

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav letadlové techniky**

**Měření charakteristik pohonné jednotky bezpilotního letounu  
do vzletové hmotnosti 20 kg**

**Measurement of power plant characteristics of unmanned aerial  
vehicle with take off weight under 20 kg**

Diplomová práce

Studijní program: N 3958 – Letectví a kosmonautika  
Studijní obor: 3906T008 – Letadlová a kosmická technika  
Vedoucí práce: Ing. Ivan Jeřábek, Ph. D.

**Bc. Richard Pinc**

---

Praha 2017



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pinc** Jméno: **Richard** Osobní číslo: **397288**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**  
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK POHONNÉ JEDNOTKY BEZPILOTNÍHO LETOUNŮ DO VZLETOVÉ HMOTNOSTI 20 KG**

Název diplomové práce anglicky:

**MEASUREMENT OF POWER PLANT CHARACTERISTICS OF UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH TAKE-OFF WEIGHT UNDER 20 KG**

Pokyny pro vypracování:

Návrh zařízení pro měření charakteristik pohonných jednotek bezpilotních letounů do vzletové hmotnosti 20 kg.

1. Definice měřených veličin a jejich rozsahu.
2. Konstrukční návrh zařízení pro měření charakteristik pohonných jednotek.
3. Návrh měřícího řetězce pro monitorování provozních parametrů pohonné jednotky.
4. Rozbor vibrací od hmotového a aerodynamického buzení

Seznam doporučené literatury:

Theiner R., Slavík S., Mráz V.: Metodika měření aerodynamických charakteristik vrtulí v aerodynamickém tunelu VZLU, VZLÚ 1999  
V. L. Alexandron: Letecké vrtule, SNTL Praha, 1954  
Miláček, S.: Měření a vyhodnocování mechanických veličin, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2001

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


**Ing. Ivan Jeřábek Ph.D., ústav letadlové techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.10.2016** Termín odevzdání diplomové práce: **10.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
Podpis vedoucí(ho) práce

  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

27. 10. 2016

Datum převzetí zadání

R.

Podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem zařízení pro měření charakteristik pohonné jednotky. Na základě rešerše byly stanoveny maximální hodnoty měřených charakteristik. Následně bylo navrženo několik variant konstrukčního řešení a byla vybrána nejvhodnější varianta. Pro výslednou variantu byla zhotovena výrobní dokumentace a navrhnut měřicí řetězec pro monitorování provozních parametrů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

měření charakteristik, UAV, hexapod

## **ABSTRACT**

Diploma thesis deals with constructional design of a device for measuring of power plant characteristics. Based on background research have been set maximum values of measured characteristics. Next step has been design of several variants of design solutions and the most suitable option has been chosen. For the final variant has been made production drawings and measuring chain has been designed for monitoring of operating parameters.

## **KEYWORDS**

measurement of characteristics, UAV, hexapod

PINC, Richard *Měření charakteristik pohonné jednotky bezpilotního letounu do vzletové hmotnosti 20 kg*: diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2017. 73 s. Vedoucí práce byl Ing. Ivan Jeřábek, PhD.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Měření charakteristik pohonné jednotky bezpilotního letounu do vzletové hmotnosti 20 kg“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Praha .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam použitých zkratk, indexů a symbolů</b>	<b>VI</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Rešerše elektrických pohonných jednotek</b>	<b>2</b>
<b>3 Definice měřených veličin a jejich rozsahu</b>	<b>4</b>
3.1 Tah pohonné jednotky . . . . .	5
3.2 Otáčky motoru a vrtule . . . . .	6
3.3 Kroutící moment pohonné jednotky . . . . .	7
3.4 Elektrické napětí na vstupu do motoru . . . . .	9
3.5 Elektrický proud na vstupu do motoru . . . . .	9
3.6 Průměr vrtule . . . . .	9
3.7 Hustota vzduchu . . . . .	9
3.8 Rychlost nabíhajícího proudu vzduchu . . . . .	10
3.9 Vibrace pohonné jednotky . . . . .	10
<b>4 Konstrukční návrh měřícího zařízení</b>	<b>12</b>
4.1 Koncepční návrh . . . . .	13
4.1.1 Varianta 1 . . . . .	13
4.1.2 Varianta 2 . . . . .	14
4.1.3 Varianta 3 . . . . .	14
4.2 Analýza zatížení . . . . .	15
4.2.1 Varianta 1 . . . . .	16
4.2.2 Varianta 2 . . . . .	18
4.2.3 Varianta 3 . . . . .	19
4.3 Analýza parazitních vlivů na měřenou veličinu . . . . .	23
4.3.1 Varianta 1 . . . . .	23
4.3.2 Varianta 2 . . . . .	26
4.3.3 Varianta 3 . . . . .	26
4.4 Pevnostní kontrola . . . . .	26
4.4.1 Varianta 1 . . . . .	26
4.4.2 Varianta 2 . . . . .	32
4.4.3 Varianta 3 . . . . .	34
4.5 Zhodnocení navržených konstrukcí a výběr řešení . . . . .	36

<b>5</b>	<b>Návrh měřicího řetězce pro monitorování provozních parametrů</b>	<b>37</b>
5.1	Měřené veličiny . . . . .	37
5.1.1	Tah, kroutící moment a vibrace pohonné jednotky . . . . .	37
5.1.2	Elektrické napětí na vstupu do motoru . . . . .	42
5.1.3	Elektrický proud na vstupu do motoru . . . . .	42
5.1.4	Otáčky motoru a vrtule . . . . .	43
5.1.5	Hustota vzduchu . . . . .	44
5.1.6	Průměr vrtule . . . . .	45
5.1.7	Rychlost nabíhajícího proudu vzduchu . . . . .	45
5.1.8	Zapojení měřících karet . . . . .	46
5.1.9	Požadavky na měřící software . . . . .	46
5.2	Rozbor vibrací . . . . .	47
5.3	Stanovení charakteristik pohonné jednotky . . . . .	50
5.3.1	Součinitel tahu . . . . .	50
5.3.2	Součinitel výkonu . . . . .	50
5.3.3	Účinnost motoru . . . . .	51
5.3.4	Účinnost vrtule . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Použité zdroje</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>56</b>
<b>A</b>	<b>Přehled vybraných motorů</b>	<b>57</b>
A.1	AXI . . . . .	57
A.2	Hacker . . . . .	58
A.3	Lumenier . . . . .	60
A.4	T-Motor . . . . .	61
<b>B</b>	<b>Výpočet matice poddajnosti</b>	<b>64</b>
<b>C</b>	<b>Tenzometry</b>	<b>67</b>
<b>D</b>	<b>Formulář pro kalibraci tenzometrických snímačů</b>	<b>68</b>
<b>E</b>	<b>Řídící program</b>	<b>69</b>
<b>F</b>	<b>Výkresy navržené konstrukce</b>	<b>70</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Schéma elektrické pohonné jednotky. . . . .	2
3.1	Závislost tahu na průměru vrtule. . . . .	6
3.2	Závislost kroutícího momentu na průměru vrtule. . . . .	8
4.1	Schéma měření aerodynamickými váhami. . . . .	12
4.2	Zařízení pro měření aerodynamických charakteristik vrtulí. . . . .	13
4.3	Konstrukční návrh varianty 1. . . . .	14
4.4	Konstrukční návrh varianty 2. . . . .	14
4.5	Konstrukční návrh varianty 3. . . . .	15
4.6	Silové schéma varianty 1. . . . .	16
4.7	Silové schéma příčnicku a stojin v rovině $y, z$ . . . . .	17
4.8	Silové schéma příčnicku v rovině $x, y$ . . . . .	17
4.9	Silové schéma varianty 2. . . . .	18
4.10	Silové schéma měřícího členu v rovině $y, z$ . . . . .	18
4.11	Silové schéma měřícího členu v rovině $x, y$ . . . . .	19
4.12	Schéma hexapodu a zjednodušené schéma. . . . .	20
4.13	Teoretická síla ve všech šesti vzpěrách v závislosti na velikosti působícího zatížení a úhlu naklonění vzpěr. . . . .	21
4.14	Teoretická síla ve čtyřech vzpěrách v závislosti na působící smykové síle a úhlu naklonění vzpěr. . . . .	21
4.15	Silové schéma měřícího členu hexapodu. . . . .	23
4.16	Schéma parazitního silového namáhání v rovině $y, z$ . . . . .	24
4.17	Parazitního silového namáhání levé strany příčnicku. . . . .	25
4.18	Parazitního silového namáhání pravé strany příčnicku. . . . .	25
4.19	Příčnick. . . . .	27
4.20	Spočtená Woehlerova křivka pro ocel S355MC (1.0976). . . . .	28
4.21	Stojina. . . . .	30
4.22	Měřící člen. . . . .	32
4.23	Měřící člen hexapodu. . . . .	34
4.24	Zatížení vzpěry. . . . .	35
5.1	Umístění senzorů pro měření tahu, kroutícího momentu a vibrací na deformačním členu. . . . .	37
5.2	Wheatstoneův můstek. . . . .	38
5.3	Zapojení Wheatstoneova můstku. . . . .	39
5.4	Zapojení senzorů pro měření tahu, kroutícího momentu a vibrací do karty NI 9237 . . . . .	40
5.5	Zapojení regulátoru do obvodu. . . . .	42
5.6	Zapojení karty NI 9215. . . . .	43



5.7	Zapojení proudového senzoru CSNP661. . . . .	43
5.8	Optoelektronický reflexní snímač. . . . .	44
5.9	Zapojení snímače E3F2-D1B4. . . . .	44
5.10	Chasee NI cDAQ-9184 s měřicími kartami. . . . .	46
5.11	Rezonance měřícího zařízení. . . . .	48
5.12	Nevyváženost a) aerodynamické síly, b) aerodynamického momentu dvoulisté vrtule. . . . .	48
5.13	Určení periody cyklicky se opakujícího děje. . . . .	49
5.14	Rozdělení naměřených hodnot na periodické úseky. . . . .	49
5.15	Zahuštění periodické křivky. . . . .	50
B.1	Schéma pro výpočet matice poddajnosti. . . . .	64
C.1	Schéma rozměrů tenzometrů. . . . .	67
E.1	Řídící program vytvořený v prostředí LabVIEW. . . . .	69

## SEZNAM TABULEK

2.1	Rozsah parametrů motorů a vrtulí. . . . .	3
3.1	Tah motorů. . . . .	5
3.2	Otáčky motorů. . . . .	7
3.3	Moment motorů. . . . .	8
3.4	Seznam měřených a počítaných veličin a jejich rozsahu. . . . .	11
A.1	Motor AXI 2203/46 GOLD LINE. . . . .	57
A.2	Motor AXI 4120/18 GOLD LINE. . . . .	57
A.3	Motor AXI 5360/20 GOLD LINE. . . . .	58
A.4	Motor Hacker A05-10S. . . . .	58
A.5	Motor Hacker A50-12S. . . . .	59
A.6	Motor Hacker A60-18L. . . . .	59
A.7	Motor Lumenier RX1806-13. . . . .	60
A.8	Motor Lumenier FX2216-11. . . . .	60
A.9	Motor MT1306. . . . .	61
A.10	Doplňující katalogové charakteristiky motoru MT1306. . . . .	61
A.11	Motor MT3515. . . . .	62
A.12	Doplňující katalogové charakteristiky motoru MT3515. . . . .	62
A.13	Motor MT3520. . . . .	63
A.14	Doplňující katalogové charakteristiky motoru MT3520. . . . .	63
C.1	Tenzometry HBM. . . . .	67
C.2	Vliv teploty – hodnota parametru $\alpha$ . . . . .	67
D.1	Formulář pro kalibraci tenzometrických snímačů na měření sil. . . . .	68

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, INDEXŮ A SYMBOLŮ

## ZKRATKY

DC	direct current (stejnoseměrný proud)
FPV	first-person view (pohled z první osoby – pohled z místa pilota)
FS	full scale (maximální rozsah)
MSA	mezinárodní standardní atmosféra
UAV	unmanned aerial vehicle (bezpilotní letadlo)

## INDEXY

$l$	směr aktivní délky
$t$	směr příčný na směr aktivní délky

## SYMBOLY

$A$	$[\text{m}^2]$	plocha
$a$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$	zrychlení
$c_P$	[1]	součinitel výkonu
$c_T$	[1]	součinitel tahu
$D$	[m]	průměr
$E$	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	Youngův modul pružnosti v tahu
$F, X, Y, Z$	[N]	síla
$I$	[A]	proud
$i$	[mm]	kvadratický poloměr
$J$	$[\text{m}^4]$	kvadratický moment (setrvačnosti) příčného řezu
$j$	[1]	jistota
$K$	[1]	deformační součinitel
$K_V$	$\left[\frac{\text{ot.}}{\text{min} \cdot \text{V}}\right]$	otáčky za minutu na volt
$k$	[1]	součinitel pružnosti
$l$	[m]	délka
$M$	$[\text{N} \cdot \text{m}]$	moment
$m$	[kg]	hmotnost
$n$	[1]	koeficient vzpěru
$n$	$\left[\frac{\text{ot.}}{\text{s}}\right]$	otáčky za sekundu
$P$	[W]	výkon
$p_b$	[Pa]	barometrický tlak
$R$	$[\Omega]$	elektrický odpor
$R_i$	[N]	reakční síla od účinku $i$
$R_{vz}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	plynová konstanta vzduchu

$r$	[m]	délka
$T$	[N]	tah
$T_K$	[K]	teplota v kelvinech
$t$	[s]	čas
$U, u$	[V]	napětí
$v$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	rychlost
$v_\infty$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	rychlost letu
$\Delta$	[1]	přírůstek
$\delta$	[mm]	deformace
$\varepsilon$	[1]	poměrné přetvoření
$\eta$	[1]	účinnost
$\kappa$	[1]	relativní chyba
$\lambda$	[1]	rychlostní poměr vrtule
$\lambda$	[1]	štíhlost
$\rho$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	hustota
$\omega$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	úhlová rychlost
$\sigma$	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	napětí
$\sigma_c$	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	mez únavy
$\sigma_k$	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	mez kluzu
$\sigma_p$	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	mez pevnosti
$\sigma_u$	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	mez úměrnosti

# 1 ÚVOD

Předmětem diplomové práce je konstrukční návrh zařízení pro měření charakteristik pohonné jednotky.

V rámci předkládané práce bude provedena analýza měřených veličin a bude stanovena jejich rozsah na základě provedené rešerše elektrických pohonných jednotek. Dále bude navrženo několik variant konstrukčního řešení, pro něž bude provedena pevnostní kontrola a určen vliv konstrukčního řešení na snímání měřených veličin. Varianty budou porovnány a bude vybráno výsledné konstrukční řešení, pro které bude zhotovena výrobní dokumentace. Na závěr práce bude pro vybranou variantu navrhnut měřicí řetězec pro monitorování provozních parametrů pohonné jednotky, ve kterém budou vybrány senzory pro snímání měřených veličin, jejich umístění a zapojení na konstrukci a proveden rozbor vibrací od hmotového a aerodynamického buzení.

## 2 REŠERŠE ELEKTRICKÝCH POHONNÝCH JEDNOTEK

UAV neboli bezpilotní letadlo je letadlo bez posádky řízené na dálku nebo za pomoci vlastního předprogramovaného řídicího systému. Uplatnění nachází jak ve vojenské sféře, tak v civilním prostředí, kde slouží především k monitorovacím nebo zábavním účelům.

UAV se skládá z draku, pohonné jednotky, avioniky (řídicí a komunikační elektronika, elektronické vybavení pro plnění misí, senzory, atd.), aktuátorů a případně dalšího vybavení potřebného pro daný účel UAV a plnění jeho misí. V základu se můžou pohonné jednotky UAV rozdělit do 2 skupin

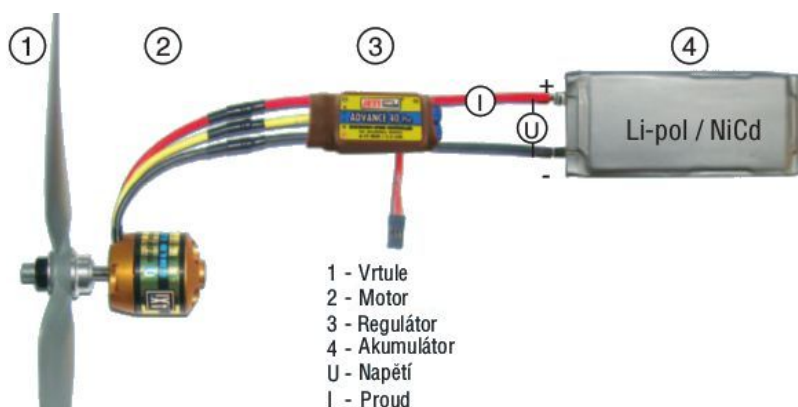
1. se spalovacím motorem,
2. s elektrickým motorem.

Elektrické pohonné jednotky lze dále dělit na

- (a) komutátorové – otáčí cívkou uvnitř pouzdra s pevnými magnety upevněnými kolem vnější strany pouzdra,
- (b) bezkomutátorové – otáčí pevnými magnety uvnitř pouzdra, ke kterému jsou upevněny cívkky.

Pro potřeby diplomové práce budou dále řešeny jen elektrické pohonné jednotky.

Elektrické motory mění elektrickou energii na kinetickou energii, která pohybuje UAV pomocí vrtule nebo vrtulí. Napájeny jsou především bateriemi, kvůli čemuž mají ze všech motorů nejmenší vytrvalost, protože dnešní baterie nejsou schopné zajistit dostatek energie, aby mohly elektrické motory konkurovat spalovacím na vytrvalostních letech. Oproti spalovacím motorům obsahují elektrické motory jen málo pohyblivých částí, tím mohou pracovat za vyšších otáček, mají vyšší účinnost a lepší momentové charakteristiky.



Obr. 2.1: Schéma elektrické pohonné jednotky [1].

Základní schéma elektrické pohonné jednotky, která je znázorněna na obrázku 2.1 tvoří:

**Vrtule** je připojena k elektromotoru a mění jeho výkon na kinetickou energii vzduchu, která umožňuje UAV pohyb.

**Motor** z elektrické energie vytváří rotační pohyb, který točí vrtulí, nejpodstatnějšími parametry výběru vhodného motoru je poměr váhy ku výkonu a poměr ceny ku výkonu.

**Regulátor otáček** je napájen stejnosměrným napětím z akumulátoru a plynule reguluje otáčky motoru a případně napájí další elektroniku letadla. Regulátor musí být schopný dodávat stejný maximální proud s odpovídajícím napětím pro motor.

**Zdroj elektrické energie** pro elektromotor, především akumulátory, které jsou složeny například z lithium-polymerových či nikl-kadmiových článků.

Byla provedena analýza trhu na základě dostupné technické dokumentace, poměru ceny a výkonu a velikosti sortimentu. Omezujícím parametrem byl maximální rozměr vrtule, který je omezen průměrem aerodynamického tunelu, pro který je měřicí zařízení navrhováno a jehož průměr je 70 cm. Z důvodu zkrácení charakteristik a manipulovatelnosti je maximální rozměr vrtule 350 mm (14 in) (dle [14] se nedoporučuje zkoušet vrtule s průměrem větším než poloměr tunelu). Z analýzy vyplynuly firmy, jejichž motory byly brány jako referenční. Jsou to

1. AXI,
2. Hacker,
3. Lumenier,
4. T-motor.

Z důvodu univerzálnosti měřicího zařízení a jeho použití na širší výběr pohonných jednotek byly vybrány motory pokrývající uvažované spektrum, jsou to: AXI 2203/46 GOLD LINE, AXI 4120/18 GOLD LINE, AXI 5360/20 GOLD LINE, Hacker A05-10S, Hacker A50-12S, Hacker A60-18L, Lumenier RX1806-13, Lumenier FX2216-11, MT1306, MT3515, MT3520. Přehled vybraných motorů s jejich charakteristikami je v příloze A. Z provedené analýzy byly definovány následující parametry, které tvoří obálku parametrů uvažovaných motorů.

Parametr	Hodnota
$P$	30 ÷ 2 800 W
$\varnothing D_{\text{motor}}$	15 ÷ 90 mm
$l_{\text{motor}}$	15 ÷ 95 mm
$\varnothing D_{\text{vrtule}}$	75 ÷ 350 mm

Tab. 2.1: Rozsah parametrů motorů a vrtulí.

### 3 DEFINICE MĚŘENÝCH VELIČIN A JEJICH ROZSAHU

Cílem měření je zjistit statické (tahové a výkonové) charakteristiky pohonné jednotky, resp. součinitele  $c_T$  a  $c_P$ , účinnost pohonné jednotky a dynamické charakteristiky, resp. velikost případných vibrací pohonné jednotky.

Součinitele  $c_T$  a  $c_P$  jsou definovány rovnicemi

$$c_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (3.1)$$

a

$$c_P = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot D^5}. \quad (3.2)$$

Tah je měřitelný přímo navrhovaným měřicím zařízením a výkon je stanoven dle

$$P = M \cdot \omega = M \cdot 2\pi \cdot n. \quad (3.3)$$

Účinnost motoru je

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{M \cdot \omega}{U \cdot I} = \frac{M \cdot 2\pi \cdot n}{U \cdot I} \quad (3.4)$$

a propulzní účinnost (vrtule) je definována vztahem

$$\eta_{\text{vrtule}} = \frac{c_T}{c_P} \cdot \lambda, \quad (3.5)$$

kde  $\lambda = \frac{v_\infty}{n \cdot D}$ .

Dalším požadavkem na měřicí zařízení je kromě ustálených hodnot možnost měření vibrací (aerodynamicky i hmotově buzených). Vibrace pohonné jednotky jsou pro účely práce definovány jako periodická změna měřené veličiny v čase (moment, síla).

Z výše uvedených rovnic byly stanoveny měřené a počítané veličiny:

1. tah [N],
2. moment [N · m],
3. otáčky  $\left[\frac{\text{ot.}}{\text{s}}\right]$ ,
4. elektrické napětí [V],
5. elektrický proud [A],
6. průměr vrtule [m],
7. hustota  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ ,
8. rychlost nabíhajícího proudu  $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$ ,
9. vibrace [N; Hz].

Všechny rozsahy jsou brány z provedené rešerše pohonných jednotek, která je v příloze A.



### 3.1 Tah pohonné jednotky

Pohonná jednotka společně s vrtulí vytváří *využitelný tah*, který umožňuje UAV pohyb. Pokud pohonná jednotka stojí na místě, vytváří *statický tah* a tah potřebný k letu v daném režimu se nazývá *potřebný tah*. Efektivní tah je stanoven dle rovnice

$$T_e = T - (X_1 - X_0), \quad (3.6)$$

kde:  $T$  je naměřený tah,

$X_1$  je odpor tělesa v blízkosti vrtule, ale s ní nespojeného a

$X_0$  je odpor téhož tělesa, ale bez vrtule.

Dle [13] byl pro návržení rozsahu tahu určen součinitel tahu pro malé vrtule ( $\sim 75$  mm)  $c_T = 0,19$  a pro velké vrtule ( $\sim 350$  mm)  $c_T = 0,1$ , hustota dle MSA  $\rho = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  a po dosazení do rovnice (3.1) vyjde

$$T_{\text{MT1306}} = 0,1 \cdot 1,225 \cdot \left( \frac{7,4 \cdot 3100}{60} \right)^2 \cdot 0,15^4 = 9,1 \text{ N}.$$

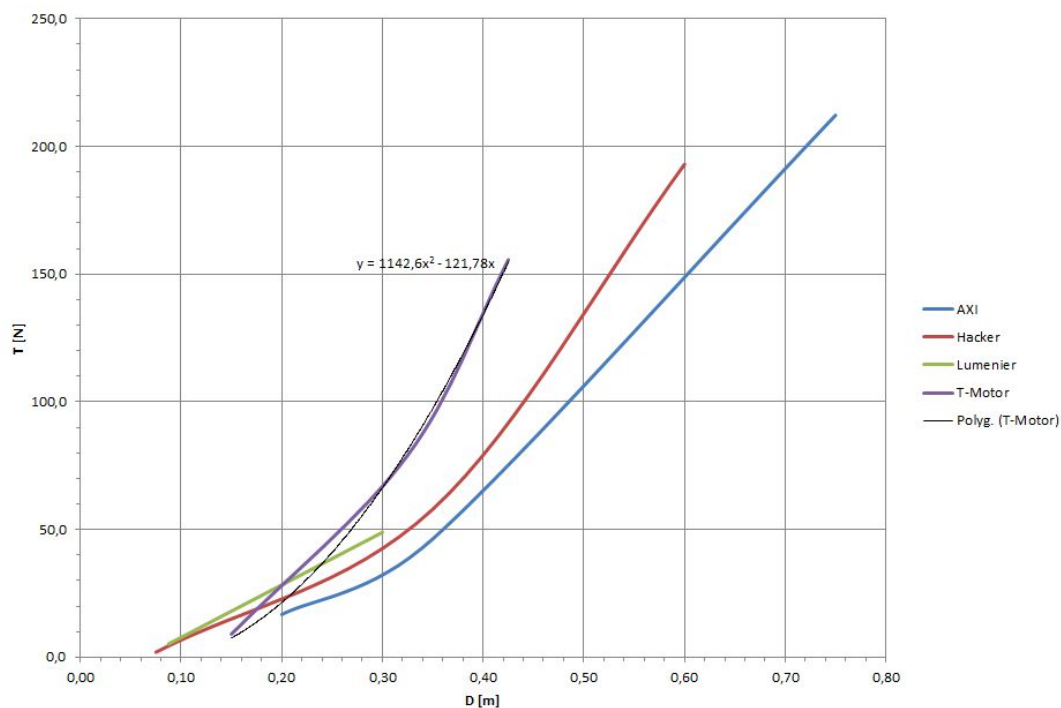
Motor		Tah [N]
AXI	2203/46	16,8
	4120/18	46,4
	5360/20	212,0
Hacker	A05-10S	2,0
	A50-12S	58,0
	A60-18L	193,0
Luminer	RX1806-13	5,2
	FX2216-11	48,9
T-Motor	MT1306	9,1
	MT3515	79,0
	MT3520	156,0

Tab. 3.1: Tah motorů.

Ze závislosti tahu na průměru vrtule z obrázku 3.1 je patrné, že nejlepšího poměru tahu ku průměru vrtule dosahují motory T-Motor a pro průměr vrtule 350 mm vychází

$$T = 1142,6 \cdot 0,35^2 - 121,78 \cdot 0,35 = 97,3 \text{ N}.$$

S jistotou 1,2 byl rozsah tahu stanoven  $0 \div 120$  N.



Obr. 3.1: Závislost tahu na průměru vrtule.

## 3.2 Otáčky motoru a vrtule

Parametr nutný pro výpočet výkonu motoru. Otáčky jsou dány napětím a hodnotou  $K_V$ . Menší motory s menšími vrtulemi musí pro dosažení požadovaného výkonu vyvíjet vyšší otáčky. Otáčky jsou definovány rovnicí

$$n = K_V \cdot U \left[ \frac{\text{ot}}{\text{min}} \right] \quad (3.7)$$

a pro motor Lumenier RX1806-13 a Hacker A05-10S vychází

$$n_{\text{RX1806-13}} = 2\,500 \cdot 4 \cdot 3,7 = 37\,000 \frac{\text{ot}}{\text{min}}.$$

Motor		Otáčky [ $\frac{\text{ot.}}{\text{min}}$ ]
AXI	2203/46	12 700
	4120/18	9 530
	5360/20	4 440
Hacker	A05-10S	31 100
	A50-12S	10 700
	A60-18L	6 620
Luminer	RX1806-13	37 000
	FX2216-11	13 300
T-Motor	MT1306	22 900
	MT3515	14 400
	MT3520	11 800

Tab. 3.2: Otáčky motorů.

Uvažovaný rozsah otáček je  $0 \div 40\,000 \frac{\text{ot.}}{\text{min}}$ .

### 3.3 Kroutící moment pohonné jednotky

Parametr motoru potřebný pro výpočet výkonu. Předběžný rozsah momentu lze určit z uvažovaných tabulkových hodnot motorů po dosazení do rovnice (3.3)

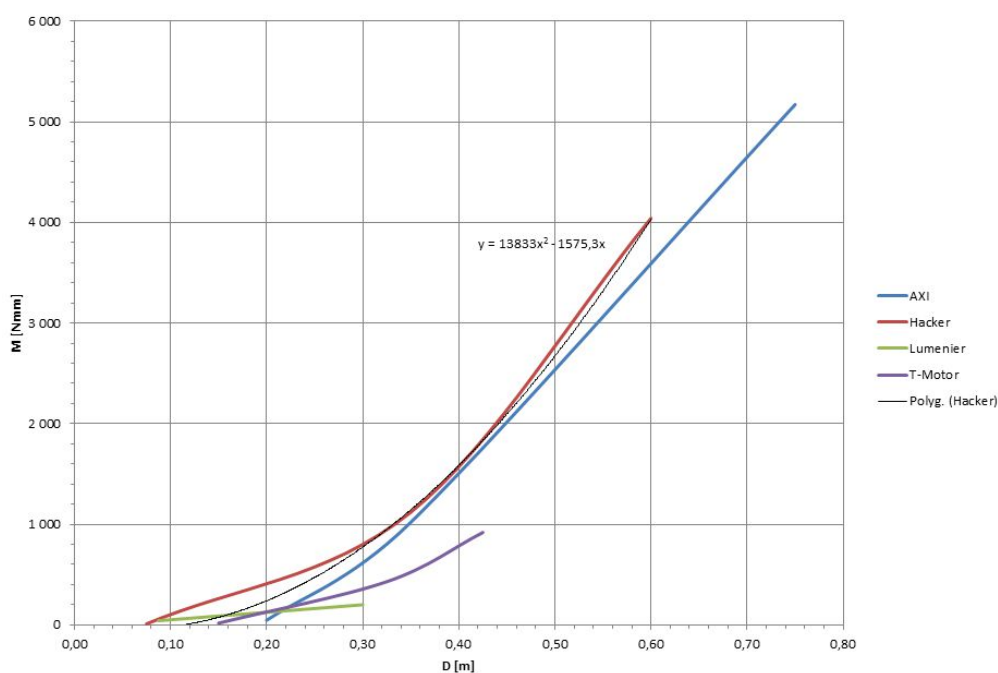
$$M = \frac{P}{2\pi \cdot n}, \quad (3.8)$$

kde je pro navržení konstrukce zanedbána účinnost motoru, tedy vychází vyšší moment a konstrukce je robustnější. Po dosazení do rovnice (3.8) vychází

$$M_{A05-10S} = \frac{35}{2\pi \cdot \frac{4200 \cdot 7,4}{60}} = 0,01 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Motor		Moment [N · mm]
AXI	2203/46	47
	4120/18	1 020
	5360/20	5 170
Hacker	A05-10S	11
	A50-12S	1 120
	A60-18L	4 040
Lumener	RX1806-13	43
	FX2216-11	201
T-Motor	MT1306	18
	MT3515	430
	MT3520	919

Tab. 3.3: Moment motorů.



Obr. 3.2: Závislost kroutícího momentu na průměru vrtule.

Ze závislosti kroutícího momentu na průměru vrtule z obrázku 3.2 je patrné, že nejlepšího poměru momentu ku průměru vrtule dosahují motory Hacker a pro průměr vrtule 350 mm vychází

$$M = 13\,833 \cdot 0,35^2 - 1\,575,3 \cdot 0,35 = 1\,140 \text{ N} \cdot \text{mm}.$$

S jistotou 1,2 byl rozsah momentu stanoven  $0 \div 1,4 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

### 3.4 Elektrické napětí na vstupu do motoru

Elektrické napětí určuje počet článků baterie, ale v průběhu vybíjení článků napětí klesá. U UAV se používá označení S, kde  $1 \text{ S} = 3,7 \text{ V}$ . Uvažované napětí je  $1 \div 10 \text{ S}$  a rozsah byl stanoven  $0 \div 40 \text{ V}$ .

### 3.5 Elektrický proud na vstupu do motoru

Elektrický proud se mění se zatížením motoru. Proud na prázdno při stanoveném napětí by se měl blížit nule. Pro motory s napětím  $\sim 10 \text{ S}$  je doporučený  $90 \text{ A}$  regulátor, proto je rozsah elektrického proudu stanoven na  $0 \div 90 \text{ A}$ .

### 3.6 Průměr vrtule

Průměr vrtule se v rovnicích pro výpočet součinitelů tahu a výkonu objevuje ve vysokých mocninách, proto je nutné spočítat jeho relativní chybu. Při průměru vrtule  $75 \text{ mm}$  a přesnosti posuvného měřítka  $0,1 \text{ mm}$  je relativní chyba měření

$$\kappa_{r \text{ prumer}} = \frac{0,1}{75} = 0,133 \%. \quad (3.9)$$

V rovnici (3.2) je průměr v páté mocnině a relativní chyba se zvýší na  $\kappa_{r \text{ pr}} = 0,665 \%$ . Relativní chyba průměru vrtule není výrazná. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, maximální průměr vrtule byl stanoven na  $350 \text{ mm}$ .

### 3.7 Hustota vzduchu

Bude stanovena výpočtem z měřené teploty a tlaku vzduchu. Pro výpočet měřených veličin je uvažován nízkorychlostní model proudění, považující vzduch za nestlačitelnou tekutinu a z rovnice ideálního plynu vyplývá

$$\rho = \frac{p_b}{R_{vz} \cdot T_K}, \quad (3.10)$$

kde  $R_{vz} = 287,1 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ . Při rozsahu teplot v aerodynamickém tunelu  $15 \div 50^\circ \text{C}$  a rozsahu barometrického tlaku  $970 \div 1140 \text{ hPa}$  je hustota

$$\begin{aligned} \rho_{\min} &= \frac{97000}{287,1 \cdot (50 + 273,15)} = 1,05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \\ \rho_{\max} &= \frac{114000}{287,1 \cdot (15 + 273,15)} = 1,38 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \end{aligned}$$

Rozsah hustoty je  $1,05 \div 1,38 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

### 3.8 Rychlost nabíhajícího proudu vzduchu

Je určena nastavením aerodynamického tunelu. Rychlost malých UAV se pohybuje v desítkách  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Rozsah rychlosti nabíhajícího proudu je zvolen na  $0 \div 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

### 3.9 Vibrace pohonné jednotky

Vibrace jsou dynamický jev způsobený hmotovým nebo geometrickým nevyvážením rotačních částí pohonné jednotky nebo mohou být vybuzeny aerodynamicky (flutter). Maximální rozsah vibrací byl stanoven jako procentuální část z měřené veličiny a to 15 % z FS (full scale) měřeného tahu 120 N. Frekvence odpovídá otáčkám motoru a je v rozsahu  $0 \div 667 \text{ Hz}$ .

Pro názornost při hmotnosti vrtule  $m = 100 \text{ g}$ , otáčkách  $12\,000 \frac{\text{ot.}}{\text{min}}$  a vzdálenosti výslednice sil od středu otáčení  $r = 1 \text{ mm}$  vychází pro odstředivou sílu

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (3.11)$$

$$F = 0,1 \cdot 0,001 \cdot \left(2\pi \cdot \frac{12\,000}{60}\right)^2 = 158 \text{ N.}$$

Z výsledku je patrné, že i malé nevyvážení způsobí velkou časově proměnnou cyklickou sílu a může mít fatální následky na měřící zařízení. Proto jsou vibrace omezeny jako procentuální část měřené veličiny. Ochrana zařízení bude řešena softwarově, definicí maximálních provozních limitů.

Seznam měřených a počítaných veličin je znázorněn v tabulce 3.4. Ve směru tahu pohonné jednotky je maximální dovolená síla tahu s vibracemi celkem 120 N. Relativně velký rozsah měřených veličin lze kompenzovat užitím rozdílných měřících karet v měřícím okruhu pro dosažení adekvátní přesnosti měření.

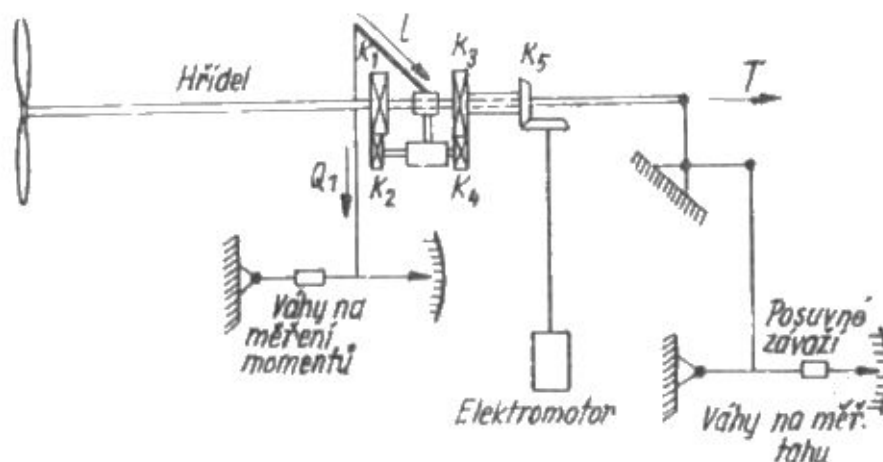
Veličina	Typ	Rozsah	Jednotka
součinitel tahu	počítaná	0÷0,2	1
součinitel výkonu	počítaná	0÷0,1	1
účinnost motoru	počítaná	0÷1	1
účinnost vrtule	počítaná	0÷1	1
vibrace pohonné jednotky	měřená	0÷18	N
		0÷667	Hz
elektrické napětí na vstupu do motoru	měřená	0÷40	V
elektrický proud na vstupu do motoru	měřená	0÷90	A
hustota vzduchu	počítaná	1,05÷1,38	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
kroučící moment pohonné jednotky	měřená	0÷1.4	N · m
otáčky motoru a vrtule	měřená	0÷40 000	$\frac{\text{ot.}}{\text{min}}$
průměr vrtule	měřená	0,075÷0,35	m
rychlost nabíhajícího proudu vzduchu	měřená	0÷40	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
tah pohonné jednotky	měřená	0÷120	N

Tab. 3.4: Seznam měřených a počítaných veličin a jejich rozsahu.

## 4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ

Cílem práce je navrhnout měřící zařízení schopné měřit charakteristiky popsané v tabulce 3.4 s minimálním ovlivněním měřených veličin a aby nedocházelo ke ztrátám měřených veličin v měřícím řetězci.

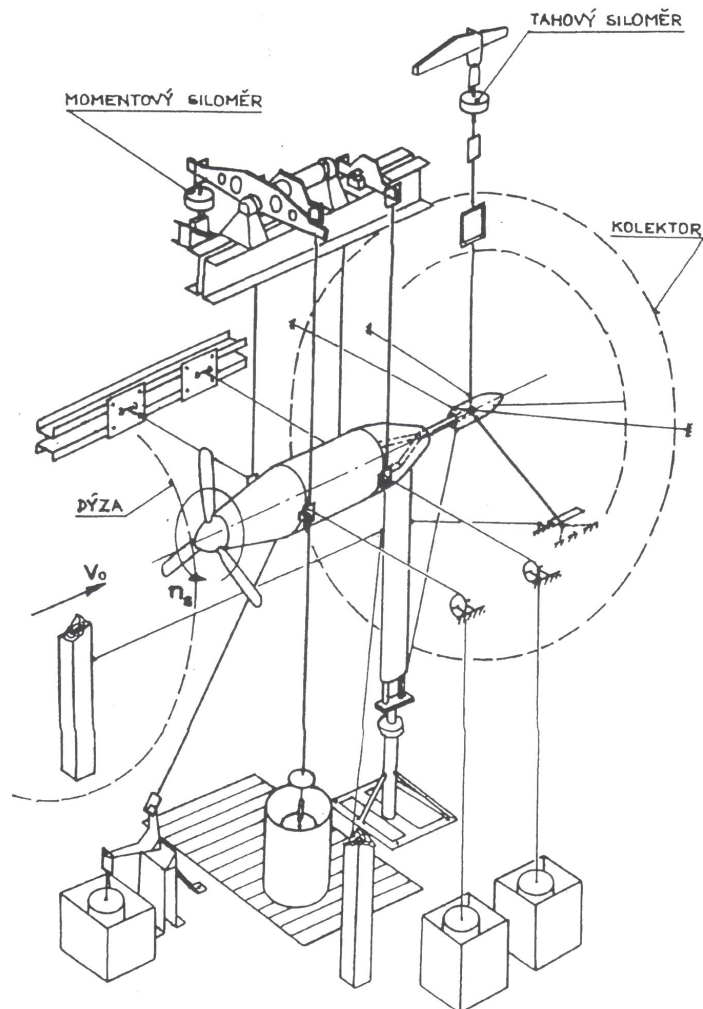
Schéma mechanického měřícího zařízení je patrné z obrázku 4.1, kde se tah a moment měřil za použití aerodynamických vah, resp. měřil se tah a síla  $Q_1$  působící na určitém rameni  $l$ , z čehož se dopočítal hledaný moment.



Obr. 4.1: Schéma měření aerodynamickými vahami [14],  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  – ozubená kola,  $K_1$  – kolo na hřídeli vrtule,  $K_3$  – kolo na hřídeli otáčející se na něm volně spolu s kuželovým kolem  $K_5$ ,  $K_2$ ,  $K_4$  – kola na předlohové hřídeli, kroutící moment od motoru se přenáší z  $K_5$  a  $K_3$  na  $K_4$  a zachytí se silou působící na páku.

Základní idea navrhovaného měřícího zařízení vychází z obrázku 4.2. Jelikož navrhované zařízení musí měřit vibrace, je nutné zajistit tužší vazbu mezi měřeným objektem a měřícím členem. Z toho důvodu bylo rozhodnuto použít místo lan planžety, které jsou schopné přenášet zatížení v obou směrech a podstatně méně ovlivní měření dynamických vlastností. Velikost měřených veličin bude měřena odporovými tenzometry s elektronikou pro měření a vyhodnocení. Vhodnou volbou geometrie měřících členů lze docílit stavu, kdy se měřený tah a moment vzájemně téměř neovlivňují. Otáčky budou měřeny optickou metodou.



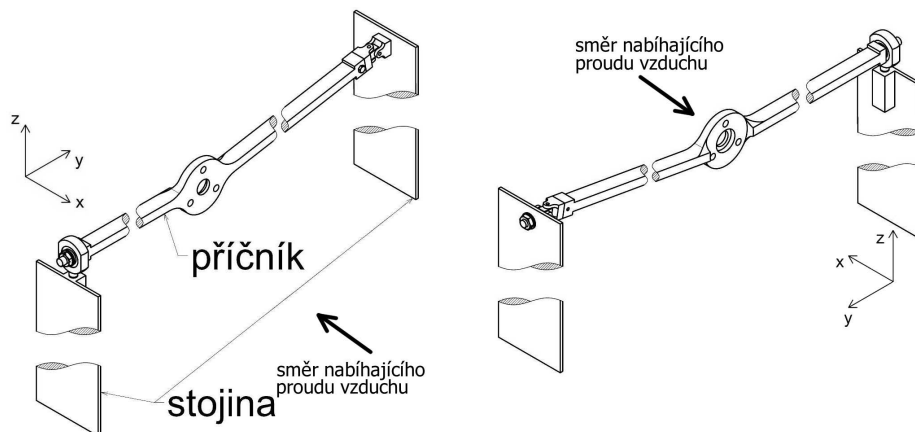


Obr. 4.2: Zařízení pro měření aerodynamických charakteristik vrtulí v tunelu VZLÚ  $\varnothing 3$  m s dynamometrem 150 kW [21].

## 4.1 Koncepční návrh

### 4.1.1 Varianta 1

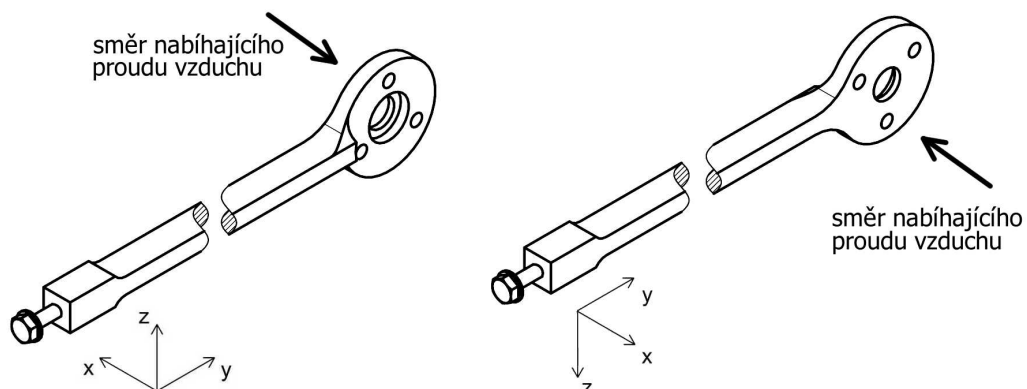
Základní konstrukční návrh varianty 1 je na obrázku 4.3. Měření probíhá na příčnici a dvou stojinách. Stojiny jsou planžety natočené tak, že umožňují pouze ohyb ve směru  $y$  a ve směrech  $x$ ,  $z$  jsou uvažovány jako dokonale tuhé. Příčník je dostatečně široký, aby stojiny neovlivňovaly nabíhající proud vzduchu (jeho šířka je větší, než 70 cm). Na jedné straně je uložen do kloubové hlavice, umožňující mu natočení ve všech směrech a na druhé straně je uložen do Kardanova kloubu, který umožní natočení okolo os  $x$  a  $z$ , ale neumožní rotaci kolem osy  $y$ .



Obr. 4.3: Konstrukční návrh varianty 1.

### 4.1.2 Varianta 2

Pro variantu 2 bylo uvažováno, že vibrační složka sil ve směrech  $y$  a  $z$  je stejná, jen fázově posunutá o  $90^\circ$ . Na základě tohoto předpokladu lze měřit vibrační sílu jen v jedné z těchto os. Měřící člen je dostatečně dlouhý, aby jeho upevnění nezasahovalo do proudu vzduchu aerodynamického tunelu. Konstrukční návrh varianty 2 je na obrázku 4.4.



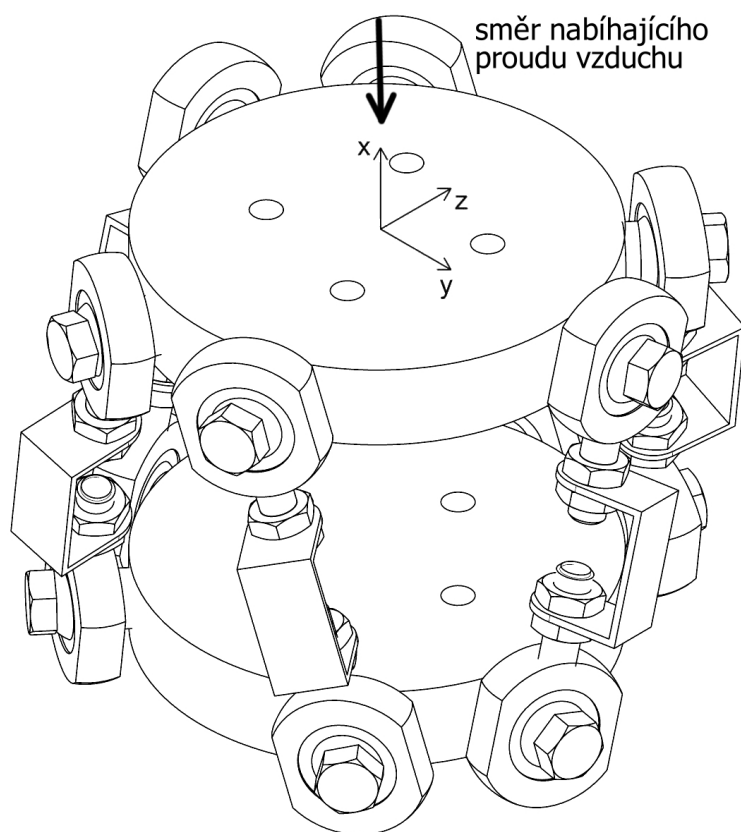
Obr. 4.4: Konstrukční návrh varianty 2.

### 4.1.3 Varianta 3

Jako třetí varianta byl zvolen hexapod (obrázek 4.5). Hexapod je šestikomponentní zařízení složené ze dvou paralelně umístěných základů spojených šesti členy s proměnnou délkou. Spodní deska je zpravidla pevně uchycená k statickému objektu,

poté může být hexapod použit k polohování horní desky, jelikož sestava má 6° volnosti (užíváno např. v leteckých simulátorech) nebo při nahrazení členů s proměnou délkou za deformační členy se snímači deformace je možné snímat zatížení působící na horní desku.

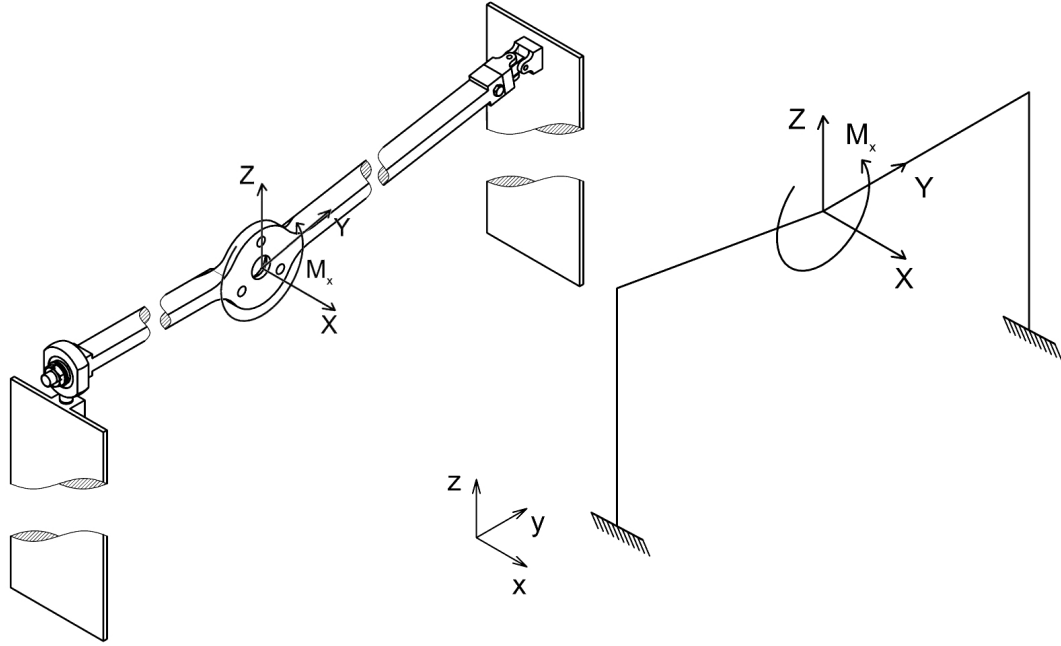
Tato nekonvenční varianta byla vybrána z důvodu poměrně jednoduché silové analýzy, jak bude objasněno v kapitole 4.2.3.



Obr. 4.5: Konstrukční návrh varianty 3.

## 4.2 Analýza zatížení

Pro každou variantu je znázorněno schéma společně s měřenými silami  $X$  (tah),  $Y$  (vodorovná složka vibrací)  $Z$  (svislá složka vibrací) a měřeným momentem  $M_x$  (moment pohonné jednotky). Síly  $Y$  a  $Z$  jsou funkcí otáček a „nedokonalosti“ zkoušené jednotky a vytváří na konstrukci střídavé zatížení. Zbylé dva momenty  $M_y$ ,  $M_z$  nejsou pro měření podstatné a jsou zanedbány díky vhodnému umístění a zapojení tenzometrů a vhodnému konstrukčnímu řešení.



Obr. 4.6: Silové schéma varianty 1.

#### 4.2.1 Varianta 1

Na obrázku 4.7 je zobrazeno silové schéma příčnicku a stojin v rovině  $y, z$  s rozborem sil.

Měřené veličiny jsou:  $Z, Y, M_x$  a reakce jsou definovány:

$$R_{ZA} = R_{ZB} = -Z \cdot \frac{l}{2} = -\frac{Z}{2}, \quad (4.1)$$

$$R_{YA} + R_{YB} = Y \rightarrow R_{YA} = R_{YB} = -\frac{Y}{2}, \quad (4.2)$$

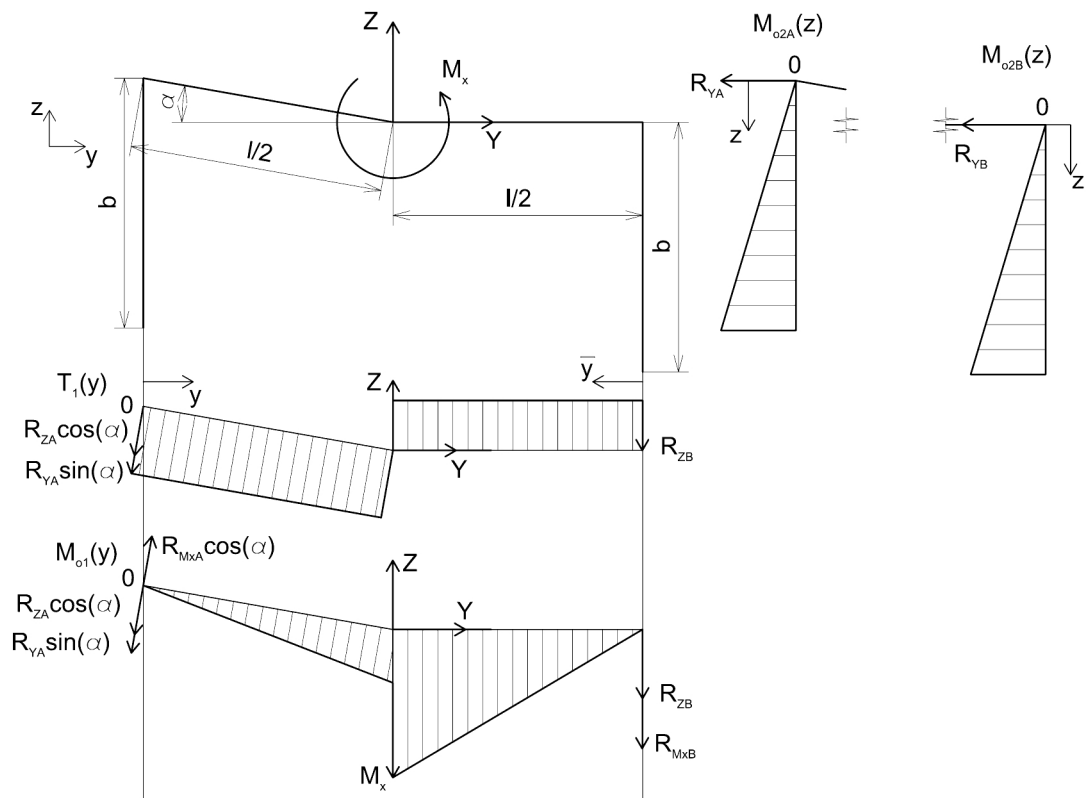
$$R_{M_x A} \cdot \frac{l}{2} = M_x \cdot \frac{l}{2} \rightarrow R_{M_x A} = \frac{M_x}{l} = -R_{M_x B},$$

$$\begin{aligned} M_{o1}(y) \Big|_{y \in (0; \frac{l}{2})} &= \left( (R_{M_x A} + R_{ZA}) \cdot \cos(\alpha) + R_{YA} \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot \frac{y}{\cos(\alpha)} \\ &= \left( \left( \frac{M_x}{l} + -\frac{Z}{2} \right) \cdot \cos(\alpha) - \frac{Y}{2} \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot \frac{y}{\cos(\alpha)}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

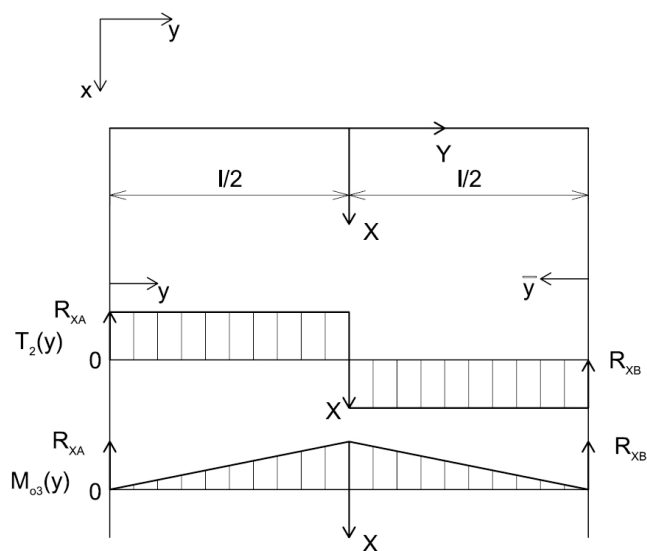
$$M_{o1}(\bar{y}) \Big|_{\bar{y} \in (0; \frac{l}{2})} = (R_{ZB} + R_{M_x B}) \cdot \bar{y} = -\left( \frac{M_x \cdot \bar{y}}{l} + \frac{Z \cdot \bar{y}}{2} \right), \quad (4.4)$$

$$M_{o2A}(z) = M_{o2B}(z) = R_{YA} \cdot z = \frac{Y \cdot z}{2}, \quad (4.5)$$

Na obrázku 4.8 je zobrazeno silové schéma příčnicku v rovině  $x, y$  s rozborem sil.



Obr. 4.7: Silové schéma příčnicku a stojin v rovině  $y, z$ .



Obr. 4.8: Silové schéma příčnicku v rovině  $x, y$ .

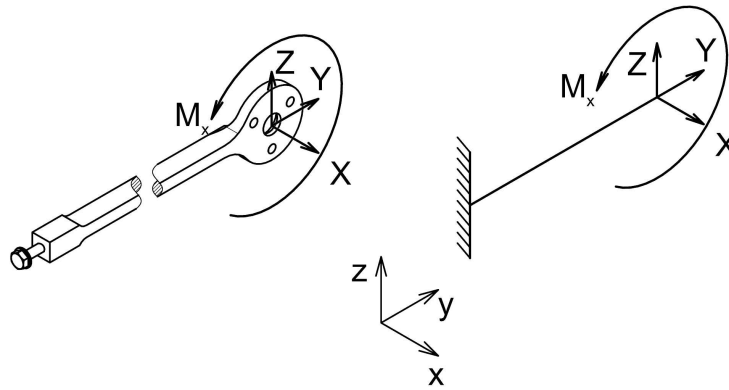
Měřená veličina je:  $X$  a reakce jsou:

$$R_{XA} = R_{XB} = \frac{X}{2}, \quad (4.6)$$

$$M_{o3}(y) \mid_{y \in (0; \frac{l}{2})} = R_{XA} \cdot y = \frac{X \cdot y}{2}, \quad (4.7)$$

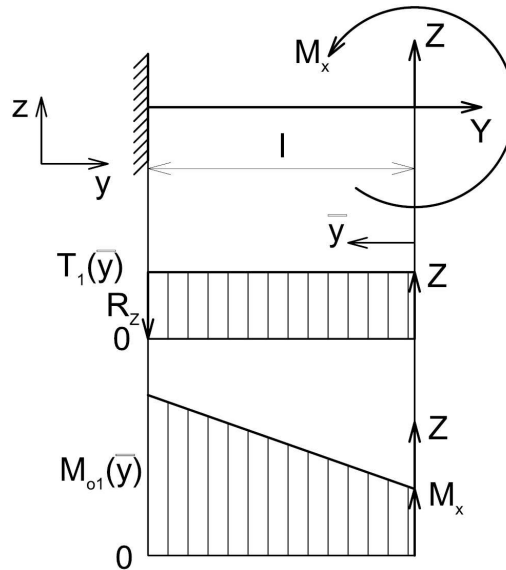
$$M_{o3}(\bar{y}) \mid_{\bar{y} \in (0; \frac{l}{2})} = R_{XB} \cdot \bar{y} = \frac{X \cdot \bar{y}}{2}, \quad (4.8)$$

#### 4.2.2 Varianta 2



Obr. 4.9: Silové schéma varianty 2.

Na obrázku 4.10 je zobrazeno silové schéma měřícího členu v rovině  $y, z$  s rozbohem sil.



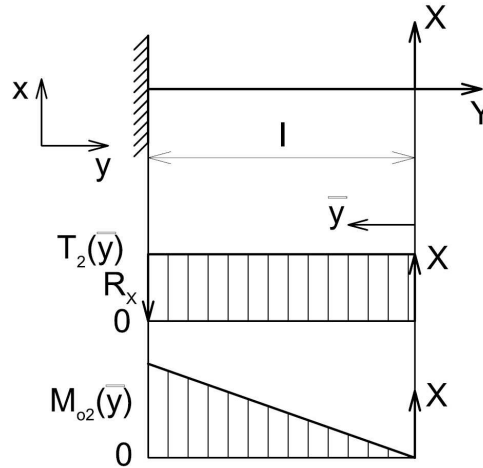
Obr. 4.10: Silové schéma měřícího členu v rovině  $y, z$ .

Měřené veličiny jsou:  $Z$ ,  $Y$ ,  $M_x$  a reakce jsou definovány:

$$R_Z = -Z \quad (4.9)$$

$$M_{o1}(\bar{y}) = M_x + Z \cdot \bar{y} \quad (4.10)$$

Na obrázku 4.11 je zobrazeno silové schéma měřícího členu v rovině  $x$ ,  $y$  s rozložením sil.



Obr. 4.11: Silové schéma měřícího členu v rovině  $x$ ,  $y$ .

Měřená veličina je:  $X$  a reakce jsou:

$$R_X = -X \quad (4.11)$$

$$M_{o2}(\bar{y}) = X \cdot \bar{y} \quad (4.12)$$

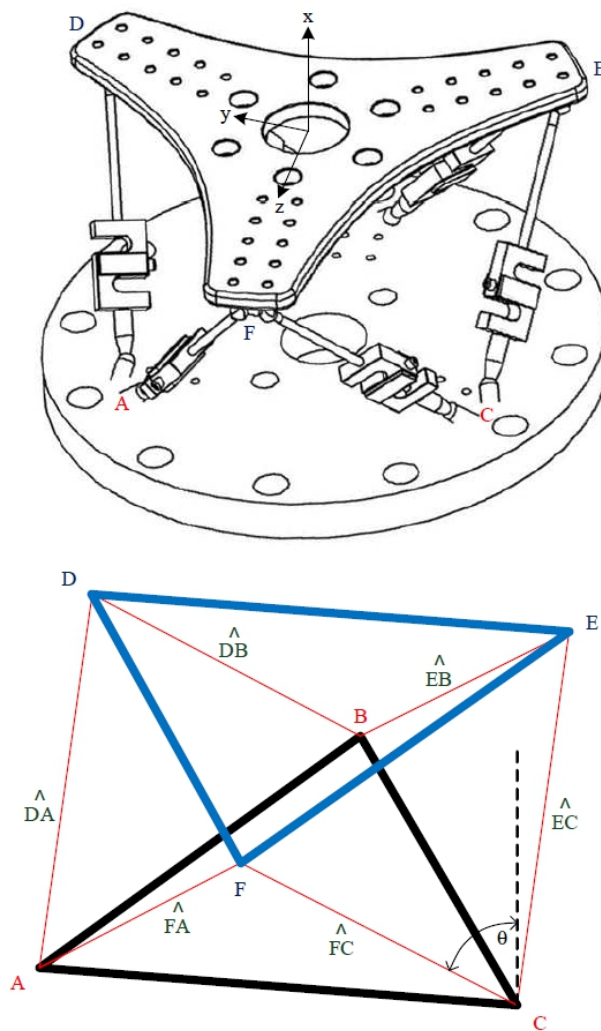
### 4.2.3 Varianta 3

Dle obrázku 4.12 má každý deformační člen jedinečný jednotkový vektor, který odpovídá směru jeho hlavní osy, tedy směru působení axiální síly zatěžující daný deformační člen ( $\vec{FA}$ ,  $\vec{DA}$ , atd.)

Reakce jednotlivých deformačních členů jsou lineárně nezávislé a tedy ze znalosti geometrie hexapodu lze sestavit soustavu rovnic, která popisuje vztah mezi měřenými silami na jednotlivých deformačních členech a silami působícími na plošinu s měřenou pohonnou jednotkou

$$\begin{bmatrix} \overrightarrow{FA} \\ \overrightarrow{DA} \\ \overrightarrow{DB} \\ \overrightarrow{EB} \\ \overrightarrow{EC} \\ \overrightarrow{FC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

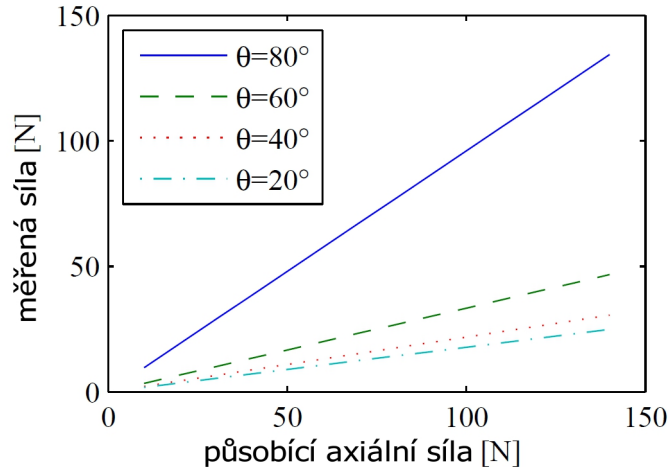
kde:  $\overrightarrow{FA}$  až  $\overrightarrow{FC}$  jsou síly měřené deformačními členy,  
 $X$  až  $M_z$  jsou síly a momenty působící na plošinu s pohonnou jednotkou a  
 $c_{ij}$  jsou koeficienty tuhosti měřící sestavy.



Obr. 4.12: Schéma hexapodu a zjednodušené schéma, kde černý trojúhelník je základna a modrý trojúhelník je plošina s měřenou pohonnou jednotkou [18].

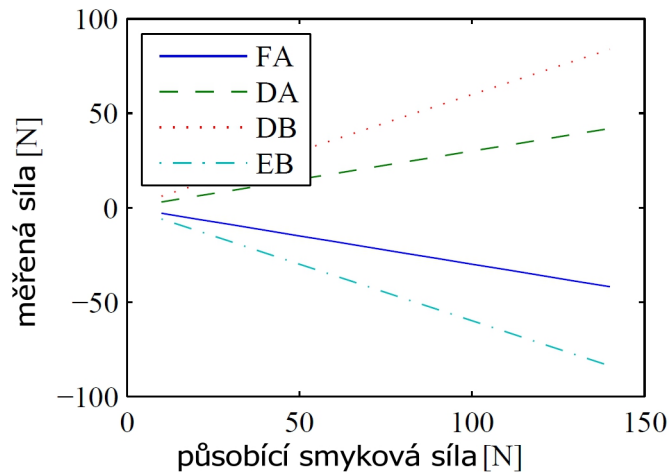


Za předpokladu čistě axiálního zatížení vzniká vzhledem k symetrii sestavy na všech šesti vzpěrách stejná síla, která je závislá na úhlu naklonění vzpěr (viz. obrázek 4.13).



Obr. 4.13: Teoretická síla ve všech šesti vzpěrách v závislosti na velikosti působícího zatížení a úhlu naklonění vzpěr [18].

Při působení čistě smykové síly vzniká v každé vzpěře jiné zatížení, jelikož určité vzpěry jsou namáhány tlakem a ostatní tahem, jak je znázorněno na obrázku 4.14. Zobrazeny jsou jen 4 vzpěry, protože ve dvou párech vzpěr je napětí identické.



Obr. 4.14: Teoretická síla ve čtyřech vzpěrách v závislosti na působící smykové síle [18].

Při působení obecné síly  $\vec{F}$  se zatížení rozdělí do všech šesti vzpěr ve směru  $\vec{F}\vec{A}$

až  $\vec{FC}$  na síly  $\vec{F}_1$  až  $\vec{F}_6$  a pro sílu  $\vec{F}$  platí

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^6 \vec{F}_i. \quad (4.14)$$

Dále je provedena normalizace vektorů  $\vec{FA}$  až  $\vec{FC}$

$$\vec{FA}_n = \frac{\vec{FA}}{|\vec{FA}|}. \quad (4.15)$$

Jelikož vektory sil  $\vec{F}_1$  až  $\vec{F}_6$  jsou totožné s normovanými vektory deformačních členů  $\vec{FA}_n$  až  $\vec{FC}_n$  lze při rozložení normovaných vektorů deformačních členů do souřadnic  $x$ ,  $y$ ,  $z$  celkovou sílu  $\vec{F}$  psát jako

$$\begin{bmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{FA}_x & \vec{DA}_x & \vec{DB}_x & \vec{EB}_x & \vec{EC}_x & \vec{FC}_x \\ \vec{FA}_y & \vec{DA}_y & \vec{DB}_y & \vec{EB}_y & \vec{EC}_y & \vec{FC}_y \\ \vec{FA}_z & \vec{DA}_z & \vec{DB}_z & \vec{EB}_z & \vec{EC}_z & \vec{FC}_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} |\vec{F}_1| \\ |\vec{F}_2| \\ |\vec{F}_3| \\ |\vec{F}_4| \\ |\vec{F}_5| \\ |\vec{F}_6| \end{bmatrix}, \quad (4.16)$$

kde koeficienty  $\vec{FA}_x$  až  $\vec{FC}_z$  jsou silovou částí matice poddajnosti (inverzní matice k matici tuhosti z rovnice (4.13)) a jsou dány geometrií dané měřicí soustavy.

Při působení momentu je řešení obdobné. Stanoví se rádiusvektory  $\vec{r}_a$  až  $\vec{r}_f$  uzlů sestavy  $A$  až  $F$  daný vzdáleností uzlů od středu souřadného systému. Poté lze obecný moment vyjádřit jako

$$\vec{M} = \vec{r}_a \times (\vec{F}_1 + \vec{F}_6) + \vec{r}_b \times (\vec{F}_2 + \vec{F}_3) + \vec{r}_c \times (\vec{F}_4 + \vec{F}_5) + \vec{r}_d \times (-\vec{F}_1 - \vec{F}_2) + \vec{r}_e \times (-\vec{F}_3 - \vec{F}_4) + \vec{r}_f \times (-\vec{F}_5 - \vec{F}_6). \quad (4.17)$$

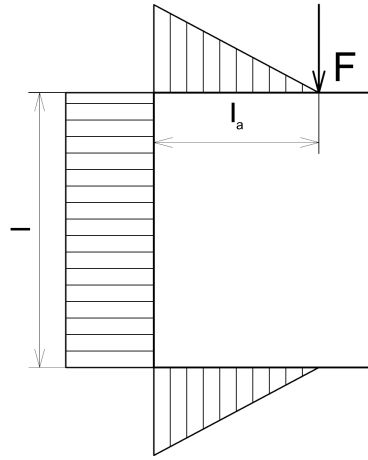
Obdobným řešením jako u sil se získá rovnice

$$\begin{bmatrix} \vec{M}_x \\ \vec{M}_y \\ \vec{M}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} |\vec{F}_1| \\ |\vec{F}_2| \\ |\vec{F}_3| \\ |\vec{F}_4| \\ |\vec{F}_5| \\ |\vec{F}_6| \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

kde koeficienty  $k_{11}$  až  $k_{36}$  jsou momentovou částí matice poddajnosti a jsou dány geometrií dané měřicí soustavy.

Spojením rovnic (4.16) a (4.18) vznikne vztah pro stanovení složek obecného zatížení působícího na plošinu s pohonnou jednotkou

$$\begin{bmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \\ \vec{M}_x \\ \vec{M}_y \\ \vec{M}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overrightarrow{FA}_x & \overrightarrow{DA}_x & \overrightarrow{DB}_x & \overrightarrow{EB}_x & \overrightarrow{EC}_x & \overrightarrow{FC}_x \\ \overrightarrow{FA}_y & \overrightarrow{DA}_y & \overrightarrow{DB}_y & \overrightarrow{EB}_y & \overrightarrow{EC}_y & \overrightarrow{FC}_y \\ \overrightarrow{FA}_z & \overrightarrow{DA}_z & \overrightarrow{DB}_z & \overrightarrow{EB}_z & \overrightarrow{EC}_z & \overrightarrow{FC}_z \\ k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} |\vec{F}_1| \\ |\vec{F}_2| \\ |\vec{F}_3| \\ |\vec{F}_4| \\ |\vec{F}_5| \\ |\vec{F}_6| \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$



Obr. 4.15: Silové schéma měřícího členu hexapodu.

Numerický výpočet matice poddajnosti z rovnice (4.19) pro navržené konstrukční řešení je v příloze B.

Jelikož síly v deformačních členech jsou příliš malé, je nutné měřené napětí zesílit. Toho je docíleno zavedením ohybového momentu na deformační člen, jak je patrné ze silového schématu na obrázku 4.15. Z něho vyplývá, že měřený ohybový moment v místě deformačních snímačů je konstantní (v celé délce  $l$ ) a je roven

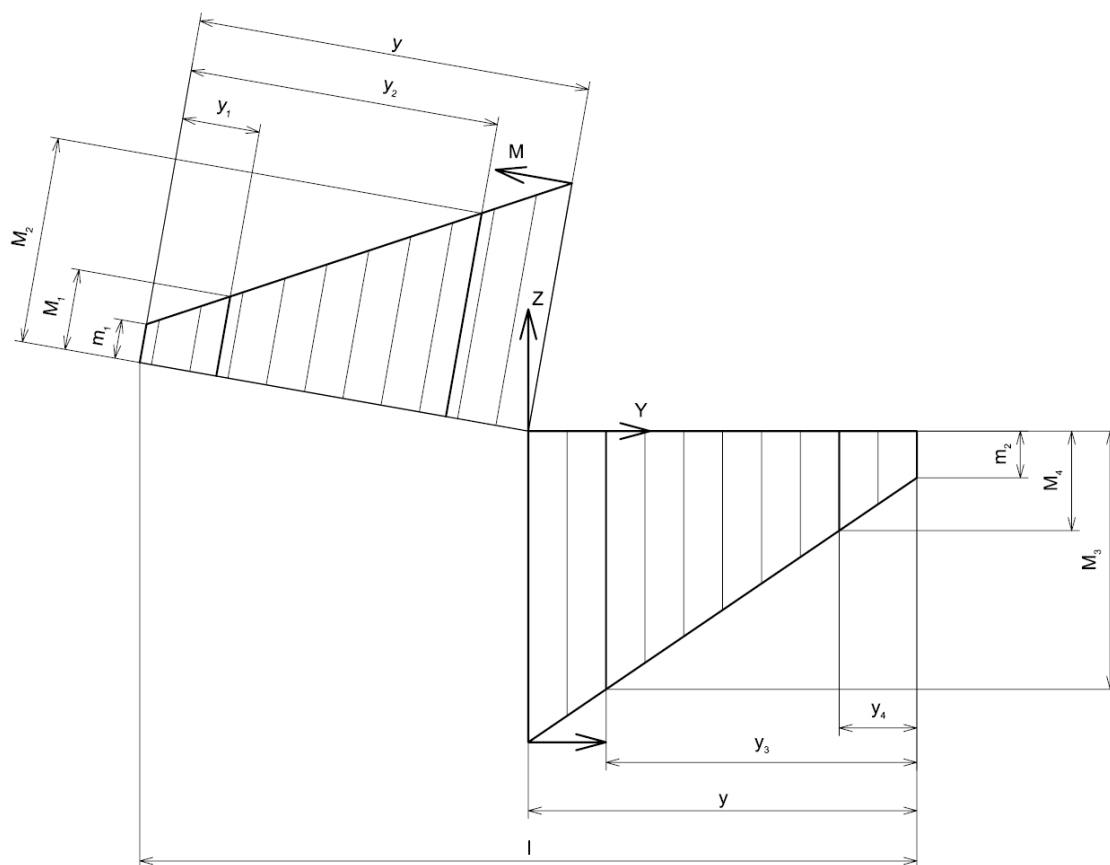
$$M_o = F \cdot l_a. \quad (4.20)$$

## 4.3 Analýza parazitních vlivů na měřenou veličinu

### 4.3.1 Varianta 1

Předpokládá se, že spojení příčnicku se stojinami nebude dokonalé a navržené kloubové uložení bude přenášet určitý moment. Aby bylo možné stanovit jeho vliv na

měřenou veličinu je nutné stanovit ohybový moment na 4 místech příčnicku. Na obrázku 4.16 je zobrazen rozbor parazitních vlivů v rovině  $y, z$ , kde:



Obr. 4.16: Schéma parazitního silového namáhání v rovině  $y, z$ .

$l$  je šířka příčnicku,

$M$  je moment pohonné jednotky,

$M_i$  je moment měřený tenzometry,

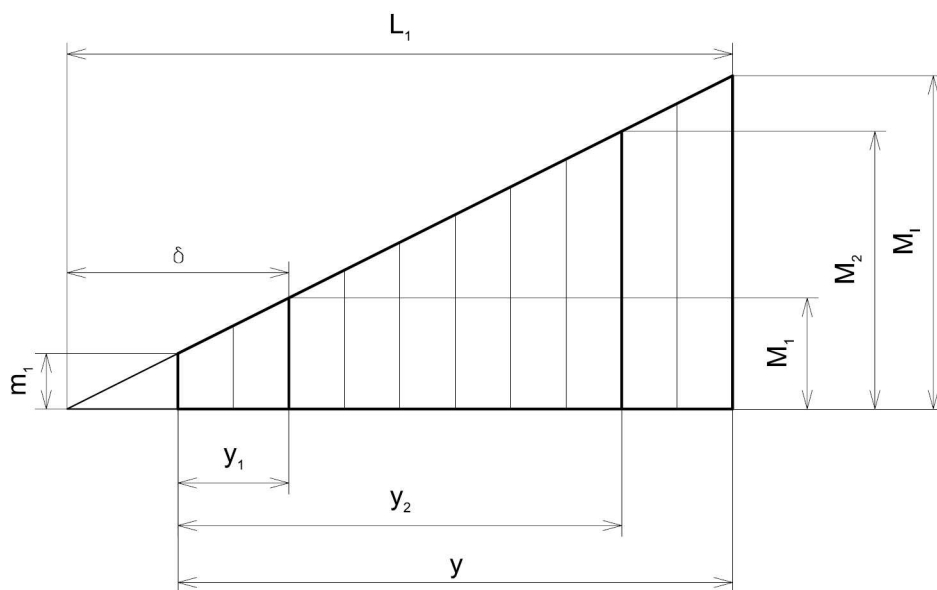
$m_i$  je parazitní namáhání přenášené napojením příčnicku na stojiny,

$y$  je poloha působíště sil pohonné jednotky,

$y_i$  je poloha tenzometrů,

$Y$   
 $Z$  složky vibrací.

Při znalosti měřených momentů  $M_i$ , poloh tenzometrů  $y_i$  a působíště sil pohonné jednotky  $y$  se stanoví moment pohonné jednotky a kolmá složka vibrací. Pro levou stranu příčnicku platí dle obrázku 4.17

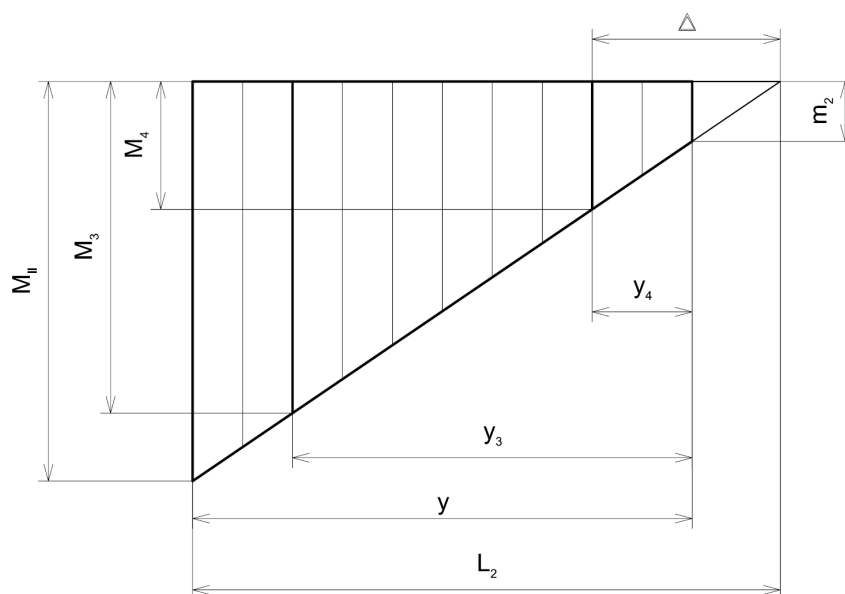


Obr. 4.17: Parazitního silového namáhání levé strany příčnicku.

$$\frac{M_2 - M_1}{y_2 - y_1} = \frac{M_1}{\delta},$$

$$M_I = \frac{M_2 - M_1}{y_2 - y_1} \cdot L_1 = \frac{M_2 - M_1}{y_2 - y_1} \cdot (y + \delta - y_1), \quad (4.21)$$

$$m_1 = \frac{M_2 - M_1}{y_2 - y_1} \cdot (\delta - y_1). \quad (4.22)$$



Obr. 4.18: Parazitního silového namáhání pravé strany příčnicku.

A pro pravou stranu platí dle obrázku 4.18

$$\frac{M_3 - M_4}{y_3 - y_4} = \frac{M_4}{\Delta},$$

$$M_{\text{II}} = \frac{M_3 - M_4}{y_3 - y_4} \cdot L_2 = \frac{M_3 - M_4}{y_3 - y_4} \cdot (y + \Delta - y_4), \quad (4.23)$$

$$m_2 = \frac{M_3 - M_4}{y_3 - y_4} \cdot (\Delta - y_4). \quad (4.24)$$

V ostatních rovinách je princip výpočtu stejný, proto zde není uveden. Na stojících bude parazitní moment stejný, jako na koncích příčnicku.

Z provedené analýzy vyplývá, že měření parazitních vlivů je pouze funkcí polohy tenzometrů a ne měřeného zatížení a parazitní vlivy mohou být eliminovány počáteční kalibrací měřících tenzometrů.

### 4.3.2 Varianta 2

Druhá varianta je staticky určitá úloha, proto lze parazitní vlivy zanedbat.

### 4.3.3 Varianta 3

Analýza parazitních vlivů varianty 3 je obdobná k variantě 1. Kloubové hlavice mohou vlivem tření přenášet určitý moment. Nicméně měření parazitních vlivů není funkcí měřeného zatížení a parazitní vlivy mohou být eliminovány počáteční kalibrací měřícího zařízení.

## 4.4 Pevnostní kontrola

Pro pevnostní kontrolu se vycházelo z maximálních zatížení popsaných v tabulce 3.4. Minimální hodnoty statické a únavové jistoty byly stanoveny na

$$j_{\text{stat}} = 1,5,$$

$$j_{\text{unav}} = 1,1.$$

### 4.4.1 Varianta 1

#### Pevnostní kontrola příčnicku

##### Zatížení

$X = 120 \text{ N}$  je tah pohonné jednotky,

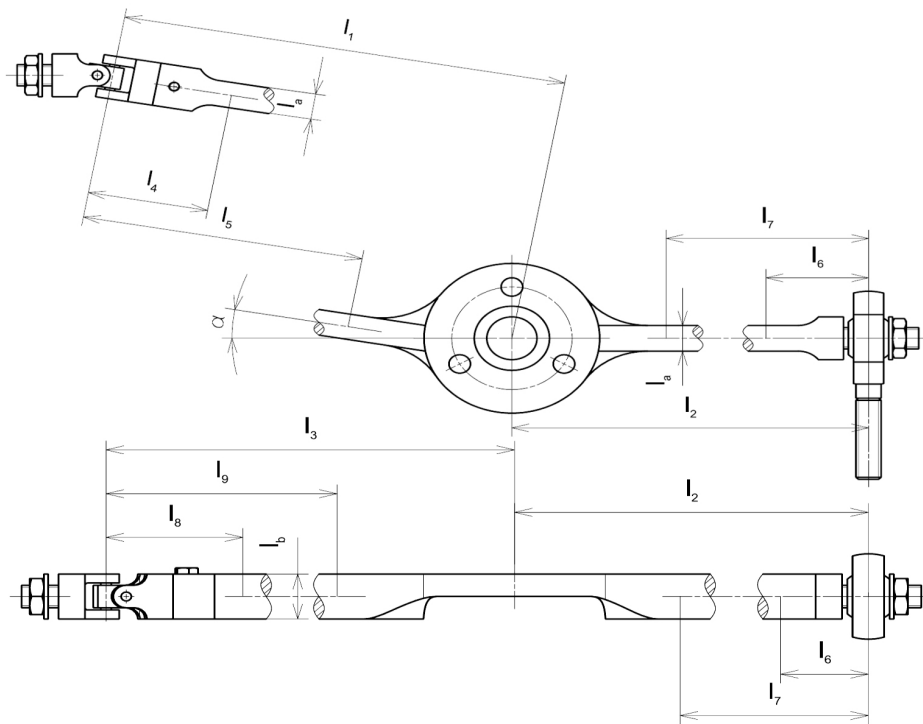
$Y = Z = 18 \text{ N}^*$  je maximální hodnota vibrační síly ve směru osy  $y$ , resp.  $z$ ,

$M_x = 1,4 \text{ N} \cdot \text{m}$  je moment pohonné jednotky.

---

\*Síly  $Y$  a  $Z$  vytváří střídavé zatížení v závislosti na otáčkách motoru, ale pro pevnostní kontrolu je brána jejich maximální hodnota.

## Definice geometrie



Obr. 4.19: Příčník (kóty na levé straně jsou rovnoběžné s osou levého ramene příčníku).

Rozměry jsou znázorněny na obrázku 4.19, kde:

$l_a = 8 \text{ mm}$  je výška příčníku v místě tenzometrů,

$l_b = 11 \text{ mm}$  je šířka příčníku v místě tenzometrů,

$l_1 = 363 \text{ mm}$  je vzdálenost působíště síly  $X$  od levého kloubového uložení,

$l_2 = 380 \text{ mm}$  je vzdálenost působíště sil a momentu od pravého kloubového uložení,

$l_3 = 366 \text{ mm}$  je vzdálenost působíště sil  $Y$ ,  $Z$  a momentu  $M_x$  od levého kloubového uložení,

$l_4 = 26 \text{ mm}$  jsou vzdálenosti tenzometrů od levého kloubového uložení,

$l_5 = 334 \text{ mm}$

$l_6 = 19 \text{ mm}$  jsou vzdálenosti tenzometrů od pravého kloubového uložení,

$l_7 = 348 \text{ mm}$

$l_8 = 29 \text{ mm}$  jsou vzdálenosti tenzometrů od levého kloubového uložení,

$l_9 = 337 \text{ mm}$

$\alpha = 10^\circ$  je úhel vzepětí příčníku.

## Materiálové charakteristiky

Za materiál příčnicku byla zvolena ocel S355MC (1.0976) s charakteristikami [8]:

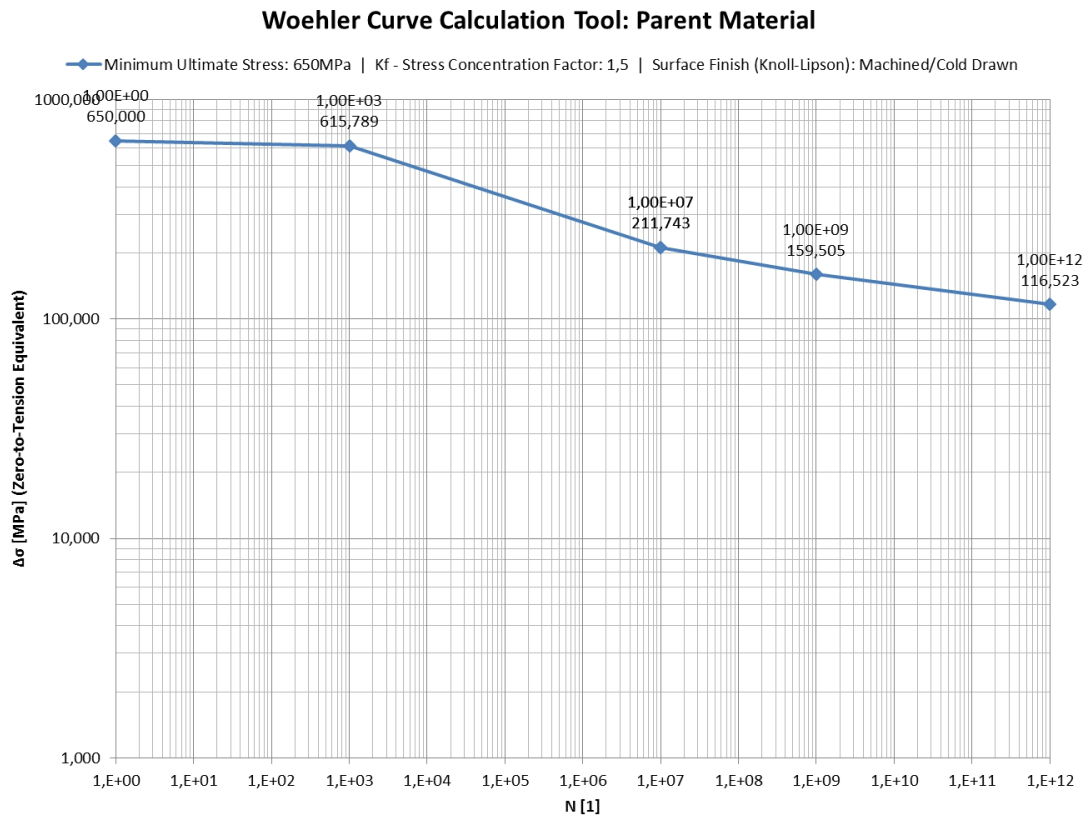
$$E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\sigma_k = \min 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\sigma_p = \min 650 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$\sigma_c = 160 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  z Woehlerovy křivky pro  $10^9$  cyklů (při frekvenci  $f = 666$  Hz je to 417 hodin provozu) – viz. graf na obrázku 4.20,

$$\sigma_u = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$



Obr. 4.20: Spočtená Woehlerova křivka pro ocel S355MC (1.0976).

## Průřezové charakteristiky

Kvadratický moment průřezu k ose  $z$  je

$$J_z = \frac{1}{12} \cdot l_a \cdot l_b^3 = \frac{1}{12} \cdot 8 \cdot 11^3 = 887 \text{ mm}^4$$

a k ose  $x$

$$J_x = \frac{1}{12} \cdot l_a^3 \cdot l_b = \frac{1}{12} \cdot 8^3 \cdot 11 = 469 \text{ mm}^4.$$



## Výpočet napětí

Reakční síly od zatížení jsou stanoveny

$$\begin{aligned}R_X &= \frac{X}{2} = \frac{120}{2} = 60 \text{ N}, \\R_Y &= \frac{Y}{2} = \frac{18}{2} = 9 \text{ N}, \\R_{Z1} &= \frac{Z}{2} = \frac{18}{2} = 9 \text{ N}, \\R_{Z2} &= \frac{M_x}{l_2 + l_3} = \frac{1\,400}{380 + 366} = 1,88 \text{ N}.\end{aligned}$$

Pro pevnostní kontrolu jsou podstatná místa s větším ohybovým momentem, tedy místa  $l_5$  a  $l_7$ . Z obrázku 4.7 je patrné, že na jednom tenzometru bude ohybový moment větší, než na druhém v závislosti směru působení momentu  $M_x$ . Pro pevnostní kontrolu je podstatný jen větší moment. Momenty jsou definovány rovnicemi

$$\begin{aligned}M_{oz} &= R_X \cdot l_7 = 60 \cdot 348 = 20\,900 \text{ N} \cdot \text{mm}, \\M_{ox1} &= (R_{Z1} + R_{Z2}) \cdot l_7 = (9 + 1,88) \cdot 348 = 3\,790 \text{ N} \cdot \text{mm}, \\M_{ox1} &= \left( (R_{Z1} + R_{Z2}) \cdot \cos(\alpha) + R_Y \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot l_5 = \left( (9 + 1,88) \cdot \cos(10^\circ) + 9 \cdot \sin(10^\circ) \right) \cdot 334 \\&= 4\,100 \text{ N} \cdot \text{mm}, \\M_{ox} &= \max(M_{ox1}; M_{ox2}) = 4\,100 \text{ N} \cdot \text{mm}.\end{aligned}$$

Napětí od tahu/tlaku je vůči napětí od ohybu zanedbatelné a úloha může být řešena jako jednoosá. Výsledná napětí v místech měření jsou

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{M_{oz} \cdot \frac{l_b}{2}}{J_z} = \frac{20\,900 \cdot \frac{11}{2}}{887} = 129 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \\ \sigma_z &= \frac{M_{ox} \cdot \frac{l_a}{2}}{J_x} = \frac{4\,100 \cdot \frac{8}{2}}{469} = 35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.\end{aligned}$$

Jistota konstrukce je definována vztahem

$$j = \frac{\sigma_{mezni}}{\sigma_{provozni}}. \quad (4.25)$$

Statická jistota je

$$\begin{aligned}j_{stat x} &= \frac{\sigma_k}{\sigma_x} = \frac{355}{129} = 2,7, \\j_{stat z} &= \frac{\sigma_k}{\sigma_z} = \frac{355}{35} = 10,\end{aligned}$$

a únavová jistota

$$\begin{aligned}j_{unav x} &= \frac{\sigma_c}{\sigma_x} = \frac{160}{129} = 1,2, \\j_{unav z} &= \frac{\sigma_c}{\sigma_z} = \frac{160}{35} = 4,6.\end{aligned}$$

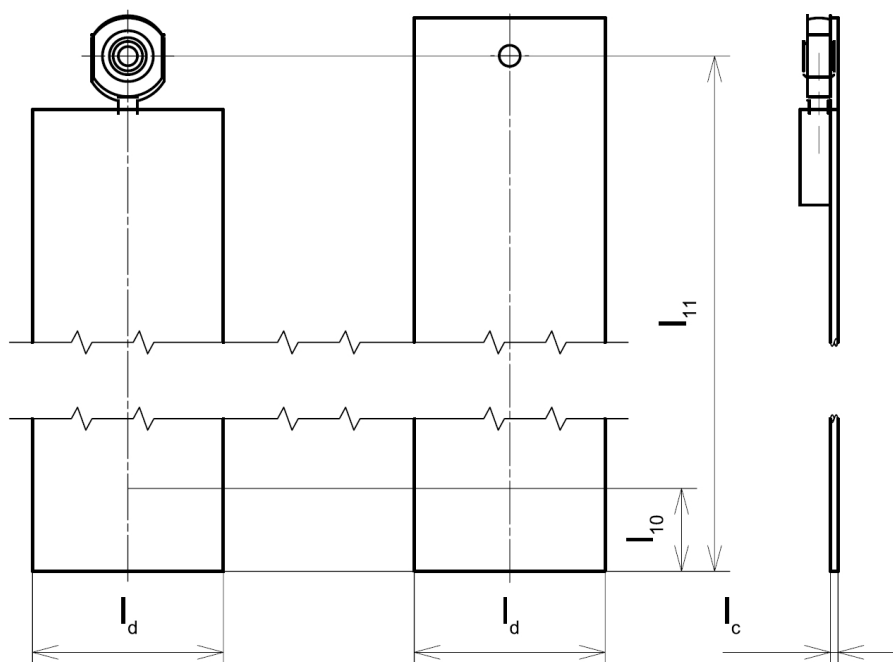
## Pevnostní kontrola stojin

### Zatížení

$Y = 18 \text{ N}^*$  je maximální hodnota vibrační síly ve směru osy  $y$ .

### Definice geometrie

Rozměry jsou znázorněny na obrázku 4.21, kde:



Obr. 4.21: Stojina.

$l_c = 2 \text{ mm}$  je tloušťka stojin v místě tenzometrů,

$l_d = 50 \text{ mm}$  je šířka stojin v místě tenzometrů,

$l_{10} = 14 \text{ mm}$  je vzdálenost tenzometrů od kraje stojin,

$l_{11} = 400 \text{ mm}$  je působišťe sil pohonné jednotky od kraje stojin.

### Materiálové charakteristiky

Za materiál příčnicku byla zvolena ocel S355MC (1.0976) s charakteristikami [8]:

$$E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\sigma_k = \min 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\sigma_p = \min 650 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$\sigma_c = 160 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  z Woehlerovy křivky pro  $10^9$  cyklů (při frekvenci  $f = 666 \text{ Hz}$  je to 417 hodin provozu) – viz. graf na obrázku 4.20,

$$\sigma_u = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

---

\*Síla  $Y$  vytváří střídavé zatížení v závislosti na otáčkách motoru, ale pro pevnostní kontrolu je brána její maximální hodnota.

### Průřezové charakteristiky

Kvadratický moment průřezu k ose  $x$  je

$$J_x = \frac{1}{12} \cdot l_c^3 \cdot l_d = \frac{1}{12} \cdot 2^3 \cdot 50 = 33,3 \text{ mm}^4$$

a kvadratický poloměr ke stejné ose je určen

$$i_x = \sqrt{\frac{J_x}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{12} \cdot l_c^3 \cdot l_d}{l_c \cdot l_d}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{12} \cdot 2^3 \cdot 50}{2 \cdot 50}} = 0,577 \text{ mm}.$$

### Výpočet ohybového napětí

Reakční síla od zatížení je stanovena

$$R_Y = \frac{Y}{2} = \frac{18}{2} = 9 \text{ N},$$

ohybový moment v místě měření je definován

$$M_{ox} = R_Y \cdot (l_{11} - l_{10}) = 7,5 \cdot (400 - 14) = 3470 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

a výsledné ohybové napětí v místě měření je

$$\sigma_y = \frac{M_{ox} \cdot \frac{l_c}{2}}{J_x} = \frac{3470 \cdot \frac{2}{2}}{33,3} = 104 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

Statická jistota je definována vztahem

$$j_{stat y} = \frac{\sigma_k}{\sigma_y} = \frac{355}{104} = 3,4$$

a únavová jistota

$$j_{unav y} = \frac{\sigma_c}{\sigma_y} = \frac{160}{104} = 1,5.$$

### Výpočet napětí od vzpěru

Je uvažován 3. případ vzpěru. Štíhlost je definována vztahem

$$\lambda = \frac{l_{11}}{i_x} = \frac{400}{0,577} = 693.$$

Mezní štíhlost je charakteristikou materiálu a pro třetí případ vzpěru platí

$$\lambda_{mez} = \sqrt{\frac{n \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5}{300}} = 115.$$

Jelikož je  $\lambda > \lambda_{mez}$  platí Eulerův vztah a maximální dovolené napětí se stanoví

$$\sigma_D = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5}{693^2} = 8,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

a maximální síla je

$$F_{\max} = \sigma_D \cdot A = 8,22 \cdot 2 \cdot 50 = 822 \text{ N}.$$

Je vidno, že maximální síla, kterou konstrukce vydrží, je několikrát větší než maximální měřené síly.

## 4.4.2 Varianta 2

Pro pevnostní kontrolu se vycházelo z maximálních zatížení popsaných v tabulce 3.4.

### Zatížení

$X = 120 \text{ N}$  je tah pohonné jednotky,

$Z = 18 \text{ N}^*$  je maximální hodnota vibrační síly ve směru osy  $z$ ,

$M_x = 1,4 \text{ N} \cdot \text{m}$  je moment pohonné jednotky.

Síla  $Y$  vytváří jen tahové/tlakové napětí a při své velikosti je z pevnostního hlediska zanedbatelná.

### Definice geometrie

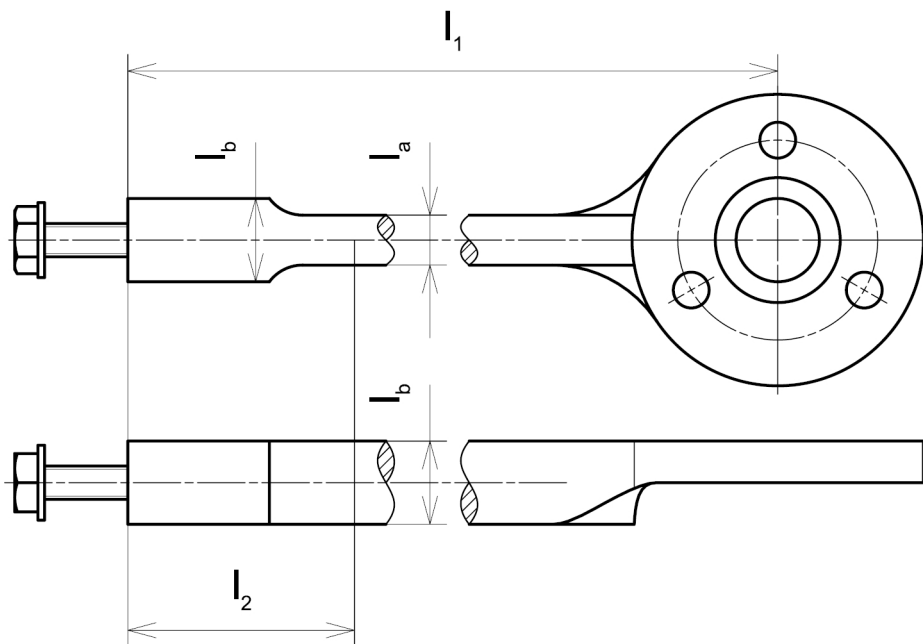
Rozměry jsou znázorněny na obrázku 4.22, kde:

$l_a = 10 \text{ mm}$  je výška měřícího členu v místě tenzometrů,

$l_b = 14 \text{ mm}$  je šířka měřícího členu v místě tenzometrů,

$l_1 = 375 \text{ mm}$  je působíště sil pohonné jednotky od kraje měřícího členu,

$l_2 = 26 \text{ mm}$  je vzdálenost tenzometrů od kraje měřícího členu.



Obr. 4.22: Měřící člen.

\*Síla  $Z$  je proměnná v čase v závislosti na otáčkách motoru, ale pro pevnostní kontrolu je brána její maximální hodnota.

## Materiálové charakteristiky

Za materiál příčnicku byla zvolena ocel S355MC (1.0976) s charakteristikami [8]:

$$E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\sigma_k = \min 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\sigma_p = \min 650 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$\sigma_c = 160 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  z Woehlerovy křivky pro  $10^9$  cyklů (při frekvenci  $f = 666$  Hz je to 417 hodin provozu) – viz. graf na obrázku 4.20,

$$\sigma_u = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

## Průřezové charakteristiky

Kvadratický moment průřezu k ose  $z$  je

$$J_z = \frac{1}{12} \cdot l_a \cdot l_b^3 = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 12^3 = 2\,290 \text{ mm}^4$$

a k ose  $x$

$$J_x = \frac{1}{12} \cdot l_a^3 \cdot l_b = \frac{1}{12} \cdot 10^3 \cdot 12 = 1\,170 \text{ mm}^4.$$

## Výpočet napětí

Reakční síly od zatížení jsou stanoveny

$$R_X = -X = 120 \text{ N},$$

$$R_Z = -Z = 18 \text{ N}.$$

$$M_{Oz} = X \cdot (l_1 - l_2) = 120 \cdot (375 - 26) = 41\,900 \text{ N} \cdot \text{mm},$$

$$M_{Oy} = M_x + Z \cdot (l_1 - l_2) = 1\,400 + 18 \cdot (375 - 26) = 7\,680 \text{ N} \cdot \text{mm}.$$

Výsledná napětí v místech měření jsou

$$\sigma_x = \frac{M_{Oz} \cdot \frac{l_b}{2}}{J_z} = \frac{41\,900 \cdot \frac{14}{2}}{2\,290} = 128 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\sigma_z = \frac{M_{Oy} \cdot \frac{l_a}{2}}{J_x} = \frac{7\,680 \cdot \frac{10}{2}}{1\,170} = 46 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

Statická jistota je

$$j_{stat x} = \frac{\sigma_k}{\sigma_x} = \frac{355}{128} = 2,8,$$

$$j_{stat z} = \frac{\sigma_k}{\sigma_z} = \frac{355}{46} = 7,7$$

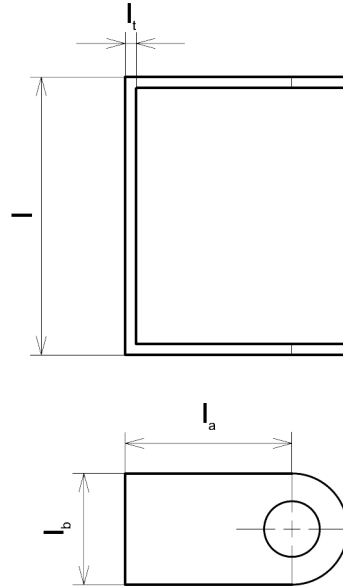
a únavová jistota

$$j_{unav x} = \frac{\sigma_c}{\sigma_x} = \frac{160}{175} = 1,2,$$

$$j_{unav z} = \frac{\sigma_c}{\sigma_z} = \frac{160}{46} = 3,5.$$

### 4.4.3 Varianta 3

#### Definice geometrie



Obr. 4.23: Měřící člen hexapodu.

Rozměry jsou znázorněny na obrázku 4.23, kde:

$l = 20 \text{ mm}$  je délka měřícího členu,

$l_a = 10 \text{ mm}$  je velikost ramene měřícího členu,

$l_b = 10 \text{ mm}$  je šířka měřícího členu,

$l_t = 1,5 \text{ mm}$  je tloušťka měřícího členu,

#### Zatížení

Z předpokladu symetrie se zatížení od tahu a momentu rozdělí do všech 6 vzpěr rovným dílem. Smyková síla bude dle obrázku 4.14 v nejzatíženější vzpěře přibližně poloviční. Na nejnamáhanější vzpěru působí zatížení dle obrázku 4.24, kde:

$X = \frac{120}{6} = 20 \text{ N}$  je síla od tahu,

$Z = \frac{18}{2} = 9 \text{ N}$  je síla od bočních vibrací,

$F_{M_x} = \frac{1400}{6 \cdot 37,5} = 6,22 \text{ N}$  je síla od momentu motoru,

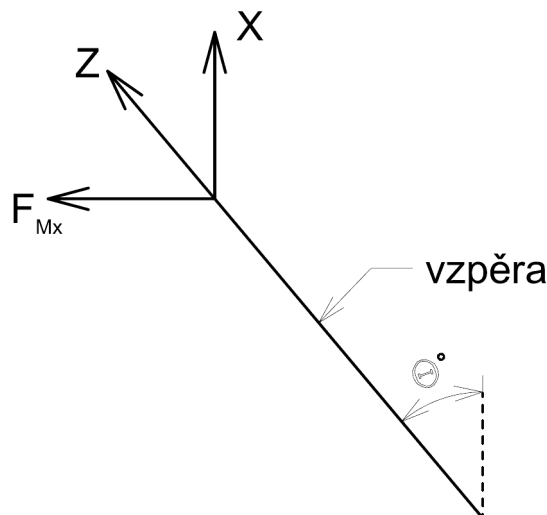
$\Theta = 15^\circ$  je velikost úhlu naklonění vzpěr.

Celková síla působící ve vzpěře je

$$F = \frac{20}{\cos(15^\circ)} + 9 + \frac{6,22}{\cos(75^\circ)} = 53,7 \text{ N}.$$

Ohybový moment v místě deformačních snímačů je dle rovnice (4.20)

$$M_o = 53,7 \cdot 10 = 537 \text{ N} \cdot \text{mm}$$



Obr. 4.24: Zatížení vzpěry.

### Materiálové charakteristiky

Za materiál deformačního členu byla zvolena ocel S355MC (1.0976) s charakteristikami [8]:

$$E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\sigma_k = \min 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\sigma_p = \min 650 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$\sigma_c = 160 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  z Woehlerovy křivky pro  $10^9$  cyklů (při frekvenci  $f = 666$  Hz je to 417 hodin provozu) – viz. graf na obrázku 4.20,

$$\sigma_u = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

### Průřezové charakteristiky

Kvadratický moment průřezu je

$$J = \frac{1}{12} \cdot l_b \cdot l_t^3 = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 1,5^3 = 2,81 \text{ mm}^4.$$

### Výpočet napětí

Výsledné napětí v místě měření je

$$\sigma = \frac{M_o \cdot \frac{l_t}{2}}{J} = \frac{537 \cdot \frac{1,5}{2}}{2,81} = 143 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

Statická jistota je

$$j_{stat} = \frac{\sigma_k}{\sigma} = \frac{355}{143} = 2,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

a únavová jistota

$$j_{unav} = \frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{160}{143} = 1,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

## 4.5 Zhodnocení navržených konstrukcí a výběr řešení

Nevýhodou varianty 1 a 3 oproti variantě 2 je složitější konstrukční řešení, složitější vyhodnocování měřených veličin, vyšší parazitní vlivy na měřenou veličinu, větší ovlivnění nabíhajícího proudu vzduchu a vyšší pořizovací cena. Výhodou je vyšší stabilita a potencionálně lepší frekvenční charakteristiky. Výhoda varianty 3 oproti zbylým variantám je úplné rozložení působící obecné síly do 3 složek sil a 3 složek momentů a vysoká tuhost sestavy.

Na základě zhodnocení všech variant bylo rozhodnuto použít variantu 3.

Průměr maximální opsané kružnice okolo měřícího zařízení je 90 mm, výška zařízení je 74 mm. Připojuje se k nosné konstrukci až šesti šrouby M4. Pro každý měřený motor musí být zhotoven přípravek, na který se motor upevní a tento bude k měřicímu zařízení přišroubován až šesti šrouby M4.



## 5 NÁVRH MĚŘÍCIHO ŘETĚZCE PRO MONITOROVÁNÍ PROVOZNÍCH PARAMETRŮ

Pro monitorování měřených parametrů (tabulka 3.4) je nutné navrhnout měřicí řetězce (senzory, měřící jednotky, SW), které budou s dostatečnou přesností měřit požadované parametry.

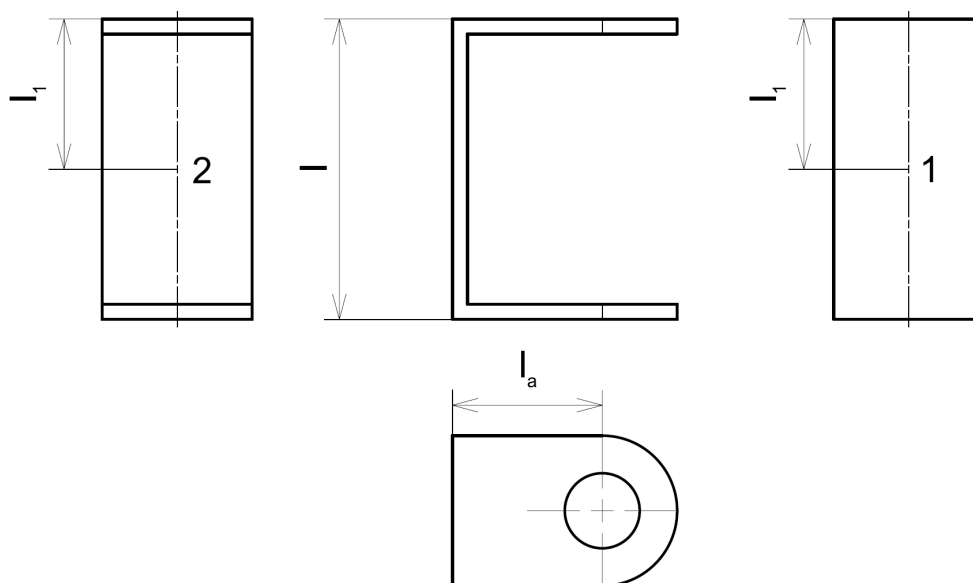
### 5.1 Měřené veličiny

#### 5.1.1 Tah, kroutící moment a vibrace pohonné jednotky

Tah, kroutící moment a vibrace pohonné jednotky jsou měřeny soustavou senzorů. Sensory měří ohybový moment, který je v rozsahu  $0 \div 544 \text{ N} \cdot \text{mm}$ .

##### Senzory

Senzory jsou 6 párů tenzometrů od firmy HBM, typ 1-LY11-6/350 s odporem  $350 \Omega$ . Umístění senzorů na deformačním členu je na obrázku 5.1, kde kóta  $l_1$  určuje střed tenzometrů:



Obr. 5.1: Umístění senzorů pro měření tahu, kroutícího momentu a vibrací na deformačním členu.

$$l = 20 \text{ mm},$$

$$l_a = 10 \text{ mm},$$

$$l_1 = 10 \text{ mm}.$$

Tenzometr je snímač pro měření deformace, využívající změnu elektrického odporu s deformací, vyjádřenou rovnicí

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{u_0}{U} = K \cdot \varepsilon, \quad (5.1)$$

kde  $K$  je deformační součinitel (k-faktor) a jeho velikost závisí na typu snímače, materiálu vodiče a jeho geometrii. Určuje se experimentálně cejchováním hotových snímačů a udává ho výrobce (pohybuje se kolem hodnoty 2).

### Zapojení

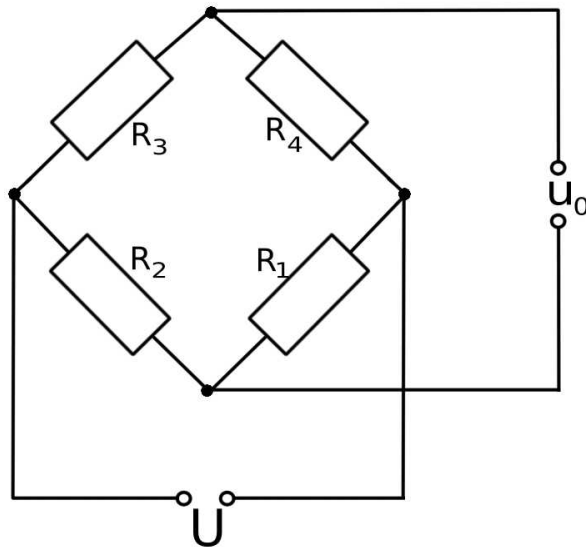
Tenzometry se zapojují do Wheatstoneova můstku (obrázek 5.2), ve kterém platí, že

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (5.2)$$

a

$$\frac{u_0}{U} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (5.3)$$

Při vyváženém můstku, tedy  $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$  je měřené napětí  $u_0 = 0$ .



Obr. 5.2: Wheatstoneův můstek, kde  $U$  je napájecí napětí,  $u_0$  je měřené napětí a  $R_{1-4}$  jsou odpory (buď tenzometry nebo jejich náhrady).

Poměrné přetvoření je definováno rovnicí

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_o \cdot r}{E \cdot J}, \quad (5.4)$$

kde  $r$  je vzdálenost krajního vlákna od neutrální osy příčného řezu. Po dosazení rovnice (5.4) do rovnice (5.1) vyjde

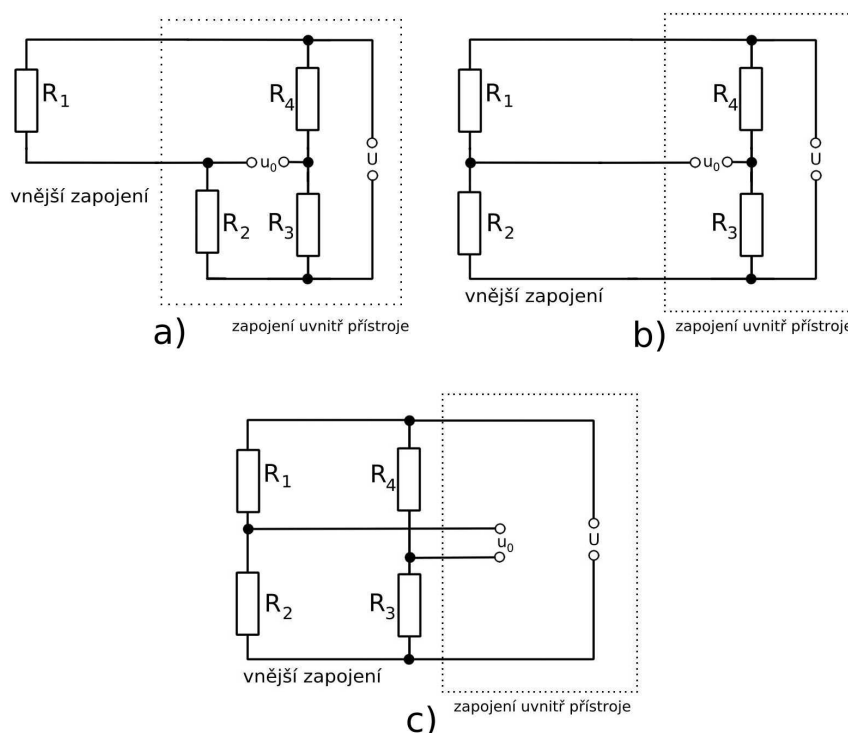
$$u_0 = K \cdot r \cdot U \cdot \frac{M_o}{E \cdot J}, \quad (5.5)$$

z čehož se dopočítá hledaný ohybový moment. Síla v ose vzpěry vytvořená pohonnou jednotkou je stanovena rovnicí

$$F = \frac{M_o}{l_a} = \frac{E \cdot J}{K \cdot r \cdot U \cdot l_a} \cdot u_0, \quad (5.6)$$

kde  $l_a$  je vzdálenost uvedená na obrázku 5.1. Tím jsou získány síly v jednotlivých měřících členech.

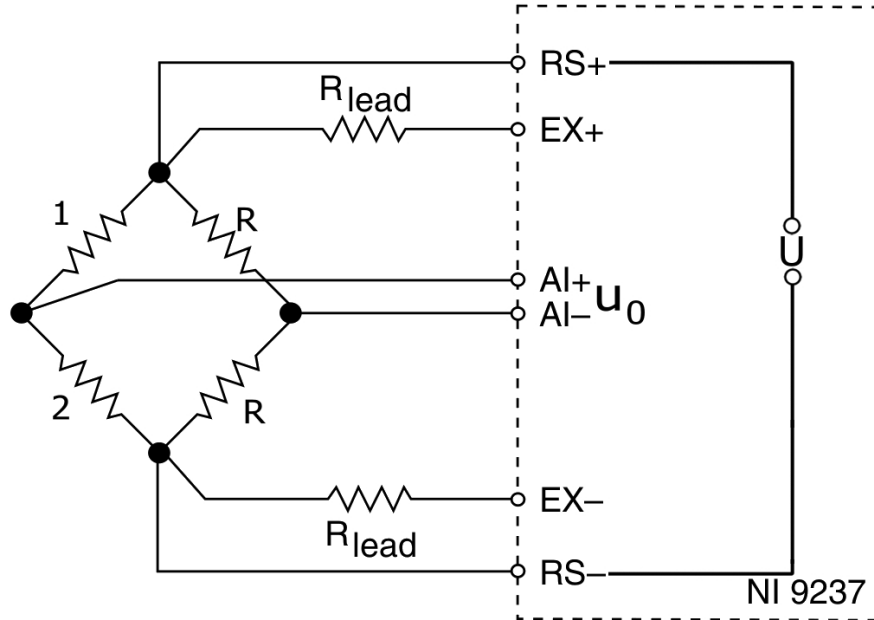
Jelikož měřené deformace jsou malé, pak je malá i změna odporu tenzometru a tedy i měřené napětí, proto se do obvodu zapojují zesilovače, které zvýší měřené napětí. Wheatstoneův můstek lze zapojit do čtvrtmostu, půlmostu nebo plného mostu, jak je znázorněno na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Zapojení Wheatstoneova můstku do a) čtvrtmostu, b) půlmostu, c) plného mostu.

Na měření signálů od senzorů byla zvolena karta NI 9237 (pro měření je potřeba užití dvou karet). Soustava bude napájena konstantním napětím 5 V DC. Vzorkovací

frekvence je stanovena na  $10 \frac{\text{kS}}{\text{s}}$ . Kompenzace odporů a napájení tenzometrů bude provedeno měřicí kartou. Zapojení senzorů do karty je patrné z obrázku 5.4, kde:



Obr. 5.4: Zapojení senzorů pro měření tahu, kroutícího momentu a vibrací do karty NI 9237 [9].

1, 2 jsou tenzometry na deformačním členu a

$R$  jsou přesné odpory doplňující můstek uvnitř měřicí karty.

Bylo zvoleno pětivodičové zapojení do půlmmostu. Pětivodičovým zapojením zdroj konstantního napětí udržuje zvolené napětí přímo na vstupu do mostu, tím eliminuje parazitní odpory přívodních kabelů a zvyšuje přesnost měření. Zapojením do půlmmostu je výstupní signál 2x zesílen a je kompenzován vliv změny teploty, vliv tahu a tlaku, vliv torze a vliv odporů přívodních vodičů.

### Kalibrace tenzometrických snímačů

Před použitím navrženého měřicího zařízení musí být provedena kalibrace tenzometrických snímačů, která vymezení rozdíly mezi teoretickým výpočtem na základě geometrie měřicího zařízení (viz. kapitola 4.2.3) a reálnou odezvou tenzometrických snímačů. Kalibrací je míněno zatěžování měřicího zařízení kombinací sil a momentů ( $X, Y, Z, M_x, M_y, M_z$ ) v rozsahu dle tabulky 3.4. Je nutno provést minimálně 6 kalibračních měření s lineárně nezávislým rozložením složek obecného zatížení, aby byly určeny zesílení a offsety měřicího zařízení.

### Postup (pro síly)

1. Vynulování indikované síly (od vlastní váhy měřícího zařízení a pohonné jednotky).
2. Zatížení konstrukce podle hodnot v tabulce D.1 a změření indikované síly. Provést pro každou osu zvlášť.
3. Závislost zatížení na výstupním napětí můstku by měla být ideálně lineární, takže se provede výpočet zesílení a offsetu lineární regresi metodou nejmenších čtverců. Výsledkem je rovnice

$$F = a \cdot x + b, \quad (5.7)$$

kde:  $a \left[ \frac{N}{\frac{mV}{V}} \right]$  je zesílení ( $\sim$  matici poddajnosti z rovnice (4.16)),

$b \left[ \frac{N}{\frac{mV}{V}} \right]$  je offset,

$F$  [N] je vypočtená síla,

$x \left[ \frac{mV}{V} \right]$  je indikovaná síla.

4. Stanovení nelinearity rovnice (5.7) rovnicí

$$nelinearita = \max |f_i - F_i| \quad (5.8)$$

kde:  $f_i$  jsou měřené síly,

$F_i$  jsou vypočtené síly

Postup pro kalibraci tenzometrických snímačů na měření momentů je obdobný.

### Vyhodnocení

Po dosazení rovnice (5.6) do rovnice (4.19) a přičtení offsetu z provedené kalibrace vyjde

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_1 \\ F_1 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{of1} \\ F_{of2} \\ F_{of3} \\ F_{of4} \\ F_{of5} \\ F_{of6} \end{bmatrix} \right\}, \quad (5.9)$$

kde:  $X, Y, Z, M_x, M_y, M_z$  jsou síly a momenty pohonné jednotky,

$k_{ij}$  jsou koeficienty matice poddajnosti (viz. příloha B),

$F_i$  jsou síly v měřících členech a

$F_{of i}$  jsou hodnoty offsetu pro daný měřící člen.

Při předpokladu, že vibrace mají sinusový průběh v závislosti na otáčkách motoru a tah motoru je při daném režimu konstantní, je tah definován jako střední hodnota měřené síly a oscilace okolo této hodnoty stanovují vibrace ve směru tahu.

Výsledkem měření je závislost tahu, kroutícího momentu a vibrační pohonné jednotky na čase, otáčkách motoru a rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu.

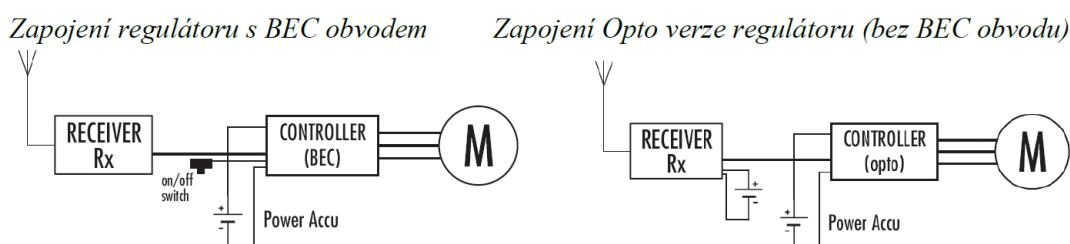
### 5.1.2 Elektrické napětí na vstupu do motoru

Elektrické napětí na vstupu do motoru určuje počet článků akumulátoru a použitý regulátor. Napětí je v rozsahu  $0 \div 40$  V.

Byl zvolen regulátor ADVANCE 90 Pro Opto.

#### Zapojení

Zapojení regulátoru do obvodu dle obrázku 5.5.



Obr. 5.5: Zapojení regulátoru do obvodu [5].

Elektrické napětí je měřeno kartou NI 9215, která je schopna měřit napětí  $\pm 10$  V. Zvýšení rozsahu měřicí karty se docílí zapojením předřadníku před měřicí kartu, jehož velikost se stanoví dle rovnice

$$R_p = (n - 1) \cdot R_v, \quad (5.10)$$

kde:  $R_p$  je velikost odporu předřadníku,

$n$  je násobek zvětšení měřicího rozsahu ( $U_{merene} = n \cdot U_{karty}$ ) a

$R_v$  je odpor měřicí karty (pro kartu NI 9215 je  $R_v = 1$  G $\Omega$ ).

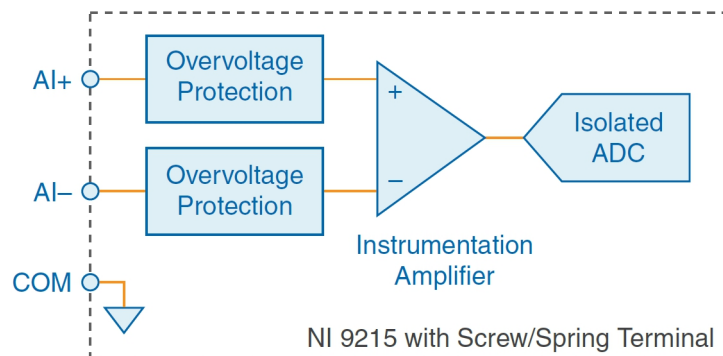
Karta je připojena paralelně mezi zdroj pohonné jednotky a regulátor. Tímto zapojením není postižen úbytek napětí na regulátoru, který je malý a může být zanedbán. Schéma zapojení je na obrázku 5.6. Vzorkovací frekvence je stanovena na  $10 \frac{kS}{s}$ .

#### Vyhodnocení

Výsledkem měření je závislost elektrického napětí na čase.

### 5.1.3 Elektrický proud na vstupu do motoru

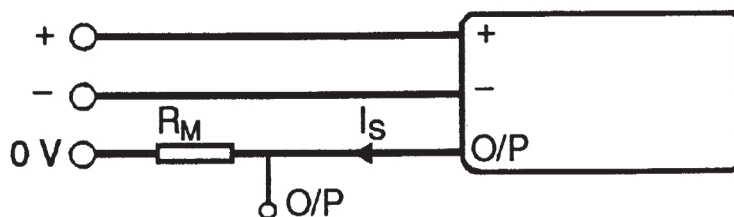
Elektrický proud na vstupu do motoru určuje zátěž motoru a použitý regulátor. Proud je v rozsahu  $0 \div 90$  A.



Obr. 5.6: Zapojení karty NI 9215 [9].

## Zapojení

Elektrický proud je měřen Halloovou sondou Honeywell CSNP661, která je napájena proudem  $U = 15 \text{ V DC}$ . K sondě je paralelně připojena karta NI 9215 s předřadníkem o velikosti  $R_p = 500 \text{ M}\Omega$ . Schéma zapojení senzoru je na obrázku 5.7 a zapojení do měřicí karty je na obrázku 5.6. Vzorkovací frekvence je stanovena na  $10 \frac{\text{ks}}{\text{s}}$ .



Obr. 5.7: Zapojení proudového senzoru CSNP661 [4].

## Vyhodnocení

Výsledkem měření je závislost elektrického proudu na čase.

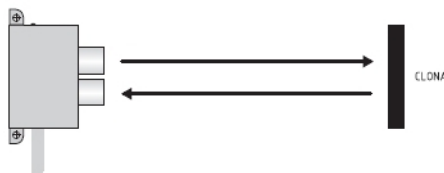
### 5.1.4 Otáčky motoru a vrtule

Otáčky motoru a vrtule jsou dány elektrickým napětím na vstupu do motoru a hodnotou  $K_V$  motoru. Otáčky jsou v rozsahu  $0 \div 40\,000 \frac{\text{ot.}}{\text{min}} = 0 \div 667 \text{ Hz}$ .

## Senzor

Otáčky motoru jsou snímány reflexním optickým snímačem Osram SFH9202-Z. Reflexní snímač je senzor, který emituje světelný paprsek, ten se odráží od měřeného objektu a vrací se zpět do snímače (viz. obrázek 5.8). Měřený objekt musí být schopen odrazit světelný paprsek, aby mohl být snímačem zaznamenán. Toho lze docílit

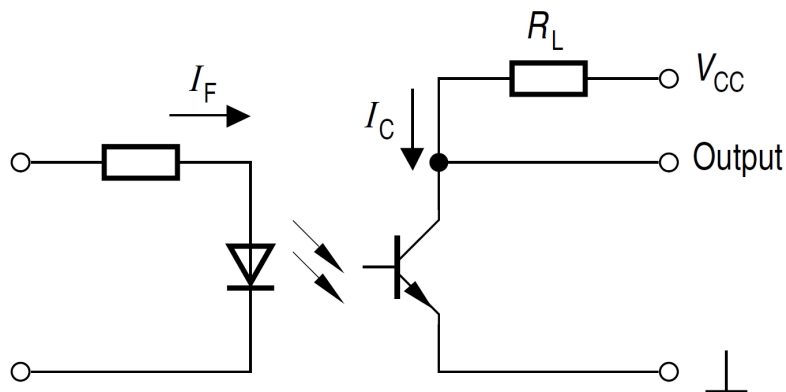
přilepením reflexního pásku v polovině délky obvodu motoru a přilepením černého (tmavého) pásku na druhou polovinu motoru. Případně natřením motoru reflexní, resp. tmavou barvou.



Obr. 5.8: Optoelektronický reflexní snímač [7].

### Zapojení

Data ze senzoru otáček jsou sbírána měřicí kartou NI 9215. Soustava bude napájena konstantním napětím 5 V DC. Vzorkovací frekvence je stanovena na  $10 \frac{\text{ks}}{\text{s}}$ . Schéma senzoru je na obrázku 5.9 a zapojení senzoru do karty je patrné na obrázku 5.6.



Obr. 5.9: Zapojení snímače E3F2-D1B4 [10].

### Vyhodnocení

Vyhodnocují se nejen otáčky vrtule, ale i její poloha v čase v závislosti na rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu, aby bylo možné podle záznamu z měření vrtuli vyvážit.

#### 5.1.5 Hustota vzduchu

Hustota vzduchu se určuje výpočtem na základě barometrického tlaku a teploty. Pohybuje se v rozsahu  $1,05 \div 1,38 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .



## Senzory

Atmosférický tlak je měřen staničním rtuťovým manometrem a teplota je měřena před tryskou, kde je v proudu umístěn platinový odporový teploměr Pt100. Senzory pro snímání tlaku a teploty jsou již v aerodynamickém tunelu zakomponovány, proto zde nejsou dále rozvedeny.

## Vyhodnocení

Po dosažení teploty a tlaku do rovnice ideálního plynu (3.10) se spočte hustota vzduchu. Výsledkem je závislost hustoty vzduchu na čase.

### 5.1.6 Průměr vrtule

Průměr vrtule je v rozsahu  $75 \div 350$  mm.

## Měření

Průměr vrtule je měřen posuvným měřítkem.

### 5.1.7 Rychlost nabíhajícího proudu vzduchu

Rychlost nabíhajícího proudu vzduchu je v rozsahu  $0 \div 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

## Senzor

Rychlost nabíhajícího proudu vzduchu je měřena pitotstatickým systémem s tlakovým převodníkem od firmy DataCon, typ DCP DP1 10 kPa, jehož výstup je připojen do měřicí karty NI 9215.

## Vyhodnocení

Rychlost nabíhajícího proudu se stanovuje z Bernoulliho rovnice

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p = p_0 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p)}{\rho}}, \quad (5.11)$$

kde  $p_0 - p$  je tlakový rozdíl měřený tlakovým převodníkem.

Měření rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu je v aerodynamickém tunelu již vytvořeno, proto zde není více rozvedeno.

### 5.1.8 Zapojení měřících karet

Měřící karty jsou zapojeny do chasee NI cDAQ-9184 (viz. obrázek 5.10). Komunikace mezi ústřednou a řídicím počítačem je provedena pomocí síťových služeb vývojového prostředí LabVIEW.

Použitá měřící aparatura (chasee + měřící karty) zajišťuje odečet všech měřených veličin ve stejném časovém okamžiku.



Obr. 5.10: Chasee NI cDAQ-9184 s měřícími kartami.

### 5.1.9 Požadavky na měřící software

Bylo zvoleno použít pro měření vývojové prostředí LabVIEW. Požadavky na měřící software jsou:

1. měřit veličiny v závislosti na čase – jedna časová osa pro všechny měřené veličiny, vzorkovacími frekvencemi uvedenými v kapitole 5.1,
2. online kontrola limitu měřícího zařízení se zpětnou vazbou na regulovanou veličinu (elektrický proud, elektrické napětí nebo frekvence motoru), aby nedošlo k poškození měřícího zařízení,

- uložení naměřených hodnot do samostatného souboru spolu s parametry měřicího zařízení, aby mohly být dále zpracovány.

Výstupní formát dat je TDMS a data se dále budou zpracovávat v programu DIAdem, ve kterém se vyhodnotí charakteristiky z kapitoly 5.3.

Náhled měřicího softwaru na v příloze E.

## 5.2 Rozbor vibrací

Vibrace mohou být vybuzeny hmotovým nevyvážením, flutterem nebo aerodynamickým nevyvážením.

**Hmotové (statické) nevyvážení** vznikne, když těžiště vrtule, resp. rotačních částí motoru neleží v ose rotace. Vytvoří odstředivou sílu danou rovnicí (3.11), kde:

$$r = r_T + \delta,$$

$r_T$  je vzdálenost výslednice sil od středu otáčení a

$\delta$  je deformace měřicího zařízení.

Když je soustava v rovnováze, rovná se odstředivá síla pohonné jednotky pružným silám měřicího zařízení

$$F = k \cdot \delta, \quad (5.12)$$

kde  $k$  je součinitel pružnosti měřicího členu. Jak bylo uvedeno v kapitole 3.9, i malé hmotové nevyvážení může vyvolat velkou cyklickou odstředivou sílu a může mít na pohonnou jednotku a měřicí zařízení fatální následky.

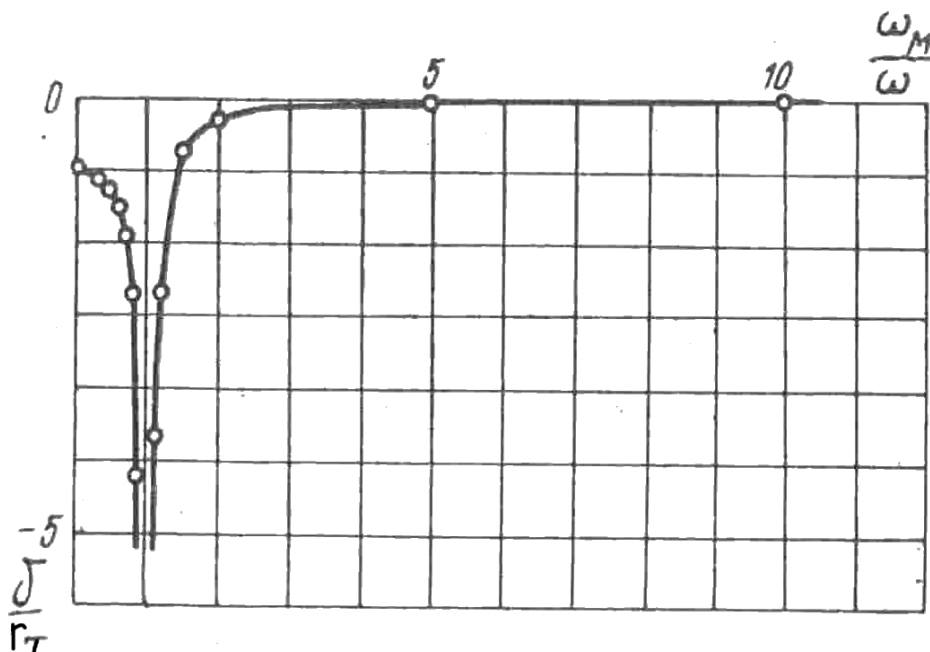
Z rovnice (3.11) plyne, že hmotové nevyvážení je funkcí kvadrátu otáček. Tím může být v měření rozpoznáno a odfiltrováno.

Dalším kritickým stavem pro měřicí zařízení může být průchod vlastní frekvencí vrtule ( $\omega_M$ ). Spojením rovnic (3.11) a (5.12) vyjde

$$\frac{\delta}{r_T} = \frac{\omega^2}{\frac{k}{m} - \omega^2} = \frac{\omega^2}{\omega_M^2 - \omega^2} = \frac{1}{\frac{\omega_M^2}{\omega^2} - 1}. \quad (5.13)$$

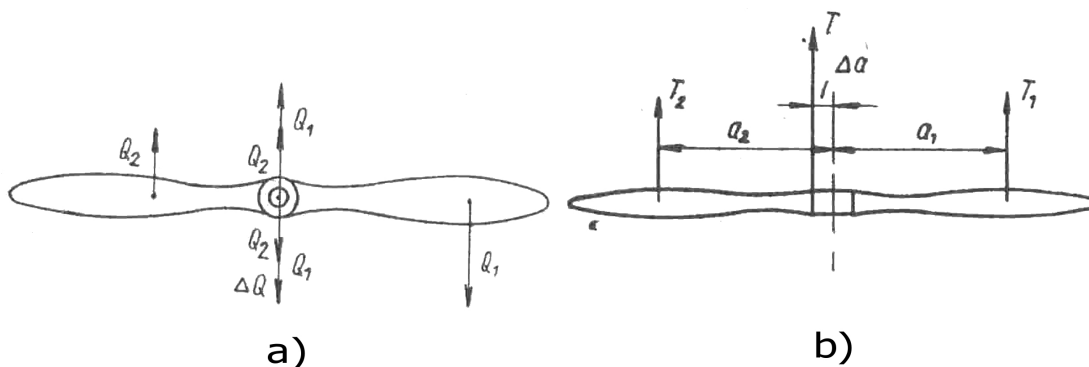
Výsledek je na obrázku 5.11, ze kterého je patrné, že při frekvenci otáčení vrtule rovné vlastní frekvenci roste deformace měřicího zařízení teoreticky nade všechny meze (důsledkem neuvažovaných tlumících sil tomu tak nebude).

**Flutter** je dynamická nestabilita, resp. samobuzené kmitání konstrukce, kdy přívod energie do soustavy převyší ztráty energie důsledkem konstrukčního tlumení a může mít na konstrukci fatální následky. Flutter nevnikne před dosažením meze stability, resp. kritické rychlosti flutteru (do této rychlosti se při měření neprojeví).



Obr. 5.11: Rezonance měřícího zařízení [14].

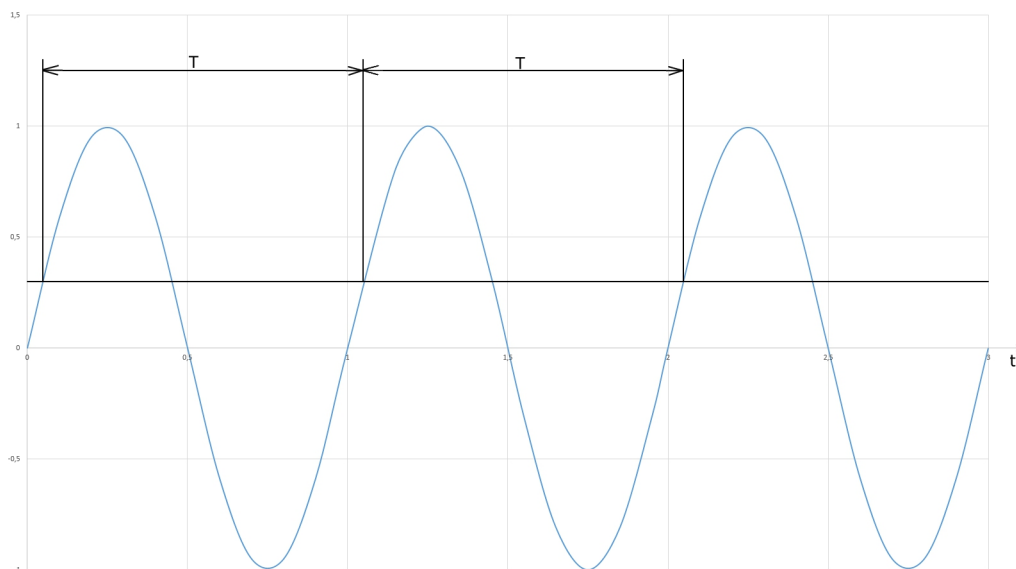
**Aerodynamické nevyvážení** je způsobeno nerovnoměrnými aerodynamickými silami jednotlivých vrtulových listů, jak je patrné z obrázku 5.12 a lze jej definovat rozdílem úhlů nastavení vrtule (geometrií vrtule) a rozdílnou profiláží, jež vzniká nepřesností výroby a poškozením vrtule za provozu.



Obr. 5.12: Nevyváženost a) aerodynamické síly, b) aerodynamického momentu dvoulisté vrtule [14].

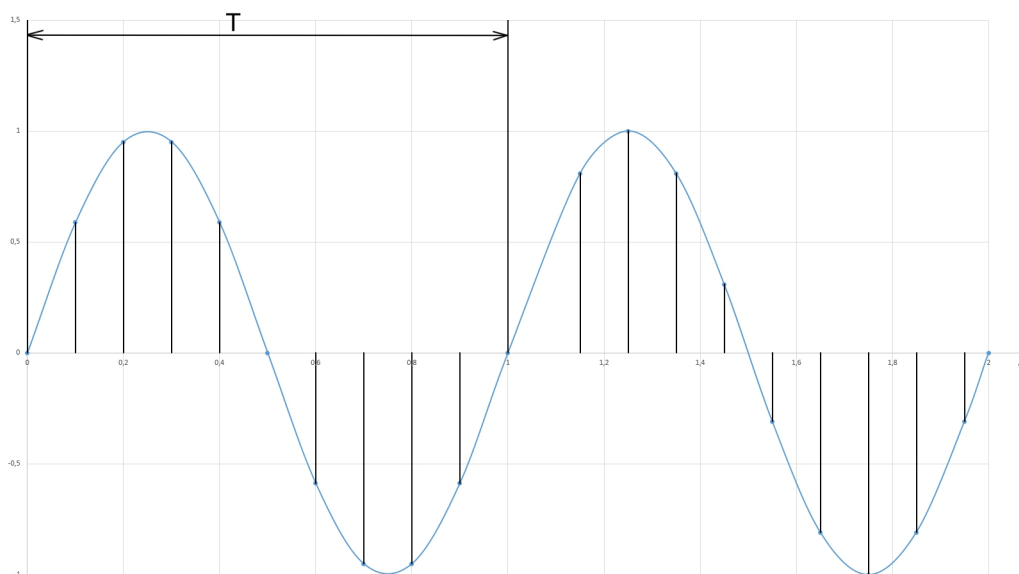
Na základě těchto skutečností je možné z naměřených hodnot separovat hmotové a aerodynamické vibrace působící na pohonnou jednotku.

Za předpokladu konstantních otáček je možné pro periodicky se opakující cykly určit periodu položením libovolné přímky rovnoběžně s osou času  $t$  a z jejích průsečíků s křivkou naměřených bodů určit periodu (viz. obrázek 5.13). Při znalosti



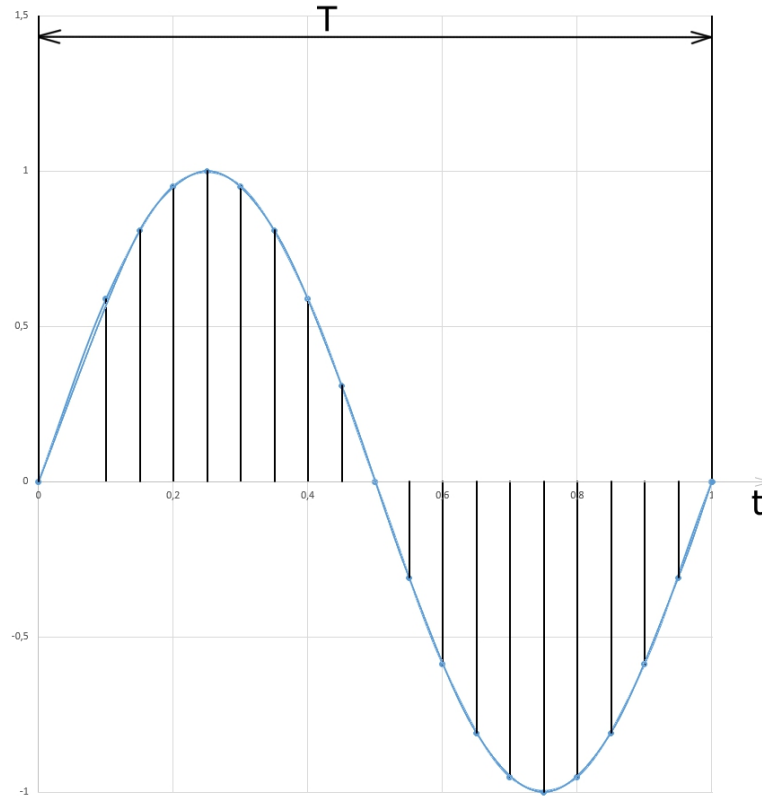
Obr. 5.13: Určení periody cyklicky se opakujícího děje.

periody je možné naměřené hodnoty vibrací rozdělit na úseky o velikosti jedné periody (viz. obrázek 5.14). Pokud není vzorkovací frekvence ve fázi s frekvencí měřené



Obr. 5.14: Rozdělení naměřených hodnot na periodické úseky.

veličiny, je možné úseky přes sebe překrýt a získat tak zahuštění periodické křivky a přesněji určit její tvar a velikost (viz. obrázek 5.15). Pokud by frekvence byly ve fázi, pak by nedošlo k zahuštění, jelikož by se měřené body navzájem překrývaly. Tato metoda byla již v praxi vyzkoušena a poskytuje dostatečně přesné výsledky [17].



Obr. 5.15: Zahuštění periodické křivky.

## 5.3 Stanovení charakteristik pohonné jednotky

Požadovanými charakteristikami pohonné jednotky jsou:

1. součinitel tahu,
2. součinitel výkonu,
3. účinnost motoru,
4. účinnost vrtule.

Dalším požadavkem je možnost vyvážení vrtule na základě naměřených vibrací a jejich závislosti na poloze vrtule.

### 5.3.1 Součinitel tahu

Součinitel tahu se stanoví z rovnice (3.1) a vynesou se do grafu  $c_T = f(\lambda)$ .

### 5.3.2 Součinitel výkonu

Součinitel výkonu se stanoví z rovnice (3.2) a vynesou se do grafu  $c_P = f(\lambda)$ .

### 5.3.3 Účinnost motoru

Účinnost motoru se stanoví z rovnice (3.4) a vynese se do grafu  $\eta_{\text{motor}} = f(\lambda)$ .

### 5.3.4 Účinnost vrtule

Účinnost vrtule se stanoví z rovnice (3.5) a vynese se do grafu  $\eta_{\text{vrtule}} = f(\lambda)$ .

## 6 ZÁVĚR

Předmětem diplomové práce je konstrukční návrh zařízení pro měření charakteristik pohonné jednotky.

Byla provedena rešerše používaných elektrických pohonných jednotek, na jejímž základě byly stanoveny měřené veličiny a jejich rozsah. Tím byly stanoveny vstupní požadavky na konstrukční návrh měřícího zařízení.

V další části byly navrženy 3 varianty konstrukčního řešení měřícího zařízení. Byla provedena pevnostní kontrola a určen vliv konstrukčního řešení na snímání měřených veličin. Varianty byly porovnány a bylo zvoleno použít variantu 3 – hexapod, která svou konstrukcí méně ovlivňuje měřené veličiny a umožňuje lepší stanovení působící sil a momentů pohonné jednotky.

Na závěr byl navrhnout měřící řetězec pro monitorování provozních parametrů pohonné jednotky, ve kterém byly vybrány senzory pro snímání měřených veličin a jejich umístění a zapojení na konstrukci. Byl navržen řídicí program v LabVIEW pro snímání měřených veličin a stanovení výstupní formát dat, která budou následně zpracována v programu DIAdem. Dále byl proveden rozbor vibrací od hmotového a aerodynamického buzení a stanovení vyhodnocení měřených veličin a charakteristik pohonné jednotky.

Dalším krokem by měla být realizace měřícího zařízení a ověřovací měření pro verifikaci funkčnosti a stanovení pracovního rozsahu rychlostí nabíhajícího proudu vzduchu a otáček pohonné jednotky, aby nedošlo k poškození měřícího zařízení.



# POUŽITÉ ZDROJE

## Online

- [1] AXI. *Katalog* [online]. 2015, [cit. 14. 03. 2016]. Dostupné z URL: <[https://www.modelmotors.cz/file/wisiwig/files/actual\\_katalog\\_hr.pdf](https://www.modelmotors.cz/file/wisiwig/files/actual_katalog_hr.pdf)>.
- [2] HACKER. *Hacker Brushless Motors* [online]. [Cit. 14. 03. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.hacker-motor-shop.com>>.
- [3] HBM. *Strain Gages and Accessories* [online]. [Cit. 17. 04. 2016]. Dostupné z URL <[http://www.hbm.cz/Prospekty/Tenzometry/katalog/Cat\\_sg\\_e.pdf](http://www.hbm.cz/Prospekty/Tenzometry/katalog/Cat_sg_e.pdf)>.
- [4] Honeywell. *Closed loop current sensors - CSNP661* [online]. [Cit. 22. 12. 2016]. Dostupné z URL <<https://sensing.honeywell.com/CSNP661-closed-loop-current-sensors>>.
- [5] JETI MODEL. *ADVANCE PRO Manual CZ* [online]. [Cit. 07. 08. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.jetimodel.com/en/show-file/128>>.
- [6] KOMPOZITY.INFO. *Odporové tenzometry* [online]. [Cit. 30. 07. 2016]. Dostupné z URL <<http://www.kompozity.info/index.php?pr=38&uid=9999&id=0>>.
- [7] KOTLÍN. *Optické snímače - Principy* [online]. [Cit. 07. 08. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.kotlin.cz/principy-opticke-snimace/>>.
- [8] LONGHAI SPECIAL STEEL. *Data Table for: Steel Grades: Carbon Steel: S355MC* [online]. [Cit. 01. 08. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.steelgr.com/Steel-Grades/Carbon-Steel/s355mc.html>>.
- [9] NATIONAL INSTRUMENTS. *Data Acquisition* [online]. [Cit. 06. 08. 2016]. Dostupné z URL <<http://www.ni.com/data-acquisition/>>.
- [10] OMRON. *E3F2 Cylindrical photoelectric sensors* [online]. [Cit. 08. 08. 2016]. Dostupné z URL <<http://www.velebil.cz/katalog-produktu/detail/e3f2-59/download/72-e224-e2-03a-x-e3f2-datasheet-pdf>>.
- [11] ROBOTSHOP. *How to Make a Drone / UAV - Lesson 3: Propulsion* [online]. [Cit. 10. 04. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.robotshop.com/blog/en/make-uav-lesson-3-propulsion-14785>>.
- [12] TIGER MOTOR. *Tiger Motor* [online]. [Cit. 14. 03. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.rctigermotor.com>>.

- [13] UIUC APPLIED AERODYNAMICS GROUP. *UIUC Propeller Data Site* [online]. [Cit. 12. 07. 2016]. Dostupné z URL <<http://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html>>.

## Literatura

- [14] ALEXANDROV, V. L. *Letecké vrtule*. [překl.] GORBATOV, N. a DANĚK, O. Praha: SNTL, 1954.
- [15] ASHWIN, R. *UAV power plant performance*. Chennai: Anna University, 2008. 116 s. Vedoucí diplomové práce: Dr. Andrew Arena.
- [16] AUSTIN, R. *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment*. Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, 2010. ISBN: 978-0-470-05819-0.
- [17] HELMICH, M., JEŘÁBEK I. *Měření průběhu kroutícího momentu na kompozitní hřídele*. Praha: ČVUT, 2015. Technická zpráva.
- [18] HUDLEMEYER, A. A., NAUGHTON, J. W. *A Hexapod-Based Thrust Balance*. Laramie: University of Wyoming, 2009. AIAA 2009-795
- [19] JANÍČEK, P. *Technický experiment*. Brno: VUT, 1989.
- [20] MILÁČEK, S. *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02417-2.
- [21] THEINER, R., SLAVÍK, S. a MRÁZ, V. *Metodika měření aerodynamických charakteristik vrtulí v aerodynamickém tunelu VZLÚ*. Praha: VZLÚ, 1999. Zpráva č. R-3101/99.
- [22] VÍTEK, V. *Návrh metodiky ověření šestikomponentního zařízení pro měření zatížení při zkouškách ocelových konstrukcí*. Praha: ČVUT, 2015. 60 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Weigel, Ph.D.
- [23] VLK M., HOUFEK L., HLAVOŇ P., KREJČÍ P., KOTEK V. a KLEMENT J. *Experimentální mechanika*. Brno, 2003.

## Software

- [24] MATHWORKS. *MatLab* [software]. Verze R2012a (7.14.0.739).
- [25] MICROSOFT. *Excel Professional Plus 2010* [software]. Verze 14.0.7177.5000

- [26] NATIONAL INSTRUMENTS. *LabVIEW 2012* [software]. Verze 12.0 (32-bit).
- [27] SIEMENS. *NX* [software]. Verze NX 8.5.0.23.

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Přehled vybraných motorů</b>	<b>57</b>
A.1	AXI . . . . .	57
A.2	Hacker . . . . .	58
A.3	Lumenier . . . . .	60
A.4	T-Motor . . . . .	61
<b>B</b>	<b>Výpočet matice poddajnosti</b>	<b>64</b>
<b>C</b>	<b>Tenzometry</b>	<b>67</b>
<b>D</b>	<b>Formulář pro kalibraci tenzometrických snímačů</b>	<b>68</b>
<b>E</b>	<b>Řídící program</b>	<b>69</b>
<b>F</b>	<b>Výkresy navržené konstrukce</b>	<b>70</b>

# A PŘEHLED VYBRANÝCH MOTORŮ

## A.1 AXI

Střídavé motory AXI jsou vyráběny ve společnosti Modelmotors s. r. o. od roku 2001.

napětí	2 S
otáčky na volt	1 720
max. účinnost	75 %
proud při max. účinnosti	2,5-7 A
max. zatížitelnost	8,5 A / 20 s
proud na prázdno při 8 V	0,5 A
vnitřní odpor	285 mΩ
průměr	27,7 mm
délka	21 mm
průměr hřídele	3 mm
váha	18,5 g
vrtule	8x4,3
cena	1 300 Kč

Tab. A.1: Motor AXI 2203/46 GOLD LINE.

napětí	5 S
otáčky na volt	515
max. účinnost	86 %
proud při max. účinnosti	15-40 A
max. zatížitelnost	55 A / 60 s
proud na prázdno při 8 V	1,5 A
vnitřní odpor	70 mΩ
průměr	49,8 mm
délka	55,5 mm
průměr hřídele	6 mm
váha	320 g
vrtule	14x9
cena	3 200 Kč

Tab. A.2: Motor AXI 4120/18 GOLD LINE.

napětí	10 S
otáčky na volt	120
max. účinnost	94 %
proud při max. účinnosti	20-59 A
max. zatížitelnost	65 A / 30 s
proud na prázdno při 30 V	1,8 A
vnitřní odpor	68 mΩ
průměr	89 mm
délka	94 mm
průměr hřídele	8 mm
váha	1 350 g
vtule	30x20
cena	9 000 Kč

Tab. A.3: Motor AXI 5360/20 GOLD LINE.

## A.2 Hacker

Hacker je firma vyrábějící RC komponenty od roku 2000.

výkon	max. 35 W (15 sec)
napětí	2 S
proud na prázdno při 8,4 V	0,5 A
vnitřní odpor	0,3 Ω
otáčky na volt	4 200
váha	7,5 g
průměr	16,6 mm
délka	15,1 mm
průměr hřídele	2 mm
vtule	GWS Prop 3x3 HD
cena	29,9 € ~ 810 Kč

Tab. A.4: Motor Hacker A05-10S.

výkon	max. 1,25 kW (15 sec)
napětí	5-6 S
proud na prázdno při 8,4 V	1,8 A
vnitřní odpor	16 mΩ
otáčky na volt	480
váha	345 g
průměr	48,7 mm
délka	52,2 mm
průměr hřídele	6 mm
vrtule	14x7 APC-E
cena	149 € ~ 4 030 Kč

Tab. A.5: Motor Hacker A50-12S.

výkon	max. 2,8 kW (15 sec)
napětí	12 S
proud na prázdno při 8,4 V	1,6 A
vnitřní odpor	20 mΩ
otáčky na volt	149
váha	910 g
průměr	59 mm
délka	84,3 mm
průměr hřídele	8 mm
vrtule	24x12 APC-E
cena	299 € ~ 8 100 Kč

Tab. A.6: Motor Hacker A60-18L.

## A.3 Lumenier

Lumenier vyrábí FPV UAV produkty od roku 2013.

výkon	max. 165 W
počet Li-Po článků	2-4 S
maximální proud	26 A / 10 s
proud na prázdko při 12,6 V	0,58 A
vnitřní odpor	260 mΩ
otáčky na volt	2 500
váha	22 g
průměr	23 mm
délka	18,5 mm
průměr hřídele	2 mm
vrtule	Gemfan 3,5x4,5 BN
cena	£21,98 ~ 750 Kč

Tab. A.7: Motor Lumenier RX1806-13.

výkon	max. 280 W
počet Li-Po článků	3-4 S
maximální stálý proud	20 A
proud na prázdko při 10 V	0,4 A
vnitřní odpor	135 mΩ
otáčky na volt	900
váha	75 g
průměr	27,8 mm
délka	34 mm
průměr hřídele	4 mm
vrtule	APC 12x3,8
cena	\$46,99 ~ 1 130 Kč

Tab. A.8: Motor Lumenier FX2216-11.



## A.4 T-Motor

Tiger motor je firma vyrábějící malé střídavé motory od roku 2009.

výkon	max. 44 W
počet Li-Po článků	1-2 S
maximální stálý proud	6 A
proud na prázdno při 10 V	0,2 A
vnitřní odpor	62 mΩ
otáčky na volt	3 100
váha	11,2 g
průměr	17,7 mm
délka	15 mm
průměr hřídele	2 mm
cena	\$29,9 ~ 710 Kč

Tab. A.9: Motor MT1306.

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating temperature( °C)
MT1306 KV3100	7.4	T-MOTOR 6*2CF	50%	2.3	17.02	105	9000	6.17	63
			65%	3.2	23.68	132	10300	5.57	
			75%	4.2	31.08	162	11200	5.21	
			85%	5.3	39.22	196	12200	5.00	
			100%	5.9	43.66	217	12800	4.97	
		T-MOTOR 7*2.4CF	50%	2.7	19.98	128	6750	6.41	
			65%	4.2	31.08	167	7800	5.37	
			75%	5.2	38.48	197	8500	5.12	
			85%	6.5	48.10	223	9100	4.64	
		GWS6030	50%	2.6	19.24	110	8900	5.72	
			65%	3.3	24.42	140	9900	5.73	
			75%	4.3	31.82	175	10800	5.50	
			85%	5.7	42.18	203	11600	4.81	
			100%	6.3	46.62	227	12500	4.87	

Notes: The test condition of temperature is motor surface temperature in 100% throttle while the motor run 10 min.

Tab. A.10: Doplňující katalogové charakteristiky motoru MT1306 [12].

výkon	max. 650 W
počet Li-Po článků	3-6 S
maximální stálý proud	35 A
proud na prázdko při 10 V	1,2 A
vnitřní odpor	49 mΩ
otáčky na volt	650
váha	188 g
průměr	42,5 mm
délka	37,5 mm
průměr hřídele	5 mm
cena	\$89,9 ~ 2 190 Kč

Tab. A.11: Motor MT3515.

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating temperature( °C)
MT3515 KV650	14.8	T-MOTOR 13*4.4CF	50%	4.3	64	650	4800	10.21	47
			65%	7.9	117	960	6000	8.21	
			75%	11.1	164	1280	6700	7.79	
			85%	14.8	219	1480	7500	6.76	
			100%	18.1	268	1690	8000	6.31	
		T-MOTOR 14*4.8CF	50%	5.6	83	840	4500	10.14	53
			65%	10.9	161	1300	5700	8.06	
			75%	15.1	223	1640	6300	7.34	
			85%	20.5	303	2000	6950	6.59	
			100%	24.8	367	2200	7300	5.99	
		T-MOTOR 15*5CF	50%	7.2	107	870	4300	8.16	60
			65%	13.8	204	1430	5300	7.00	
	75%		19	281	1800	5900	6.40		
	85%		25.4	376	2100	6500	5.59		
	100%		30.7	454	2400	6800	5.28		
	22.2	T-MOTOR 13*4.4CF	50%	8.7	193	1200	7000	6.21	61°C/150S
			65%	15.1	335	1830	8500	5.46	
			75%	20.8	462	2300	9500	4.98	
			85%	27.8	617	2750	10300	4.46	
			100%	33.2	737	3100	10800	4.21	

Notes: The test condition of temperature is motor surface temperature in 100% throttle while the motor run 10 min.

Tab. A.12: Doplňující katalogové charakteristiky motoru MT3515 [12].

výkon	max. 1,14 kW
počet Li-Po článků	4-8 S
maximální stálý proud	38 A
proud na prázdko při 10 V	1,2 A
vnitřní odpor	32 mΩ
otáčky na volt	400
váha	205 g
průměr	42,5 mm
délka	45 mm
průměr hřídele	5 mm
cena	\$99,9 ~ 2 370 Kč

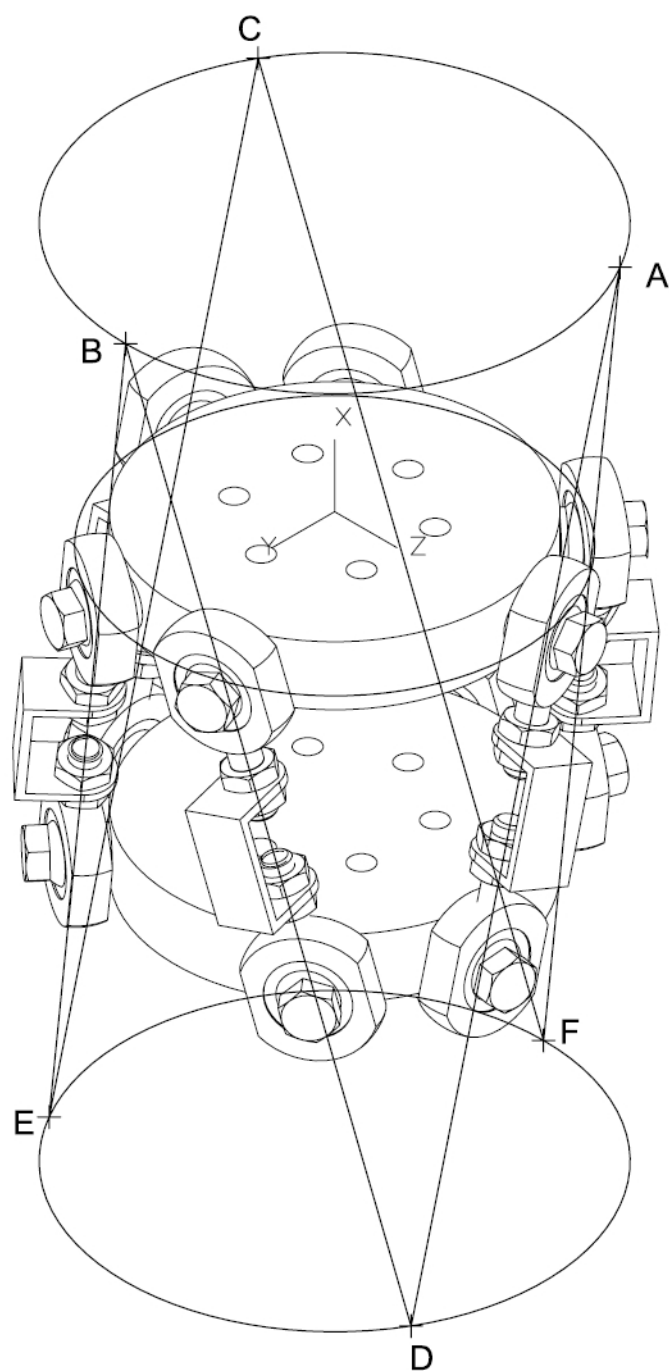
Tab. A.13: Motor MT3520.

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (g)	RPM	Efficiency (g/W)	Operating temperature( °C)
MT3520 KV400	22.2	T-MOTOR 15*5CF	50%	4.5	100	1010	4280	10.11	50
			65%	8.8	195	1540	5400	7.88	
			75%	12.3	273	1920	6050	7.03	
			85%	16.6	369	2380	6700	6.46	
		100%	20.3	451	2700	7100	5.99	55	
		T-MOTOR 16*5.4CF	50%	5.3	118	1140	4160		9.69
			65%	10.2	226	1780	5260		7.86
			75%	14.4	320	2200	5850		6.88
			85%	19.4	431	2680	6500	6.22	
		100%	23.2	515	3000	6800	5.82	67	
		T-MOTOR 17*5.8CF	50%	6.5	144	1340	4000		9.29
			65%	12.5	278	2120	5000		7.64
75%	17.7		393	2670	5600	6.79			
85%	23.3		517	3200	6100	6.19			
100%	28.1	624	3600	6450	5.77				

Notes: The test condition of temperature is motor surface temperature in 100% throttle while the motor run 10 min.

Tab. A.14: Doplňující katalogové charakteristiky motoru MT3520 [12].

## B VÝPOČET MATICE PODDAJNOSTI



Obr. B.1: Schéma pro výpočet matice poddajnosti.

Na obrázku B.1 je schéma konstrukčního řešení s doplněnými body nutnými pro následující výpočet matice poddajnosti sestavy popsané v kapitole 4.2.3.

```
close all
clear all
```

```
%průsečíky os deformačních členů
```

```
A = [ 50.946182225      -21.299805970      36.905383124      ];
B = [ 50.946182225      42.610902307      -0.006518496      ];
C = [ 50.946182225      -21.311096337     -36.898864628      ];
D = [-114.662613020     21.311096337      36.898864628      ];
E = [-114.662613020     21.311096337     -36.898864628      ];
F = [-114.662613020     -42.610902307     -0.006518496      ];
```

```
%vektory deformačních členů
```

```
a(1,:) = D-A;
a(2,:) = D-B;
a(3,:) = E-B;
a(4,:) = E-C;
a(5,:) = F-C;
a(6,:) = F-A;
```

```
%normalizované vektory deformačních členů
```

```
for i=1:size(a,1)
    an(i,:) = a(i,:)/norm(a(i,:));
end
```

```
%silová část matice poddajnosti
```

```
for i=1:size(an,2)
    for j=1:size(an,1)
        K(i,j) = an(j,i);
    end
end
```

```
%výpočet koeficientů momentové části matice poddajnosti
```

```
A = A/norm(A);
B = B/norm(B);
C = C/norm(C);
D = D/norm(D);
E = E/norm(E);
F = F/norm(F);
k(1,:) = cross(A,an(1,:)) + cross(D,-an(1,:));
k(2,:) = cross(B,an(2,:)) + cross(D,-an(2,:));
k(3,:) = cross(B,an(3,:)) + cross(E,-an(3,:));
k(4,:) = cross(C,an(4,:)) + cross(E,-an(4,:));
k(5,:) = cross(C,an(5,:)) + cross(F,-an(5,:));
k(6,:) = cross(A,an(6,:)) + cross(F,-an(6,:));
```

```
%momentová část matice poddajnosti
```

```
for i=1:size(a,2)
    for j=1:size(k,1)
        K(i+size(a,2),j) = k(j,i);
    end
end
```

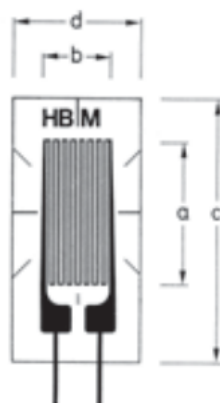
```
%matice poddajnosti
display('matice poddajnosti')
display(K);
```

matice poddajnosti

K =

-0.9685	-0.9685	-0.9685	-0.9684	-0.9685	-0.9684
0.2492	-0.1246	-0.1246	0.2492	-0.1246	-0.1246
-0.0000	0.2158	-0.2157	0	0.2157	-0.2159
-0.0633	0.0633	-0.0633	0.0633	-0.0633	0.0633
-0.2459	-0.0756	0.0757	0.2459	0.1703	-0.1703
-0.0546	0.2403	0.2403	-0.0546	-0.1857	-0.1856

## C TENZOMETRY



Obr. C.1: Schéma rozměrů tenzometrů [3].

Typ			Jmenovitý odpor [ $\Omega$ ]	Rozměry [mm]			
ocel	hliník	ostatní		a	b	c	d
1-LY11-6/350	1-LY13-6/350	1-LY1x-6/350	350	6	2,3	13	6

Max. perm. efektivní budící napětí [V]	Pájecí svorky
14	LS 5

Tab. C.1: Tenzometry HBM SG/Y série s 1 měřicí mřížkou a lineární měřicí charakteristikou.

Typ	$\alpha$ [ $\cdot 10^{-6}/K$ ]
LY11	10,8
LY13	23

Tab. C.2: Vliv teploty – hodnota parametru  $\alpha$ .

## D FORMULÁŘ PRO KALIBRACI TENZOMETRICKÝCH SNÍMAČŮ

Tah (=X)		Vibrace (=Y)		Vibrace (=Z)	
Měřená síla [N]	Indikovaná síla $\left[\frac{\text{mV}}{\text{V}}\right]$	Měřená síla [N]	Indikovaná síla $\left[\frac{\text{mV}}{\text{V}}\right]$	Měřená síla [N]	Indikovaná síla $\left[\frac{\text{mV}}{\text{V}}\right]$
0		0		0	
12		3		3	
24		6		6	
36		9		9	
48		12		12	
60		15		15	
72		18		18	
84		15		15	
96		12		12	
108		9		9	
120		6		6	
108		3		3	
96		0		0	
84		-3		-3	
72		-6		-6	
60		-9		-9	
48		-12		-12	
36		-15		-15	
24		-18		-18	
12		-9		-9	
0		0		0	
zesílení $a$		zesílení $a$		zesílení $a$	
offset $b$		offset $b$		offset $b$	

Tab. D.1: Formulář pro kalibraci tenzometrických snímačů na měření sil.

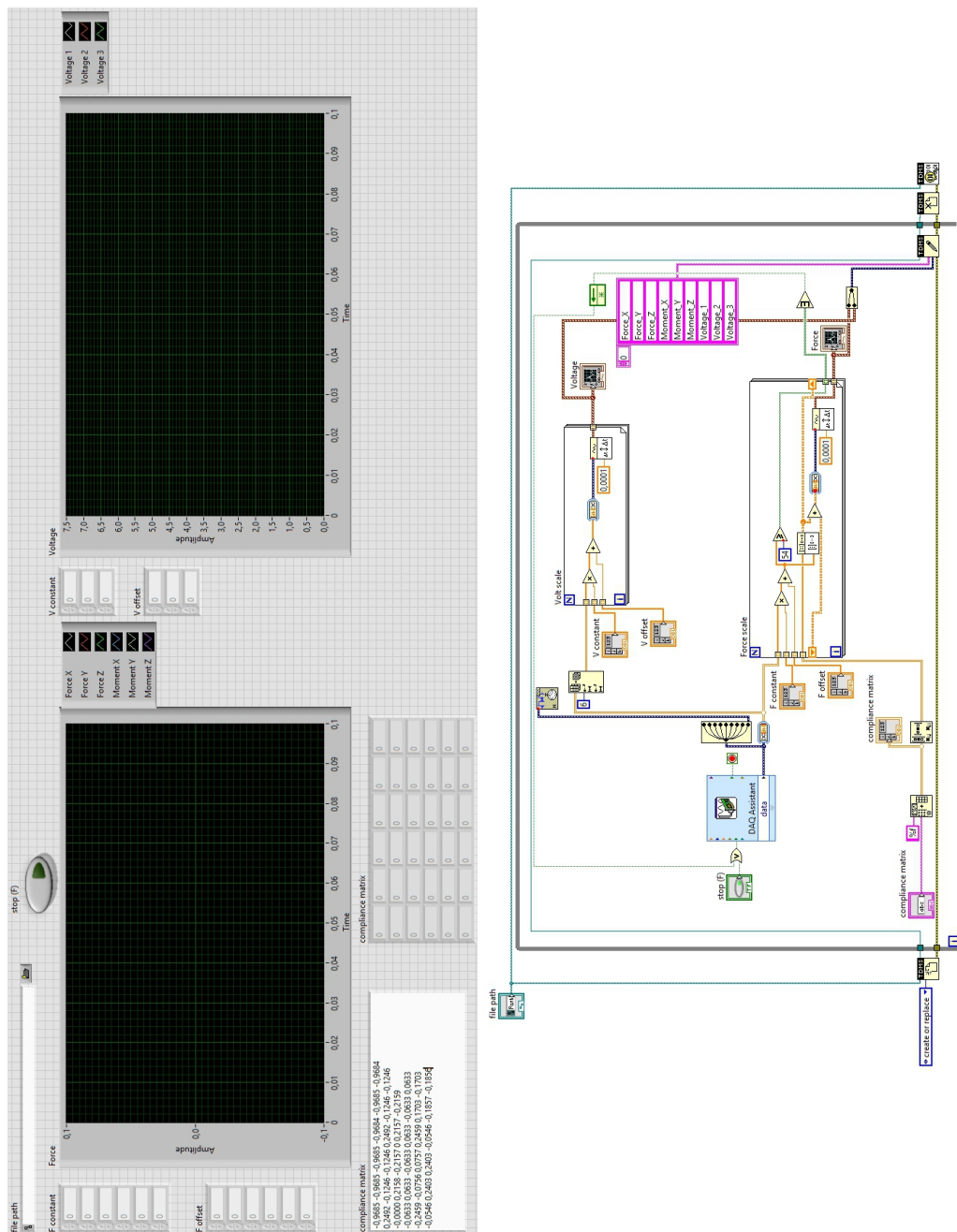
Výsledná rovnice (5.7) pro sílu získaná lineární regresí

$$F = a \cdot x + b,$$

kde:  $F$  [N] je vypočtená síla a  
 $x$   $\left[\frac{\text{mV}}{\text{V}}\right]$  je indikovaná síla.



# E ŘÍDÍCÍ PROGRAM



Obr. E.1: Řídicí program vytvořený v prostředí LabVIEW.

Na obrázku E.1 je náhled řídicího softwaru. Výstupem je průběh sil ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), momentů ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) a napětí (snímání napětí, proudu a otáček) v závislosti na čase. Vyhodnocení charakteristik pohonné jednotky bude řešeno postprocesem na základě ostatních měřených veličin (průměr vrtule, hustota a rychlost nabíhajícího proudu vzduchu atp.) v programu DIAdem dle rovnic uvedených v kapitole 3.

## **F VÝKRESY NAVRŽENÉ KONSTRUKCE**

1

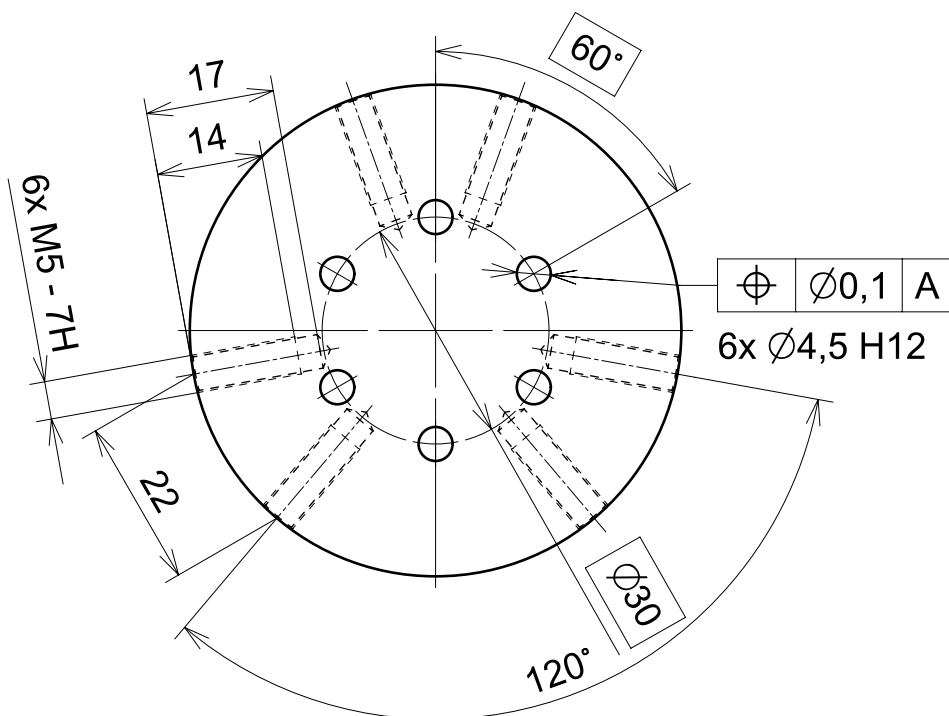
2

3

4

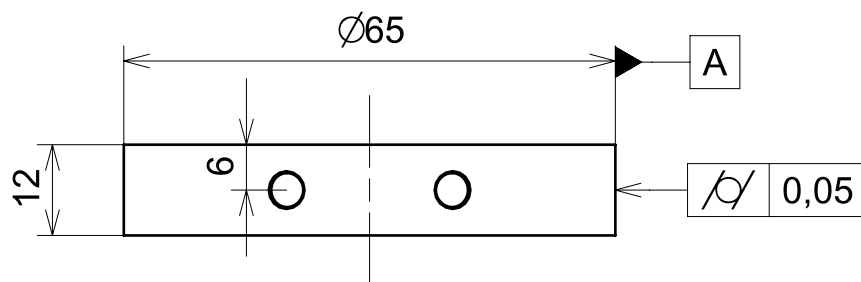
A

A



B

B



C

C

$Ra 3,2$

NÁZEV

PLOŠINA

MĚŘÍTKO

1:1

PROMÍTÁNÍ

ISO E

MATERIÁL

S355J2+N (1.0577) dle EN 10025-2

POLOTOVAR

KR 68 A - 15 ČSN 42 5510.11

TOLEROVÁNÍ PODLE ISO 8015

ANO

PŘESNOST ISO 2768

mK

KRESLIL

PINC Richard

DATUM

2016-12-27

1

2

3

4

D

D

1

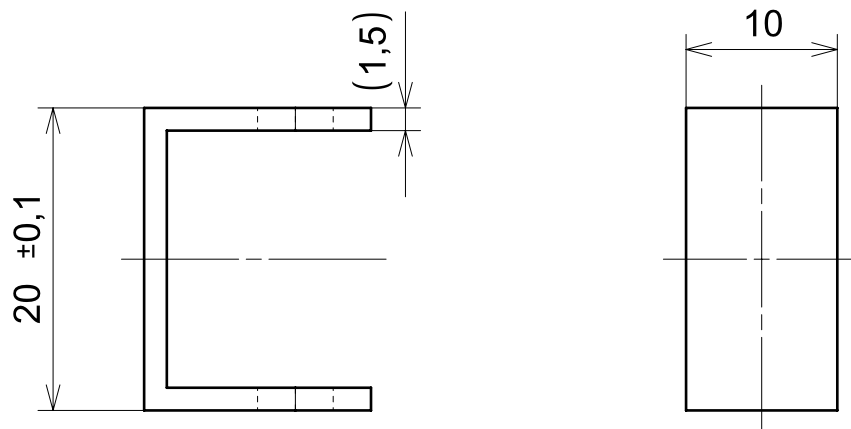
2

3

4

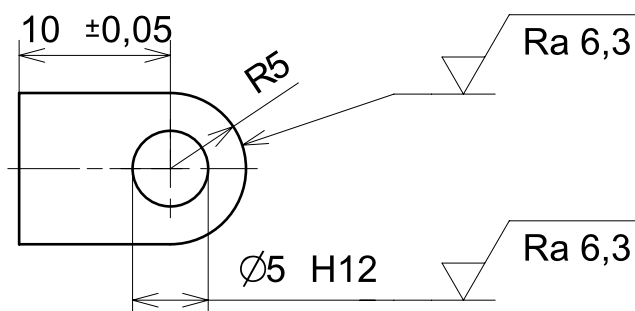
A

A



B

B



C

C



D

D

NÁZEV	MĚŘÍCÍ ČLEN
MĚŘÍTKO	1:1
PROMÍTÁNÍ	ISO E
MATERIÁL	S355J2+N (1.0577) dle EN 10025-2
POLOTOVAR	P 1,5 - 50 x 10 ČSN 42 5301.11
TOLEROVÁNÍ PODLE ISO 8015	NE
PŘESNOST ISO 2768	mK
KRESLIL	PINC Richard
DATUM	2016-12-27

1

2

3

4

1 2 3 4 5 6 7 8

6	ŠROUB SE ŠESTIHRANNOU HLAVOU ISO 4017 - M5x20 8.8	12
5	ŠESTIHRANNÁ MATICE ISO 4035 - M5 - 05	24
4	MĚŘÍCÍ ČLEN	6
3	KLOUBOVÁ HLAVICE S VNĚJŠÍM ZÁVITEM SAKB 5 F	12
2	PODLOŽKA B ČSN 02 1702.18 - 5,3	12
1	PLOŠINA	2
POZICE	NÁZEV	POČET KUSŮ

A

A

B

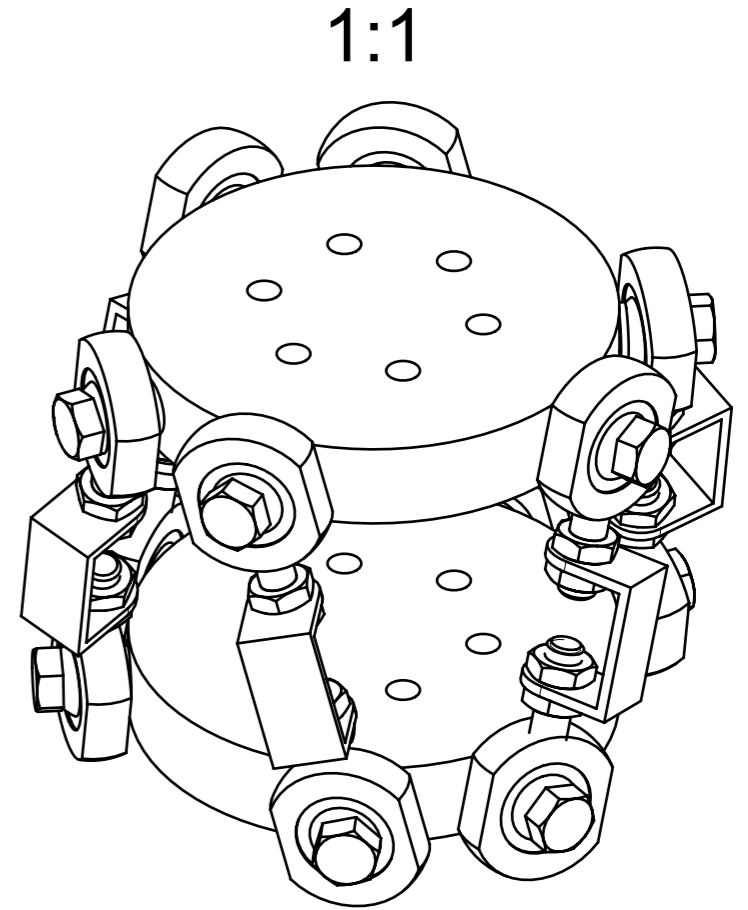
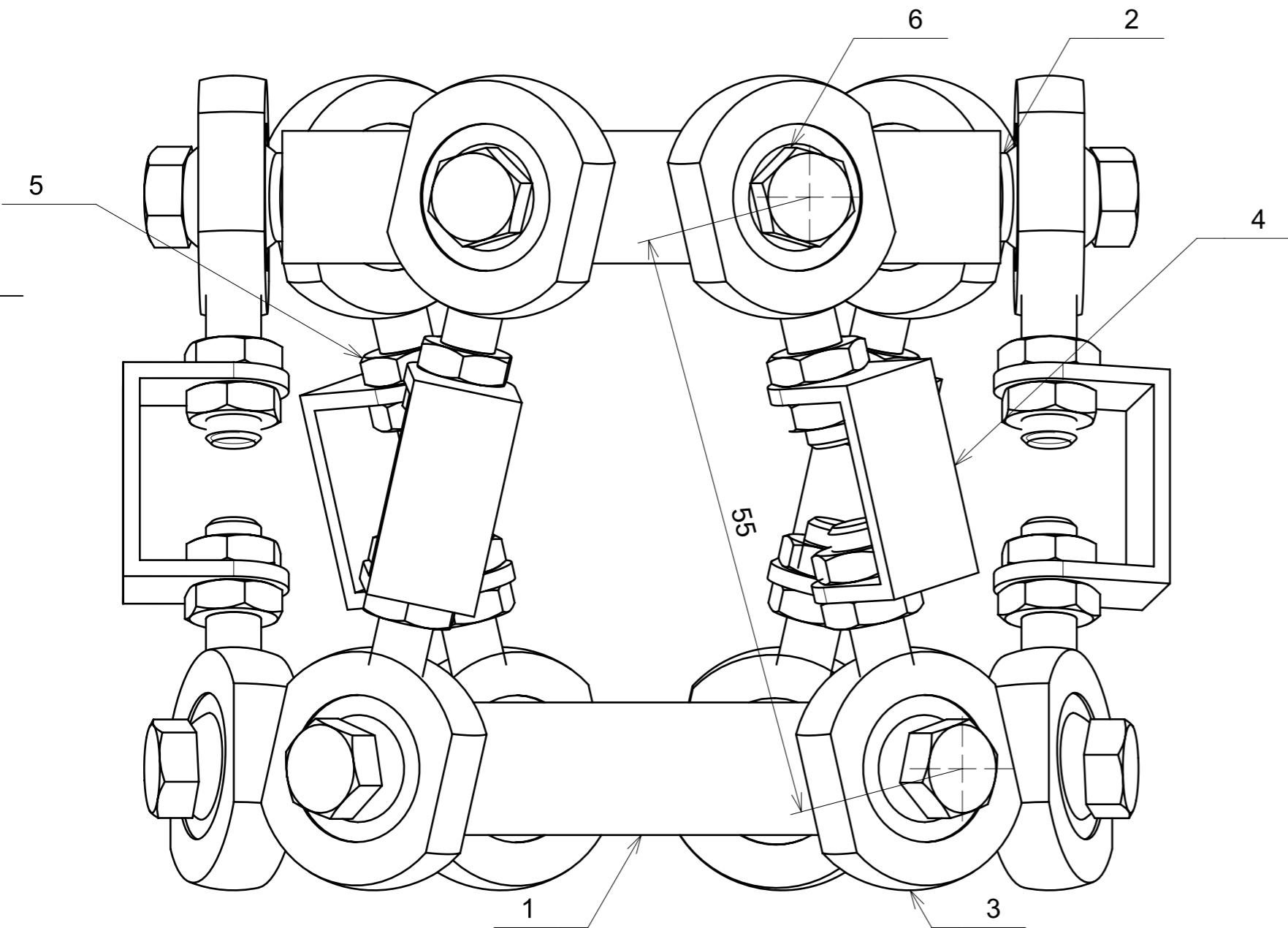
B

C

C

D

D



NÁZEV	SESTAVA
MĚŘÍTKO	2:1
KRESLIL	PINC Richard
DATUM	2016-12-27

1 2 3 4 5 6 7 8