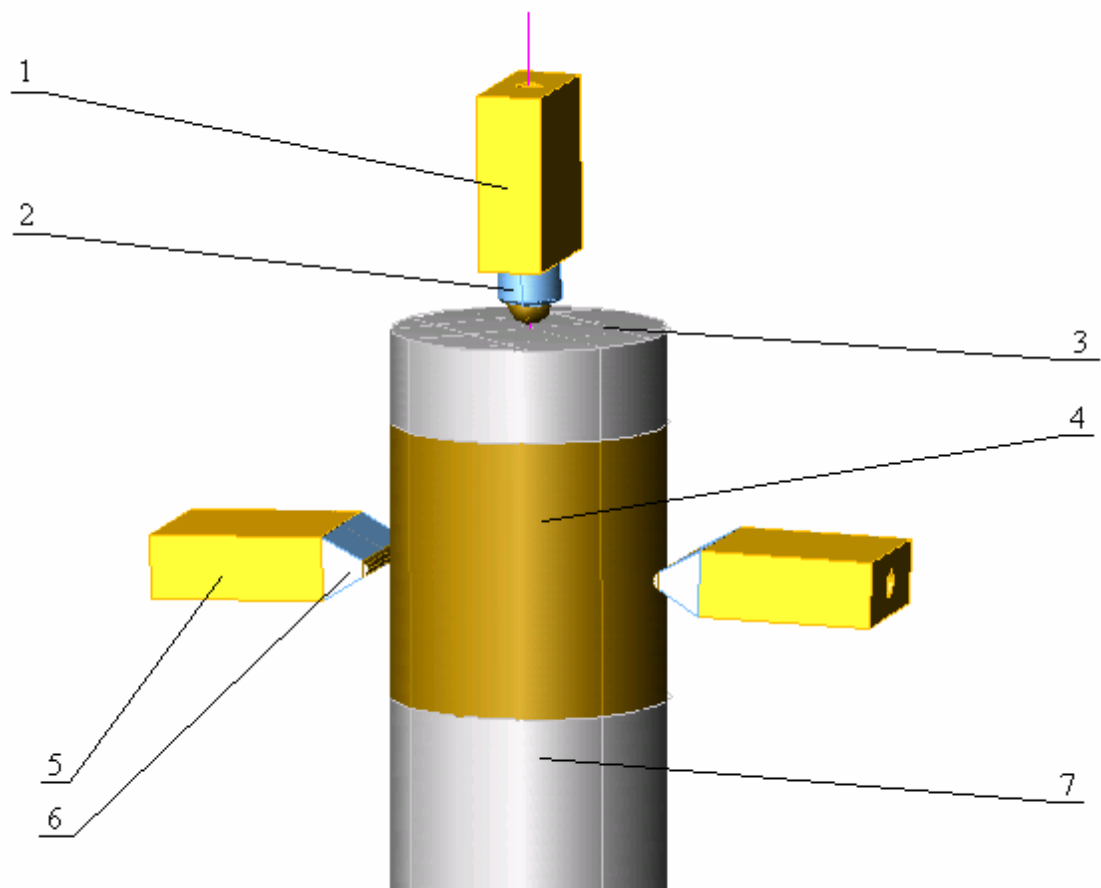
Obr. 31: Prvotní idea návrhu



Obr. 32: Popis kotvy zatěžovacího zařízení

- Kde:
- 1 – Zkoumaný snímač se vztažným bodem ve středu horní strany
  - 2 – Rameno uchycující pohyblivou část snímače ke kotvě
  - 3 – Rám kotvy
  - 4 – Rameno kotvy
  - 5 – Dosedací plocha tvaru kulového vrchlíku pro silové působení v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$
  - 6 – Dosedací plocha pro působení momentu síly s osou rotace  $x$ ,  $y$ ,  $z$
  - 7 – Jednoosý tenzometrický siloměr s tlačným palcem upraveným pro měření působící síly ve směru os  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
  - 8 – Jednoosý tenzometrický siloměr s tlačným palcem upraveným pro měření působících sil tvořících silovou dvojici k vyvolání požadovaného momentu síly s osou rotace  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

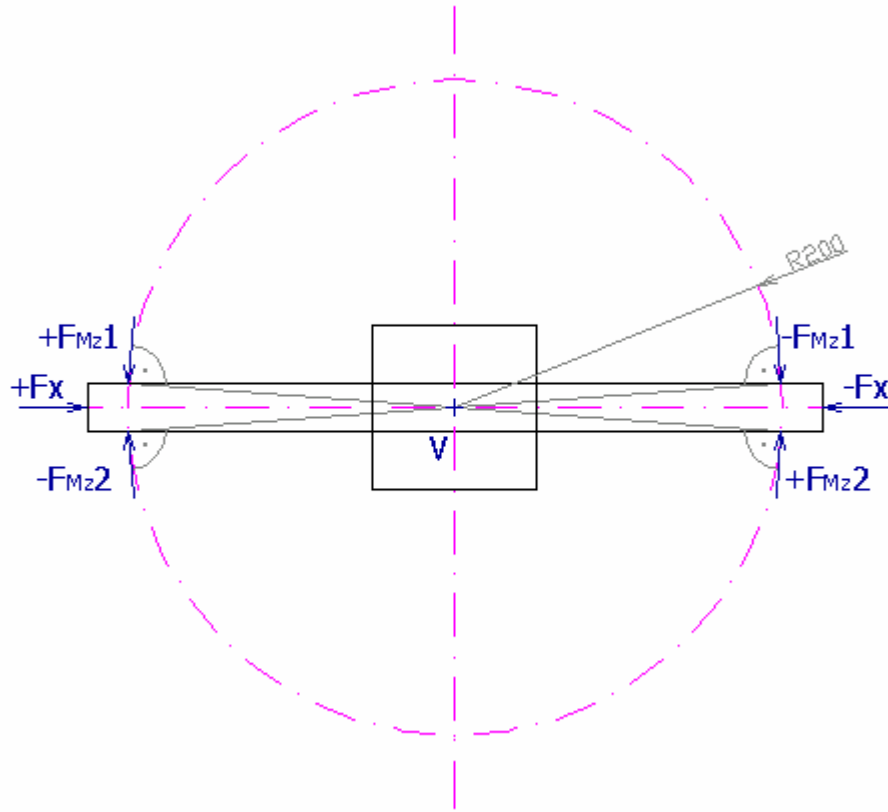




*Obr. 33: Detail umístění siloměrů na rameni kotvy*

- Kde:
- 1 – Jednoosý tenzometrický siloměr
  - 2 – Palec pro silové působení v osách  $x, y, z$ .
  - 3 – Dosedací plocha palce pro působení v osách  $x, y, z$ .
  - 4 – Jehlové valivé ložisko tvořící dosedací plochu palců vyvolávajících moment síly s osou rotace  $x, y, z$ .
  - 5 - Jednoosý tenzometrický siloměr
  - 6 – Palec pro momentové působení s osou rotace  $x, y, z$ .
  - 7 – Rameno kotvy

Rozbor sil působících na dvě protilehlá ramena klece je na *Obr. 34*. Z něj je patrné, že síly vytvářející silové dvojice nejsou kolmé k ose  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , ale jsou kolmé ke spojnici jejich dvou působišť.



*Obr. 34: Síly působící na dvě protilehlá ramena klece*

Výsledné kroutící momenty  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  jsou potom dány vztahem:

$$M_x = 2 \cdot |F_{Mx}| \cdot r \quad (37)$$

$$M_y = 2 \cdot |F_{My}| \cdot r \quad (38)$$

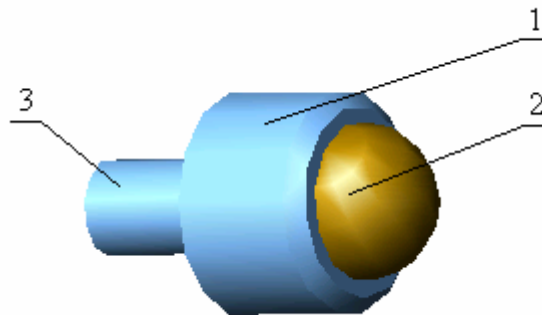
$$M_z = 2 \cdot |F_{Mz}| \cdot r \quad (39)$$

### 5.1.2 Konstrukční detaily

*Tvar dosedacích ploch palců působících v osách  $x, y, z$  vychází z nutnosti umožnit pootočení kotvy při současném konstantním silovém působení v daném směru. Z tohoto důvodu byl zvolen tvar části kulového vrchlíku se středem ve vztázném bodě snímače. V případě první varianty byl zvolen rádius  $r = 225$  mm.*

*Tvar dosedacích ploch palců přenášejících síly vyvolávající rotaci kolem vztázného bodu byl zvolen tak, aby při působení momentové dvojice sil bylo umožněno i silové působení ve směru os  $x, y, z$  a současně aby bylo minimalizováno tření vyvolané dalším silovým působením na klec zatěžovacího zařízení. Z tohoto důvodu jsou dosedací plochy tvořeny valivými jehlovými ložisky s válcovým vnějším kroužkem. Poloměr momentového působení je v případě této varianty  $r = 200$  mm.*

*Tvar palců pro přenos síly působící ve směru os  $x, y, z$  vychází z požadavku působení síly v jediném bodě a s minimálním třením v případě dalšího silového působení na kotvu zatěžovacího zařízení. Toho bylo dosaženo použitím palců opatřených jednokuličkovým axiálním valivým ložiskem s kuličkou zajištěnou proti uvolnění (Obr. 35).*



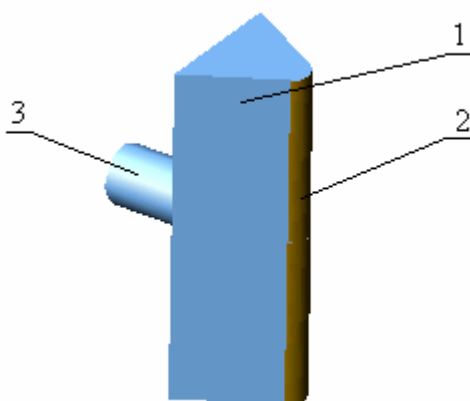
Obr. 35: Palec přenášející síly působící v osách  $x, y, z$ .

Kde: 1 – Tělo palce

2 – Rolovací kulička

3 - Závít

Palce pro přenos sil vyvolávajících momentové působení na zkoumaný snímač jsou navrženy tak, aby zajistily konstantní silové působení i při vychýlení ramene kotvy ve směru kolmém na směr působení a současně, aby bylo minimalizováno tření vznikající posunutím kotvy. Z těchto důvodů má palec tvar trojbokého hranolu opatřeného na dotykové hraně rotačně uloženou jehlou (Obr. 36).



Obr. 36: Palec přenášející síly vyvolávající momentové působení

Kde: 1 – Tělo palce

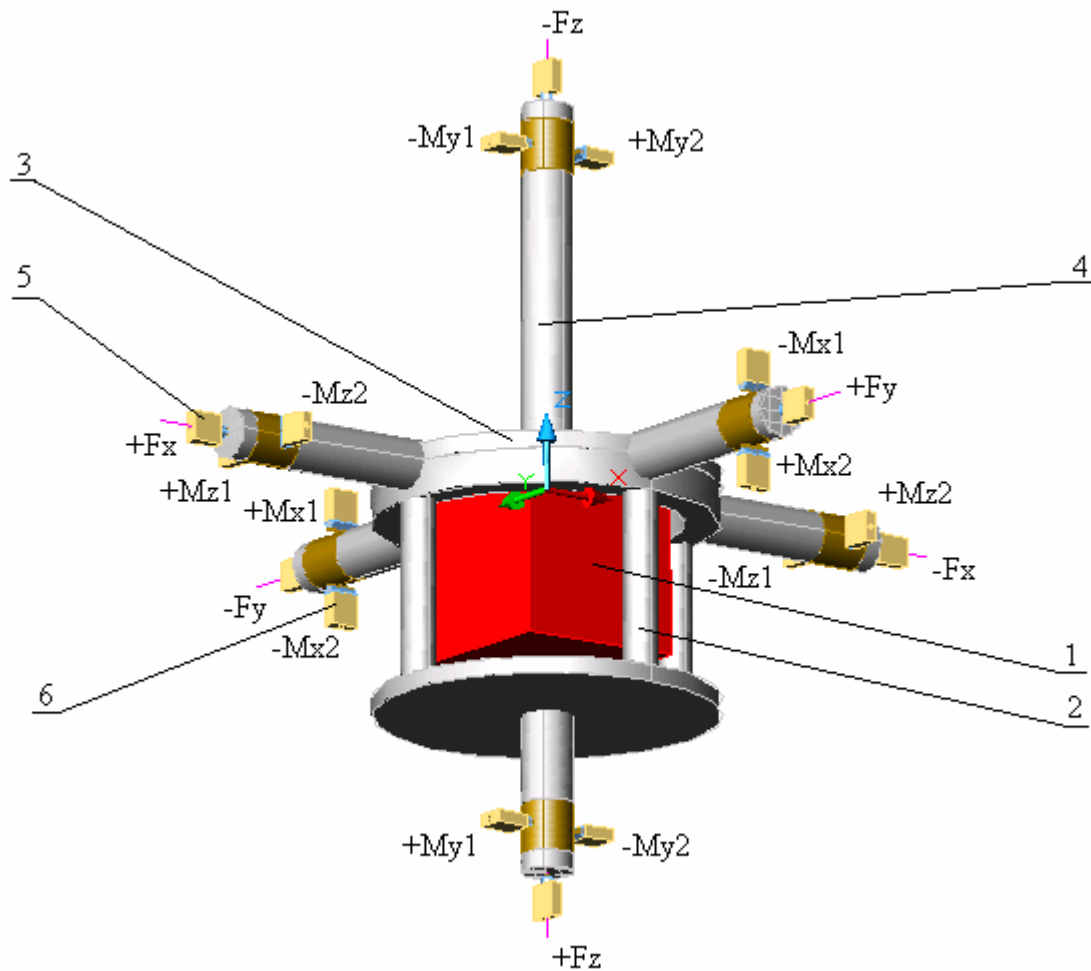
2 – Rotačně uložená jehla

3 – Závit

### 5.1.3 Realizovatelné provedení

Protože kotva navržená na základě prvotní myšlenky je velmi náročná na výrobu, je zde prezentována i jedna z dalších možností jejího tvaru. Nově navržená kotva má proti předchozí odlišný tvar klece, který umožňuje rozdělit klec na dvě samostatné části a vložit, nebo vyjmout zkoumaný snímač. Toto kritérium nebylo při prvotním ideovém návrhu zohledněno. Prvotní návrh je však přehlednější pro demonstraci principu, proto je v této práci ponechán. Ostatní konstrukční detaily a základní rozměry jsou stejné jako u prvního ideového návrhu. Obrázek

Obr. 37 znázorňuje kotvu kalibračního zařízení osazenou šesti-složkovým silově-momentovým snímačem znázorněným červeně. Spodní část tohoto snímače bude pevně spojena se statickou konstrukcí zařízení.



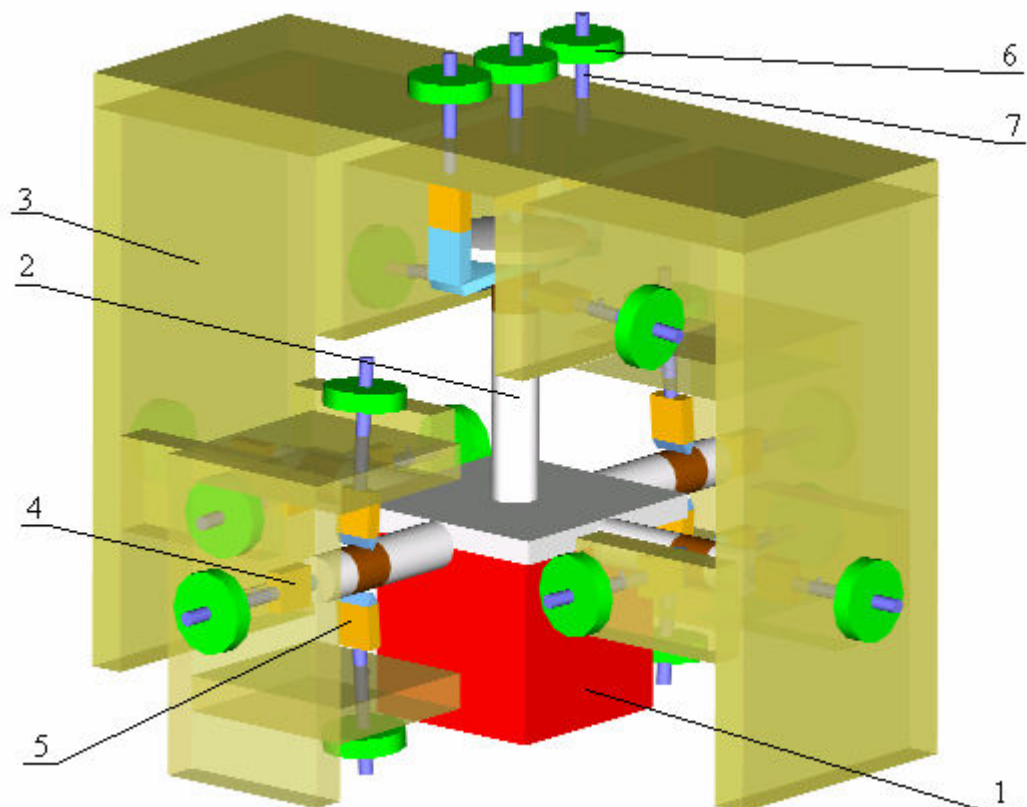
Obr. 37: Návrh reálného tvaru kotvy pro první variantu

- Kde:
- 1 – Zkoumaný snímač se vztažným bodem ve středu horní strany.
  - 2 – Pevná část klece kotvy.
  - 3 – Odnímatelná část klece kotvy spojená se zkoumaným snímačem.
  - 4 – Rameno klece s dotekovými plochami.
  - 5 – Jednoosý tenzometrický siloměr s tlačným palcem upraveným pro měření působící síly ve směru os  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
  - 6 – Jednoosý tenzometrický siloměr s tlačným palcem upraveným pro měření

působících sil tvořících silovou dvojici k vyvolání požadovaného momentu síly  
s osou rotace  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

## 5.2 Druhá varianta návrhu – zjednodušené řešení

Jedná se o zjednodušení první varianty. Spočívá v tom, že je vynechána spodní část zařízení. Z toho plyne omezení, že na zatěžovaný snímač nejsme schopni působit dvojicí momentových sil s osou rotace  $x$  (Obr. 39). Toto omezení je možno v případě potřeby kompenzovat pootočením zkoumaného snímače o  $\pi/2$ , popřípadě potočením působících dvojic jednoosých siloměrů na ose  $y$  o  $\pi/2$ . Sada snímačů vyvolávajících momentové působení kolem osy  $x$  však zůstala zachována pro případ potřeby orientačního měření. Tato varianta však vychází rozměrově menší a je celkově jednodušší. Celkový zjednodušený pohled na zatěžovací zařízení je na Obr. 38. Zde je pro přehlednost statická konstrukce znázorněna poloprůhledně. Tvar kotvy je patrný na Obr. 39.

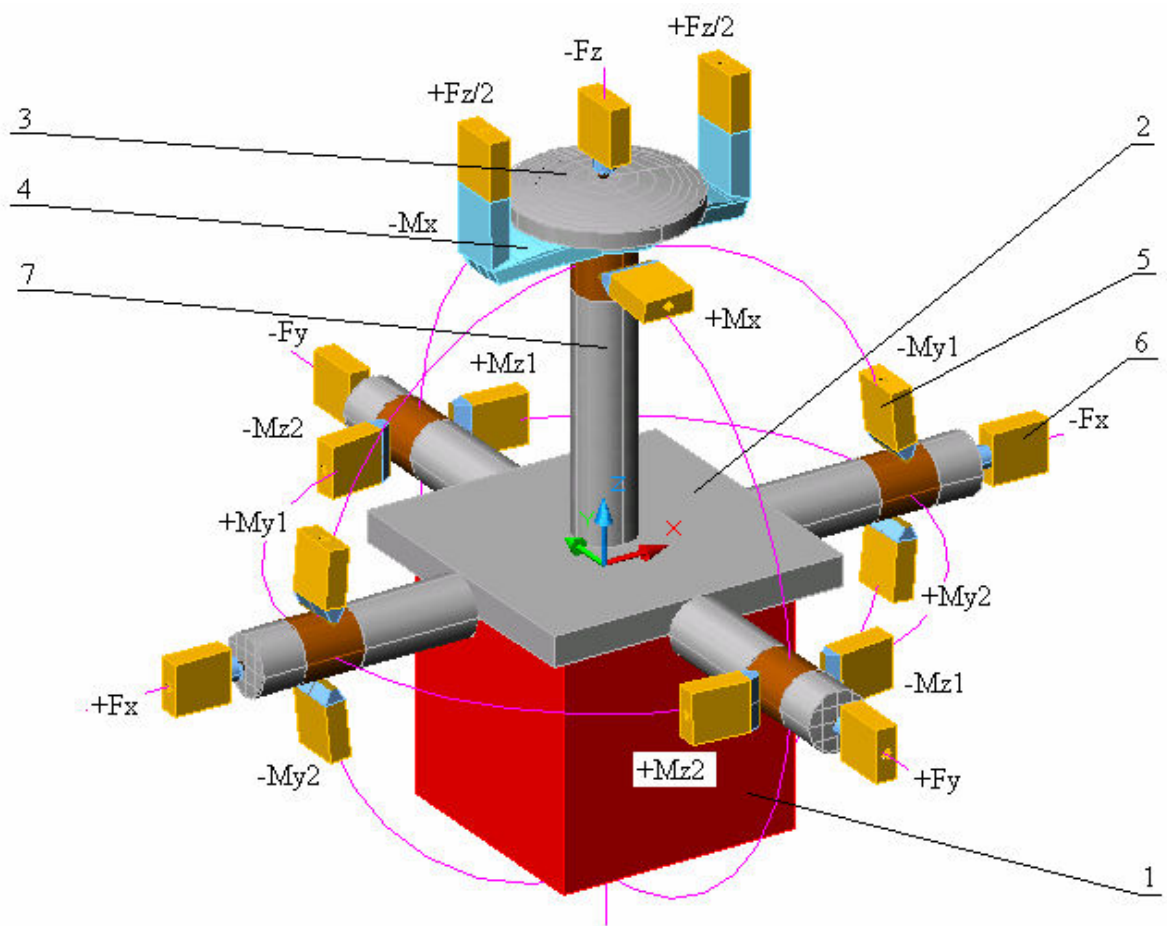


Obr. 38: Celkový zjednodušený pohled na zatěžovací zařízení

Kde:

- 1 - Obecný 6DOF snímač se vztažným bodem ve středu horní strany.
- 2 – Kotva zjednodušeného zatěžovacího zařízení.

- 3 – Statická opěrná konstrukce.
- 4 – Jednoosý tenzometrický siloměr s tlačným palcem upraveným pro měření působící síly ve směru posunutí  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
- 5 – Jednoosý tenzometrický siloměr s tlačným palcem upraveným pro měření působících sil tvořících silovou dvojici k vyvolání požadovaného momentu síly s osou rotace  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
- 6 – Pohon vysouvání, popř. matice
- 7 – Tlačná hřídel



Obr. 39: Pohled na kotvu zařízení osazenou jednoosými siloměry

Kde: 1 – Obecný 6DOF snímač se vztažným bodem ve středu horní strany.

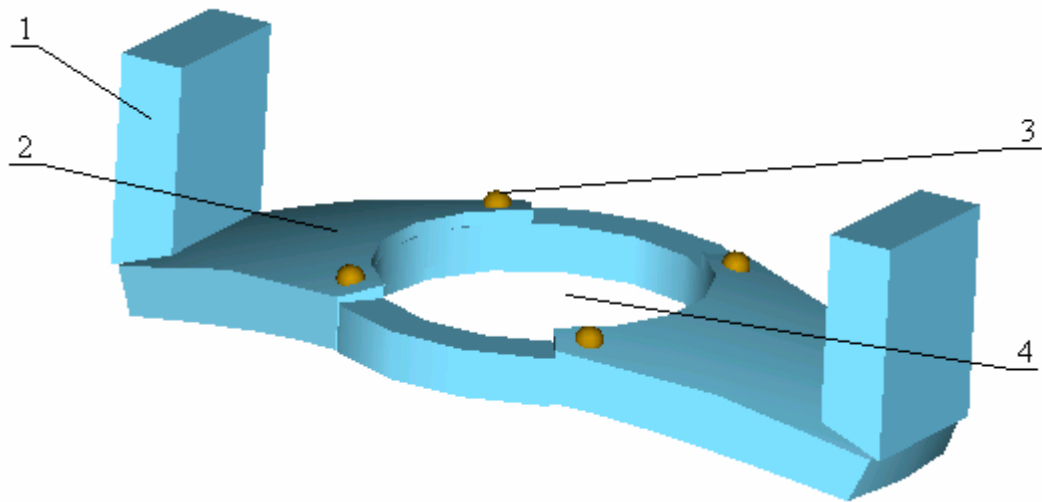


- 2 – Deska pro spojení pohyblivé části snímače a kotvy.
- 3 – Vrcholová hlavice z osy.
- 4 – Nosník podepírající kotvu v ose  $z$ .
- 5 – Jednoosý tenzometrický siloměr s tlačným palcem upraveným pro měření působící síly ve směru posunutí  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
- 6 – Jednoosý tenzometrický siloměr s tlačným palcem upraveným pro měření působících sil tvořících silovou dvojici k vyvolání požadovaného moment síly s osou rotace  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
- 7 – Rameno kotvy

### 5.2.1 Silové působení $F_x$ , $F_y$ , $F_z$

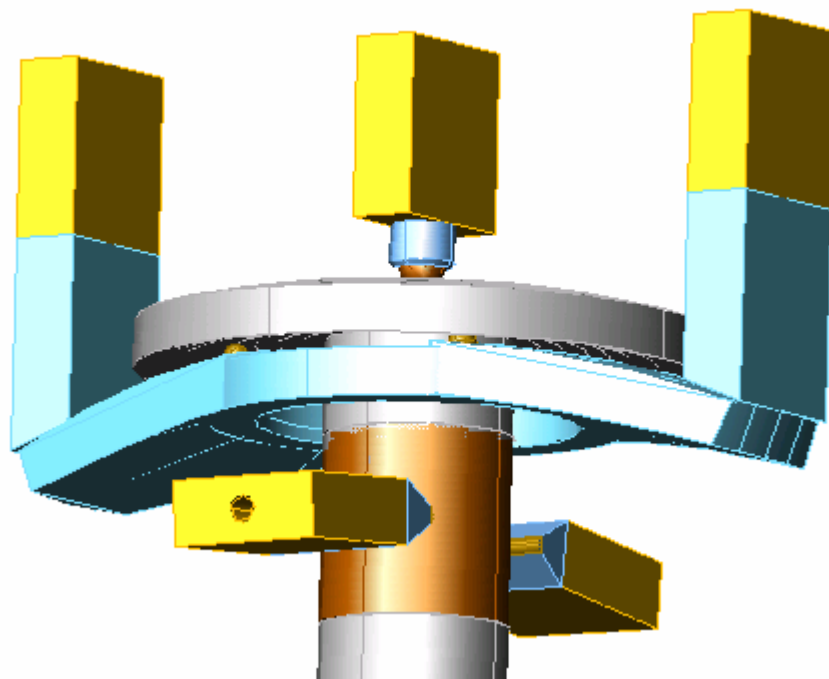
K vyvolání těchto sil je použito celkem sedmi jednoosých siloměrů. V případě působení ve směrech os  $x$  a  $y$  jsou dvojice protilehlých siloměrů umístěny tak, aby svým rolovacím dotekem ležely vždy v ose požadovaného působení. Dosedací ploška kotvy má v tomto případě tvar části kulové plochy o poloměru  $R=120\text{mm}$  se středem ve vztažném bodě snímače. Tím je v případě pootočení kotvy zajištěno konstantní působení dané složky síly na zkoumaný snímač v požadovaném směru.

Silové působení ve směru osy  $z$  je zajištěno celkem trojicí siloměrů. Jeden z nich působí přesně v ose  $z$  směrem dolů a zbylé dva pomocí spojovacího nosníku se středovým otvorem (*Obr. 40*) podepírají celou kotvu a tím eliminují působení gravitační síly  $F_g$ . Vnitřní i vnější plocha vrcholové hlavice v ose  $z$  má tvar části kulové plochy se středem ve vztažném bodě zkoumaného snímače.



Obr. 40: Nosník podepírající vrcholovou hlavici v ose z

- Kde: 1 – Distanční mezikus pod jednoosý tenzometrický siloměr.  
2 – Vyklenuté tělo nosníku kopírující vnitřní plochu vrcholové hlavice.  
3 – Rolovací kulička.  
4 – Otvor pro rameno kotvy v ose z.



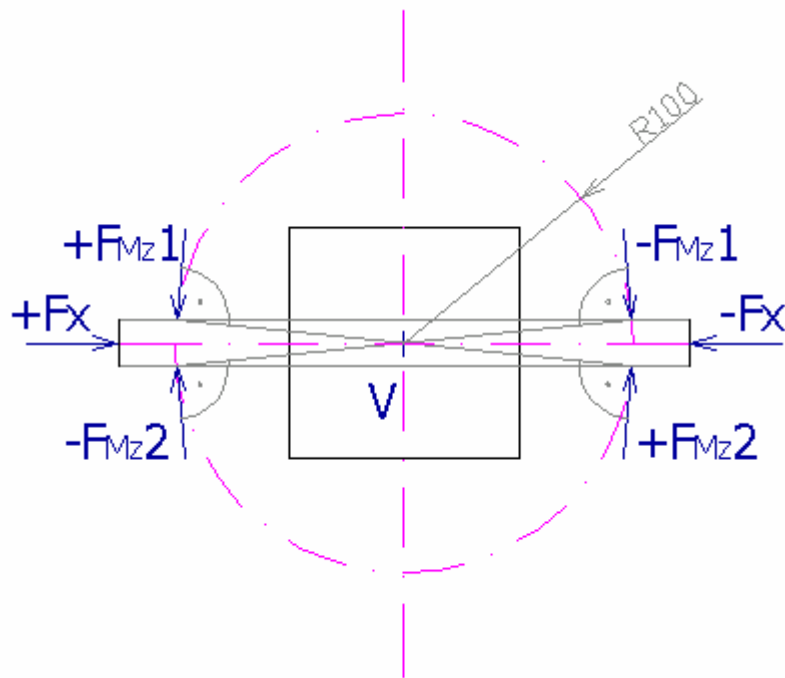
Obr. 41: Detail vrcholové hlavice uložené na nosníku

Aby byl vliv třecích sil vznikajících v místě kontaktu siloměrného doteku a kotvy zařízení co nejmenší, jsou stejně jako v případě první varianty, siloměrné doteky působící v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$  opatřeny rolovací kuličkou (*Obr. 35*).

Obdobným způsobem je minimalizováno tření mezi nosníkem  $Fz$  a spodní stranou vrcholové hlavice. Zde je hlavice uložena na čtveřici rolovacích kuliček, jejichž lůžka jsou přímo součástí nosníku (*Obr. 40, Obr. 41*).

### 5.2.2 Působení $M_x$ , $M_y$ , $M_z$

Pro vyvolání přesně definovaného momentu síly je zapotřebí vždy dvojice sil působících kolmo na protilehlé konce dvojzvrtné páky se středem rotace ve vztažném bodě zkoumaného snímače kolem požadované osy rotace. Tato páka je pro každý silový moment pomyslně vytvořena v těle kotvy zařízení (*Obr. 42*). Vzhledem k omezení plynoucímu z této zjednodušené konstrukce však toto nemůžeme říci o silách vyvolávajících rotaci kolem osy  $x$ . V tomto případě není možno oproti variantě 1 zajistit protilehlé síly k silám působícím na rameno osy  $z$  kotvy. Zde vzniká jisté omezení, které však lze překonat pootočením zkoumaného snímače o  $\pi/2$ , popřípadě potočením působících dvojic jednoosých siloměrů na ose  $y$  o  $\pi/2$ . To vše je kompenzováno jednodušší konstrukcí.



Obr. 42: Síly působící na dvě protilehlá ramena kotvy

Výsledné kroutící momenty  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  jsou potom dány vztahem:

$$M_x = 2 \cdot |F_{Mx}| \cdot r \quad (40)$$

$$M_y = 2 \cdot |F_{My}| \cdot r \quad (41)$$

$$M_z = 2 \cdot |F_{Mz}| \cdot r \quad (42)$$

Stejně jako u první varianty je i v tomto případě minimalizováno tření vznikajících na styčných plochách mezi siloměrnými palci a dosedací plochou kotvy. Toho je opět dosaženo použitím jehličkového valivého ložiska na ramenech kotvy a použitím rotačně uložené jehly vsazené do palce siloměru.

## 6 VLASTNOSTI NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ

Obě navržené varianty umožňují zatížit snímač kombinacemi sil a momentů tak, abychom byli schopni ze získaných údajů sestavit kalibrační matici a určit velikosti chyb snímače. V porovnání s kalibračním zařízením KAM SjF umožňuje zde navrhované zařízení zatěžovat snímač i dynamicky a provádět tak měření časových odezev snímače, dynamického zkreslení mezi jednotlivými složkami (například zázněje), nebo měření nízkokmitočtových frekvenčních charakteristik. K tomuto je zapotřebí, aby zařízení bylo osazeno řízenými pohony. A to hydraulickými, magnetickými, nebo pneumatickými, ale nejlépe elektrickými servomotory, s napojením na PC, kde bude možno programovat i sledovat pro více složek současně jak průběhy zatěžovacích sil, tak i průběhy odezev ze snímače.

Přesnost tohoto zařízení je dána přesností použitých jednoosých tenzometrických siloměrů a jejich vyhodnocovacích jednotek. Přesnost je největší při zatěžování snímače vždy jen jednou složkou zatížení. V tomto případě se neprojeví chyba polohy snímače. V případě kombinace zatěžovacích složek je třeba znát velikost vychýlení kotvy zařízení z klidové polohy vlivem elastických deformací deformačního členu zkoumaného snímače, aby bylo možno tuto chybu eliminovat přepočtem.

Dalším činitelem který má vliv na přesnost jsou ztráty způsobené třením na styčných plochách siloměrných palců a dosedacích ploch. Z těchto důvodů je třeba dbát na vhodnou volbu jednoosých tenzometrických siloměrů a na precizním dílenském zpracování celého zařízení.

Jak již bylo zmíněno je u druhé navrhované konstrukční varianty omezení nastavení působících sil. Toto omezení je ve smyslu nedokonalého momentového působení ve smyslu rotace kolem osy  $x$ . Toto omezení však lze kompenzovat vhodným postupem při zatěžování zkoumaného snímače. Abychom tento nedostatek zcela odstranili, je nutno pootočit před požadovaným zatížením zkoumaný snímač o  $\pi/2$  okolo osy  $z$ , popřípadě potočením působících dvojic jednoosých siloměrů na ose  $y$  o  $\pi/2$ .

## 6.1 Navrhovaný pracovní postup

I přes to, že zařízení ještě fyzicky neexistuje, je již nyní možno navrhnout základní pracovní postup pro práci na tomto zařízení.

- 1) Upnout zkoumaný snímač do kotvy zatěžovacího zařízení
- 2) Vložit kotvu do opěrné konstrukce zařízení
- 3) Vymezit vůle mezi dosedacími plochami a palci siloměru
- 4) Zatížit snímač nejprve silově ve směru os  $x$ ,  $y$ ,  $z$
- 5) Zatížit snímač kroutícím momentem s osou rotace  $x$ ,  $y$ ,  $z$
- 6) Odečíst hodnoty z jednoosých tenzometrických snímačů
- 7) Odečíst hodnoty vykázané zkoumaným snímačem
- 8) Uvolnit momentové zatížení zkoumaného snímače
- 9) Uvolnit silové zatížení zkoumaného snímače
- 10) Vyjmout kotvu ze zatěžovacího zařízení
- 11) Uvolnit snímač z kotvy zatěžovacího zařízení

Jak je uvedeno v pracovním postupu, je nutno dbát na to, aby na kotvu zatěžovacího zařízení působily nejprve síly ve směrech os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a až poté silové dvojice vytvářející momentové zatížení snímače. Je to z toho důvodu, aby nedošlo k poškození zařízení.

Vlivem pružnosti elastického deformačního prvku uvnitř zkoumaného snímače dochází vlivem působení zatěžovacích sil k malým posunutím, nebo pootočením celé kotvy zatěžovacího zařízení. Pokud bychom tedy kotvu například zatížili nejprve dvojicí sil vytvářejících rotaci v kladném smyslu kolem osy  $z$  (*Obr. 32*) a teprve potom začali působit silou v kladném smyslu osy  $x$ , došlo by vlivem posunutí celé kotvy ke kolizi mezi zatěžovacím siloměrem  $+Mz2$  a dosedací plochou kotvy. To platí i pro dynamické paralelní zatěžování ve více složkách.

Jedná se o předběžný návrh zařízení a o předběžný návrh měřicího postupu. Je zřejmé, že vzhledem ke složitosti kalibračního zařízení obojí dozná v průběhu realizace mnohých změn.

## ZÁVĚR

Cílem této práce je návrh kalibračního zařízení určeného pro šesti-složkové silově-momentové snímače. Jsou zde uvedeny dva konstrukční návrhy na kalibrační zařízení. Oba návrhy vycházejí z myšlenky využití jednoosých tenzometrických siloměrů při přesném měření jednotlivých složek sil a momentů zatěžujících staticky anebo dynamicky zkoumaný snímač. V obou případech je zatěžovací síla vyvíjena pomocí tlačných tyčí vysouvaných z opěrné konstrukce zařízení proti opěrným bodům jeho kotvy kalibračního zařízení. Oba návrhy umožňují osadit zařízení řízenými pohony pneumatickými, hydraulickými, magnetickými, nebo elektrickými pro ovládání vysouvání tlačných tyčí a tím splňují předpoklady pro zjišťování dynamických charakteristik zkoumaných snímačů pro více složek současně.

Tvar kotvy jednotlivých konstrukčních variant kalibračního zařízení a rozmístění jednoosých tenzometrických siloměrů vycházel ze snahy minimalizovat počet sil působících na kotvu zařízení při dosažení požadovaného efektu.

Jednotlivé konstrukční varianty se od sebe liší nejen velikostí, ale především strukturou zatěžovacích možností. První varianta návrhu umožňuje zatěžování snímače všemi šesti silově-momentovými složkami. Její celkové rozměry jsou však větší. Druhá varianta klade důraz na snížení rozměrů a kompaktnost kalibračního zařízení. To však s sebou nese omezení v méně dokonalém zatížení zkoumaného snímače krouticím momentem s osou rotace  $x$  při zatěžovacím momentu  $M_x$ . Toto omezení je nutno kompenzovat pootočením zkoumaného snímače o  $\pi/2$  okolo osy  $z$ , popřípadě potočením působících dvojic jednoosých siloměrů na ose  $y$  o  $\pi/2$ .

V příslušných kapitolách této práce jsou řešeny jednotlivé konstrukční detaily návrhů, počínaje tvarem kotvy zařízení, přes detaily jednotlivých konstrukčních součástí mezi pohony, tenzometry a kotvou, až po tvar a řešení dosedacích ploch kotvy.

## CONCLUSION

The aim of Diploma Thesis is the design of the calibration equipment for the six-component force-torque sensors. There are introduced two variants of the calibration equipments using the one-axis resistance strain gauges for the measurements of the force-torque components at the static or dynamic loading. The loading force is acting by the use of the pressing rods moved from the mechatronics, hydraulic or pneumatic actuators against the basic points of the squirrel cage of the calibration equipment in order to enable the measurement not only the static, but as well the dynamic characteristics of this sensor for more components simultaneously.

The shape of the squirrel cage of both calibration equipments and the placement of one-axis resistance strain gauges is proposed in order to minimize the number of the acting forces.

The difference between both designs is not only in the size, namely in the structure of the loading possibilities. The first variant of the design enables the loading of the sensor in all six degrees of freedom, but the size is bigger. The second variant of the design is smaller and compact, but this simplification causes restriction in the loading torque  $M_z$  in the rotation axis  $x$  or  $y$ . This restriction is possible to avoid by the angular displacement of the sensor by the angle  $\pi/2$  around the axis  $z$  or contrary by the angular displacement of acting pairs of one-axis strain gauges dynamometers by the angle  $\pi/2$  around the axis  $y$ .

In this Diploma Thesis is solved the design of the squirrel cage, all details of mechanical parts between actuators, strain gauges and the squirrel cage and the seating face of the squirrel cage.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] SÁSIK, J.: Viaczložkové snímače síl a momentov, meranie, testovanie, kalibrácia, Bratislava: Technická Univerzita v Bratislave, 2000. ISBN 80-227-1438-0
- [2] Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements, ISO, Ženeva, 1993
- [3] SEDLÁČEK, M.: Metrologie: <http://www.cszt.cz/den%20metrologie/Sedlacek.htm>, 12.4.2007; ČVUT, Fakulta elektrotechnická
- [4] MILÁČEK, S.: Měření a vyhodnocování mechanických veličin; Vydavatelství ČVUT; Praha 2001
- [5] GAB-SOON, K.: Development of a 6-axis robot's finger force/moment sensor for stable grasping of an unknown object, In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing ročník 5, číslo 3, 2004.
- [6] NISHIWAKI, K. – KUNYOSHI, Y. – MURAKAMI, Y. – INABA, M. – KAGAMI, S. – INOUE H.: A Six-axis Force Sensor with Parallel Support MechanisM to Measure the Ground Reaction Force of Humanoid Robot, In: International Conference of Robotics & Automation; Washington DC; May 2002
- [7] TAKAHASHI, N. – TADA, M. – UEDA, J – MATSUMOTO, Y. – OGASAWARA, T.: An Optical 6-axis Force Sensor for Brain Function Analysis using Fmri In: IEEE 2003 0-7803-8133-5/03/\$17.00
- [8] KVASNICA, M.: Silově – momentová interakce na rozhraní člověk - stroj; ACTA konference, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
- [9] SÁSIK, J. – PODĚBRADSKÝ, J.: Analýza systematických chýb kalibračních zariadení viaczložkových snímačov. In: Zborník vedeckých prác 22, Bratislava, SjF STU, 1994
- [10] ŠUTEK, L. – VARGA, M.: Experimentálne metódy identifikácie. 1. vyd. Bratislava, VEDA 1981
- [11] SÁSIK, J. : Experimenty kalibrácie a vyhodnotenie meraní pri viaczložkových snímačoch. [Habilitationná práca], Bratislava 1994 STU v Bratislave
- [12] TAKADA, R. – ONO, K. – OGATA, K. – KUSAKI, T.: An analysis of errors on 6-copponent force moment calibration machines. In: IMEKO Houston 1988

- [13] FERRERO, C.: Multicomponent calibration systems to check force sensors. In: ISMCR Houston 1990
- [14] ĎAĎO, S. – KREIDL, K.: Měřicí převodníky fyzikálních veličin; Ediční středisko ČVUT; Praha 1990
- [15] VOJÁČEK, A.: Fóliové tenzometry; [www.automatizace.hw.cz](http://www.automatizace.hw.cz)
- [16] [www.dlr.de](http://www.dlr.de)
- [17] SONKA, M. – HLAVAC, V. – BOYLE, R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision. 2. vyd. PWS Publishing, Pacific Grove, 1999. ISBN 0-534-95393-X
- [18] KVASNICA, M.: Multi Degrees-of-Freedom Modular Sensory Systems for Measurement, Robotics and Human-Machine Interaction. Proceedings of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics – 7<sup>th</sup> International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis SCI'2001-ISAS, July 2001, Orlando, Florida, USA
- [19] PÁLENÍČÁŘ, R. – HALAJ, M.: Calibration of multicomponent-torque sensors. Proceedings of the Eight International Symposium on Measurement and Control in Robotics, Czech Republic, ISMRC, 1998
- [20] PÁZMAN, A.: Základy optimalizácie experimentu. 1. vyd. Bratislava, VEDA, 1980
- [21] [www.amtiweb.com](http://www.amtiweb.com)
- [22] KVASNICA M.: Measurement in Engineering Construction and Control Operations in Space. ASCE Multiconference on Engineering, Construction, Operations, and Business in Space and on Robotics for Challenging Situations and Environment “Space and Robotics 2000” in Albuquerque, New Mexico, February-March 2000, USA.
- [23] KVASNICA M. – VAV DER LOOS M.: Six DOF\_Modular Sensory System with Haptic Interface for Rehabilitation Robotics and Human-Machine Interaction, 4<sup>th</sup> World Automation Congress - WAC'2000 - ISORA'2000, 8<sup>th</sup> International Symposium on Robotics and Applications ISORA, July 2000, Wailea, Maui, Hawaii, USA.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

6DOF	Six Degrees Of Freedom.
AMTI	Advanced Mechanical Technology Inc.
C	Elektrická kapacita.
CCD	Charge – Coupled Device.
CIM	Computer Integrated Manufacturing.
cp	Koeficient tuhosti mechanického členu
DLR	Deutsche Centrum für Luft – und Raumfahrt
E	Modul mechanické pružnosti.
F	Síla.
fMRI	Funkční Elektromagnetická rezonance.
h	Přesnost.
$h^x$	Hrubá chyba.
k	Materiálová konstanta krystalu.
KAM SjF	Katedra Automatizácie a Merania Strojnická Fakulta STU v Bratislave.
l	Délka.
LED	Light Emiting Diode.
M	Moment síly.
NASA	National Aeronautice and Space Administration.
$n^x$	Náhodná chyba.
PC	Personal Computer.
PSD	Positron Sensitive Detector.
r	Poloměr..
S	Plocha průřezu.
$s^x$	Systémová chyba.

---

U	Elektrické napětí.
VÚMA	Výzkumný Ústav Mechanizace a Automatizace.
X	Skutečná hodnota.
$x_i$	Naměřená hodnota.
$\gamma$	Převodová konstanta deformačního členu.
$\varepsilon$	Relativní prodloužení, nebo zkrácení.
$\mu\text{m/mm}$	Mechanické napětí snímače.
$\rho$	Měrný elektrický odpor vodiče.
$\sigma$	Mechanické napětí.
$\Omega$	Elektrický odpor.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Příklad funkce tenzometru při deformaci <math>\varepsilon</math> protažením o <math>\Delta l</math> působením síly <math>F</math> =&gt; změna odporu o <math>\Delta R</math> .....</i>	12
<i>Obr. 2: Deformace deskové struktury .....</i>	14
<i>Obr. 3: Reálné deformace deformačního členu .....</i>	15
<i>Obr. 4: Mechanické řešení snímače .....</i>	16
<i>Obr. 5: Osazený snímač robotického prstu .....</i>	17
<i>Obr. 6: Základní měřicí bod .....</i>	18
<i>Obr. 7: Mechanická struktura snímače .....</i>	19
<i>Obr. 8: Zjednodušená konstrukce .....</i>	19
<i>Obr. 9: Reálné řešení .....</i>	20
<i>Obr. 10: Tvar nosníku měřícího silové působení ve dvou osách .....</i>	20
<i>Obr. 11: Použitelné provedení šesti-složkového silově-momentového snímače .....</i>	21
<i>Obr. 12: Aplikace snímače .....</i>	21
<i>Obr. 13: Snímač na principu křížových nosníků .....</i>	22
<i>Obr. 14: Snímač tvaru dutého válce .....</i>	22
<i>Obr. 15: Princip piezoelektrického tenzometrického snímače .....</i>	23
<i>Obr. 16: Piezoelektrický snímač AMTI .....</i>	24
<i>Obr. 17: Deformační člen Takahashiho snímače .....</i>	26
<i>Obr. 18: Rozbor deformací deformačního členu Takahashi .....</i>	27
<i>Obr. 19: Snímací princip Takahashiho snímače .....</i>	28
<i>Obr. 20: Dokončený Takahashiho senzor .....</i>	29
<i>Obr. 21: Princip DLR optoelektronického šesti-složkového .....</i>	30
<i>Obr. 22: Princip UTB optoelektronického šesti-složkového .....</i>	31
<i>Obr. 23: Interferenční působení v šesti-složkovém snímači .....</i>	33
<i>Obr. 24: Funkční princip šesti-složkového snímače VÚMA .....</i>	34
<i>Obr. 25: Hustota pravděpodobnosti normálního .....</i>	44
<i>Obr. 26: Hustota pravděpodobnosti rovnoměrného .....</i>	45
<i>Obr. 27: Metody zatěžování snímačů .....</i>	47
<i>Obr. 28: Silové zatížení snímače .....</i>	49
<i>Obr. 29: Momentové zatížení snímač .....</i>	49
<i>Obr. 30: Funkční schéma zatěžovacího zařízení KAM S<sub>j</sub>F .....</i>	52

<i>Obr. 31: Prvotní idea návrhu .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 32: Popis kotvy zatěžovacího zařízení.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 33: Detail umístění siloměrů na rameni kotvy .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 34: Síly působící na dvě protilehlá ramena klece .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 35: Palec přenášející síly působící v osách <math>x</math>, <math>y</math>, <math>z</math>. .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 36: Palec přenášející síly vyvolávající momentové působení .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 37: Návrh reálného tvaru kotvy pro první variantu .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 38: Celkový zjednodušený pohled na zatěžovací zařízení .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 39: Pohled na kotvu zařízení osazenou jednoosými siloměry .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 40: Nosník podepírající vrcholovou hlavici v ose <math>z</math> .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 41: Detail vrcholové hlavice uložené na nosníku.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 42: Síly působící na dvě protilehlá ramena kotvy .....</i>	<i>68</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1: Absolutní velikost chyb snímače.....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2: Vlastnosti snímače AMTI .....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 3: Přesnost optického snímače Takahashi .....</i>	<i>28</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

Práce neobsahuje přílohy.