



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

**Návrh metodiky ověření šestikomponentního zařízení pro měření
zatížení při zkouškách ocelových konstrukcí**

**The proposal of methodology for the verification of six-
componential device for load measurements in steel structures
analysis**

Diplomová práce

Studijní program: Inteligentní budovy

Vedoucí práce: Ing. Karel Weigel, Ph.D.

Bc. Vítězslav Vitek

Praha, rok 2015



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Vítězslav Vítek**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Název tématu česky: **Návrh metodiky ověření šestikomponentního zařízení pro měření zatížení při zkouškách ocelových konstrukcí**

Název tématu anglicky: **The Proposal of Methodology for the Verification of Six-componential Device for Load Measurements in Steel Structures Analysis**

Pokyny pro vypracování:

1. Definujte princip konkrétního zařízení pro šestikomponentní měření zatížení a popište možnosti využití při měření ve vývoji a konstrukci ocelových svařovaných konstrukcí.
2. Navrhněte vhodný způsob zpracování a vyhodnocení výstupních signálů z deformačního elementu a navrhněte způsob kalibrace zařízení. Návrhy ověřte na naměřených datech.
3. Posudte otázky elektromagnetické kompatibility měřícího zařízení.
4. Zhodnoťte reálné možnosti využití zařízení pro zkoušky ocelových svařovaných konstrukcí.

Seznam odborné literatury:

- [1] Hoffmann, K.: An Introduction to Measurements using Strain Gages, 1989 HBM Darmstadt
- [2] Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc.: Technický experiment
- [3] Vaculíková, P., Vaculík, E.: Elektromagnetická kompatibilita. Grada 1998

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Weigel, Ph.D. (Doosan Bobcat Engineering s.r.o.)

Datum zadání diplomové práce: 17. září 2014

Platnost zadání do¹: 29. ledna 2016

Doc. Ing. Jan Hölub, Ph.D.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 17. 9. 2014

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze uvedenou literaturu.

V Praze dne 11. 5. 2015.

.....

Podpis

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem metodiky ověření šestikomponentního zařízení pro měření obecného zatížení při zkouškách ocelových svařovaných konstrukcí. Při řešení jsou rozebrány a zhodnoceny vhodné koncepce konkrétního měřícího zařízení. Následně jsou zde zpracovány způsoby vyhodnocení měřených veličin a kalibrace.

Abstract

Submitted thesis deals with a proposal of the methodology for the verification of a six-componential device for load measurements in steel structures analysis. A suitable design and specific measuring equipment for mentioned application are discussed. Subsequently, possible methods of signal processing and calibration of multi-axial device are described.

Klíčová slova

Ověření, kalibrace, vícekomponentní měření zatížení, měření síly, hexapod, tenzometr, elektromagnetická kompatibilita.

Keywords

Verification, calibration, multi-axial load measurement, force measurement, hexapod, strain gauge, electromagnetic compatibility.

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za nesmírnou podporu, rady a připomínky. Dále děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Weigelovi, PhD. za trpělivost, pomoc a vedení. A v neposlední řadě děkuji svým kolegům z Doosan Bobcat Engineering s.r.o., bez jejichž spolupráce by předkládaná diplomová práce nemohla vzniknout.

Obsah

Obsah	- 5 -
1 Úvod	- 8 -
2 Zařízení pro měření vícekomponentních zatížení	- 9 -
2.2 Požadavky na měřící zařízení pro analýzu ocelových svařovaných konstrukcí	- 11 -
2.3 Zařízení pro měření vícekomponentního zatížení dostupná na trhu	- 12 -
2.3.1 Snímače vícekomponentního zatížení GTM	- 12 -
2.3.2 Snímače vícekomponentního zatížení Interface	- 12 -
2.4 Uvažované koncepce zařízení pro šestikomponentní měření zatížení svařovaných ocelových konstrukcí	- 13 -
2.4.1 Spojení paralelních desek čtyřmi dutými vzpěrami	- 13 -
2.4.2 Využití hexapodové soustavy pro spojení paralelních desek	- 15 -
2.5 Zhodnocení a výběr koncepce pro šestikomponentní měřící zařízení	- 16 -
2.6 Teoretický rozbor hexapodu	- 18 -
2.7 Odezva deformačních členů při zatěžování	- 20 -
3 Způsoby zpracování a vyhodnocování signálu z deformačních členů	- 25 -
3.1 Požadavky na způsob zpracování signálu z deformačních členů	- 25 -
3.2 Uvažované principy měření síly	- 25 -
3.2.1 Piezoelektrické snímače síly	- 26 -
3.2.2 Magnetické snímače síly	- 26 -
3.2.3 Siloměry s odporovými tenzometry	- 27 -
3.2.4 Snímače se stykovým odporem	- 30 -
3.2.5 Měření síly v závislosti na změně vlastní frekvence měřícího členu	- 31 -
3.3 Zhodnocení uvažovaných řešení pro měření síly	- 31 -

3.4	Elektrické zapojení tenzometrů a zpracování signálu	- 33 -
3.4.1	Zpracování signálu z tenzometrů pomocí Wheatstonova můstku.....	- 33 -
3.4.2	Buzení měřícího obvodu	- 35 -
3.4.3	Rozlišení převodníků	- 36 -
3.5	Kompensace parazitních vlivů vícekomponentního snímače	- 36 -
3.5.1	Kompensace parazitních silových účinků.....	- 36 -
3.5.2	Kompensace příčné citlivosti tenzometrů.....	- 37 -
3.5.3	Teplotní kompenzace tenzometrů	- 37 -
3.5.4	Kompensace vlivu přívodních vodičů.....	- 38 -
3.6	Rozmístění tenzometrů.....	- 38 -
3.6.1	Návrh konfigurace měřících tenzometrů	- 38 -
3.6.2	Výsledné rozmístění použitých tenzometrů	- 39 -
4	Kalibrace šestikomponentního zařízení	- 41 -
4.1	Popis kalibrovaného zařízení.....	- 41 -
4.1.1	Základny	- 42 -
4.1.2	Deformační členy	- 42 -
4.2	Princip kalibrace	- 43 -
4.3	Stanovení nejistoty zařízení	- 44 -
4.3.1	Nejistota typu A.....	- 44 -
4.3.2	Nejistota typu B	- 45 -
4.3.3	Kombinovaná nejistota typu C	- 45 -
5	Elektromagnetické vlastnosti zařízení.....	- 47 -
5.1	Elektromagnetická kompatibilita	- 47 -

5.1.1	Vznik elektromagnetického rušení.....	- 48 -
5.1.2	Prostředí elektromagnetické vazby.....	- 48 -
5.1.3	Možnosti zvýšení EMC.....	- 48 -
5.1.4	Posouzení měřícího zařízení v prostředí provozu	- 49 -
5.1.5	Doporučení pro použití zařízení v prostředí provozu.....	- 50 -
6	Možnosti využití měřícího zařízení při zkouškách ocelových svařovaných konstrukcí ...	- 52 -
6.1	Aplikace měřícího zařízení.....	- 52 -
6.1.1	Statické laboratorní zkoušky pro stanovení únavové životnosti.....	- 52 -
6.1.2	Cyklické laboratorní zkoušky pro stanovení únavové životnosti	- 53 -
6.2	Vlastnosti a omezení měřícího zařízení.....	- 53 -
7	Závěr.....	- 54 -
8	Použité zdroje.....	- 55 -
9	Přílohy	- 58 -
	Příloha A – Výkres základny hexapodu	- 58 -
	Příloha B – Výkres deformačního členu hexapodu	- 59 -
	Příloha C – Výkres sestavy hexapodového měřícího zařízení	- 60 -

1 Úvod

Cílem předkládané diplomové práce je návrh metodiky ověření šestikomponentního zařízení pro měření obecného zatížení při statických, dynamických a únavových zkouškách svařovaných ocelových konstrukcí. Při zpracování předkládané práce se braly v úvahu požadavky a omezení, která vychází z předpokládané aplikace pro zkoušky ocelových svařovaných konstrukcí malých stavebních strojů.

V současné době se v průmyslu používá řada principů pro měření zatížení. Jednotlivé senzory jsou z hlediska typu a rozsahu měřeného zatížení zpravidla přizpůsobené pro konkrétní aplikaci. Senzory schopné měřit šestikomponentní zatížení jsou univerzální a lze je použít i pro měření méněkomponentních zatížení. Součástí práce je rozbor současných vícekomponentních senzorů, posouzení a zhodnocení vhodné koncepce, konstrukce senzoru a způsobu měření síly pro konkrétní měřicí zařízení. Následně jsou zde zpracovány způsoby vyhodnocení měřených veličin a posouzení elektromagnetické kompatibility zařízení.

2 Zařízení pro měření vícekomponentních zatížení

Při průběhu pracovních cyklů strojů a jejich součástí vzniká zatížení, které má obecný charakter. Je způsobené kombinací sil např. od akčních členů působících při průběhu pracovního cyklu, setrvačnými účinky (např. ramena pracovních strojů), aerodynamickými účinky a dalšími. Jejich znalost je základním předpokladem pro návrh, výrobu a ověření navržené konstrukce.

Působící zatížení se většinou nechají s jistou chybou zjednodušit a nahradit pouze působením dominantních složek, např. jednoosé zatížení táhel, rovinná napjatost u skořepinových prvků nebo nosníků.

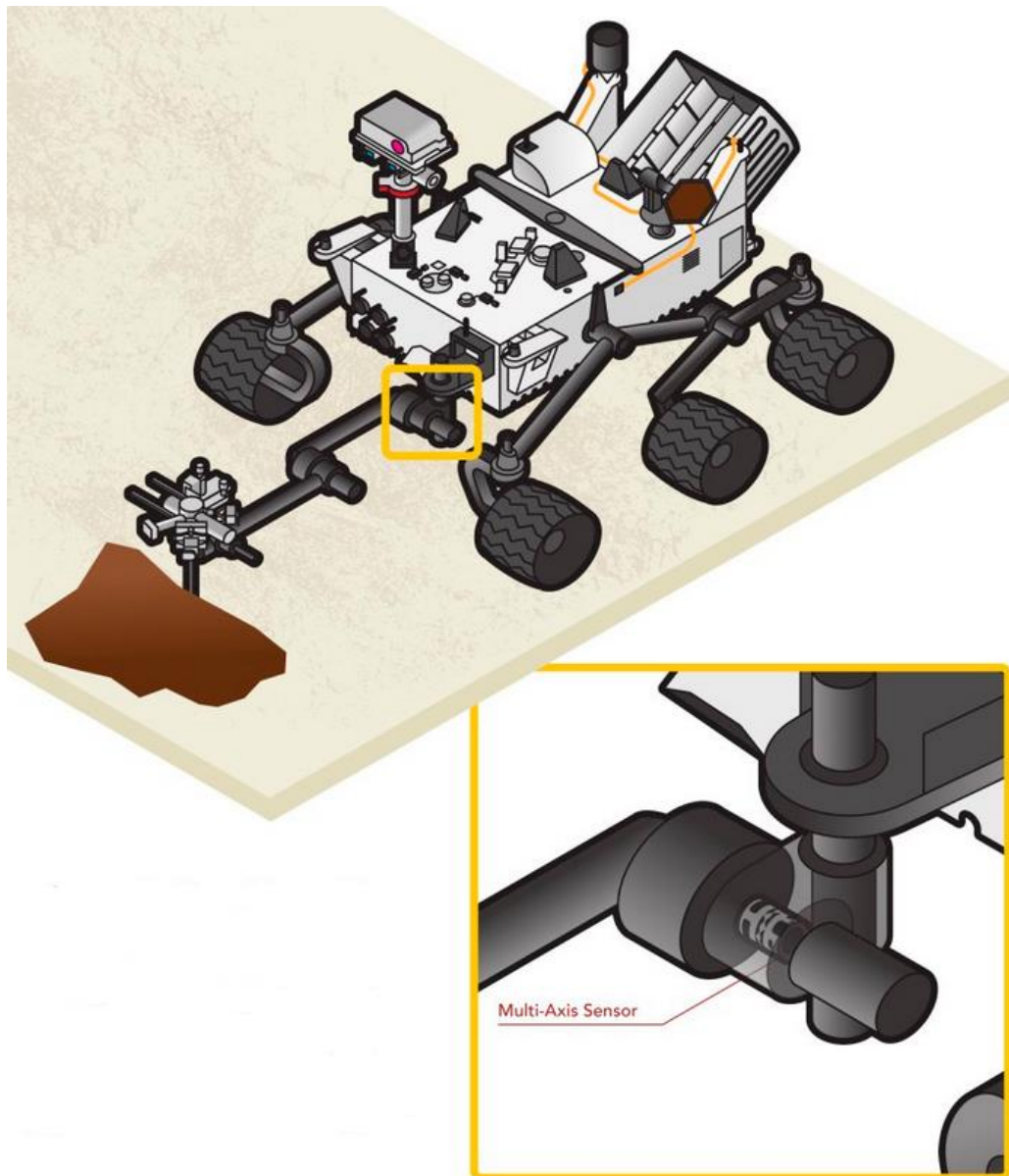
Pro zkoušky konstrukčních celků je nutné uvažovat kompletní spektrum zatěžovacích sil. To se zpravidla zajišťuje kombinací různých jednoosých zatěžovacích mechanismů. Výsledné zatížení jednotlivých členů se pak stanoví pomocí geometrie zatěžovacího mechanismu a celkové zatěžovací síly. Příklad zkoušky zatěžování konstrukce prostřednictvím kombinace jednoosého zatěžování ukazuje Obr. 1.



Obr. 1 - Příklad životnostního strukturálního testu při působení obecného zatěžování na křídlo letadla Embraer EMB 314 [16]

Druhou variantou je využití vícekomponentního měřicího členu, který je schopný obecné zatížení rozložit do základních měřených složek. Každé těleso může být zatěžováno

libovolnou kombinací sil a momentů. Ty lze transformovat do jakéhokoli souřadného systému a nahradit je kombinací tří nezávislých sil a momentů, které je možné měřit a stanovit tak odpovídající zatížení.



Obr. 2 - Aplikace vícekomponentního senzoru zatížení od firmy FUTEK pro MSL Mars Rover [23]

Mezi nejproblematictější oblast použití vícekomponentních měřících zařízení patří vzájemné ovlivňování jednotlivých měřených složek složkami měřenými v jiném směru zatížení – tzv. crosstalk. V konstrukci siloměrů se na trhu většinou objevují 2 řešení, soustava snímačů pro jednotlivá zatížení nebo monoblok s kompenzací parazitních složek napětí.

2.2 Požadavky na měřicí zařízení pro analýzu ocelových svařovaných konstrukcí

Navrhované zařízení pro měření víceosého zatížení bude využito při zkouškách konstrukce pozemních strojů pro měření obecných sil a momentů. Pro daný účel lze definovat níže uvedené požadavky, které musí měřicí zařízení splňovat.

- Konstrukce zařízení musí umožňovat statické i dynamické víceosé zatěžování.
- Zařízení bude používáno za laboratorních teplot v rozsahu 15°C až 25°C.
- Měřená hodnota musí být opakovatelná – při působení stejných vstupních podmínek musí být dosaženo opakovaných naměřených hodnot.
- Zařízení by mělo kompenzovat vliv parazitních silových účinků.
- Zařízení musí být kalibrovatelné.
- Zařízení musí být univerzální, aby bylo použitelné pro co nejširší spektrum prováděných měření.
- Výstupní měřené veličiny musí být ve formě elektrického signálu vhodného k numerickému zpracování dostupnou měřicí aparaturou.
- Požadovaný rozsah měřených veličin při kombinovaném namáhání je uveden v Tab. 1

Tab. 1 - Požadavky na rozsah měřených veličin

Osa	X	Y	Z
Jmenovitá síla	±50 kN	±50 kN	±50 kN
Jmenovitý moment síly	±3 kNm	±3 kNm	±2kNm

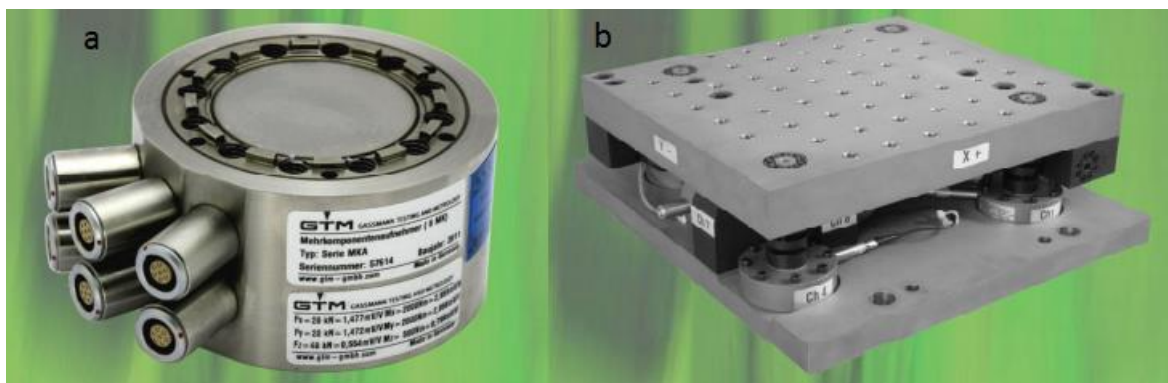
- Minimální počet cyklů při 80% rozsahu je 10^7 .
- Doba odezvy snímače menší než 0,01 sec., předpokládají se pomalé změny měřené veličiny do 10 Hz.
- Požadovaná chyba měřené veličiny je menší než 1%
- Požadovaná citlivost měřené veličiny je minimálně 0,1% rozsahu pro každou měřenou složku.

2.3 Zařízení pro měření vícekomponentního zatížení dostupná na trhu

Na trhu se vyskytuje řada firem specializovaných na výrobu nebo distribuci zařízení určených pro stanovení vícekomponentního zatížení. V následujícím textu budou uvedeny některé příklady řešení.

2.3.1 Snímače vícekomponentního zatížení GTM

Snímače nabízené německou firmou GTM se vyznačují velkou flexibilitou kombinace rozsahu měření sil a momentů. GTM nabízí 2 varianty vícesložkových snímačů zatížení.



Obr. 3 - Snímače vícekomponentního zatížení od GTM

Série MKA (Obr. 3a) se vyznačuje kompaktními rozměry, díky kterým je siloměr vhodný k většině strojírenských aplikací, kde je vyžadováno snadné zabudování měřícího zařízení do testovaných konstrukcí nebo zařízení. Pro měření jednotlivých složek zatížení využívá tenzometry zabudované v monolitickém snímači.

Série MPF (Obr. 3b) využívá pro měření několik oddělených snímačů síly. Vyznačují se vysokou necitlivostí vůči rušivým silám. Tím jsou vhodné pro aplikace například v aerodynamických tunelech pro odvalovací testy pneumatik. Díky samostatným odděleným snímačům je vhodné jejich využití jako referenční snímače pro vícesložková zatížení. [17]

2.3.2 Snímače vícekomponentního zatížení Interface

Americká firma Interface nabízí vícesložkový senzor zatížení řady 6AXX. Senzor se vyznačuje velmi kompaktní velikostí a dobrou kompenzací parazitních vlivů. Variabilita rozsahu měřených sil a momentů je vysoká. Od malých silových účinků v desítkách N a momentů v jednotkách Nm až po stovky kN a tisíce Nm. Vícesložkový senzor zatížení Interface je zobrazen na Obr. 4.



Obr. 4 - Vícesložkový senzor zatížení od firmy Interface

Dalšími výrobci vícesložkových senzorů zatížení jsou například německá firma HBM, francouzská firma GAROS, americká firma Honeywell a řada dalších.

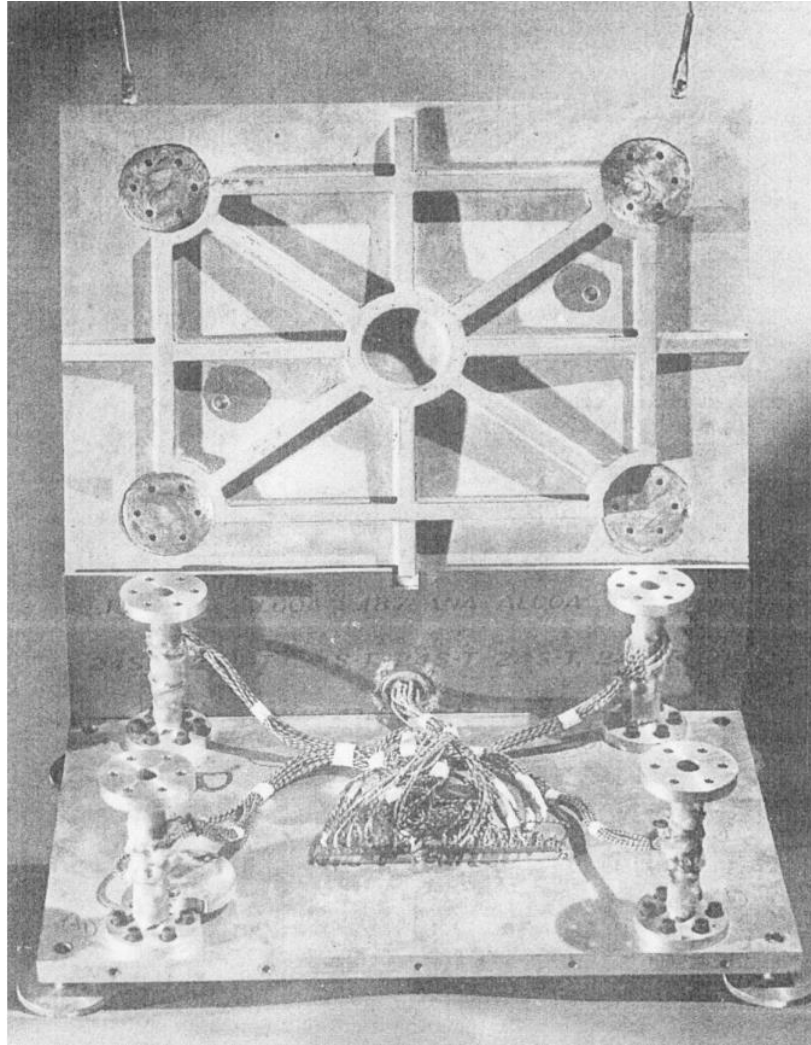
Ačkoli na trhu je řada dostupných vícekomponentních zařízení pro měření zatížení, v případě vlastního návrhu je možné dosáhnout nižší finanční náročnosti a vyššího přizpůsobení vlastností snímače.

2.4 Uvažované koncepce zařízení pro šestikomponentní měření zatížení svařovaných ocelových konstrukcí

Konstrukce siloměru a orientace použitých měřících členů musí být navržena tak, aby umožňovala měření obecného zatížení s dostatečnou přesností. V následujícím textu budou popsána dvě řešení vícekomponentních snímačů, které by bylo možné využít při návrhu měřícího členu pro měření zatížení svařovaných ocelových konstrukcí.

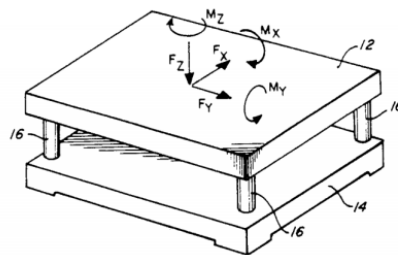
2.4.1 Spojení paralelních desek čtyřmi dutými vzpěrami

Zařízení pro šestikomponentní měření zatížení je konstrukce sestávající ze dvou paralelně umístěných desek spojených čtyřmi dutými vzpěrami. Tento typ konstrukce poprvé publikovala Kalifornská univerzita v roce 1952. (Obr. 5)



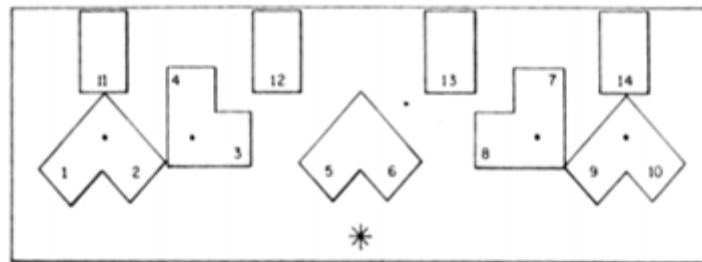
Obr. 5 - Fotografie prvního publikovaného zařízení pro šestikomponentní měření zatížení zkonstruovaného ze dvou desek spojených čtyřmi dutými vzpěrami[12]

Schéma konstrukce ukazuje Obr. 6. Duté vzpěry plní funkci deformačního členu siloměru. Vzpěry jsou pevně spojeny s vrchní i spodní deskou zařízení. Na každou vzpěru jsou aplikovány tenzometry takovým způsobem, aby bylo možné měřit tahovou či tlakovou sílu ve svislé ose F_z vodorovné stříhové síly F_x a F_y , a zároveň momenty síly ve směrech M_x , M_y a M_z .



Obr. 6 - Schéma zařízení pro šestikomponentní měření zatížení [12]

Konkrétní osazení pláště jednotlivé vzpěry tenzometry ukazuje Obr. 7. V tomto zapojení lze pomocí tenzometrů 1, 2, 5, 6, 9 a 10 měřit stříhové síly F_x , a F_y , pomocí tenzometrů 3, 4, 7 a 8 svislé namáhání a momenty M_x , M_y a M_z pomocí tenzometrů 11, 12, 13 a 14. Rozložení na Obr. 7 umožňuje použitým tenzometrům vysokou citlivost na individuální složky sil a momentů a nízké ovlivňování měřené veličiny veličinou působící v jiném směru.



Obr. 7 - Rozložení tenzometrů na plášti duté válcové vzpěry [12]

2.4.2 Využití hexapodové soustavy pro spojení paralelních desek

Hexapod je šestikomponentní zařízení někdy nazývané Stewartovou plošinou. Hexapod je složen ze dvou paralelně umístěných základen spojených šesti členy s proměnnou délkou, tak vzniklo označení hexapod – hexa, šest. Běžně se toto zařízení využívá pro přesné nastavování polohy vrchní základny se šesti stupni volnosti (viz. Obr. 8).

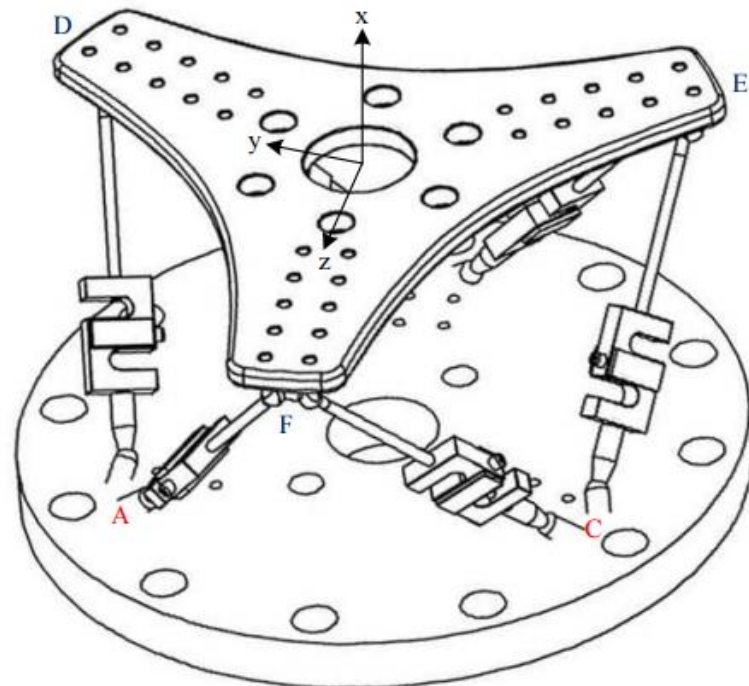


Obr. 8 - Hexapodová (Stewartova) plošina [15]

Obě základny jsou spojené šesti pohyblivými částmi, například hydraulickými nebo pneumatickými válci. Spodní deska je zpravidla pevně uchycená k statickému objektu. V závislosti na vysunutí jednotlivých válců dochází ke změně polohy a zatížení vrchní desky.

Když je na tuto desku pevně uchycen testovaný objekt, je možné změnou polohy pístů jednotlivých válců dosáhnout velkého rozsahu potřebného zatížení. Rozsah zatěžování lze upravit délkou a dosažitelnou silou výsuvných válců. Původně byla hexapodová zařízení vyvinuta v šedesátých letech pro účely polohování desek pro letecké simulátory [14].

Nahrazením pohyblivých válců určených pro nastavení polohy za deformační členy osazené snímači deformace (např. odporové tenzometry, optická vlákna atd.), kterými je možné měřit působící síly, je možné získat zařízení pro šestikomponentní měření zatížení. Princip hexapodového siloměru ukazuje Obr. 9. Vlastnosti hexapodového siloměru umožňují velmi širokou aplikaci v závislosti na provedení použitých základů a vzpěr. Konkrétně provedení geometrie vzpěr (úhel vůči základně a jejich délka) určuje výslednou aplikovatelnost siloměru. Upravením úhlu vzpěr vůči základně je možné upravit citlivost pro měření axiální síly.



Obr. 9 - Princip měření síly pomocí hexapodu

2.5 Zhodnocení a výběr koncepce pro šestikomponentní měřící zařízení

V předchozí kapitole byl proveden rozbor principů pro definici měřícího zařízení. Pro výběr vhodné konstrukce měřícího členu byla použita hodnotící kritéria z kap. 2.2. Každé kritérium bylo ohodnoceno třibodovou stupnicí, výsledek je zapsán do Tab. 2.

- 1 - optimální pro dané využití
- 0 – použitelný, ale má jistá omezení
- -1 – nelze použít

Výsledné hodnocení je dáno součtem přírůstků jednotlivých hodnocení.

Tab. 2 - Zhodnocení principu pro šestikomponentní měřicí zařízení

Hodnotící kritérium	Hexapodový siloměr	Siloměr s kolnými vzpěrami
Schopnost zařízení měřit statická i dynamická víceosá zatížení do frekvence 10 Hz	1	1
Opakovatelnost měření	1	1
Schopnost kompenzace vlivu parazitních silových účinků	1	1
Možnost konfigurace pro měření s citlivostí min 0,1% rozsahu	1	1
Schopnost Měření jednotlivých komponent zatížení	1	0
Možnost numerického zpracování výstupní měřené veličiny	1	1
Možnost přizpůsobení zařízení pro měření veličin v rozsahu dle Tab. 1	1	1
Životnost zařízení dle Tab. 1	1	1
Kalibrovatelnost	1	1
Finanční náročnost	1	0
Technologická náročnost	1	0
Celkové bodové hodnocení	11	8

Na základě provedené analýzy byla pro konstrukční řešení víceosého měřícího zařízení zvolena koncepce hexapodu, která převádí obecné vícekomponentní zatížení na soustavu deformačních členů (vzpěr) zatěžovaných axiální silou.

2.6 Teoretický rozbor hexapodu

Pro stanovení rozsahu převodníku deformace na elektrický signál, je nutné znát velikost deformace jednotlivých členů v závislosti na uvažovaném zatížení. Pro stanovení zatížení jednotlivých měřících členů je nutné provést rozbor silových účinků v jednotlivých částech hexapodu.

Deformační členy plnící funkci siloměru mohou být k základnám připevněny pomocí svarů, kloubů či jiným způsobem. Mohou například obsahovat nezávislý siloměr, jak ilustruje Obr. 9, nebo se samy stávají siloměrem pomocí vhodně aplikovaných tenzometrů.

2.6.1.1 Konstrukce hexapodového zařízení

Konstrukci hexapodového šestikomponentního siloměru ilustruje Obr. 9. Šest deformačních členů je spojených po dvojicích do třech bodů na každé základně. Na spodní základně do bodů A až C a na vrchní základně do bodů D až F. Z každého bodu jsou vzpěry plnící funkci deformačního členu vedeny každý do jednoho ze dvou nejbližších bodů na protilehlé základně. Geometricky má každý deformační člen jedinečný jednotkový vektor, který odpovídá směru jeho osy a tím směru, ve kterém působí axiální síla zatěžující samotnou vzpěru. Tyto vektory jsou definovány dvěma body, které odpovídají počátku a konci příslušného deformačního členu (např. \overrightarrow{FA}).

Reakce jednotlivých deformačních členů jsou lineárně nezávislé. Proto je možné ze znalosti geometrie hexapodu získat soustavu rovnic, která popisuje vztah mezi měřenými silami na jednotlivých deformačních členech a silami reálně působícími na namáhané základny.

$$\begin{pmatrix} \overrightarrow{FA} \\ \overrightarrow{DA} \\ \overrightarrow{DB} \\ \overrightarrow{EB} \\ \overrightarrow{EC} \\ \overrightarrow{FC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

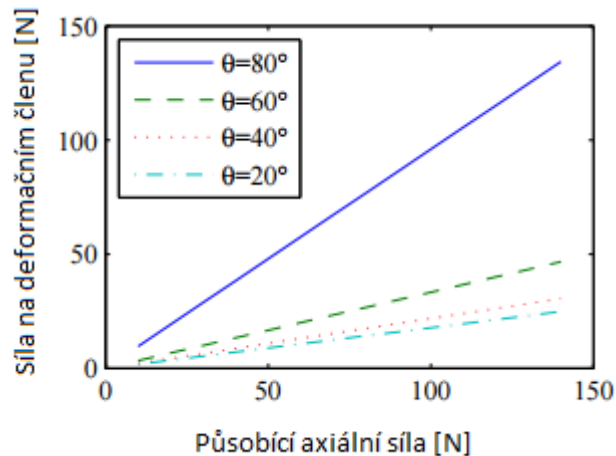
kde \overrightarrow{FA} , až \overrightarrow{FC} jsou síly měřené ve vzpěrách, F_x , až M_z jsou síly a momenty působící na zatěžované základny a koeficienty C_{ij} udávají matici tuhosti zatěžované sestavy. Při znalosti matice tuhosti je potom možné zkoumat zatížení působící na siloměr pomocí měřených hodnot

síly na deformačních členech. Nebo naopak lze působením známého napětí a znalosti inverzní matice tuhosti vypočítat síly působící na jednotlivé vzpěry.

2.6.1.2 Předpokládaná odezva deformačních členů hexapodu

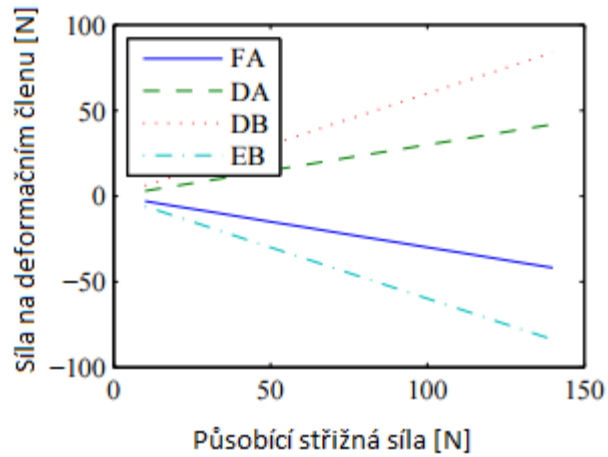
Pro teoretický rozbor chování hexapodu je nejdříve vhodné posoudit čistě axiální zatížení, které by se vzhledem k symetrii konstrukce hexapodu mělo rozložit rovnoměrně a vytvořit tak stejnou odezvu ve všech šesti osách.

Měřené síly jednotlivých deformačních členů by se dále měly lišit v závislosti na jejich úhlu vzhledem k základnám. Závislost této předpokládané odezvy zatížení ukazuje Obr. 10. Je zřejmé, že při narůstajícím úhlu mezi deformačními členy a základnami budou při axiálním zatížení narůstat i měřené síly na vzpěrách – směr síly působící v ose deformačního členu se vyrovnává se směrem členu samotného.



Obr. 10 – Předpokládaná závislost odezvy zatížení v závislosti na úhlu deformačních členů vzhledem k základně [14]

Efekt boční stříhové síly, kolmé k ose hexapodu ukazuje Obr. 11. Zde by deformační členy měly reagovat odlišně. Na některých by se mělo s narůstající stříhovou silou projevit tahové působení axiální síly a na některých tlakové.



Obr. 11 – Předpokládaná odezva některých deformačních členů při působení střížné síly [14]

2.7 Odezva deformačních členů při zatěžování

Na Obr. 12 je zobrazen hexapodový siloměr. Jednotlivé uzly, ve kterých jsou spojeny deformační členy, jsou označeny A až F, deformační členy samotné jsou označené pomocí vektorů \vec{a}_1 až \vec{a}_6 , které jsou definovány pomocí bodů A až F následujícím způsobem.

$$\vec{a}_1 = D - A \quad (2)$$

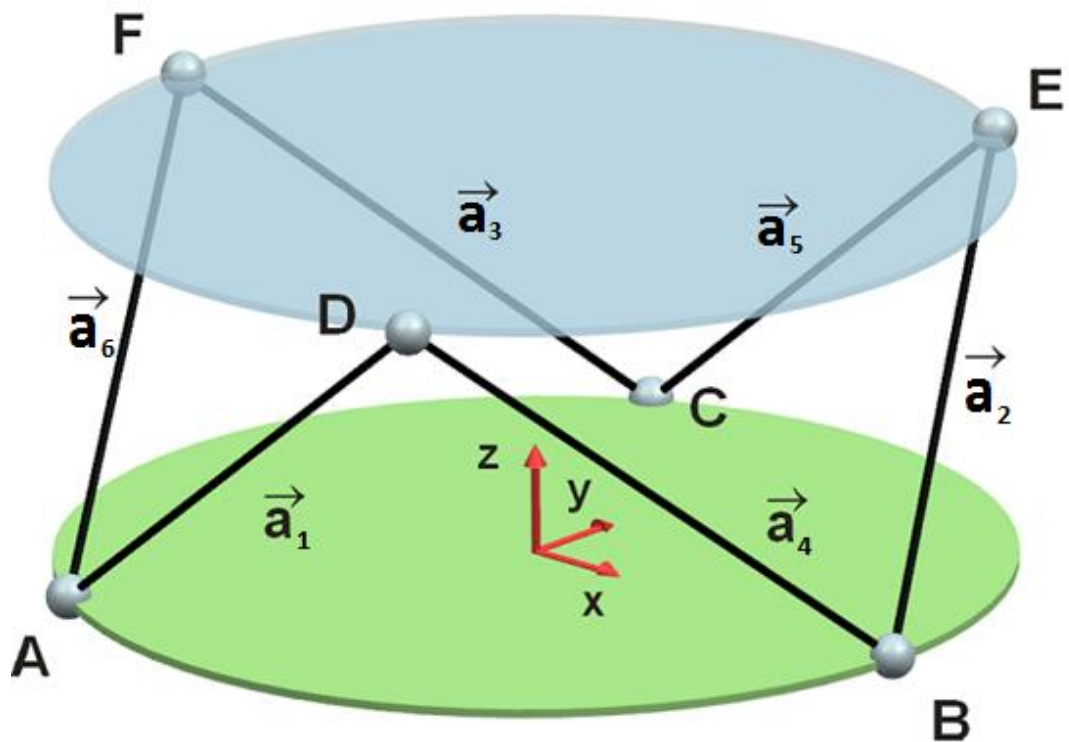
$$\vec{a}_2 = E - B \quad (3)$$

$$\vec{a}_3 = F - C \quad (4)$$

$$\vec{a}_4 = D - B \quad (5)$$

$$\vec{a}_5 = E - C \quad (6)$$

$$\vec{a}_6 = F - A \quad (7)$$



Obr. 12 - Popis deformačních členů hexapodového siloměru

V případě zatěžování základny siloměru obecnou silou \vec{F} působící ve směru vektorů \vec{a}_1 až \vec{a}_6 nenulové síly \vec{F}_1 až \vec{F}_6 . Silové účinky obecné síly \vec{F} se rozdělí mezi jednotlivé deformační členy.

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^6 \vec{F}_i \quad (8)$$

Kde \vec{F} je celková síla působící na základny siloměru a \vec{F}_i , jsou síly měřené na jednotlivých deformačních členech. Dále provedeme normalizaci vektorů \vec{a} až \vec{f} , kde

$$\vec{a}_{1n} = \frac{\vec{a}_1}{|a_1|} \quad (9)$$

$$\vec{a}_{2n} = \frac{\vec{a}_2}{|a_2|} \quad (10)$$

až do

$$\vec{a}_{6n} = \frac{\vec{a}_6}{|a_6|} \quad (11)$$

Protože vektory sil \vec{F}_1 až \vec{F}_6 mají stejný směr jako normované vektory deformačních členů \vec{a}_{1n} až \vec{a}_{6n} , je možné celkovou sílu \vec{F} působící na základny psát jako

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^6 \vec{F}_i = |F_1| \cdot \vec{a}_{1n} + |F_2| \cdot \vec{a}_{2n} + \dots + |F_6| \cdot \vec{a}_{6n} \quad (12)$$

Kde $|F_1|$ až $|F_6|$ jsou hodnoty sil měřených na deformačních členech.

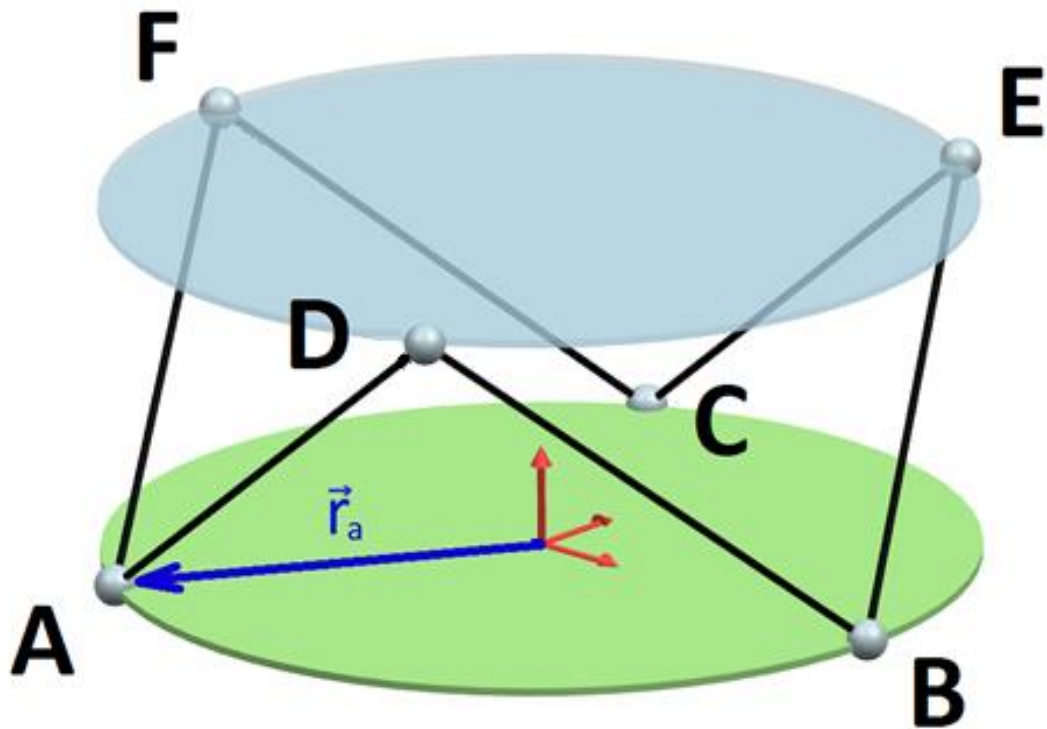
Po roznásobení souřadnic normovaných vektorů s hodnotami měřených sil je síla \vec{F} vyjádřena

$$\begin{aligned} \vec{F} = & |F_1| \cdot (a_{1nx}, a_{1ny}, a_{1nz}) + |F_2| \cdot (a_{2nx}, a_{2ny}, a_{2nz}) + \dots \\ & \dots + |F_6| \cdot (a_{6nx}, a_{6ny}, a_{6nz}) \end{aligned} \quad (13)$$

A po rozepsání vektoru působící síly na jednotlivé složky

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_x \\ \vec{F}_y \\ \vec{F}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1nx} & a_{2nx} & a_{3nx} & a_{4nx} & a_{5nx} & a_{6nx} \\ a_{1ny} & a_{2ny} & a_{3ny} & a_{4ny} & a_{5ny} & a_{6ny} \\ a_{1nz} & a_{2nz} & a_{3nz} & a_{4nz} & a_{5nz} & a_{6nz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |F_1| \\ |F_2| \\ |F_3| \\ |F_4| \\ |F_5| \\ |F_6| \end{pmatrix} \quad (14)$$

Srovnáním s rovnicí 1 je zřejmé, že se jedná o silovou část matice tuhosti. Koeficienty matice jsou definovány body A až F. Pro jejich výpočet proto stačí znát souřadnice bodů A až F vzhledem k počátku zvoleného souřadného systému.



Obr. 13 - Ilustrace vektoru ramena síly pro výpočet momentu síly

V případě působení obecného momentu síly na základnu siloměru je situace podobná. Protože měřená odezva na zatěžování obecným momentem je uvažována vzhledem k počátku souřadnic (viz. Obr. 13), je možné pro každý vektor ramena síly uvažovat

$$\vec{r}_a = A - [0,0,0] \quad (15)$$

$$\vec{r}_b = B - [0,0,0] \quad (16)$$

A podobně až

$$\vec{r}_f = F - [0,0,0] \quad (17)$$

Obecně lze moment síly s použitím metody uvolňování vyjádřit jako

$$\vec{M} = \vec{r}_a \times (\vec{F}_1 + \vec{F}_6) + \vec{r}_b \times (\vec{F}_4 + \vec{F}_2) + \dots \vec{r}_f \times (-\vec{F}_6 - \vec{F}_3) \quad (18)$$

kde \vec{F}_i je stejně jako u rovnice (13) skalárním součinem měřené síly a normovaného vektoru příslušného deformačního členu. Pro úpravu tvaru této rovnice do podoby rovnice (14) je nutné provést vektorový součin jednotlivých složek.

Dalšími úpravami lze odezvu obecného momentu vyjádřit jako matici 6x3.

$$\begin{pmatrix} \vec{M}_x \\ \vec{M}_y \\ \vec{M}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |F_1| \\ |F_2| \\ |F_3| \\ |F_4| \\ |F_5| \\ |F_6| \end{pmatrix} \quad (19)$$

Kde k_{11} až k_{36} jsou prvky momentové části matice tuhosti.

Prvky matic z rovnice (15) a (18) jsou určeny geometrií modelu snímače. Ze znalosti souřadnic bodů A až F vůči počátku lze jednotlivé prvky numericky vyjádřit. Sloučením rovnic vznikne vztah pro výpočet působících silových a momentových složek obecného zatížení, který je dán skalárním součinem vyjádřené matice tuhosti a měřených sil v jednotlivých deformačních členech.

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_x \\ \vec{F}_y \\ \vec{F}_z \\ \vec{M}_x \\ \vec{M}_y \\ \vec{M}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1nx} & a_{2nx} & a_{3nx} & a_{4nx} & a_{5nx} & a_{6nx} \\ a_{1ny} & a_{2ny} & a_{3ny} & a_{4ny} & a_{5ny} & a_{6ny} \\ a_{1nz} & a_{2nz} & a_{3nz} & a_{4nz} & a_{5nz} & a_{6nz} \\ k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |F_1| \\ |F_2| \\ |F_3| \\ |F_4| \\ |F_5| \\ |F_6| \end{pmatrix} \quad (20)$$

3 Způsoby zpracování a vyhodnocování signálu z deformačních členů

3.1 Požadavky na způsob zpracování signálu z deformačních členů

Dostupnost použité technologie

Důležitým kritériem pro výběr je dostupnost použité technologie jak pro mechanickou část zařízení, tak pro zpracování a vyhodnocení elektrického signálu. Měřicí část a konstrukci zařízení musí být možné navrhnout a vyrobit v podmínkách průmyslové prototypové dílny. V případě poruchy musí být zařízení snadno a levně opravitelné. Rozsah elektrického výstupu musí být standardizovaný a ideálně analogový, aby ho bylo možné zpracovat dostupnými průmyslovými měřicími aparaturami. Výstupní veličina musí být použitelná jako vstup do regulátorů zatěžovacích strojů.

Rychlost odezvy zařízení

Zařízení bude použito pro statické i dynamické měření obecných sil a momentů. Musí být zaručena stálá odezva zařízení na statické zatěžování a dynamické zatěžování s maximální dobou odezvy 0,01 sec.

Konstrukční parametry zařízení

Zařízení bude využito při zkouškách ocelových svařovaných konstrukcí malých stavebních strojů. Připojovací rozměry zařízení by měly být unifikované, aby umožňovaly instalaci zařízení do testované konstrukce. Hmotnost zařízení by měla být co nejmenší z důvodu setrvačných sil plynoucích z pohybu zařízení.

Finanční náročnost

Na trhu se v současnosti vyskytuje řada zařízení pro šestikomponentní měření zatížení. Proto se nabízí varianta koupě hotového, průmyslově vyráběného zařízení. Navržené zařízení by mělo být levnější než senzory běžně dostupné na trhu.

3.2 Uvažované principy měření síly

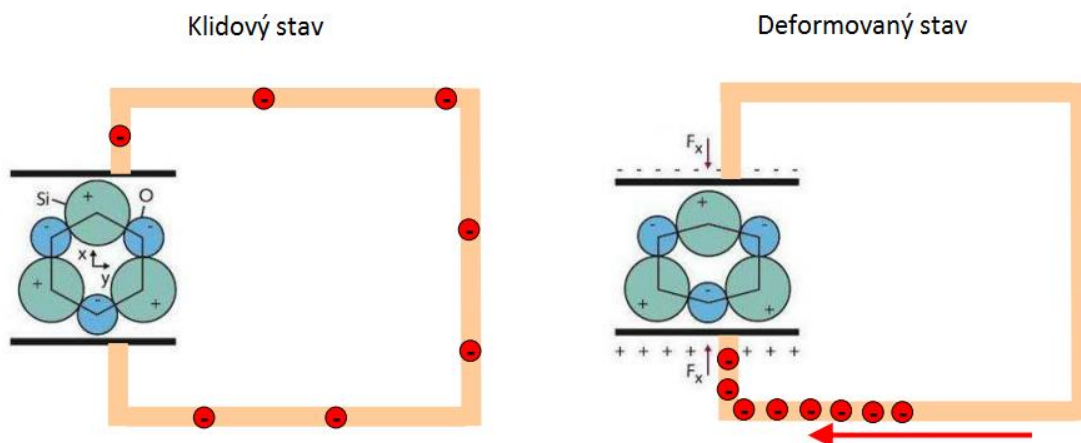
Pro měření sil se většinou používají nepřímé metody. To znamená, že se analyzuje odezva měřeného objektu na účinky působící síly. V současné době se používají měřicí členy,

které převádí hodnotu působící síly na změnu elektrického signálu (napětí, proudu, kapacity, frekvence, atd.). To usnadňuje záznam naměřené hodnoty a její numerické zpracování.

3.2.1 Piezoelektrické snímače síly

Piezoelektrické snímače využívají pro svou funkci piezoelektrického jevu. V důsledku působení síly dochází k deformaci krystalů dielektrika, na nichž polarizací vzniká elektrický náboj. Tím vzniká rozdíl potenciálů – elektrické napětí. Snímače využívající piezoelektrického jevu mají rychlou odezvu a zpravidla se používají pro měření dynamických sil.

Na Obr. 14 je šestiúhelníková monokrystalická mřížka, na které při deformaci vzniká piezoelektrický jev. Tuto mřížku má například SiO_2 . Dalšími materiály použitelnými pro piezoelektrické senzory jsou polykrystalické keramické materiály (LiTiO_3 , PbTiO_3), organické polymery (např. polyvinylidendifluorid) nebo feroelektrické materiály, které se vyznačují nelineární závislostí polarizace na elektrickém poli (hysterezní smyčka).



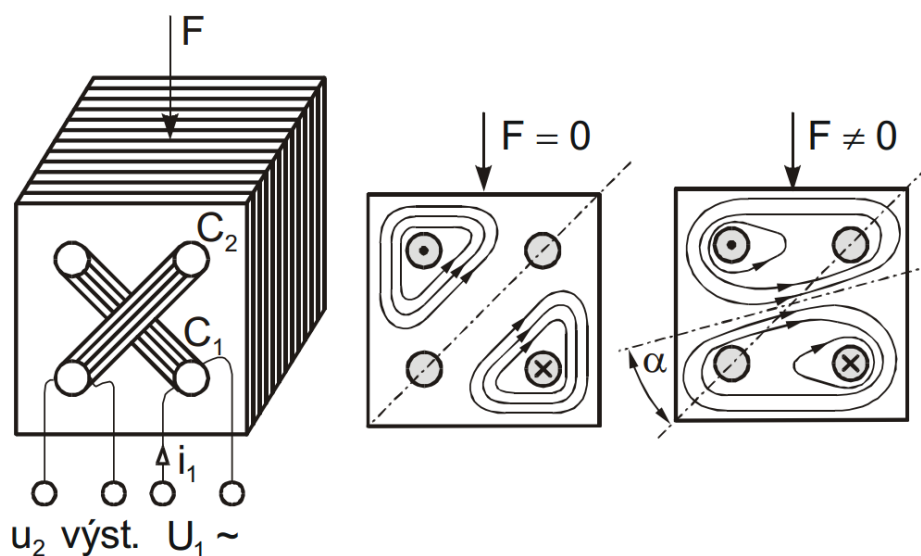
Obr. 14 - Monokrystalická mřížka piezoelektrika v klidovém a deformovaném stavu [25]

3.2.2 Magnetické snímače síly

Magnetické snímače využívají pro měření deformace změnu chování magnetických vlastností feromagnetického materiálu při působení vnější síly.

- **Magnetostrikční snímač** – vyvoláním deformace působením vnějších sil dochází ke změně permeability feromagnetika. Tím dochází k relativně malým změnám indukčnosti, které se vyhodnocují zpravidla můstkovými metodami.
- **Magnetoizotropní snímač** – snímač je složený z plechů, do nichž jsou symetricky vložena dvě vinutí. Při nulovém zatížení je indukční vazba mezi těmito cívkami minimální. Dojde-li k zatížení snímače působící silou, natočí se magnetický tok budící

cívky tak, že zasáhne sekundární obvod. V něm se tak indukuje výstupní napětí úměrné působící síle (Obr. 15).



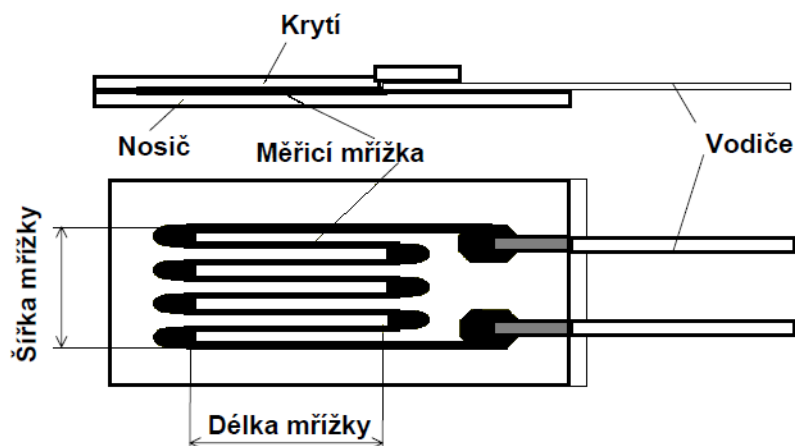
Obr. 15 - Princip magnetoizotropního snímače [4]

3.2.3 Siloměry s odporovými tenzometry

Při působení sil na zkoumaný objekt dochází k deformaci, která je závislá na velikosti působící síly a tuhosti zatěžovaného členu. Deformace vyvolá změnu elektrického odporu odporového tenzometru, který je spojen se zkoumaným povrchem. Tenzometry se standardně vyrábí se jmenovitým odporem 350 nebo 120 Ω .

3.2.3.1 Kovové tenzometry

Kovové tenzometry jsou nejstarším typem tenzometrů. Rozdělují se na drátkové tenzometry s podložkou a bez podložky (někdy označované jako tenzometry s volnou mřížkou). Speciální kovové tenzometry se vyznačují použitelností při měření za vysokých teplot nebo při dlouhodobém a vysokém dynamickém namáhání. U nelepených tenzometrů (tenzometry s volnou mřížkou) navíc odpadají problémy spojené s přenosem informace spojovací vrstvou mezi konstrukcí a tenzometrem. Nevýhodou je omezená maximální hodnota odporu, která je určena rozměry mřížky a průměrem drátku, a výrazný creep efekt, který se projevuje obzvláště při vysokých teplotách. V současnosti se z kovových tenzometrů využívají nejvíce foliové tenzometry, mřížka je zpravidla vytvořena leptáním.



Obr. 16 - Konstrukce odporového tenzometru [3]

Princip měření kovovými tenzometry

Základním vztahem využívaným pro konstrukci tenzometrů, je závislost elektrického odporu R (Ω) na délce l (m) a průřezu S (m^2) materiálu s rezistivitou ρ [Ωm].

$$R = \frac{l}{S} \cdot \rho \quad (21)$$

Totální diferenciál tohoto vztahu pak ukazuje závislost změn základních veličin na výsledném elektrickém odporu.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (22)$$

Kde $\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$ je relativní prodloužení namáhaného materiálu, $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ je důsledek mikrostrukturálních změn materiálu (ovšem vratných) a ΔS je závislá na relativním prodloužení podle vztahu

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \frac{\Delta l}{l} + \left(\nu \frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \dots \cong -2\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (23)$$

Kde ν je Poissonova konstanta. Následující členy řady je možné zanedbat z důvodu nízké hodnoty deformace ε , jejíž vyšší mocniny jsou oproti prvnímu členu řádově nižší. [3]

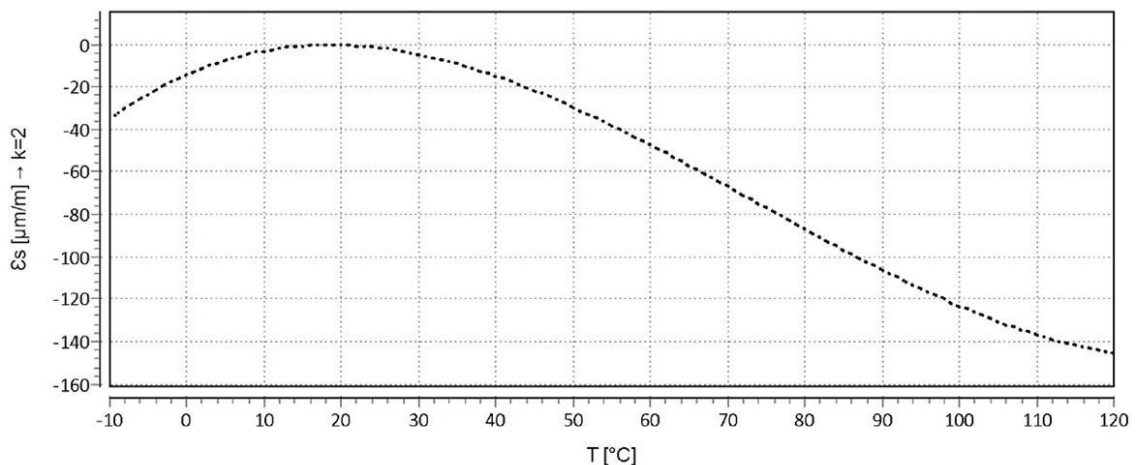
Součinitel deformační citlivosti - tenzometrická konstanta

Podle rovnic (21), (22) a (23) je možné součinitel deformační citlivosti (K-faktor) vyjádřit jako

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 + 2\nu + \pi_e E \quad (24)$$

Kde π_e je piezorezistivní koeficient a E je Youngův modul pružnosti.

Bezrozměrný K-faktor představuje takzvaný proporcionální součinitel, který v sobě zahrnuje konfiguraci celého tenzometru (geometrie, závislost změny odporu na přetvoření, materiálu atd.). Hodnota K-faktoru je výrobcem měřena a udávána pro pokojovou teplotu. Pro jiné teploty lze dle teplotního koeficientu přepočítat hodnotu k-faktoru pro teplotu měřeného místa. Obr. 17 ukazuje příklad závislosti měřené deformace tenzometru v nezatíženém stavu z katalogu firmy HBM.



Obr. 17 - Příklad teplotní závislosti měřené deformace tenzometru v nezatíženém stavu [26]

3.2.3.2 Polovodičové tenzometry

Polovodičové tenzometry využívají piezorezistivního jevu některých polovodičů, zejména křemíku. Nejsou tolik rozšířené jako kovové tenzometry, protože se u nich vyskytuje řada problémů s citlivostí, nelinearitou nebo s chováním při změnách teploty. Mezi jejich přednosti patří vysoký součinitel citlivosti (rozlišení pro měření deformace je téměř 100x vyšší než u kovových tenzometrů), vysoká únavová životnost (nachází využití např. při výrobě siloměrů), vynikající teplotní stabilita (jsou velmi tepelně odolné - hystereze, creep nebo drift

se v širokém rozmezí teplot neprojevují). Další výhodou jsou relativně malé rozměry a vysoký odpor.

3.2.3.3 Optické tenzometry

Optické tenzometry jsou vyrobeny z optického vlákna s velmi tenkým průměrem (řádově desítky μm), které je opatřeno odrazivou (Braggovou) mřížkou. Braggova mřížka bývá vytvořena zpravidla pálením s využitím UV laseru v průběhu tažení optického vlákna. Vlákno je chráněno proti vlhkosti a poškození krycím polymerním obalem. I s tímto pláštěm vlákno obvykle nepřesahuje průměr 250 μm .

Princip optického tenzometru

Základním principem je měření vlnové délky odraženého světla procházejícího vláknem s Braggovou mřížkou. Délka této mřížky se shoduje s délkou senzoru. Část spektra světelného signálu mřížkou prochází a část se odráží. V přístroji je jako reference uloženo spektrum odraženého signálu při průchodu nezatíženou mřížkou, který je následně porovnán se signálem získaným při průchodu zatíženou mřížkou. Z rozdílu spekter lze získat působící deformaci.

Odražený signál má vlnovou délku rovnou vlnové délce Braggovy mřížky λ_0 . Tato vlnová délka je závislá na indexu lomu použitého optického vlákna n_e a periodě Braggovy mřížky Λ .

$$\lambda_0 = 2n_e\Lambda \quad (25)$$

Působením deformace se mění perioda mřížky a s ní vlnová délka Braggovy mřížky. [6]

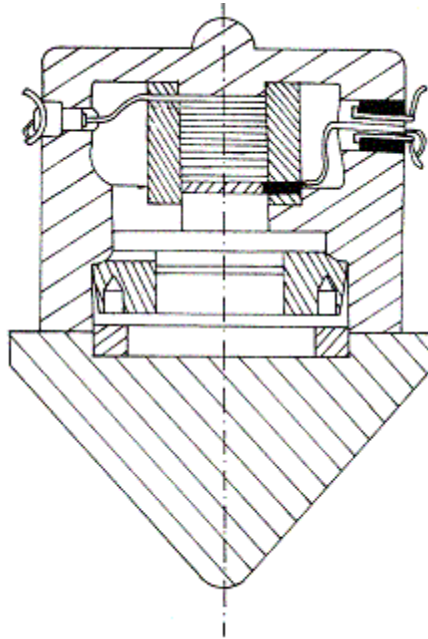
Mezi hlavní výhody patří absolutní odolnost proti rušivému elektromagnetickému poli, dále možnost vícenásobného měření jedním optickým vedením (zpravidla až 10) a možnost měřit na dlouhé vzdálenosti (tisíce metrů nejsou pro optický signál problém). Nevýhodou je teplotní vliv na periodu Braggovy mřížky, který komplikuje vyhodnocení naměřených dat v prostředí s nestálou teplotou. Dále nižší K-faktor (přibližně 0,8) a problematické měření tlakového namáhání. Pro tlaková měření je optický tenzometr nutné v počátečním stavu zatížit předem, aby příliš velkým stlačením nedošlo k jeho poškození. Další problematickou oblastí je aplikace mimo laboratorní prostředí.

3.2.4 Snímače se stykovým odporem

Snímače se stykovým odporem využívají stykového odporu, respektive vztahu elektrického odporu styku kontaktu s působící přitlačnou silou. Snímače jsou použitelné pouze pro tlakové působení sil. Měřicí část je složena zpravidla z uhlíkových kotoučků, jejichž povrch

je zbrošen a chráněn proti nečistotám. Ty jsou následně stlačeny definovanou počáteční silou, která určuje jejich odpor. Tloušťka takto vzniklé pružné stěny pak určuje rozsah měření sil.

Snímač obvykle pracuje s vysokou relativní chybou ($\pm 10\%$), která je dána především závislostí stykového odporu na teplotě a hysterezi. Chybu lze snížit až na $\pm 2\%$ metodou umělého stárnutí. Snímače mají vysokou odolnost proti přetížení (až 200%) a výstupní signál je dostatečně veliký pro měření bez nutnosti použití zesilovačů. [7]



Obr. 18 - Princip siloměru se stykovým odporem [8]

3.2.5 Měření síly v závislosti na změně vlastní frekvence měřícího členu

Pro měření síly lze využít závislosti vlastní frekvence měřícího členu v závislosti na jeho předpětí. Působením síly dojde ke změně vlastní frekvence a prodloužení jeho délky. Daného principu se používá například pro měření předepnutí řemenů.

3.3 Zhodnocení uvažovaných řešení pro měření síly

Uvažovaná řešení pro měření síly byla vyhodnocena stejným způsobem jako koncepce konstrukce šestikomponentního měřícího zařízení v kap. 2.5. Výsledné provedené analýzy jsou uvedeny v Tab. 3.

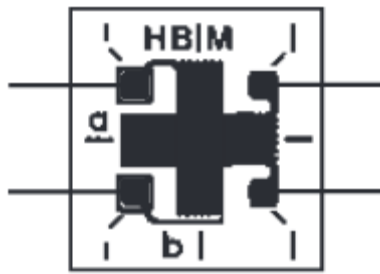
Tab. 3 - Srovnání principů pro měřící člen siloměru

Hodnotící kriteriia	Foliové tenzometry	Piezoelektrické snímače	Optické tenzometry	Magnetické snímače síly	Kapacitní/indukční snímače síly
Dostupnost technologie	1	0	0	-1	-1
Rychlost odezvy zařízení	1	0	1	0	0
Rozměrová kritéria	1	1	0	0	0
Finanční náročnost	1	0	0	0	0
Celkové hodnocení	4	1	1	-1	-1

Z analýzy uvažovaných řešení se jeví jako nejvhodnější využití foliových tenzometrů. Na trhu se vyskytuje řada firem nabízejících foliové tenzometry potřebných vlastností. Například firmy HBM, Vishay nebo Omega nabízí škálu tenzometrů umožňující výběr pro konkrétní aplikace. Pro vyhodnocení signálu z měřících tenzometrů je možné použít celou řadu běžně dostupných měřících zesilovačů. Jedná se o analogový signál, doba odezvy měřících tenzometrů je téměř okamžitá.

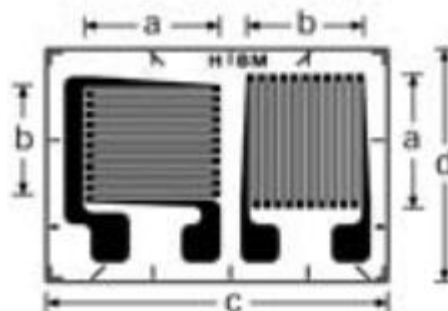
Doporučený způsob zpracování měřícího zařízení pro stanovení zatížení s ohledem na vyhodnocení výstupního signálu je využití fóliových tenzometrů, které nejlépe splňují kladené požadavky.

Pro aplikace na navrhované zařízení jsou nejvhodnější foliové tenzometry od firmy HBM typu 1-XY9x-6/120 (viz. Obr. 19) s teplotní kompenzací pro ocel.



Obr. 19 - Tenzometr řady 1-XY91-6/120 od firmy HBM [30]

Z důvodu kompatibility použitých tenzometrů s používanou měřicí aparaturou u uživatele vícekomponentní měřící jednotky, je vyžadován jmenovitý odpor mřížky tenzometru o hodnotě 350 Ω . Tenzometrické kříže se stejnou geometrií mřížky, řady 1-XY-91-6 od HBM jsou vyráběny u jiných dodavatelů se jmenovitou hodnotou odporu 350 Ω . Tyto tenzometry však nejsou běžně dostupné. Z toho důvodu byly zvoleny ocelové foliové tenzometry typu 1-XY31-6/350 (viz. Obr. 20).



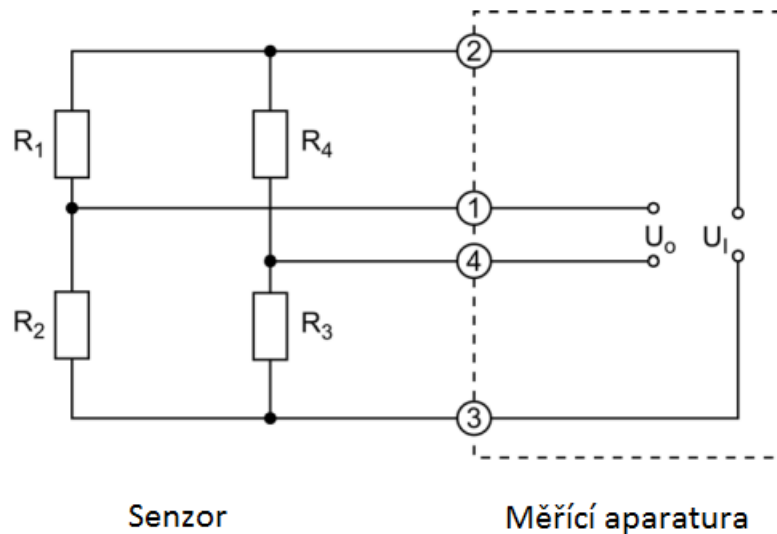
Obr. 20 - Tenzometr řady 1-XY31-6/350 od firmy HBM [30]

3.4 Elektrické zapojení tenzometrů a zpracování signálu

Konstrukce hexapodového siloměru (Obr. 9) by měla zaručit převážně jednoosou napjatost na povrchu měřených deformačních členů. Osa jednoosé napjatosti je v tomto případě rovnoběžná s osou deformačních členů. Tomu bude odpovídat aplikace tenzometrů (umístění, orientace, elektrické zapojení, atd.).

3.4.1 Zpracování signálu z tenzometrů pomocí Wheatstonova můstku

Pro zpracování signálu z tenzometrů se používá zapojení do Wheatstonova můstku. Uvažované schéma zapojení měřících tenzometrů ukazuje Obr. 21, kde je zobrazeno plnomostové zapojení tenzometrů a jejich připojení k měřicí aparatuře.



Obr. 21 - Schéma zapojení tenzometrů do plného Wheastonova můstku

Plnomostové zapojení je pro připojení senzoru síly nejvhodnější. Všechny čtyři odpory tenzometrického můstku jsou tvořeny aktivními tenzometry.

Geometrie můstku je tvořena čtyřmi odpory a dvěma diagonálami. Jedna diagonála je měřící, na druhou je připojený zdroj napájecího napětí. Pro napětí na sousedících odporech R_1 a R_4 platí

$$U_1 = U_B \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (26)$$

$$U_4 = U_B \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (27)$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = U_1 - U_4 = U_{in} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (28)$$

V případě, že odpory R_1 až R_4 tvoří tenzometry aplikované v plnomostovém zapojení na namáhané konstrukci, dochází v závislosti na působícím zatížení ke změnám jejich nominálního odporu a lze psát

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (29)$$

S ohledem na rovnici (23) lze psát

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4), \quad (30)$$

Kde k je součinitel deformační citlivosti.

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (31)$$

A ε_1 až ε_4 jsou relativní prodloužení odpovídajících tenzometrů R_1 až R_4 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (32)$$

3.4.2 Buzení měřícího obvodu

Velikost měřeného napětí na diagonále tenzometrického můstku je závislá na velikosti napájecího napětí.

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4), \quad (33)$$

kde $k=4$ pro plnomostové zapojení.

Pro napájení tenzometrických můstků se obvykle využívá napětí v rozmezí 1 až 12V. Maximální hodnota dovoleného napětí je definována výrobcem a je uvedena v katalogu nebo datasheetu konkrétního typu tenzometru. Při aplikaci je důležité najít kompromis mezi velikostí napájecího napětí a teplotní zátěží tenzometru a monitorovaného objektu, která roste s druhou mocninou napájecího napětí pro stejný referenční odpor můstku.

Tenzometrické můstky je možné budit střídavým i stejnosměrným napětím. Každé z nich nese určité výhody a nevýhody.

- Napájení **Střídavým napětím** – „Principiálně se jedná o amplitudovou modulaci napájecího napětí, která se odvíjí podle změny odporů v ramenech můstku. Na výstupním napětí můstku jsou modulovány měřené hodnoty. Po zesílení výstupního napětí z měřící diagonály je potřeba vyhodnotit signál takzvaným synchronním demodulátorem, který převádí amplitudu a fázi vstupního napětí na stejnosměrné výstupní napětí. Výhodou je potlačení tzv. stejnosměrného driftu (pomalé změny výstupního napětí dané teplotní nestabilitou nuly zesilovače, parazitními termoelektrickými jevy v kabeláži a na konektorech atd.). Při demodulaci je navíc

možné potlačit rušivé frekvence na výstupním signálu můstku. Demodulátor pracuje s pevnou nosnou frekvencí.“ [22].

Při buzení tenzometrického můstku střídavým napětím je vhodné použít kroucenou přívodní kabeláž. V případě použití jednoduchých vodičů hrozí nebezpečí vzniku parazitních napětí v trase přívodních vodičů.

- Napájení **stejnoseměrným napětím** – současná analogová technika umožňuje generovat konstantní a stálé stejnosměrné napětí potřebné pro dosažení nezkrácených hodnot měřeného výstupního napětí na měřící diagonále. Výhodou stejnosměrného napájení můstku je rozšíření měřitelného signálu do frekvencí až desítek kHz. S rostoucí frekvencí však roste i vliv parazitních kapacit a indukčností kabeláže a dalších částí obvodu.

3.4.3 Rozlišení převodníků

V současnosti používají měřící aparatury minimálně 16-bitové AD převodníky, které zajišťují rozlišitelnost 65 tis. bodů. Pokud uvedené rozlišení AD-převodníku aplikujeme na rozsah měřené veličiny, bude mít měřící zařízení rozlišení 0,02% měřeného rozsahu. Vzhledem k předpokladu použití 24-bitového AD převodníku je chyba způsobená rozlišitelností převodníku zanedbatelná.

3.5 Kompenzace parazitních vlivů vícekomponentního snímače

3.5.1 Kompenzace parazitních silových účinků

3.5.1.1 Zatížení způsobené vlastní hmotností zařízení

Navržené zařízení může být z důvodu potřebné tuhosti a rozsahu měřených sil velmi robustní. Hmotnost celého zařízení se pohybuje v desítkách kg. Tenzometry použité pro měření prodloužení deformačních členů měří v závislosti na poloze nainstalovaného zařízení silové účinky gravitačního pole Země a setrvačné účinky při pohybu měřícího zařízení. Účinky gravitace lze při statickém měření kompenzovat vynulováním měřené hodnoty po instalaci měřícího zařízení. U setrvačných účinků je nutné provést korekci výpočtem setrvačných sil nebo měřením zrychlení.

3.5.1.2 Předepjatost deformačních členů

V případě, že deformační členy jsou se základnami spojeny svářením, vzniká v oblasti svaru napjatost, kterou lze kompenzovat vynulováním výstupního signálu zařízení před

začátkem měření. Další možností je použití jiného způsobu spojení deformačních členů a základen.

3.5.1.3 Spojení základny měřícího zařízení s měřeným objektem

Spojení pohyblivých částí stroje generujících zatížení se základnou siloměru musí být dostatečně pevné, aby nedošlo k uvolnění nebo narušení spojovacích členů. Obvykle se pro spojení základny s částí stroje využívají šrouby. Ty musí být utaženy definovaným momentem stanoveným na základě předpokládaného zatížení. V případě nedostatečného dotažení šroubů může důsledkem vzniklé vůle dojít k poruše spoje nebo chybnému vyhodnocení naměřených hodnot.

3.5.1.4 Vliv prostředí měřícího procesu

Na výstupní signál tenzometrických siloměrů může působit řada vnějších vlivů. Nejobvyklejším je změna teploty ovlivňující odezvu tenzometrů. Tu je možné kompenzovat vhodným zapojením podle kap. 3.5. Dále je nutné dbát zvýšené pozornosti na elektromagnetické vlastnosti prostředí, ve kterém je měřící zařízení používáno. Pro spolehlivé měření musí být celý měřící řetězec v daném prostředí elektromagneticky kompatibilní. Vliv elektromagnetických vlastností prostředí bude podrobněji rozepsán v kapitole 5.

3.5.2 Kompenzace příčné citlivosti tenzometrů

Příčná citlivost – „U tenzometru by mělo docházet ke změně odporu a tím i k přetvoření pouze v tzv. „aktivní délce“. Někdy však může nastat situace, kdy dochází k deformaci i ve směru příčném k aktivní délce. Tento jev se nazývá příčná citlivost. Druhým vlivem souvisejícím s příčným přetvořením je zúžení v oblasti aktivní délky mřížky vlivem příčné kontrakce materiálu. Tento efekt způsobuje malou zápornou změnu odporu pro kladné přetvoření. Příčná citlivost je kompenzována vhodným zapojením použitých tenzometrů do Wheatstoneova plnomostu.“ [22].

3.5.3 Teplotní kompenzace tenzometrů

Výhodou plnomostového zapojení je, že v případě použití identických tenzometrů měřících za stejných podmínek je dosažena úplná kompenzace změn teploty.

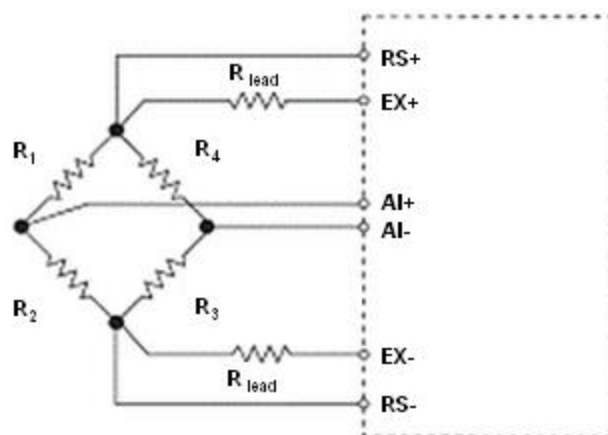
$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1 + \Delta R_p}{R_1} - \frac{\Delta R_2 + \Delta R_p}{R_2} + \frac{\Delta R_3 + \Delta R_p}{R_3} - \frac{\Delta R_4 + \Delta R_p}{R_4} \right) \quad (34)$$

kde ΔR_p je parazitní přírůstek změny odporu vlivem změn teploty. Díky tomu, že použité tenzometry jsou stejné, jsou i jednotlivé parazitní změny odporů tenzometrů stejné a navzájem se kompenzují.

Zapojení s plným tenzometrickým mostem se využívají pro měření s vysokými požadavky na přesnost a dlouhodobou stabilitu. Nevýhodou plnomostového zapojení je prostorová náročnost.

3.5.4 Kompensace vlivu přívodních vodičů

Změny odporu tenzometru jsou velmi malé, řádově $m\Omega$. V oblasti malých změn odporů je důležité vyloučit vliv odporu přívodních vodičů a dalších zdrojů, například termoelektrických napětí vznikajících na styku tenzometru s přívodním vodičem k měřicímu obvodu. Pro korekci vlivu odporu přívodních vodičů se v závislosti na typu můstkového zapojení (čtvrtmost, půlmost, plnomost) využívá vícevodičového zapojení. Pro kompenzaci přívodních vodičů plných mostů se obvykle využívá šestivodičového zapojení. Šestivodičové zapojení ilustruje Obr. 22.



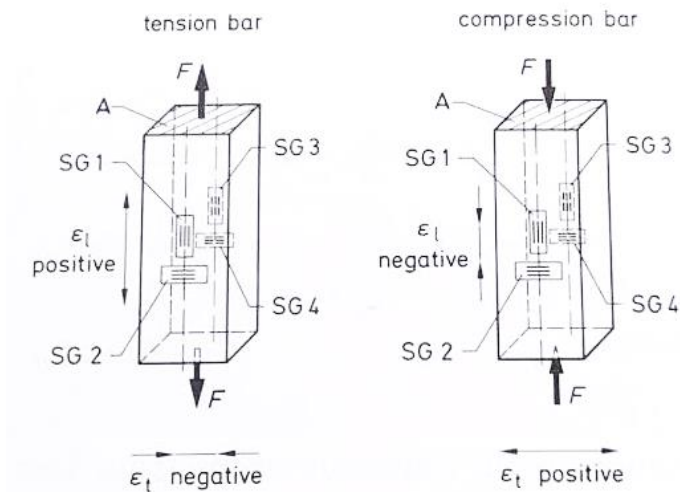
Obr. 22 - Šestivodičové zapojení tenzometrického plnomostu [21]

3.6 Rozmístění tenzometrů

Rozmístění tenzometrů na povrchu deformačních členů je definováno tak, aby vyhovovalo požadavkům na kompenzaci parazitních silových účinků.

3.6.1 Návrh konfigurace měřících tenzometrů

V uvažované aplikaci bude použita konfigurace plnomostového zapojení pro měření axiální síly s kompenzací teploty a parazitních napětí. Konfiguraci použitého zapojení ukazuje Obr. 23.



Obr. 23 - Zrcadlové zapojení tenzometrických křížů pro měření axiálního zatížení [9]

S ohledem na požadavek měření axiální síly bude pro zapojení tenzometrů použito schéma znázorněné na Obr. 22. Zrcadlové zapojení dvojice tenzometrů situovaných do kříže popisuje následující vztah

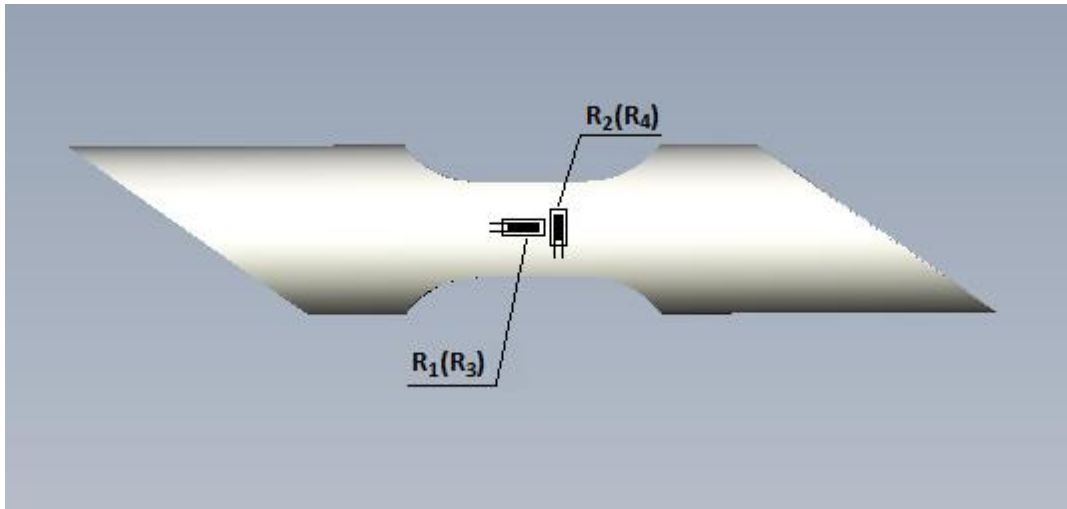
$$\varepsilon_i = 2(\varepsilon_L + \varepsilon_T) = 2(1 + \nu)\varepsilon_L \quad (35)$$

kde ε_L je podélná deformace a ε_T je příčná deformace měřená na tenzometru 1 (3)

V případě použití tenzometrů ze stejné sady se zapojení vyznačuje kompenzací ohybového namáhání, velmi dobrou kompenzací teplotní nelinearity tenzometrů a dobrým zesílením měřeného signálu.

3.6.2 Výsledné rozmístění použitých tenzometrů

Výsledné rozmístění použitých tenzometrů ilustruje Obr. 24. Na každém ze šesti deformačních členů jsou aplikovány dvě dvojice stejných tenzometrů umístěných do středu deformačního členu. Tenzometry jsou aplikovány naproti sobě na protilehlé vnější plochy. Z principu hexapodu plyne, že při zatěžování měřícího zařízení bude docházet k axiálnímu zatěžování deformačních členů. Elektrické zapojení tenzometrů ukazuje Obr. 24.



Obr. 24 – Schéma umístění tenzometrů na deformačním členu

4 Kalibrace šestikomponentního zařízení

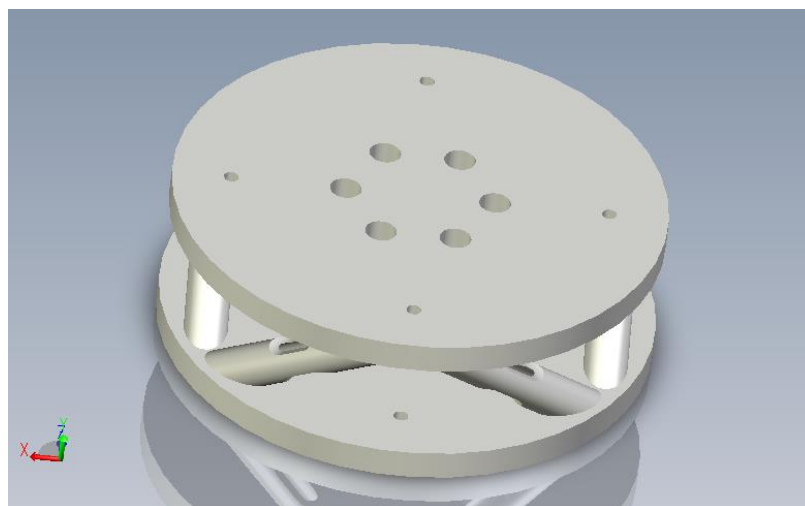
Konkrétní geometrie a konfigurace hexapodového siloměru vyžaduje kalibraci, která vyjadřuje rozdíl reálné odezvy měřicího zařízení oproti teoretickým předpokladům plynoucím z geometrie snímače. Kalibrace zahrnuje zatěžování siloměru definovanou kombinací sil a momentů. Pro zjištění matice tuhosti (viz. rovnice 19) je nutné provést minimálně 6 kalibračních měření s lineárně nezávislým rozložením složek obecného zatížení.

Při kalibraci jsou stejně jako při měření sledovány především změny měřených hodnot. Z důvodů popsaných v kap. 3.5.1. dochází k zatížení siloměru v klidovém stavu, proto každý deformační člen vykazuje nenulovou měřenou sílu i v nezatíženém stavu. Změna měřené síly by měla odpovídat teoretickým hodnotám bez ohledu na počáteční stav.

4.1 Popis kalibrovaného zařízení

Jak je uvedeno v kap. 2.4.2, Rozsah a citlivost snímače na konkrétní složky zatížení lze měnit vhodnou konfigurací deformačních členů. Základny by měly být co nejlehčí, aby samy o sobě nezatěžovaly deformační členy. Zároveň musí být dostatečně tuhé, aby při zatěžování nebyly deformovány.

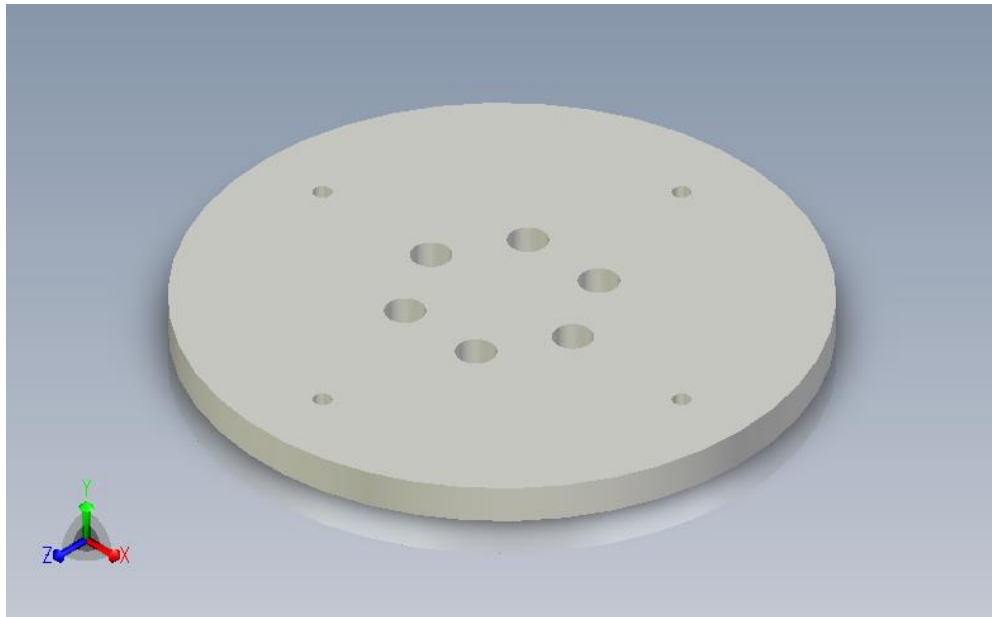
Pro návrh kalibrace měřících členů byl definován snímač na Obr. 25. Snímač je tvořen dvěma protilehlými kruhovými základnami a šesti trubkovými deformačními členy spojenými svářením.



Obr. 25 - Sestava hexapodového siloměru

4.1.1 Základny

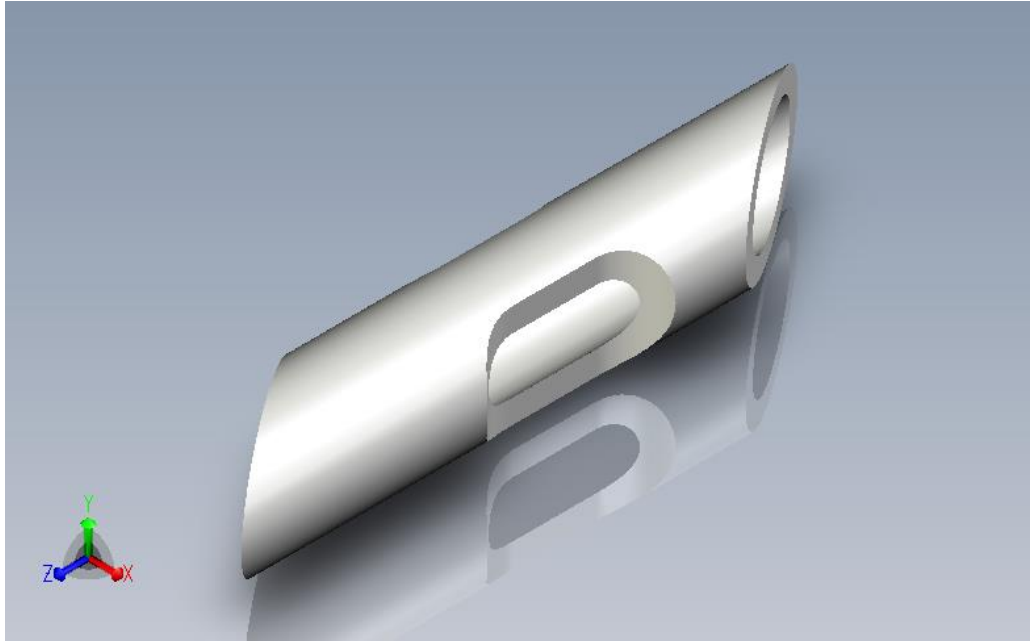
Na Obr. 26 je model základny snímače. Základna je kruhového tvaru s průměrem 500 mm. Tloušťka základny je 30 mm vzhledem k požadavku na tuhost. Na soustředné kružnici o poloměru 150 mm je v úhlové vzdálenosti 60° rozmístěno šest děr o průměru 32 mm, které slouží k instalaci snímače při zkouškách. Ve vzdálenosti 190 mm jsou v základně rozmístěny 4 díry o průměru 15 mm, které vhodným spojením s měřenou konstrukcí slouží pro definici směru měřených sil.



Obr. 26 - Základna hexapodového siloměru

4.1.2 Deformační členy

S ohledem na předpokládaný charakter zatěžování jsou deformační členy navrženy pod vnitřním úhlem vůči základně 35,2°. Deformační člen je navržen z trubky o délce 243 mm, průměru 44,5 mm a tloušťce stěny 6,3 mm. Použitý materiál je ocel podle ČSN 11 353. Deformační člen ukazuje Obr. 27.



Obr. 27 - Deformační člen hexapodového siloměru

Deformační člen je upraven frézováním, jak ukazuje Obr. 27. Tím je zeslaben, aby při jeho namáhání docházelo k deformaci vybroušené části deformačního členu namísto oblastí v okolí svaru.

4.2 Princip kalibrace

V kap. 2.7 je odvozena teoretická matice tuhosti navrženého zařízení pro měření zatížení. Podobu matice tuhosti ukazuje rovnice (36), kalibraci měřícího zařízení lze získat jejím vyjádřením.

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_x \\ \vec{F}_y \\ \vec{F}_z \\ \vec{M}_x \\ \vec{M}_y \\ \vec{M}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |F_1| \\ |F_2| \\ |F_3| \\ |F_4| \\ |F_5| \\ |F_6| \end{pmatrix}, \quad (36)$$

V případě, že na měřící zařízení bude aplikováno známé zatížení, lze pozorovat odezvu deformačních členů v podobě měřené síly. Pro zjištění kompletní reakce je nutné zařízení vystavit šesti lineárně nezávislým působením obecného zatížení. Nejjednodušší případ lineárně nezávislých stavů zatěžování nastává v případě, kdy na měřící zařízení postupně působí čistě jednokomponentní zatížení. V případě, že bude zařízení postupně namáháno jednotlivými složkami F_x , F_y , F_z , M_x , M_y a M_z a v případě, že ostatní složky zatížení budou nulové, bude

nezávislosti jednotlivých zatížení dosaženo. Tím z rovnice (36) vyplyne šest jednotlivých rovnic o šesti neznámých, díky kterým je možné síly F_x , F_y , F_z , a momenty M_x , M_y a M_z napsat jako funkci měřených sil F_1 až F_6 .

Dosažení čistě jednokomponentního zatížení je bez speciálního přípravku obtížně dosažitelné. Konstrukční návrh přípravku a celý detailní postup kalibrace přesahuje rámec předkládané práce.

Pro provedení kalibrace bude použita certifikovaná zkušebna.

4.3 Stanovení nejistoty zařízení

Nejistoty měření jsou součástí výsledku měření. Pro plnohodnotné aplikování měřicího zařízení je nutné znát nejistotu, se kterou jsou naměřené hodnoty získány. Celková nejistota zařízení se skládá z nejistoty typu A a nejistoty typu B.

4.3.1 Nejistota typu A

Nejistotu typu A lze získat statistickou analýzou naměřených hodnot z opakovaných měření, zpravidla určením směrodatné odchylky hodnoty aritmetického průměru série stejné veličiny. Nejistota typu A je ovlivněna náhodnými vlivy.

$$u_A(x) = \bar{\sigma}(\bar{X}) = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}} = \left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

Kde

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (38)$$

kde $\bar{\sigma}(\bar{X})$ je odhad směrodatné odchylky aritmetického průměru \bar{X} , $\bar{\sigma}$ je směrodatná odchylka jednotlivých měření a n je počet měření. Nejistota typu A je způsobena rozptylem naměřených údajů. Počet opakovaných měření by měl být větší než deset, protože jinak není možné učinit kvalifikovaný odhad.

Pokud není k dispozici potřebný počet měření, lze použít korigovanou nejistotu u_{Ak}

$$u_{Ak} = k \cdot (\bar{\sigma}(\bar{X})) \quad (39)$$

kde k je koeficient závislý na počtu opakovaných měření. Hodnoty koeficientu k pro různé počty opakovaných měření jsou v následující tabulce:

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

4.3.2 Nejistota typu B

Nejistota typu B se odhaduje na základě dostupných skutečností a zkušeností. Skládá se zpravidla z dílčích složek, které uvádí výrobce, kalibrační list nebo jsou zjištěny jiným způsobem. Nejčastěji lze do stanovení nejistoty typu B použít

- Údaje výrobce (datasheet použitého zařízení)
- Zkušenosti z předchozích měření
- Znalosti a poznatky chování materiálů
- Údaje získané při kalibraci

Výslednou nejistotu typu B lze stanovit geometrickým součtem jednotlivých komponent

$$u_B = \left[\sum_{i=1}^n u_{b,i}^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (40)$$

4.3.3 Kombinovaná nejistota typu C

Kombinovaná standardní nejistota typu C se získá sloučením standardní nejistoty typu A (u_A) s výslednou standardní nejistotou typu B (u_B)

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}, \quad (41)$$

Hodnota této nejistoty říká, že měřená hodnota je podle normálního (Gaussovo) rozdělení pravděpodobnost ovlivněna nejistotou $\pm u_C(x)$ s přibližně 68% pravděpodobností.

Pro zvýšení pravděpodobnosti se používá rozšířená nejistota

$$U = k \cdot u_C \quad (42)$$

kde k je koeficient rozšíření. Míru spolehlivosti stanovené nejistoty v závislosti na koeficientu rozšíření udává Tab. 4

Tab. 4 - Závislost úrovně spolehlivosti stanovení kombinované nejistoty v závislosti na koeficientu rozšíření

K	1	2	3
Úroveň spolehlivosti	68%	95%	99,7%

Kalibrace měřícího zařízení by měla obsahovat údaj o nejistotě. Po stanovení kalibrace měřícího zařízení je možné provedením dalších měření s různou konfigurací komponent obecné napjatosti spočítat odchylku změřených hodnot od reálně působícího zatížení. V případě dostatečného množství měření je možné stanovit nejistotu typu A měřícího zařízení pro každou složku testované odezvy.

5 Elektromagnetické vlastnosti zařízení

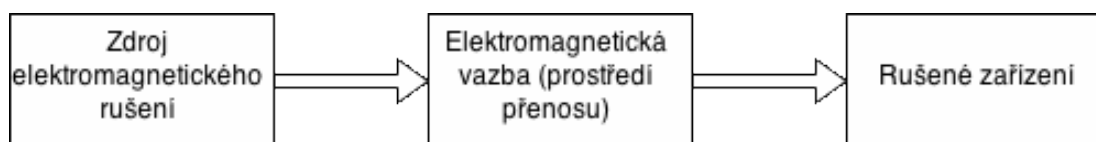
Měřicí zařízení s tenzometry je pasivního charakteru, jeho funkce je závislá na připojení k měřicímu zesilovači, který obstarává vstupní napájecí signál a zároveň měří výstupní signál na měřící diagonále tenzometrických mostů. Výstupní signál je v řádu mV. Při zpracování nízkourovňového signálu je potřebné předcházet možnému rušení a ovlivňování měřené veličiny.

5.1 Elektromagnetická kompatibilita

Je-li posuzována spolehlivost naměřených hodnot, nezanedbatelný vliv mají tzv. náhodné jevy, způsobené zčásti neznámými vlastnostmi okolního prostředí. S rozvojem elektroniky významně stoupá počet elektronických zařízení v našem okolí. Společně s tím stoupá i rušení v kmitočtových pásmech až do stovek GHz. Významem rušivého elektromagnetického pole se zabývá elektromagnetická kompatibilita – EMC. Ta je rovnocenná spolehlivosti systému. Obecně platí, že jakýkoli systém bude nepoužitelný, nebude-li v provozu elektromagneticky kompatibilní bez ohledu na jeho spolehlivost.

EMC je schopnost zařízení správně fungovat v prostředí se zdroji elektromagnetického záření. Zároveň svou funkcí nesmí nepřipustně ovlivňovat ostatní zařízení v dosahu vyzařování vlastního pole. Kompatibilita vyjadřuje schopnost současné funkce – koexistence různých zařízení provozovaných ve společném elektromagnetickém poli, aniž by došlo k nepřipustnému ovlivnění jejich běžné funkce.

Obr. 28 ukazuje základní řetězec EMC. Ve skutečnosti je obvykle situace složitější, protože rušené zařízení může být zároveň zdrojem rušení pro okolní zařízení. Zjednodušeně se za zdroj rušení považuje zařízení s vyšší úrovní rušení a za zařízení rušené zařízení s nižší úrovní rušení.



Obr. 28 - Řetězec elektromagnetické kompatibility [24]

5.1.1 Vznik elektromagnetického rušení

Součástí některých elektronických zařízení a přístrojů jsou elektronické obvody, které mohou na určitých frekvencích pracovat na vysokých výkonových úrovních a tím při normální funkci mohou ovlivňovat ostatní zařízení.

Konkrétně se jedná se například o:

- motory, spínače, relé
- energetické rozvody
- polovodičové měniče
- obloukové pece, svářečky
- elektrostatické výboje
- generátory signálů
- generátory obrazových a vysokofrekvenčních impulzů
- výkonové vysokofrekvenční, nízkofrekvenční a impulzních zesilovače.

Tyto obvody pracují s poměrně vysokým výkonem úrovně generovaného signálu. Koexistující zařízení s citlivými přijímači, zesilovači signálu, či jinými částmi zpracovávajícími nízké úrovně signálu, mohou být ovlivněny. K rušivému působení dochází v důsledku elektromagnetické interakce dvou nebo více obvodů, pracujících s rozdílnou úrovní výkonu signálu. Tento rozdíl může být až v řádech stovek dB. Zároveň s rostoucí úrovní výkonu signálu roste pravděpodobnost ovlivnění.

5.1.2 Prostředí elektromagnetické vazby

Při posuzování EMC je důležité zkoumat prostředí vazby jako celek. To znamená zkoumat vzájemné vazby všech zařízení v posuzovaném prostoru. Je sice možné postupovat tak, že jedno zařízení je považováno za zdroj a primárně je zkoumán jeho vliv na okolní zařízení, ale poté je třeba i toto zařízení považovat za ovlivňované a zhodnotit důsledky jeho ovlivnění všemi ostatními systémy.

5.1.3 Možnosti zvýšení EMC

Základní řetězec EMC na Obr. 28 ukazuje základní bloky elektromagnetického rušení a vazbu mezi nimi. Pokud některá část tohoto řetězce neexistuje, ztratí posuzování EMC smysl a zařízení či prostředí se stane dokonale kompatibilním. Proto je při potlačování rušivých signálů zaměřena pozornost na eliminování vlivu jednotlivých komponent řetězce EMC. V praxi je při pokusech o zvýšení EMC obvyklé zaměřit se na eliminaci vlivu zdroje rušení. Nejsnazším

způsobem je úprava prostředí elektromagnetické vazby přidáním vhodných překážek, které rušivý signál odkloní nebo pohltí. Při zvyšování elektromagnetické kompatibility je možné se zaměřit na omezení elektromagnetické interference (rušení) zdrojů nebo za zvýšení elektromagnetické susceptibility (odolnosti) rušeného zařízení.

5.1.3.1 *Potlačení elektromagnetického rušení*

Pro omezení rušivého elektromagnetického signálu se obvykle posuzují následující body.

- **Elektromagnetická interference (EMI)** – omezení vlivu rušení rušícího zařízení. Omezení se dosahuje technickými opatřeními na straně zdroje elektromagnetického rušení. Nedílnou součástí EMI je identifikace, měření a popis zdrojů rušení a jejich vlivu ve zkoumaném prostředí. Na to navazuje odstraňování odhalených příčin rušení.
- **Elektromagnetická susceptibilita (EMS)** – zvýšení schopnosti rušeného zařízení pracovat v prostředí se zdroji elektromagnetického rušení bez poruch nebo se známým přípustným vlivem. EMS se věnuje omezování důsledků rušení bez ohledu na příčinu. Prakticky se podobně jako u zdrojů rušení řeší technické prostředky omezující rušivé signály. V tomto případě na straně rušeného zařízení.

5.1.3.2 *Zvýšení elektromagnetické odolnosti*

Při vývoji zařízení citlivých na elektromagnetické rušení je ekonomičtější provést opatření zvyšující elektromagnetickou odolnost již ve fázi návrhu. Proto je při vývoji prováděno testování elektromagnetické odolnosti či počítačové simulace a modelování obou složek EMC. Při testování se obvykle využívá simulátorů rušení – praktického ověřování odolnosti navrženého zařízení pomocí definovaných rušivých signálů. Pro simulace existují SW produkty schopné předpovědět chování navrženého zařízení v uživatelem definovaném prostředí.

Z důvodu složitosti problematiky EMC definuje státní správa normy a předpisy určující potřebnou odolnost konkrétních zařízení a způsob a podmínky jejich testování. Soubor těchto normativních dokumentů obsahující komplexní poznatky na poli EMC tvoří předpoklady k řešení problémů souvisejících s ovlivňováním funkce technických zařízení v méně či více elektromagneticky agresivním prostředí.

5.1.4 **Posouzení měřícího zařízení v prostředí provozu**

Posuzované měřící zařízení pracuje s nízkourovňovým napěťovým signálem. Pro obsluhu měřícího zařízení je použita běžná měřící aparatura, dostupná na českém trhu, měřící řetězec by teoreticky měl splňovat podmínky elektromagnetické kompatibility.

Pro oficiální potvrzení splnění podmínek EMC je nutné využít služeb akreditované testovací laboratoře v dané oblasti měření.

Zvýšené pozornosti je třeba dbát na elektromagnetickou odolnost měřícího zařízení. V prostředí provozu měřícího zařízení nelze vyloučit rušivé působení

- elektrických motorů
- spínaných napájecích zdrojů
- elektrostatických výbojů a důsledků úderu blesku

Elektromagnetické rušení lze vhodnými prostředky omezit. V první řadě je nutné rozlišit, zda se jedná o rušení šířící se po vedení nebo rušení šířící se vyzařováním. Pro zvýšení odolnosti vůči rušení šířícímu se po vedení lze využít tzv. odrušovacích prostředků (např. odrušovací tlumivky, odrušovací kondenzátory, odrušovací LC filtry, atd.) Pro zvýšení odolnosti vůči rušení šířícímu se vyzařováním lze použít vhodně navržené elektromagnetické stínění náchylných částí. Pro zvyšování odolnosti vůči elektrostatickým výbojům nebo důsledkům úderu blesku lze využít přepěťových ochranných prvků.

5.1.5 Doporučení pro použití zařízení v prostředí provozu

S ohledem na rizika elektromagnetického rušení je při používání zařízení pro měření zatížení vhodné

- Předcházet jeho umístění do bezprostřední blízkosti zdrojů rušení.
- Používat stíněné přívodní vodiče (měřící i napájecí). Umístit zařízení do uzemněného vodivého obalu.
- Oddělit zařízení od elektrické rozvodné sítě napájením měřící aparatury z nezávislého zdroje energie.

Pro bližší posouzení vlastností měřícího zařízení by bylo vhodné prakticky otestovat jeho chování při působení konkrétních rušivých elektromagnetických vlivů podle níže uvedených standardů.

- Test odolnosti měřícího řetězce na poklesy a výpadky napájení dle standardu IEC EN 61000-4-11
- Test odolnosti zařízení vůči elektrostatickým výbojům dle standardu ČSN EN 61000-4-2
- Test odolnosti zařízení vůči EFT Burst rušení dle standardu ČSN EN 61000-4-4
- Test odolnosti vůči rázovým pulzům Surge dle ČSN EN 61000-4-5

- Testy vyzařování měřícího řetězce do napájecího vedení

Pro reálné testování je vhodné využít externí testovací laboratoře specializované v oblasti EMC.

6 Možnosti využití měřicího zařízení při zkouškách ocelových svařovaných konstrukcí

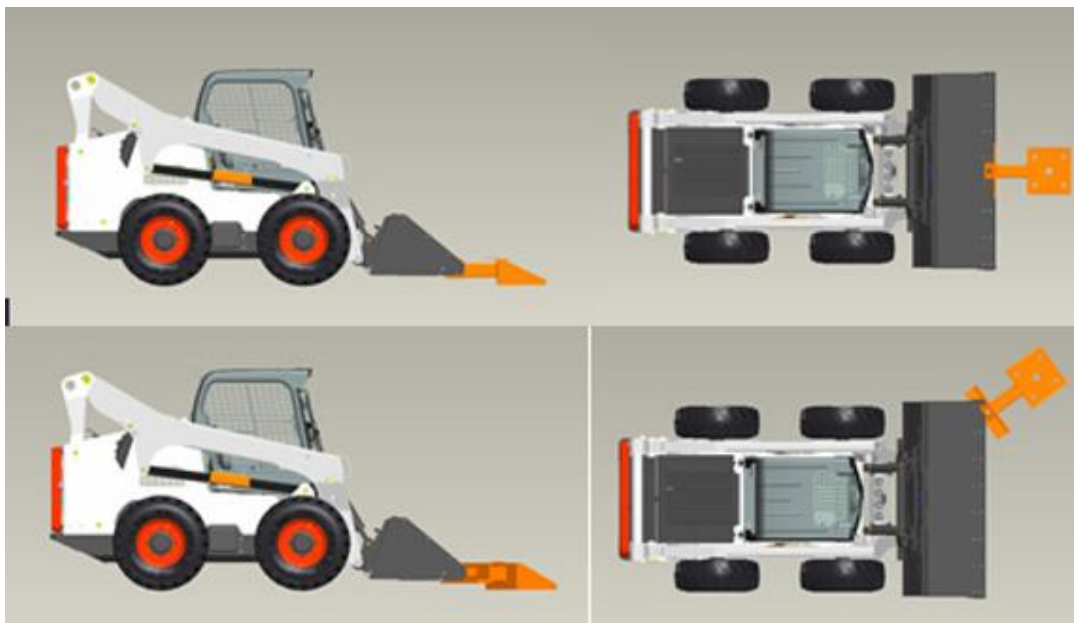
Důvodem požadavku měřicího zařízení pro měření obecného zatížení bylo jeho uplatnění při zkouškách únavové životnosti ocelových svařovaných konstrukcí a při specifikačních zkouškách pozemních strojů.

6.1 Aplikace měřicího zařízení

Při zkouškách životnosti ocelových svařovaných konstrukcí pozemních strojů je konstrukce postupně vystavována zatěžování obecného charakteru podle předpokladu normovaného zákazníka. Součástí souboru zatěžovacích testů jsou statické laboratorní zkoušky.

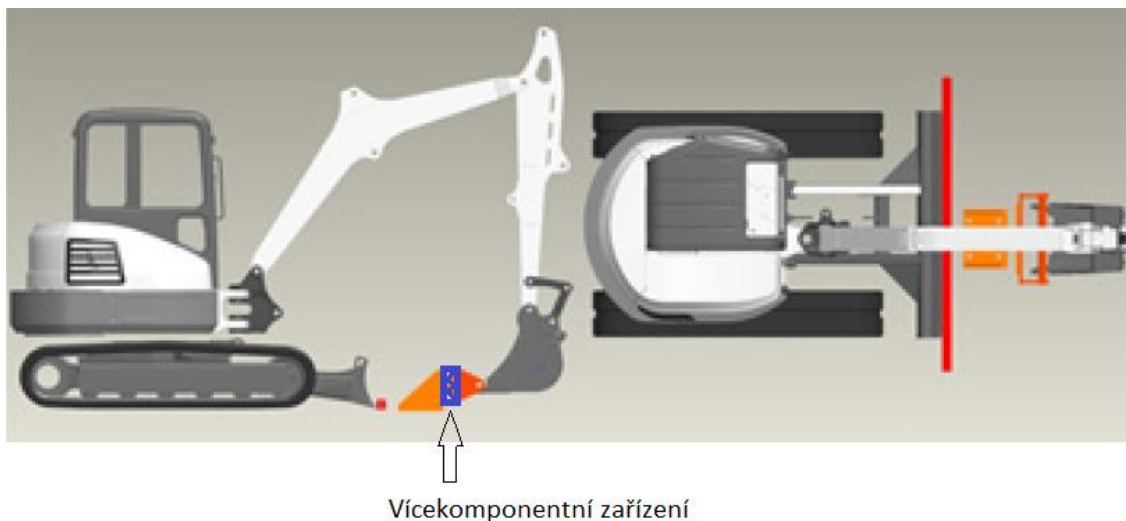
6.1.1 Statické laboratorní zkoušky pro stanovení únavové životnosti

Konstrukce pozemního stroje je postupně namáhána pro extrémní případy namáhání. Zkouška je koncipována tak, že v jednotlivých krocích je pracovní skupina stroje definovaným způsobem pevně uchycena k podlaze a hydraulický obvod pracovní skupiny je nastaven k pohybu. Tím dojde k zatížení konstrukce mezi bodem upevnění a příslušnými hydraulickými válci. Na namáhanou konstrukci jsou zpravidla aplikovány tenzometry, které slouží ke sběru dat k vyhodnocení únavové životnosti konstrukce stroje. Příklad statické zkoušky ukazuje Obr. 29.



Obr. 29 - Příklad statického zatěžování konstrukce pozemního stroje [29]

Navržené zařízení pro měření vícekomponentního zatěžování je obvykle umístěno v bodě spojení pracovní skupiny stroje s podlahou a monitoruje charakter obecného namáhání v průběhu zkoušky. Příklad použití ukazuje Obr. 30.



Obr. 30 - Příklad použití vícekomponentního měřícího zařízení [29]

6.1.2 Cyklické laboratorní zkoušky pro stanovení únavové životnosti

Konstrukce pozemního stroje nebo její část je uchycena k hydraulickému zatěžovacímu zařízení konfigurovanému pro kontinuální cyklické namáhání konstrukčního prvku za účelem vyhodnocení únavové životnosti.

Vícekomponentní měřící zařízení je v závislosti na konkrétní aplikaci spojeno s testovaným konstrukčním prvkem v oblasti obecného namáhání. Vícekomponentní měřící zařízení slouží k vyhodnocení obecného namáhání a případně jako vstupní signál pro regulační prvky hydraulického mechanismu.

6.2 Vlastnosti a omezení měřícího zařízení

Vícekomponentní měřící zařízení je použitelné v požadovaných aplikacích. Výstupní veličina ve formě analogového signálu je vhodná k rychlému sběru a vyhodnocení dat i k regulaci obvodu zatěžovacího mechanismu. Konstrukce zařízení umožňuje vysoký počet námahových cyklů. Nevýhodou je relativně velká hmotnost zařízení, ze které plyne ovlivnění měřeného zatížení vlastní hmotností. Kompenzace vyžaduje korekci výpočtem.

7 Závěr

V diplomové práci byly ve spolupráci se zadavatelem definovány požadavky na měřící zařízení určené pro analýzu zatížení ocelových svařovaných konstrukcí. V souvislosti s definovanými požadavky byly posouzeny vhodné koncepce zařízení pro měření šestikomponentního zatížení ocelových konstrukcí a došlo ke zhodnocení a výběru koncepce pro návrh konkrétního měřícího zařízení – hexapodu. Hexapod je schopný převést obecné složky zatížení na soustavu axiálních sil působících ve směru jednotlivých deformačních členů. Rozsah a citlivost na jednotlivé složky obecného zatížení jsou jednoduše konfigurovatelné změnou geometrie hexapodu.

Pro měření působící síly v ose deformačního členu byly vybrány foliové odporové tenzometry typu 1-XY-91-6 od HBM. Na jednotlivých deformačních členech je navrženo plnomostové zapojení, které kompenzuje vliv teploty, příčnou citlivost použitých tenzometrů a parazitní ohybové a smykové zatížení. Pro korekci vlivu odporu přírodních vodičů bylo použito šestivodičové zapojení. Návrh tenzometrického mostu byl dle požadavků zadavatele přizpůsoben pro připojení k průmyslové měřící aparatuře vhodné ke zpracování a vyhodnocení výstupních signálů.

Odezvu hexapodu na působení obecného zatížení charakterizuje matice 6×6 , která je závislá na konstrukčním řešení hexapodu. Pro zjištění jednotlivých prvků matice tuhosti je nutné zařízení vystavit šesti známým lineárně nezávislým stavům zatížení. To je bez speciálního přípravku těžko dosažitelné. Z toho důvodu je pro kalibraci hexapodového zařízení vhodné využít certifikovanou kalibrační laboratoř. Uvedené řešení je výhodnější než výroba a provoz zařízení pro kalibraci vícekomponentního zatížení.

U navrhovaného vícekomponentního zařízení byly posouzeny elektromagnetické vlastnosti a vlastnosti prostředí, ve kterém bude zařízení používáno. Byly posouzeny a navrženy možnosti zvýšení elektromagnetické odolnosti vícekomponentního zařízení. Pro certifikované posouzení elektromagnetické kompatibility je nutné využít externí testovací laboratoř.

Hexapodové měřící zařízení bylo navrženo pro statické, dynamické a únavové zkoušky ocelových svařovaných konstrukcí a pro specifikační zkoušky malých pozemních strojů. Hexapodový siloměr je při vhodném spojení s testovaným konstrukčním prvkem schopný měřit obecné zatížení.

8 Použité zdroje

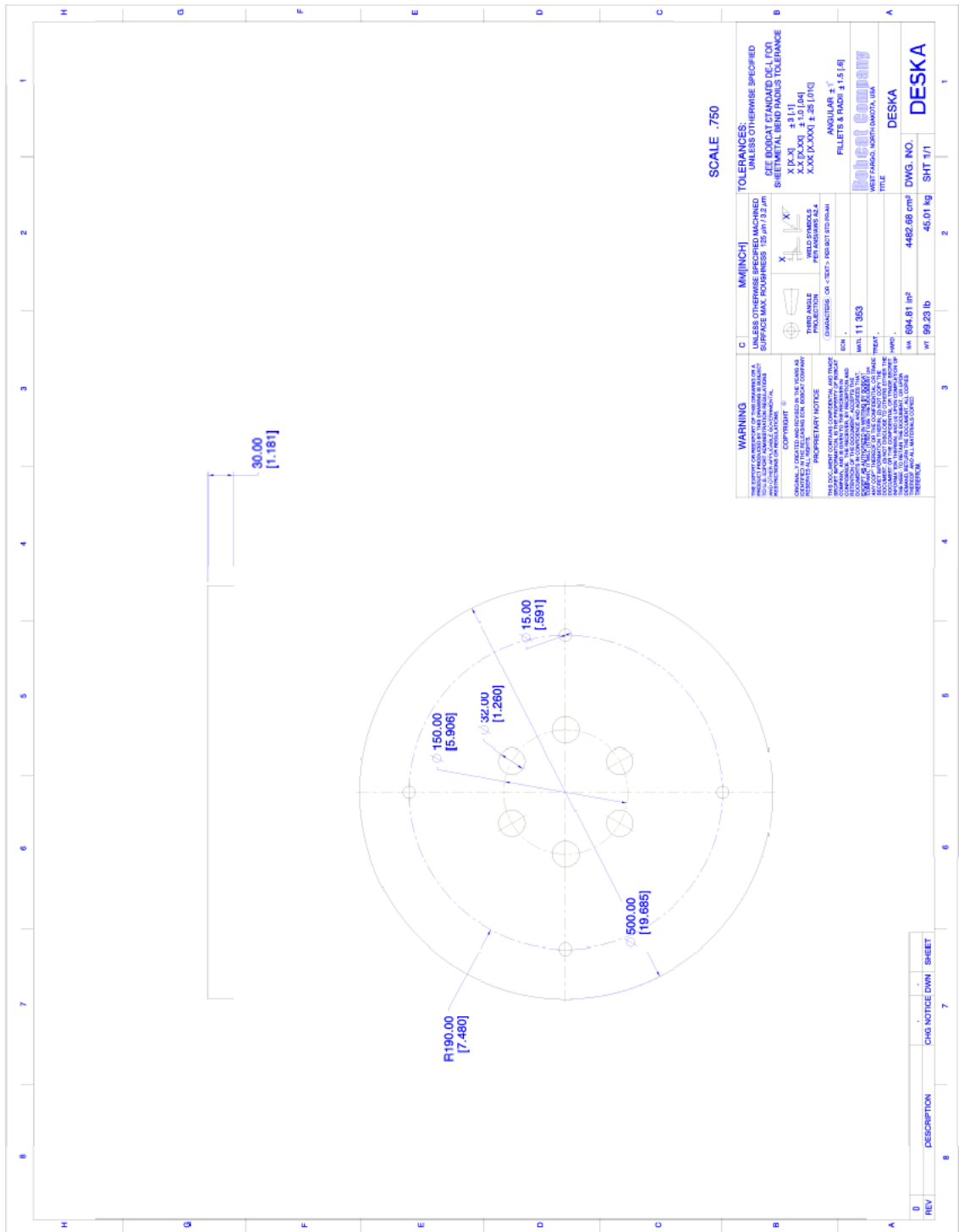
- [1] BAUER, David. 2009. *KRITÉRIA VÍCEOSÉ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI* [Online]. Brno [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17333.
Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [2] MICHALEC, Jiří. 2009. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 308 s. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [3] VÍTEK, Vítězslav. 2014. *Projekt 2: Teoretický rozbor metodiky firmy Bobcat pro stanovení únavové životnosti ocelových svařovaných konstrukcí - sběr a zpracování dat*. Praha.
- [4] RIPKA, Pavel. 2010. *Senzory síly a tlaku* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A5M38SZS/03_sila%20a%20tlak_IB.pdf
- [5] *How to form strain gage bridges* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/clanky/odpor_ten/schema_tenzometry.pdf.
- [6] *Princip měření FBG snímačem* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.kompozity.info/index.php?pr=44&uid=9999>.
- [7] *Snímače tlaku a síly* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/snimace%20sily.pdf>.
- [8] *Odporové snímače síly* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/sila/sila_odporove_snimace.htm.
- [9] HOFFMANN, Karl. 1989. : *An Introduction to Measurements using Strain Gages*, HBM Darmstadt.
- [10] JANÍČEK, Přemysl. 1989. *Technický experiment: [určeno pro posl. fak. strojní]*. 1. vyd. Praha: MON, 384 s. ISBN 80-214-1011-6
- [11] *How multi-axis load cells and sting balances work: The relationship between sting balances and multi-axis transducers* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.sensorsolutions.co.uk/news/multi-axis-load-cells-and-sting-balances>.
- [12] HOFFMAN, Benjamin. 2013. *Six-Component Load Cell Design for Use in Force Measurement Platforms* [online]. Ohio [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: https://etd.ohiolink.edu/%21etd.send_file?accession=osu1383950379&disposition=inline. Thesis. The Ohio State University.
- [13] VACULÍKOVÁ, P. 1998. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 504 s. ISBN 80-716-9568-8.

- [14] HUDLEMEYER, Aaron A. a Jonathan W. NAUGHTON. 2009. *A Hexapod-Based Thrust Balance* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://enu.kz/repository/2009/AIAA-2009-795.pdf>.
- [15] *Modular Hexapod System for Fast, Economic and Precise Positioning* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.newsmax.de/modular-hexapod-system-for-fast-economic-and-precise-positioning-pressemitteilung50613.html>.
- [16] *Embraer EMB 314 Super Tucano* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Embraer_EMB_314_Super_Tucano.
- [17] *Snímače vícekomponentního zatížení GTM* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.gtm-gmbh.com/cz/produkty/snimace-vicekomponentniho-zatizeni.html>.
- [18] *MĚŘENÍ SÍLY TENZOMETRICKÝM MŮSTKEM* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://fieldbus.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/cviceni/09_mereni_sily.pdf.
- [19] BÁRTA, Petr. 2007. *Telemetrická úlová váha*. Brno. Dostupné také z: http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2007/DP_Barta.pdf. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [20] HUSÁK, Miroslav a Pavel KULHA. *Piezoodporový jev: Tenzometry, senzory mechanické deformace* [online]. In: . [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/07%20Piezoodporovy%20jev%20-%20mechanicke%20deformace.pdf>.
- [21] *Top Five Considerations for Taking the Stress Out of Strain Measurements* [online]. In: . [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/11488/en/>.
- [22] VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. 2013. *Experimentální mechanika*. Brno. Dostupné také z: http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf.
- [23] *MSL Mars Rover Cryogenic Multi-Axis* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/futek-advanced-sensor-technology-inc/msl-mars-rover-cryogenic-multi-axis/14287-342679.html>.
- [24] *Elektromagnetická kompatibilita technických systémů* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node5>.
- [25] *SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ SÍLY, TLAKU, KROUTÍČÍHO MOMENTU, ZRYCHLENÍ* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalnimetody/prednasky/p9_snimace_sily.pdf.
- [26] *Temperature Compensation for Strain Gauges: Theory and Practical Implementation* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.hbm.com/en/menu/tips-tricks/experimental-stress-analysis/temperature-compensation-for-strain-gauges/>.

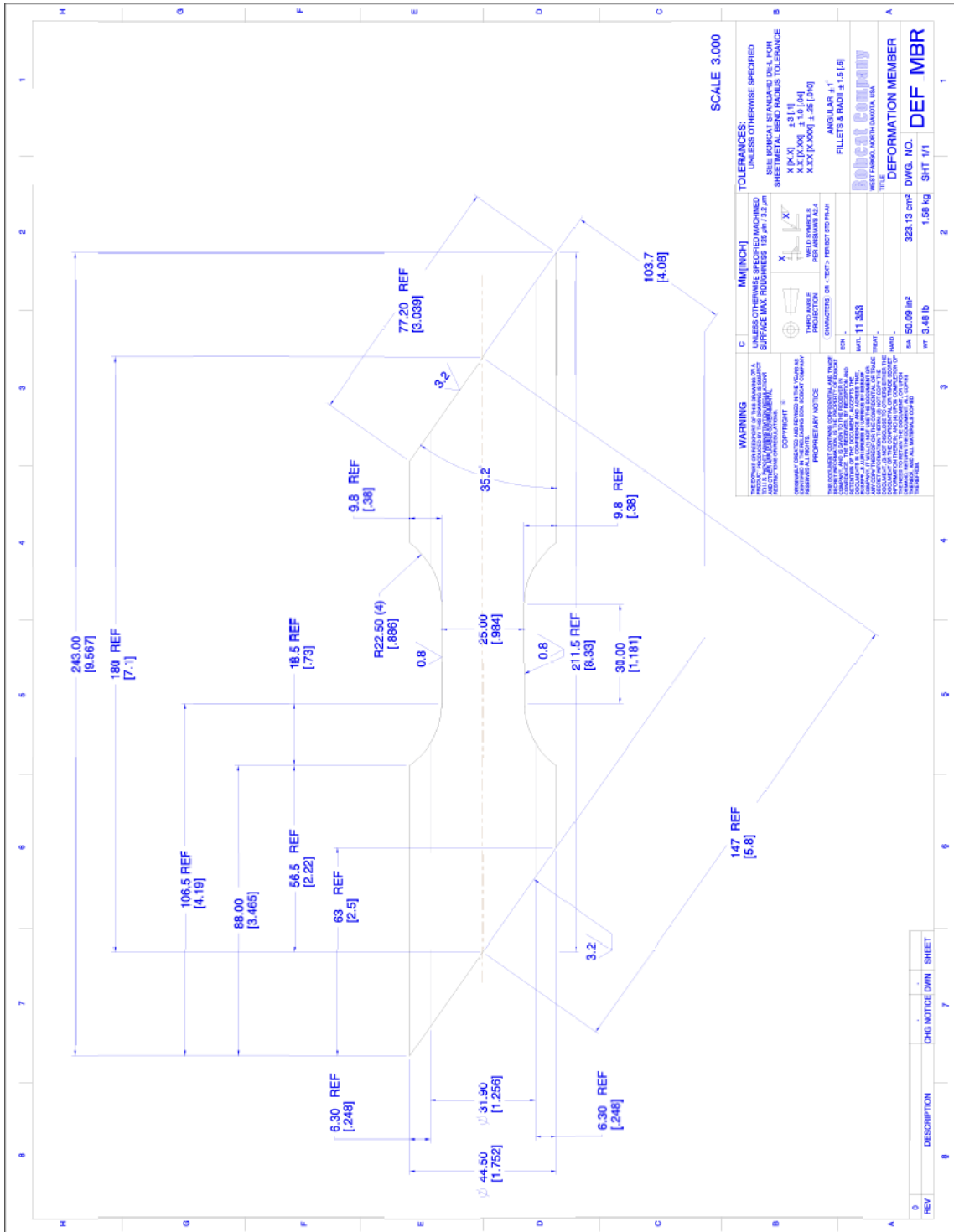
- [27]CÉZOVÁ, Eliška. *Metrologie v praxi* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z:
<http://www.statspol.cz/cs/wp-content/uploads/2013/05/request2006/sbornik/cezova.pdf>.
- [28]HAAZS, V. a M. SEDLÁČEK. *Dodatek monografie ČVUT. Elektrická měření. Přístroje a metody: Nejistoty měření* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z:
http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/a1b38ema/pdfs/nejistoty_dodatek_monografie.pdf.
- [29]FALK Jared: Bobcat Engineering Test Standard MT0003: FIELD STRUCTURAL STRESS ANALYSIS (ESTIMATED TEST LIFE AND FIELD DUTY CYCLE). Bobcat Product Engineering, 2012. Internal standard.
- [30]Strain Gauges for Stress Analysis and Durability Testing. *HBM* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.hbm.com/en/menu/products/strain-gauges/stress-analysis/>.

9 Přílohy

Příloha A – Výkres základny hexapodu



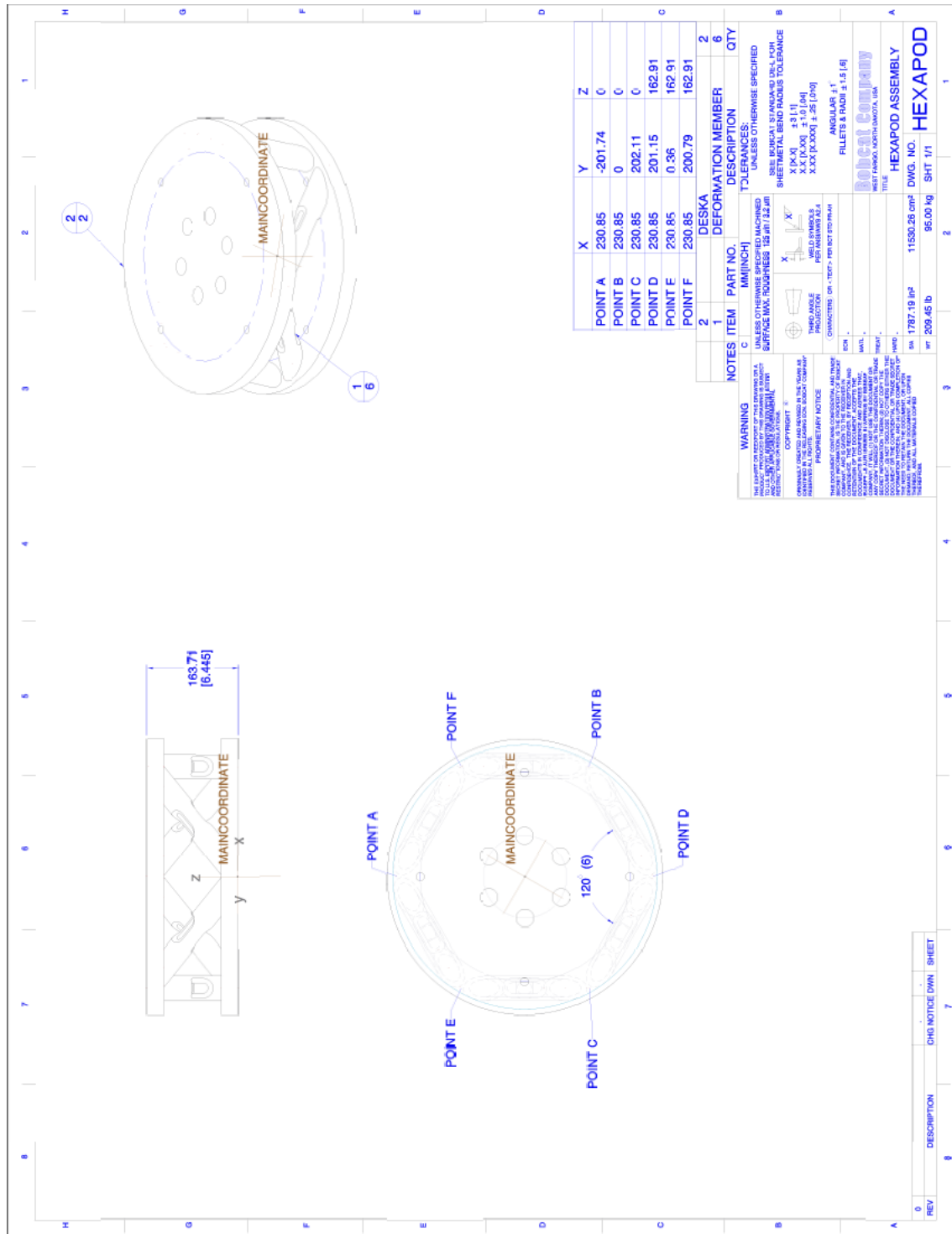
Příloha B – Výkres deformačního členu hexapodu



SCALE 3.000

WARNING THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF ROBOBOT COMPANY, INC. IT IS TO BE USED ONLY FOR THE PROJECT AND QUANTITY SPECIFIED HEREON. IT IS NOT TO BE REPRODUCED, COPIED, OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS, ELECTRONIC OR MECHANICAL, INCLUDING PHOTOCOPYING, RECORDING, OR BY ANY INFORMATION STORAGE AND RETRIEVAL SYSTEM. ROBOBOT COMPANY, INC. SHALL BE RESPONSIBLE FOR ANY DAMAGE TO PROPERTY OR PERSONS ARISING FROM THE USE OF THIS DRAWING.	PROPERTY NOTICE THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF ROBOBOT COMPANY, INC. IT IS TO BE USED ONLY FOR THE PROJECT AND QUANTITY SPECIFIED HEREON. IT IS NOT TO BE REPRODUCED, COPIED, OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS, ELECTRONIC OR MECHANICAL, INCLUDING PHOTOCOPYING, RECORDING, OR BY ANY INFORMATION STORAGE AND RETRIEVAL SYSTEM. ROBOBOT COMPANY, INC. SHALL BE RESPONSIBLE FOR ANY DAMAGE TO PROPERTY OR PERSONS ARISING FROM THE USE OF THIS DRAWING.	FINISHES X [X.X] ±3 [1] X.X [X.X] ±1.0 [0.4] X.X [X.X] ±.25 [0.01]	TOLERANCES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS SHALL BE TO DIMENSIONS UNLESS NOTED OTHERWISE SHEET METAL BEND RADIUS TOLERANCE ANGULAR ±1° FILLETS & RADI ±1.5 [0.4]
DESCRIPTION DEF MBR	QUANTITY 50.09 [1.58 kg]	DATE 11/25/23	SCALE 3.000
REV	DESCRIPTION	CHG	NOTICE
1	DEF MBR		

Příloha C – Výkres sestavy hexapodového měřicího zařízení



NOTES	ITEM	PART NO.	DESCRIPTION	QTY
1	DESKA			2
2	DESKA			6

WARNING: THE PARTS OR SUBASSEMBLY OF THIS DRAWING IS TO BE USED ONLY IN THE MACHINES AND EQUIPMENT FOR WHICH IT IS DESIGNED. SURFACE MAX. ROUGHNESS 125 μm / 5.0 μin. UNLESS OTHERWISE SPECIFIED.

TOLERANCES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

SIZE: METRIC / 2X PARENTHESIS: USA, INCH

SHEET METAL BEND RADIUS TOLERANCE

X [P-X] ± 0.1 [1]

X.X [X.X0] ± 0.0 [0.04]

X.XX [X.X00] ± 0.05 [0.005]

ANGULAR ± 1°

FILLETS & RADI ± 1.5 [0.16]

WEST FABRO, NORTH UNION, USA

Robot Company

TITLE: HEXAPOD ASSEMBLY

DWG. NO.: 11530.26 cm²

wt: 209.45 lb 85.00 kg

SHT 1/1

REV	DESCRIPTION	CHG	NOTICE	DWN	SHEET
0					