



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH KONSTRUKCE TESTOVACÍHO MODELU PRO VÝUKU VIBRODIAGNOSTIKY

DESIGN OF A TEST STAND FOR VIBRODIAGNOSTICS EDUCATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Doležal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. David Doležal**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Zuth, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh konstrukce testovacího modelu pro výuku vibrodiagnostiky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat podrobným návrhem modelu pro výuku vibrodiagnostiky. Kromě výkresové dokumentace, bude práce obsahovat funkční prototyp s otestováním základních funkcí. Navržený model bude schopen simulovat zejména závady jako nevývaha, nesouosost a případně uvolněný základ.

Cíle diplomové práce:

Rešerše v oblasti vibrodiagnostiky (diagnostika závad rotačních strojů).

Návrh a výběr vhodného řešení.

Návrh konstrukce a pohonu.

Vypracování výkresové dokumentace.

Provést sérii měření pro otestování navrženého modelu.

Vlastní závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.

NOVÁK, Petr. Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001411.

BROCH, Jens Trampe. Mechanical Vibration and Shock Measurements. 2nd Edition. Naerum: Brüel & Kjaer, 1984. ISBN 8787355361.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce na téma Návrhu konstrukce testovacího modelu pro výuku vibrodiagnostiky se zabývá problematikou konstrukce daného zařízení. V úvodní části je systematický rozbor práce dle kterého je následně práce vyhotovena. V rešeršní části je uvedena Technická diagnostika se zaměřením na její pod obor Vibrodiagnostiku. Dále zde jsou popsány jednotlivé typy snímačů použitelných pro měření vibrací. Následně jsou uvedeny typické závady rotorů a jejich ustavení. V další části se práce zabývá návrhem testovacího zařízení. V návrhu byl kladen velký důraz na jednoduchost konstrukce, snadnou vyrobiteľnost a také na pokud možno co nejnižší výrobní náklady při zachování funkčnosti a spolehlivosti. Po navržení vhodné konstrukce bylo testovací zařízení vyrobeno a jeho funkčnost byla otestována ve školní laboratoři. Kde proběhla řada měření na typy závad statická neváha, momentová neváha. Do samotného měření se promítla i nesouosost a to vlivem absence seřízení zařízení. V závěrečné části práce je provedeno zhodnocení testovacího zařízení. Spolu s doporučením na jeho možné vylepšení.

Výsledkem práce je zhotovení testovacího modelu pro výuku diagnostiky který byl otestován a je provozuschopný.

KLÍČOVÁ SLOVA

technická diagnostika, vibrodiagnostika, neváha, nesouosost, simulátor poruch

ABSTRACT

The master's thesis on the topic "Design of a Testing Model for Vibrodiagnostics Education" deals with the construction issues of the device. The introductory section provides a systematic analysis, which serves as the basis for the subsequent work. The literature review section discusses Technical Diagnostics with a focus on its subfield, Vibrodiagnostics. It also describes various types of sensors used for vibration measurements. Subsequently, typical faults of rotors and their configuration are presented. The thesis then focuses on the design of the testing device. The design emphasizes simplicity, ease of manufacturing, and minimizing production costs while maintaining functionality and reliability. After the suitable design was proposed, the testing device was manufactured and its functionality was tested in a school laboratory. Several measurements were conducted on different types of faults, such as static unbalance and moment unbalance. The measurements also considered misalignment due to the lack of device calibration. The final part of the thesis evaluates the testing device and provides recommendations for possible improvements.

The outcome of the work is the creation of a functional testing model for diagnostic education, which has been tested and is operational.

KEYWORDS

technical diagnostics, vibrodiagnostics, imbalance, misalignment, fault simulator

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLEŽAL, David. Návrh konstrukce testovacího modelu pro výuku vibrodiagnostiky. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145625>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Daniel Zuth.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Daniela Zutha, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. 5. 2023

.....

Doležal David

Obsah

1	ÚVOD	13
2	SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE	15
2.1	Problémová situace	15
2.2	Formulace problému	15
2.3	Cíle práce a řešení	15
2.4	Popis testovacího modelu	15
2.5	Požadavky na simulátor poruch	16
3	TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	17
3.1	Signál	19
3.1.1	Vzorkování signálu	19
3.1.2	Spektrální analýza	21
3.1.3	Fourierova transformace	23
3.1.4	Nejistoty měření	23
3.1.5	Rozdělení signálů	24
3.1.6	Mechanické kmitání	25
3.2	Snímače vibrací kontaktní – seismická zařízení	26
3.2.1	Mechanické akcelerometry	28
3.2.2	Piezoelektrický akcelerometr – Piezoelectric accelerometer	29
3.2.3	MEMS Akcelerometry (Microelectromechanical systems)	30
3.3	Snímače vibrací bezkontaktní – snímače relativní výchylky	31
3.3.1	Indukční snímání vibrací – Eddy Current Type Displacement Sensor	32
3.3.2	Laserové vibrometry	32
3.4	Vibrodiagnostika	33
3.5	Nevývaha - Imbalance	34
3.5.1	Statická nevyvaha	36
3.5.2	Momentová nevyvaha	37
3.5.3	Dynamická nevyvaha	38
3.5.4	Kvazistatická nevyvaha	39
3.6	Nesouosost - Misalignment	39
3.7	Uvolněný základ	41
3.8	Normy	43
4	SIMULÁTOR PORUCH	45
4.1	Průmyslový simulátor poruch vyvažování a ložisek	45
4.2	Návrh a předběžný výěr komponent	46
4.2.1	Hřídel	47
4.2.2	Akcelerometr GY-61 ADXL335	47
4.2.3	Motor	48
4.2.4	Rotor	49
4.2.5	Stojan ložiska	49
4.3	Uložení	49
4.3.1	Valivá ložiska	50
4.3.2	Zajištění ložisek	50
4.4	Spoj hřídele s nábojem	51
4.4.1	Rozpěrný spoj	52
4.5	Pružiny	52
4.6	Spojky	53
4.7	Zdroj	55

4.8	Převodník.....	55
5	NÁVRH A VÝBĚR VHODNÉHO ŘEŠENÍ.....	57
5.1	První návrh.....	57
5.2	Druhý návrh.....	59
5.3	Třetí návrh.....	62
5.4	Montáž sestavy.....	65
5.5	Čtvrtý návrh.....	66
5.6	Výpočty.....	67
5.7	Výkresová dokumentace.....	69
6	TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉHO SIMULÁTORU PORUCH.....	71
7	ZÁVĚR A DOPORUČENÍ PRO PRAXI.....	77
8	CITOVANÁ LITERATURA.....	79
9	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	83
9.1	Seznam tabulek.....	83
9.2	Seznam obrázků.....	83

1 ÚVOD

Příchod průmyslu do společnosti vytvořil mnoho nových vědních oborů které se zabývají vývojem a výzkumem. Cílem těchto oborů je neustálé zefektivňování a zlepšování fungování nejen celého průmyslu. Jedním z těchto oborů je i Technická diagnostika, tento obor se zabývá zkoumáním celkového technického stavu strojních zařízení. Cílem Technické diagnostiky je zajistit bezporuchovou funkčnost strojního zařízení za pomoci včasné diagnózy a následném provedení preventivní údržby kdy při provedení preventivní údržby dojde k odstranění vznikající poruchy např. výměnou opotřeбенé komponenty (ložisko). Technická diagnostika používá celou řadu diagnostických metod jednou z nich je Vibrodiagnostika.

Vibrodiagnostika se zabývá měřením, zkoumáním a vyhodnocováním hodnot vibrací a jejich spektra. Záměrem zkvalitnění výuky vibrodiagnostiky se tato práce bude zabývat návrhem tetovacího zařízení pro výuku vibrodiagnostiky.

Kromě výkresové dokumentace, bude práce obsahovat funkční prototyp s otestováním základních funkcí. Navržený model bude schopen simulovat zejména závady jako neváha, nesouosost a případně uvolněný základ.

2 SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE

2.1 Problémová situace

Během výuky diagnostiky došlo na téma vibrodiagnostiky. Toto téma je velice dobře zpracováno jak teoreticky, tak výukově, ovšem v laboratorních cvičeních není možno dostatečně demonstrovat toto téma z důvodu absence simulátoru poruch se zaměřením na typy poruch jako je neváha, nesouosost a uvolněný základ.

2.2 Formulace problému

Zhotovení zařízení pro simulaci poruch typu neváha, nesouosost a uvolněný základ

2.3 Cíle práce a řešení

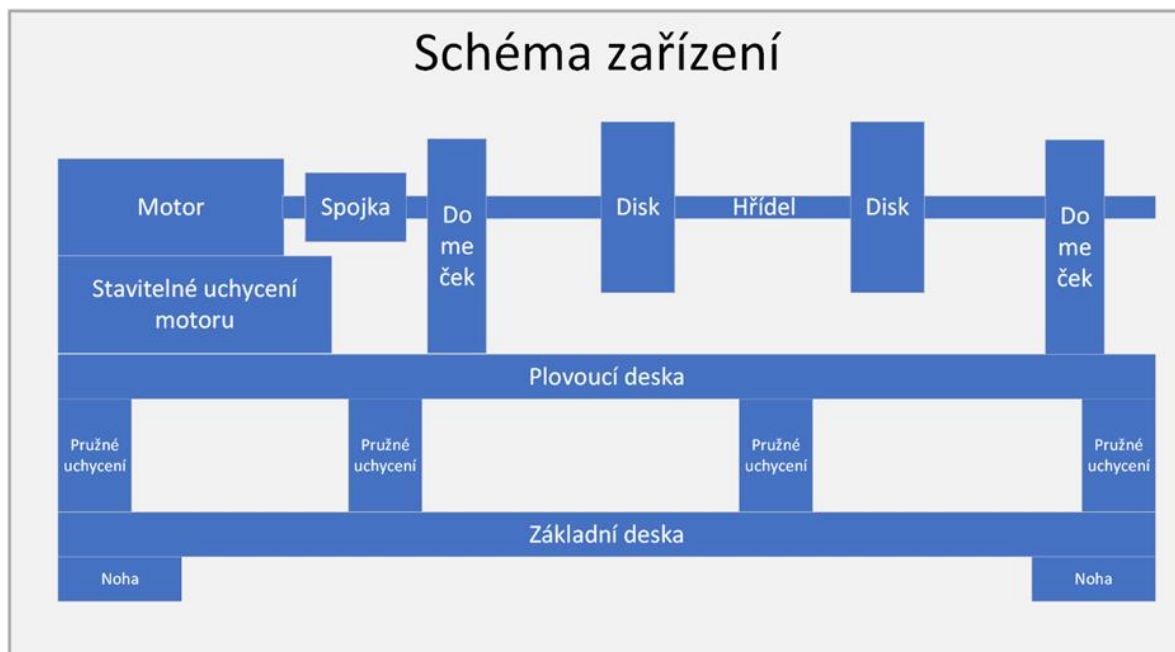
Vytvoření funkčního testovacího modelu pro výuku vibrodiagnostiky.

Cíle této diplomové práce jsou:

- Provést rešerši zaměřenou na vibrodiagnostiku rotačních strojů a jejich závad
- Navrhnout vhodný testovací model
- Nakreslit 3D model zařízení
- Zhotovit výkresovou dokumentaci
- Vyrobit testovací model
- Provést zkušební testování za pomoci série měření
- Zhodnotit testovací model, měření a uvést doporučení pro praxi

2.4 Popis testovacího modelu

Praktická část diplomové práce řeší konstrukci simulátoru poruch pro výuku diagnostiky s hlavním zaměřením na závady typu neváha, nesouosost a uvolněný základ. Konstrukce se bude zaměřovat na splnění všech těchto požadovaných typů poruch. Na Obr. 2.1 je zjednodušené schéma zamýšlené konstrukce simulátoru. Všechny typy závad, které má tento simulátor vytvářet mají společnou vlastnost a že jejich projev vytváří vibrace. Z toho důvodu je celé zařízení umístěno na odpružené plovoucí desce, která je uchycena k pevné základní desce. Tím bude umožněno plovoucí desce a všem komponentám naní ustavených rozvibrování to bude následně měřeno a diagnostikováno. Přičemž sestava sloupků složených z několika pružin umožní snížit přenos vibrací na základní desku. To spolu s hmotností dané desky a odpruženými nohami maximálně sníží přenos vibrací mimo zařízení. Na plovoucí desce bude ustaven motor který bude propojen za pomoci spojky s hřídelí na které budou umístěny dva disky. Tyto disky budou spojeny svěrně s hřídelí. Hřídel bude uložena na ložiscích přes domečky které budou uchyceny k plovoucí desce. Rotující části stroje budou při provozu zakrytovány pro bezpečné používání.



Obr. 2.1 Schéma Simulátoru poruch

2.5 Požadavky na simulátor poruch

Hřídel – délka hřídele mezi domečky s ložisky musí být nejméně pětinásobkem velkého průměru disku. To je podstatné pro měření uvedených typů závad.

Simulátor by měl být kompaktní, pokud možno snadno přenosný. Výroba by měla být co nejjednodušší s minimálním použitím strojního vybavení pro snadnou replikaci.

Nízké výrobní náklady

3 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Jde o obecnou nauku o hledání poruch – zkoumání celkového technického stavu zařízení.

Technická diagnostika se diferencuje na tři základní druhy úloh zjištění technického stavu zařízení. Samotná technická diagnostika se zaměřuje na technický stav objektu v současnosti. Dále technická prognostika, která se zabývá oblastí předpovídání budoucího technického stavu v daném časovém úseku. Dobou provozu, stanovením plánu údržby a oprav.

A technická genetika věnující se stavu zařízení v daném časovém úseku v minulosti. Jde o zkoumání poruch, jejich vzniku, vyhodnocení a určení příčin. [1]

Moderní údržba si klade za hlavní cíl udržet stroje a strojní zařízení v provozuschopném stavu, a to především stroje u kterých by měl následný výpadek provozuschopného stavu závažné ekonomické nebo časové následky. [2]

Technická diagnostika je vhodná pro zjišťování technického stavu a určování vývoje měřeného zařízení. Diagnostika se zabývá mnoha typy diagnostických metod. Ty jsou rozděleny do kategorií podle způsobů měření a vlivů na zařízení.

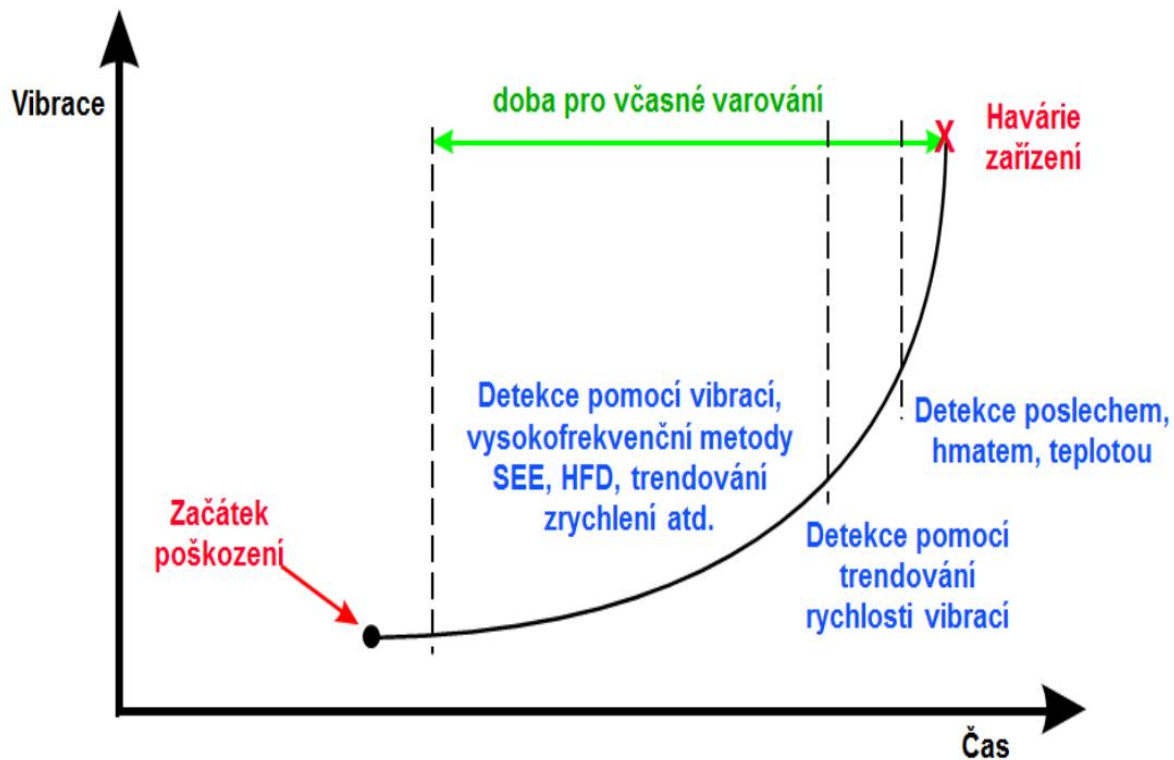
- Vibrodiagnostika
- Tribodiagnostika
- Termodiagnostika
- Akustická diagnostika
- Elektrodiagnostika
- Diagnostika hydraulických strojů a zařízení

[3]

Technická diagnostika užívá rozsáhlé způsoby diagnostických metod pro zajištění prevence a včasné údržby strojních zařízení. Tím snižuje pravděpodobnost vzniku poruchy diagnostikovaného zařízení, jeho částí, které lze diagnostikovat.

Zjištěním vady komponenty (ložisko) v počátku poruchového stavu vzniká čas a prostor pro naplánování a provedení preventivní údržby. Tím nedojde k selhání vadné součásti při chodu stroje, nevzniká prostoj a takto diagnostika snižuje náklady na údržbu samotnou. [3]

Na Obr. 3.1 je znázorněn úsek ve kterém je možno včasně detekovat vznikající závadu tím předejít havárii zařízení.

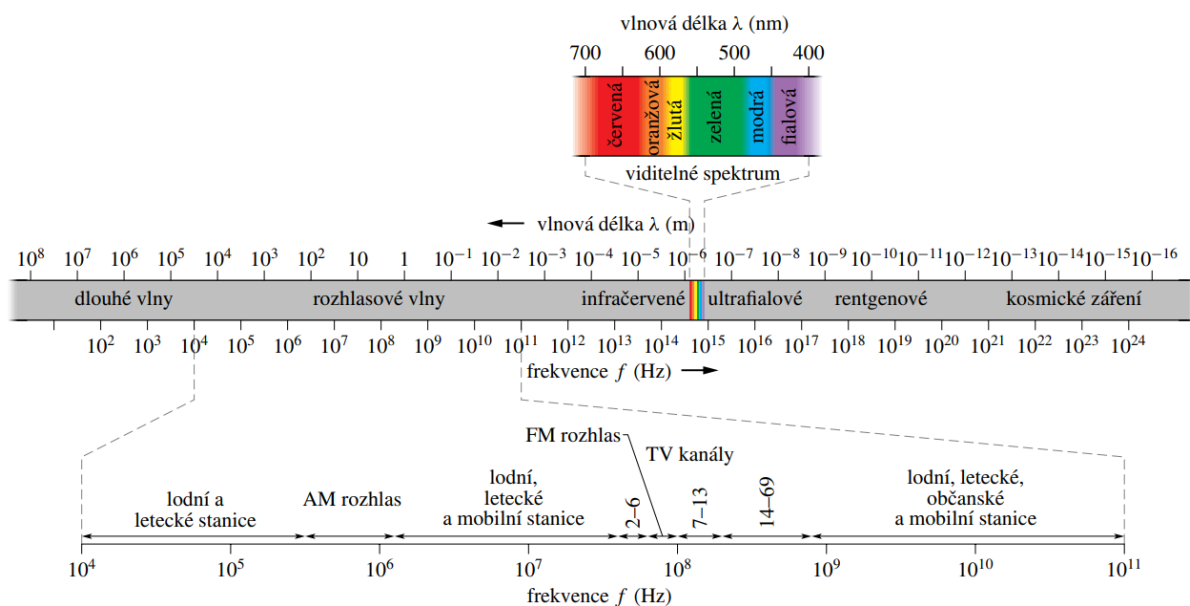


Obr. 3.1 Identifikace opotřebení [3]

3.1 Signál

Signál obecně je fyzikální veličina nesoucí informaci. Signál lze reprezentovat mnoha způsoby, například formou vln, kde může jít o vlny elektromagnetické ty jsou zobrazeny na Obr. 3.2 nebo vlny zvukové, dále může jít o hodnoty elektrického napětí či proudu. Přenos informace daným signálem probíhá za pomoci jeho změn v čase a prostoru. Tyto změny lze následně identifikovat a analyzovat. Tím získáváme údaje nesené daným signálem.

Mezi hlavní měřené parametry signálu patří amplituda jde o velikost výchylky. To je patrné z Obr. 3.7, kde maximální výchylka (Amplituda) nabývá hodnoty 0.5 v kladných hodnotách a -0.5 v záporných. Dalším parametrem je frekvence z obrázku je patrné že jde o frekvenci 1Hz frekvenci udává počet opakování (period) v průběhu času kde čas t je 1s. Dále může být měřena fáze, kde jde měřen posun signálu vůči referenčnímu bodu. A také lze měřit spektrální charakteristiku. Spektrální charakteristika reprezentuje energie signálu a jejich rozložení v jednotlivých frekvenčních složkách.



Obr. 3.2 Spektrum elektromagnetických vln [4]

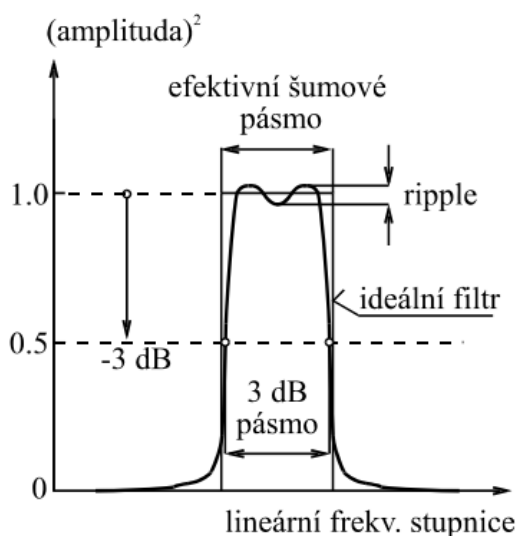
3.1.1 Vzorkování signálu

Signál můžeme zaznamenávat v reálném čase tedy on-line, to znamená že získáváme výsledky kontinuálně. Signál můžeme také zaznamenávat v úseku, či více úsecích tím vytvoříme datový soubor který následně analyzujeme tuto metodu nazýváme off-line. [5]

Při získávání signálu může dojít vlivem vzorkování k aliasingu ten nastává při nedostatečné vzorkovací frekvenci vůči maximální frekvenci zdrojového signálu. Pravidlo pro určení vhodné vzorkovací frekvence udává Shannon-Kotělnikova věta. Z této věty vyplývá že

nejnižší vzorkovací frekvence musí být nejméně dvojnásobkem maximální měřené frekvence viz(3.1). Při reálném měření je nezbytné nastavit vzorkovací frekvenci nejméně na čtyřnásobek maximální frekvence nebo i více. Tato podmínka lze dodržet dvěma způsoby, a to použitím dostatečně výkonného zařízení které je schopno měřit v potřebném rozsahu nebo lze použít antialiasingový filtr který maximální frekvenci zdrojového signálu ořízne. Při použití filtru může docházet ovlivnění měřené amplitudy a fáze z toho důvodu musí být použit vhodný typ filtru. [5]

Na Obr. 3.3 je vyobrazena charakteristika pásmového filtru s útlumem o 3dB. Pro harmonický signál tento útlum redukuje výkon signálu o 50% to přináší snížení amplitudy výstupního signálu a to o násobek $1/\sqrt{2}$. [6](str.68)



Obr. 3.3 Charakteristiky pásmového filtru [6]

$$f_{vz} > 2 \cdot f_{max} \quad (3.1)$$

Vzorkovací perioda

$$T = t_{k+1} - t_k; k \in (-\infty; \infty), k \in \mathbb{N} \text{ [s]} \quad [-] \quad (3.2)$$

Vzorkovací frekvence

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (3.3)$$

V následující Tab. 3.1 jsou uvedeny příklady rozlišitelných frekvenčních pásem pro danou aplikaci spolu s frekvencí se kterou jsou tyto data zaznamenávána. Z tabulky lze vyčíst že lidský sluch může pracovat v frekvenčním rozsahu 20- 20 000 Hz a ukládání zvukového záznamu probíhá při 44 100 Hz což odpovídá dvojnásobku maximální slyšitelné frekvenci.

Tab. 3.1 Frekvenční pásma [7]

Aplikace	Pásmo [Hz]	Záznam [Hz]
Lidský sluch	20-20 000	44 100 (CD)
Srozumitelnost řeči	300 – 3400	8000 (tel. linka)
EKG	0.1 -60	200
Invasivní EEG	0 - 800	2000

Obecně je výhodnější vzorkovat s co nejvyšší frekvencí. Tím zamezíme ztrátě informace vlivem měření. Následně pokud se jedná příliš objemný soubor dat pro vyhodnocení lze tyto data převzorkovat (zdecimovat).

Analogový signál

Analogový signál je spojitá množina hodnot v čase. Může být reprezentován elektrickým napětím nebo proudem.

Digitální signál

Digitální signál získáváme z původního analogového signálu za pomoci AD převodníku nebo modulu. Mezi podstatné parametry AD převodníků patří max. vzorkovací frekvence, rozsah amplitudy, počet kanálů, nejmenší měřitelné rozlišení. Při použití převodníku může docházet ke zkreslení dat vlivem kvantovacího šumu. [5]

3.1.2 Spektrální analýza

Signál je z pravidla vykreslován na časové ose. Tento signál se následně rozkládá na jednotlivé funkční složky. Nejsnazší cesta analýzy je rozdělení na sadu jednotlivých harmonických funkcí. Takto selektované funkce se následně odlišují svojí amplitudou, počáteční fází a úhlovou frekvencí. Takovýto rozklad funkce se označuje jako Furierova řada. Pro neperiodické funkce lze použít rychlou Fourierovu transformaci FFT.

[8]

„Překrývající se vlny se při svém postupu navzájem
neovlivňují.“ [4]

Vzájemná interakce mezi signály a jejich částmi

$$E_z \neq E_x + E_y \quad (3.4)$$

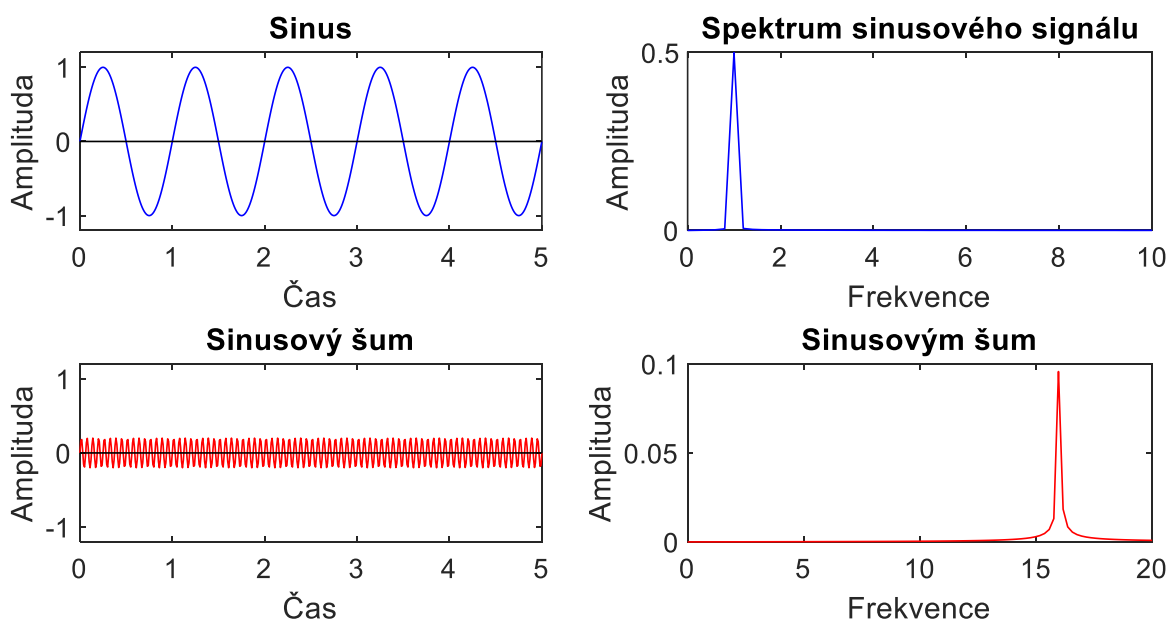
Složený signál je zobrazen na Obr. 3.5 tento složený signál lze následně rozdělit na jednotlivé složky. V tomto případě jde o dvě složky signál sinusový a signál sinusový šumový.

Tento složený signál je vytvořen pouze pro demonstrativní příklad. Je málo pravděpodobné že by reálný signál takto vypadal.

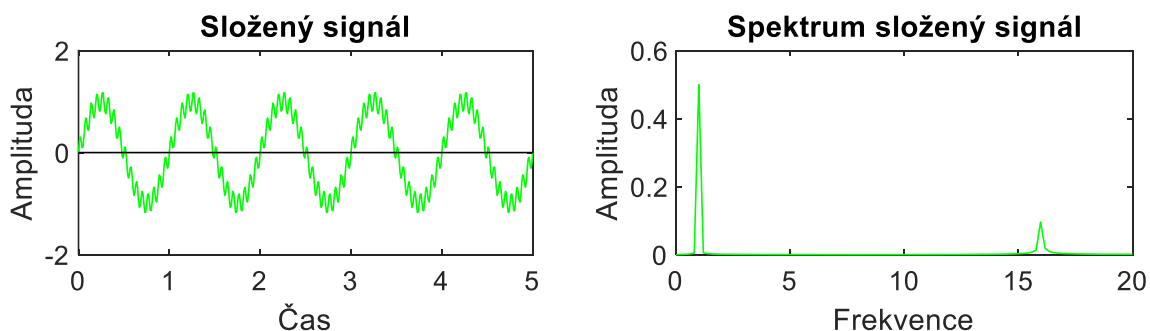
Signál jako takový můžeme rozložit na jednotlivé složky, u těch poté řešíme amplitudu, frekvenci a fázi. Složený signál rozdělený na jednotlivé frekvenční složky vidíme na Obr. 3.4 kde je v horní části zobrazen sinusový signál o amplitudě 1, periodě 1 a frekvenci 1Hz. Ve spodní části obrázku je vyobrazen sinusový šum. Teno šum má amplitudu 0.2, periodu 16 a frekvenci 16Hz.

Následující vzorec (3.5) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** znázorňuje obecnou funkci pro vytvoření uvedených signálů

$$y = \text{amplituda} * \sin(2 * \pi * \text{frekvence} * \text{čas}) \quad (3.5)$$



Obr. 3.4 Signál a šum



Obr. 3.5 Složený signál

3.1.3 Fourierova transformace:

“Vlnu libovolného tvaru lze vyjádřit ve tvaru součtu velkého počtu sinusových vln. Stačí jen pečlivě zvolit jejich frekvence, amplitudy a fázové konstanty.” [4]

Fourierova řada se používá především na analýzu periodických a kvaziperiodických signálů. Ačkoli množství jednotlivých selektovaných složek je nekonečný ve Fourierově řadě jsou zahrnuty složky, které jsou násobky harmonické frekvence a základní frekvence. Tím jsou vyseparovány jednotlivé složky spektra.

Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

DFT je příhodná pro rozbor stacionárního signálu. Podstatou je rozložení získaného signálu na systém periodických funkcí s periodou T . [5], [9]

Short-Time Fourier Transform (STFT)

STFT je vhodná pro rozbor nestacionárního signálu, kde dochází k rozboru krátkého časového úseku spektra. [5]

3.1.4 Nejistoty měření

Měřením dochází ke zkreslení výsledku vlivem nejistoty měření. Mezi zdroje těchto nejistot může patřit, nedokonalost experimentu, nepoužití ideálního měřicího zařízení, špatný postup při měření, vlivy prostředí, vlivy obsluhy, nedokonalosti přenosu dat a jiné. [9]

Nejistoty typu A

Jde především o chyby vnesené opakováním měření, kde jde především

[10]

Nejistoty typu B

Jedná se o jiné typy nejistot, než jsou nejistoty typu A.

[10]

Kombinovaná nejistota

Jde o kombinaci nejistot typu A a B, které jsou určeny dle zákona šíření nejistot.

[10]

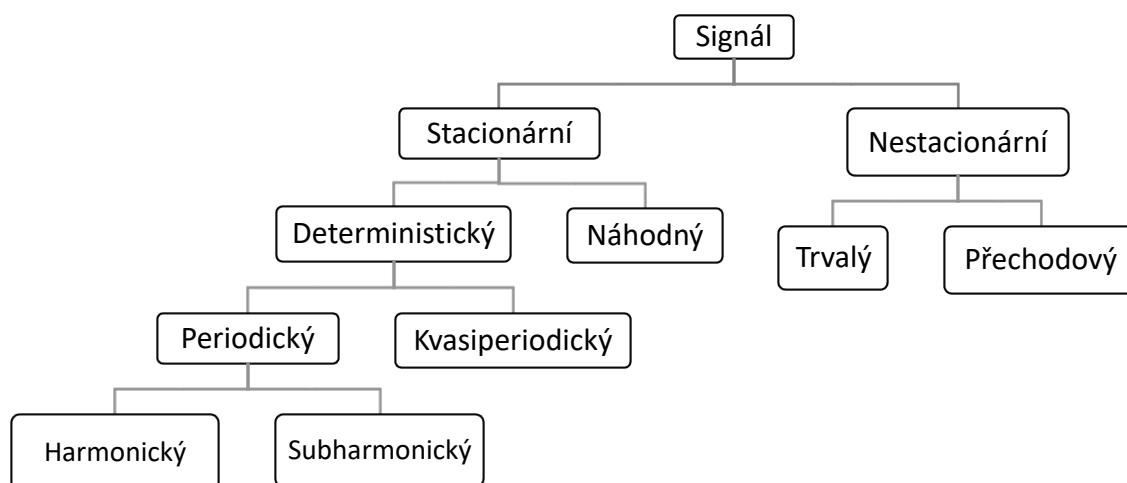
Rozšířená nejistota

Rozšířená nejistota zahrnuje okolí výsledku měření. Toto okolí je stanoveno koeficientem krytí, kdy dojde k pronásobení s původním výsledkem měření na obě strany.

[10]

3.1.5 Rozdělení signálů

Signály jsou možné rozdělit dle různých hledisek. Hlavními typy signálu jsou signály stacionární a signály nestacionární. Stacionární signály se projevují stálostí středních hodnot daných veličin v čase. Stacionární signál se dá rozdělit na deterministický nebo náhodný. U deterministického signálu lze s dostatečným množstvím informací předvídat další průběh signálu. [1] Náhodný signál (sochastický) u tohoto signálu nelze předvídat průběh. [1], [3] Přechodový signál může mít projev impulsu krátkého trvání. Periodický signál se skládá z harmonických nebo subharmonických projevů signálů. Kvasiperiodický signál se skládá také z harmonických nebo subharmonických projevů signálů které dosahují minimálně dvojnásobku základních frekvencí se stejným poměrem velikostí. [3]



Obr. 3.6 Rozdělení signálů [1], [3]

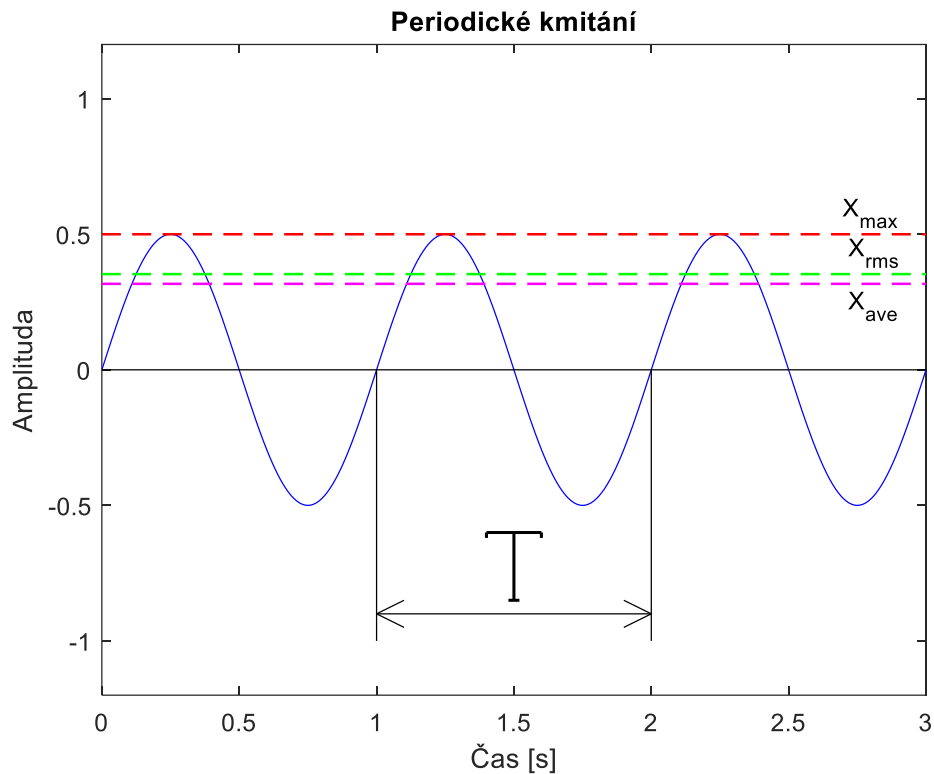
Nestacionární signály

Nestacionární signály lze rozdělit na tranzientní signál tento signál má začátek i konec v nulové hodnotě a signál kontinuální. Kontinuální tedy trvalý nestacionární signál můžeme rozdělit na malé krátké úseky a ty následně analyzovat. Takto rozdělený nestacionární signál můžeme označit za kvazistacionární. [1]

3.1.6 Mechanické kmitání

„Mechanické kmitání je dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy.“ [5]

Periodické kmitání lze dobře vyjádřit funkcí sinus to je zobrazeno na Obr. 3.7 kde je znázorněna křivka $y = (1/2) \cdot \sin(2\pi \cdot 1 \cdot t)$ přičemž $t = 3s$, na obrázku jsou dále znázorněny hodnoty X_{\max} , X_{rms} , X_{ave} a T .



Obr. 3.7 Harmonické kmitání

y – výchylka

T – perioda

t – čas

X_{\max} – jde o maximální rozkmit

$$y = X_{\max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) = X_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad [\text{mm}] \quad (3.6)$$

x_{\max} – jde maximální výchylka

ω – kruhová frekvence

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad [\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (3.7)$$

X_{rms} – jde střední kvadratická hodnota neboli Efektivní hodnota

Pro popis vibrací jde o jednu z nejvíce používaných hodnot [9].

Pro harmonický pohyb platí

$$X_{RMS} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot X_{ave} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot X_{max} \quad [\text{mm}] \quad (3.8)$$

X_{ave} – jde střední absolutní hodnota

$$X_{ave} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x| \cdot dt \quad [\text{mm}] \quad (3.9)$$

Rychlost

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot X_{max} \cdot \cos(\omega t) = v_{max} \cdot \cos(\omega t) = v_{max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.10)$$

v_{max} – Maximální rychlost

Zrychlení

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 \cdot X_{max} \cdot \sin(\omega t) = -a_{max} \cdot \sin(\omega t) = a_{max} \cdot \sin(\omega t + \pi) \quad [\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3.11)$$

a_{max} – maximální zrychlení

[8]

Určením hodnot maximální výchylky, střední absolutní hodnoty a střední kvadratické hodnoty spolu se získáním tvaru a vrcholu můžeme určit, zda jde o harmonický pohyb. V praxi je nezbytné tyto údaje doplnit, a to o frekvenční analýzu.

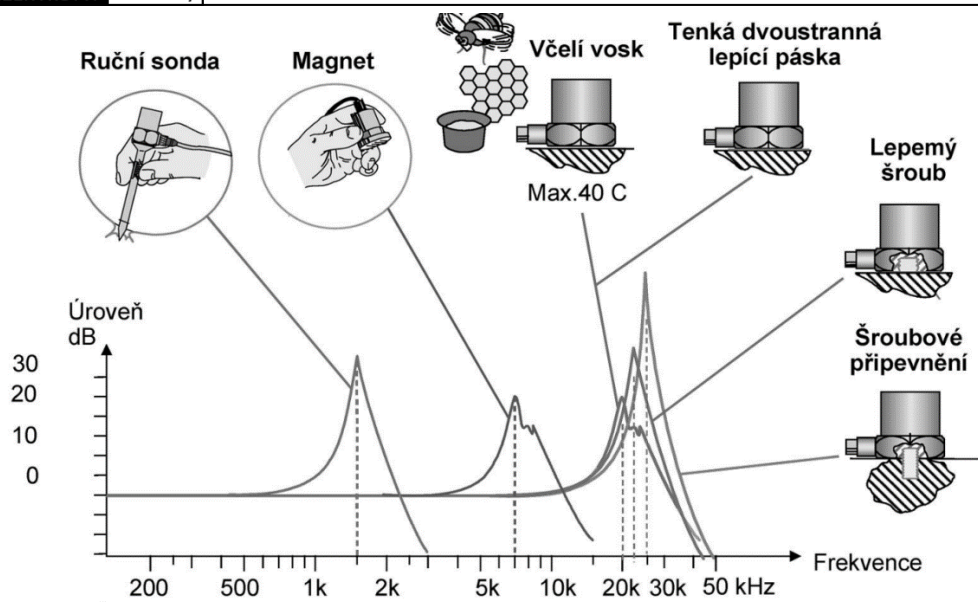
[8]

3.2 Snímače vibrací kontaktní – seismická zařízení

Měření vibrací je náročný úkol, při měření je nutné, aby naměřený signál co nejpřesněji odpovídal průběhu mechanického kmitání. Z principu funkce se dají snímače vibrací rozdělit do dvou kategorií, a to na seismická zařízení a snímače relativní výchylky.

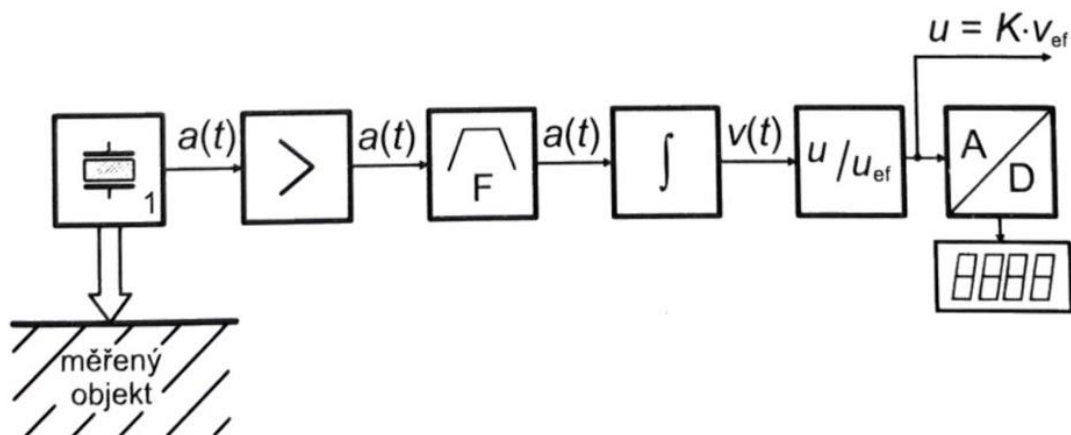
[8]

Při používání akcelerometrů je nutné dbát na způsob uchycení akcelerometru samotného. Při nesprávném nebo nedostatečném uchycení dochází k nepřesnosti měření. Tato nepřesnost je znázorněna na Obr. 3.8 .



Obr. 3.8 Uchycení piezo-snímačů [11]

Na Obr. 3.9 je znázorněno blokové schéma jednoduchého zařízení pro měření vibrací skládající se z piezoakcelerometru, širokopásmového filtru a AD převodníku.



Obr. 3.9 Blokové schéma měřícího řetězce pro měření vibrací [5]

Akcelerometry

Jedná se o seismické zařízení, jež produkuje signál, jehož intenzita je úměrná mechanickému vibračnímu zrychlení. Montáž akcelerometrů se zpravidla provádí na stacionární části zařízení. Při použití je vhodné volit akcelerometr tak aby pokrýval celý rozsah předpokládané frekvence.

[8]

Základní princip funkce akcelerometrů je uchycení závaží na pružině, při změně zrychlení – začínající nebo končící pohyb, případně při zrychlení nebo zpomalení uchycené závaží má snahu zůstat v klidové poloze čímž závaží vyvine sílu na pružinu, tato změna stavu je měřena a následně převedena na hodnoty zrychlení, rychlost nebo výchylku zrychlení.

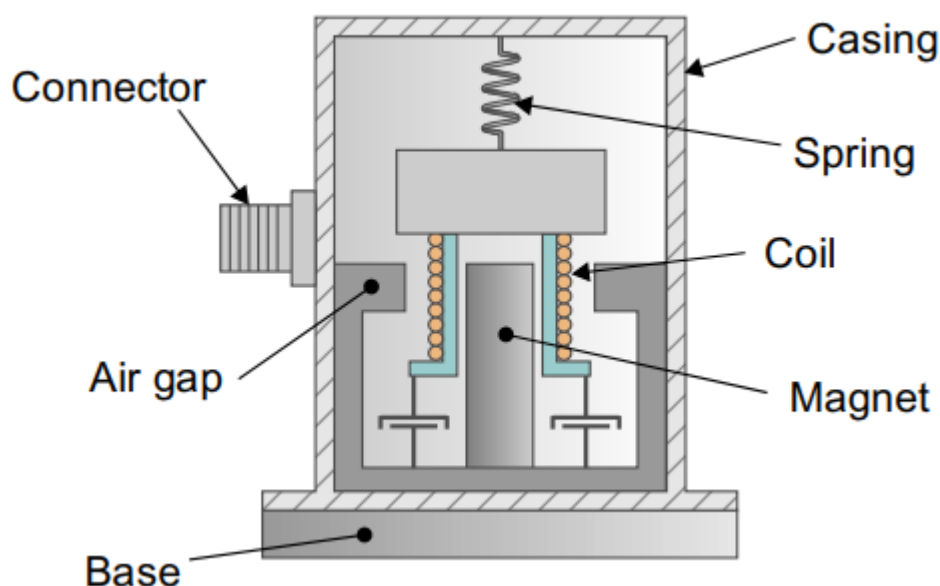
Akcelerometry jsou vyráběny v různých velikostech a variantách níže budou popsány jednotlivé typy dle typu konstrukce.

3.2.1 Mechanické akcelerometry

Jde o elektromechanický senzor určený pro měření vibrací. Tento typ snímače je nutné pravidelně kalibrovat, z pravidla každých 6 měsíců, z tohoto důvodu jsou velmi často nahrazeny jinými typy akcelerometrů. Výhodou je nízká pořizovací cena, přenos signálu může být za pomoci obyčejného dvoužilového kabelu bez vzniku významných ztrát a dále je odolný na rušení přicházející kabelem.

[12]

Na obrázku níže je znázorněn řez mechanickým akcelerometrem. Poté co je akcelerometr přiložen na měřené zařízení dochází k jeho rozvibrování. To způsobuje indukování napětí. To je přenášeno na výstupní kabely a následně vyhodnocován.



Obr. 3.10 Mechanický akcelerometr [12]

3.2.2 Piezoelektrický akcelerometr – Piezoelectric accelerometer

Piezoelektrický akcelerometr obsahuje jeden i více piezoelektrických krystalů. Obecně platí že čím je akcelerometr s vyšší citlivostí tím má nižší horní hranici frekvenčního rozsahu. Při měření je důležité dbát na správné upevnění akcelerometru k měřenému povrchu při nedostatečném uchycení dochází ke ztrátám a tím ke zkreslení měření. [5]

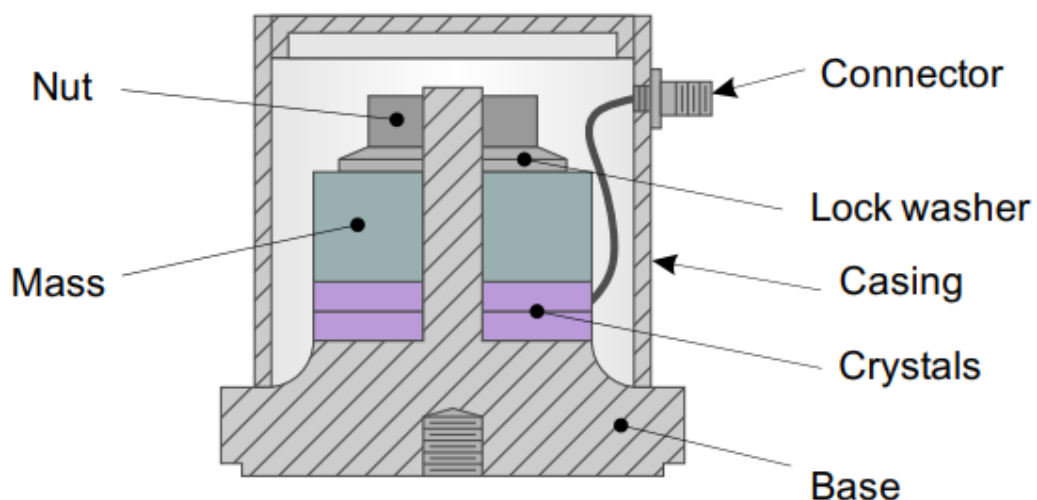
Piezoelektrická akcelerometr je zobrazen na Obr. 3.11 Konstrukce piezoelektrického akcelerometru Obr. 3.11 kde je vyobrazen v řezu ze kterého je velmi dobře patrná jeho konstrukce. Akcelerometr se skládá ze základu, na kterém je umístěn piezokrystal na krystalu je umístěno závaží, které je pojištěno proti uvolnění. Při měření vibrací dochází k přesunu vibrací na akcelerometr. Tím dojde k rozvibrování akcelerometru a vzniku sil působících na krystal jeho deformací vzniká elektrický náboj. Tento náboj je úměrně závislý na zatěžující síle [8]. Tento náboj se měří a zaznamenává jako signál vibrací nebo zrychlení [12].

Piezoelektrické akcelerometry jsou často použity pro v průmyslu pro kontrolu vibrací u rotačních strojů a zařízení, pro detekci zemětřesení, sledování kmitání mostů a dalších. Tento typ senzoru je velmi citlivý a umožňuje měřit zrychlení a vibrace v rozsáhlém frekvenčním spektru.

[12]

Frekvenční rozsah pro měření Piezorezistivními akcelerometry začíná na 0Hz a dosahuje hodnot až 7 kHz, v dynamickém rozsahu se jedná o hodnoty od 1,5 až 2000 g. Senzitivita těchto akcelerometru je v rozmezí 25mV/g. [5]

Na obrázku níže je znázorněn řez mechanickým akcelerometrem. Poté co je akcelerometr přiložen na měřené zařízení dochází k jeho rozvibrování. To vyvíjí tlak na piezokrystal který vytváří odpovídající elektrický náboj.



Obr. 3.11 Konstrukce piezoelektrického akcelerometru [12]

3.2.3 MEMS Akcelerometry (Microelectromechanical systems)

V polovině 90. let 20. století se technologie MEMS začala objevovat v mnoha komerčních produktech a aplikacích včetně akcelerometrů kde se tyto akcelerometry používaly k řízení aktivace airbagů v automobilech. Dále v tlakových senzorech pro lékařské aplikace a hlavy inkoustových tiskáren.

[13]

Senzory automobilových airbagů byly jedním z prvních komerčních zařízení využívajících MEMS. Tyto senzory nahrazovaly původní mechanické akcelerometry. Mems akcelerometry se dnes používají jako senzory které měří hodnoty zpomalení automobilu při nárazu do předmětu. Samotné zpomalení je měřeno změnou napětí.

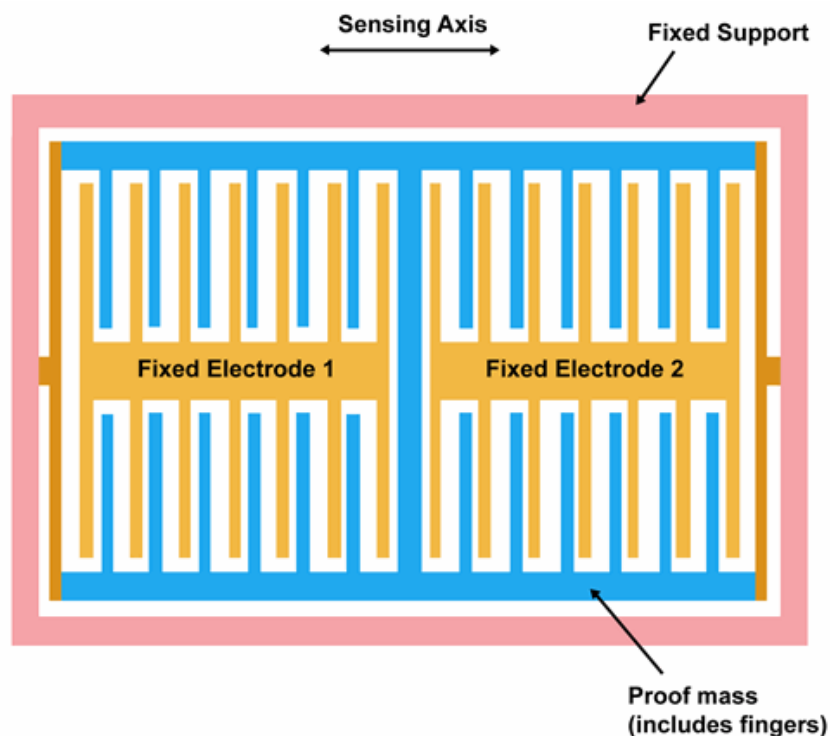
[13]

MEMS akcelerometr je v podstatě kapacitní nebo piezorezistivní zařízení sestavené ze zavěšeného kyvadla odolná hmota/deska. Jak zrychlení působí na důkazní hmotu, mikroobrobené kapacitní nebo piezorezistivní desky snímají změnu zrychlení z vychýlení desek. Snímací desky jsou vidět na obrázku.

[13]

Frekvenční rozsah pro měření MEMS akcelerometry začíná na 0Hz a dosahuje hodnot až 6 kHz, v dynamickém rozsahu se jedná o hodnoty až 250 g. Senzitivita těchto akcelerometrů je v rozmezí 20 až 1000Mv/g. [5]

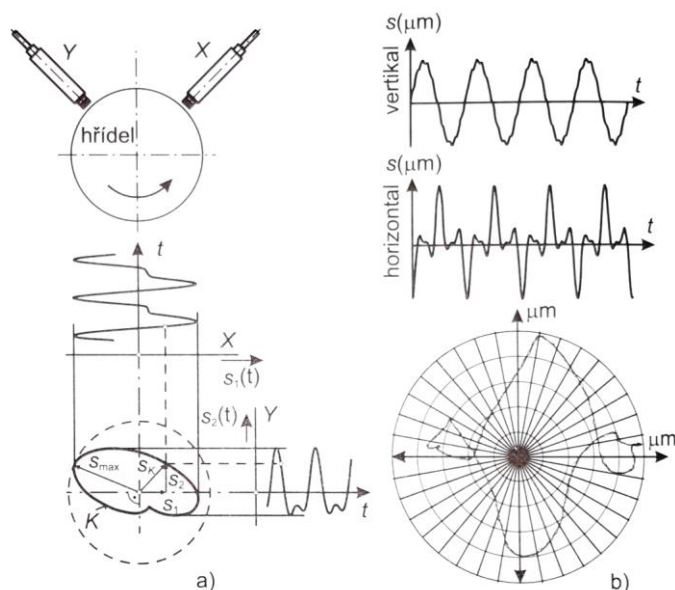
Nákres konstrukce lineárního akcelerometru pro měření hodnot ve směru jedné osy.



Obr. 3.12 Lineární akcelerometr [14]

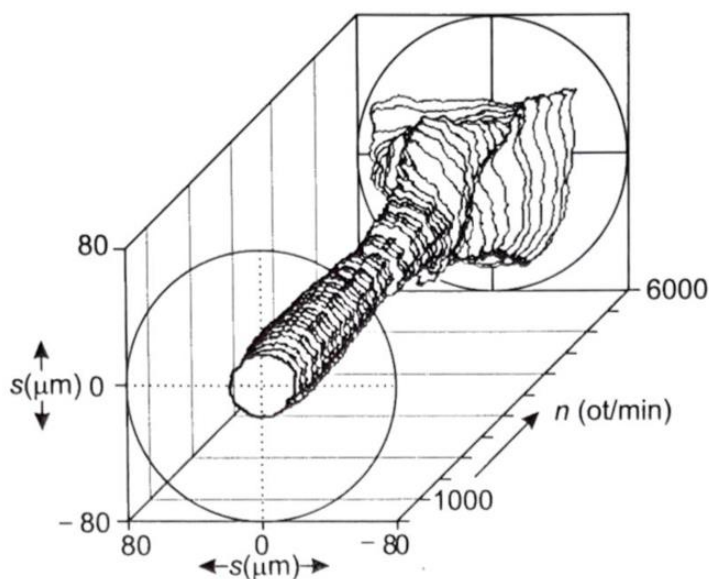
3.3 Snímače vibrací bezkontaktní – snímače relativní výchylky

Bezkontaktní snímače vibrací pracují na principu kapacity, ultrazvuku a optiky.



Obr. 3.13 Kinematická dráha hřídele [5]

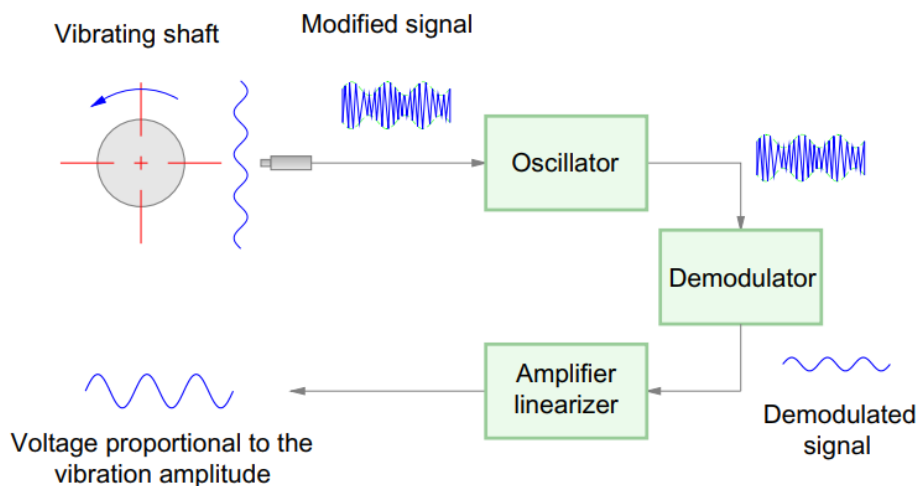
Při měření bezkontaktními snímači zjišťujeme kinematickou dráhu hřídele. Na Obr. 3.13 a) je znázorněno vhodně umístění snímačů. Při umísťování je podstatné dodržet vzájemný úhel mezi snímači 90° . Vespod je vyobrazena dráha osy hřídele nazývána orbitou, z obrázku je patrné že při rotaci dochází k vyosení a oběhu osy hřídele vůči ideálnímu středu. Při tomto typu měření musíme brát v úvahu ovalitu hřídele která vnáší nepřesnost. Toto zkreslení lze eliminovat změřením hřídele při velmi nízkých otáčkách, tím nasnímáme ovalitu kterou následně promítneme do výsledku měření. Na Obr. 3.14 je znázorněno, jak se mění vyobrazení orbity v závislosti na otáčkách hřídele. [5]



Obr. 3.14 Coorbíta - závislost na otáčkách [5]

3.3.1 Indukční snímání vibrací – Eddy Current Type Displacement Sensor

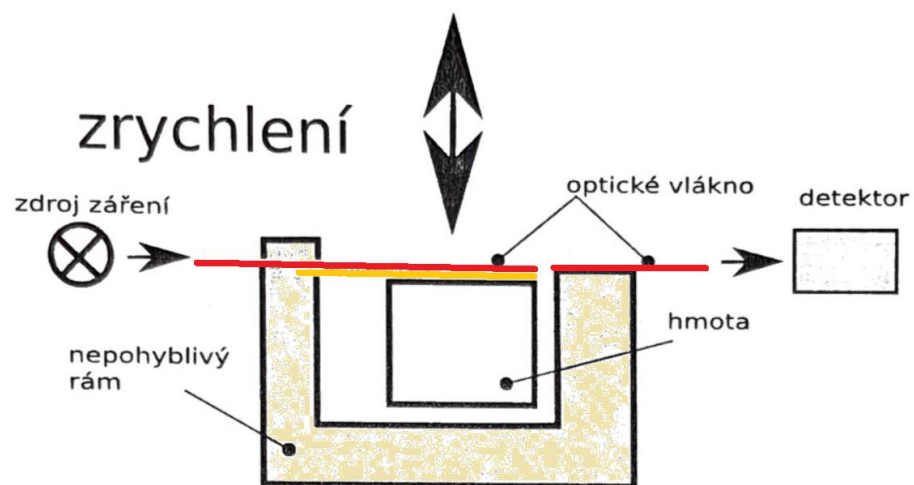
Pro indukční snímání vibrací se používá indukční sonda. Obvykle je konstrukce sondy je zhotovena z kovového pouzdra, většinou se závitem na obvodu po celé jeho délce. V místě určeném pro měření je vložena cívka, která je chráněna záslepkou. Jako ochrana cívky slouží epoxidová pryskyřice případně keramika nebo skelné vlákno, a to o tloušťce cca 0.25mm. Na opačné straně tělesa je umístěn konektor. [12] Na Obr. 3.15 je znázorněno schéma zapojení.



Obr. 3.15 Schéma funkce indukčního snímání vibrací [12]

3.3.2 Laserové vibrometry

Princip funkce optického akcelerometru spočívá přerušování – snižování množství detekovaného záření. Senzor obsahuje optické vlákno, kterým prochází záření. Vláknko je přichyceno na seismickou desku, která se při vzniku vibrací rozvibruje a tím dojde ke snížení množství záření které prochází do detektoru. Toto množství je vyhodnoceno a tím je určeno zrychlení. Tento typ akcelerometru je vhodný zejména do výbušných prostředí nebo do prostředí se silnými magnetickými poli. [15]



Obr. 3.16 Princip funkce optického akcelerometru [15]

3.4 Vibrodiagnostika

Jeden ze základních požadavků na vibrodiagnostiku je optimálně určit a použít nejméně nákladné metody pro sledování kritických částí zařízení, strojů a systémů aby se předešlo vzniku poruchy. Proto je nezbytné znát kompletní funkci i funkční parametry měřených zařízení. Obecně se tyto systémy skládají z dílčích funkčních hnacích a hnaných jednotek které jsou spojeny za pomoci spojek, řetězů, řemenů, převodovek a dalších ... Mezi hnací jednotky patří elektromotory, turbíny a spalovací agregáty.

[12]

Vibrodiagnostika je poměrně málo nákladnou metodu za pomoci, které lze získat dobrý přehled o aktuálním stavu měřené jedné či více částí stroje. Díky těmto vlastnostem jde o velice používanou metodu diagnostiky na strojních zařízeních.

Měřením získáváme údaje o zrychlení (a), rychlosti (v) a výchylce (y). tyto veličiny měříme za pomoci snímačů – čidel, a tím získáváme signál. Tento signál je vhodné následně filtrovat. Poté lze tento signál analyzovat.

Zařízení, které při své činnosti vykonává libovolný pohyb také vytváří vibrace. Ať jde o pohyb posuvný nebo rovátní. Tyto vibrace jsou pro každé zařízení specifické. Hodnoty vibrací souvisí se stavem strojního zařízení a pracovních podmínkách. Nové zařízení má tyto hodnoty obvykle nízké, s postupem času dochází k opotřebením jednotlivých komponent a tím i nárůstu hodnot. Tyto hodnoty jsou měřeny a vyhodnocovány při překročení stanovených mezí dojde k naplánování preventivní údržby a k odstranění závady ještě před jejím vznikem. A to s předstihem ve hodný čas pro údržbu.

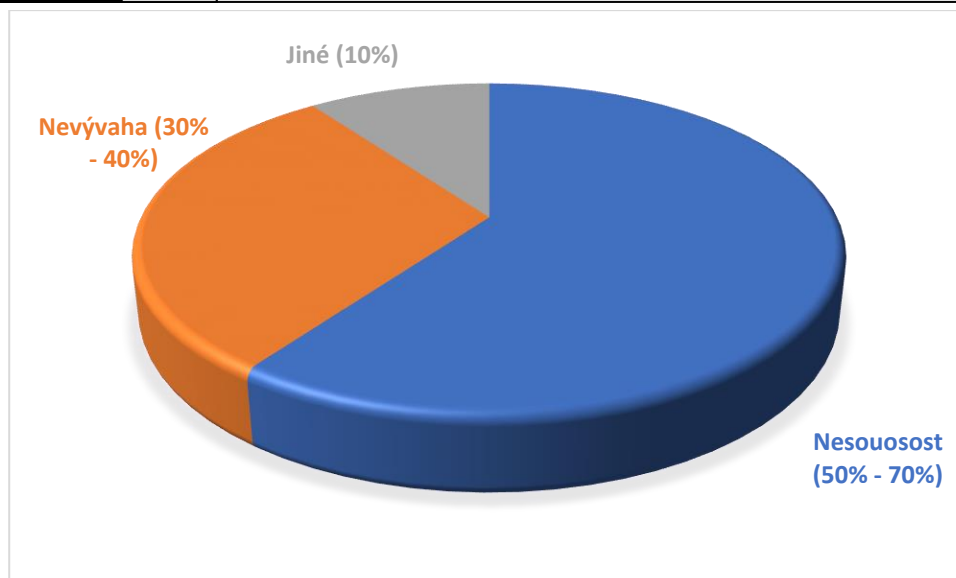
Zvýšené vibrace zatěžují dynamicky stroj, nejen v místě ale i v okolí vadné komponenty. Tím dochází k opotřebením a snižování životnosti okolních součástí, ke snížení přesnosti, účinnosti i bezpečnosti.

Vibrace mohou také vznikat i při nevhodném seřazení, nebo neodborném sestavení stroje. Poté může docházet k závadám typu nevyvážení nebo nesouosost.

[3]

Vibrace jsou nejčastěji testovány ve frekvenčním rozsahu 10 - 1000 Hz. V tomto rozsahu se velmi často projevuje zmíněná nevyvážení, nesouosost a uvolněný základ i jiné. Pro vyhodnocení měřených hodnot lze použít normu ČSN ISO 10816. [3]

U vibrací sledujeme jejich zrychlení, to je nezbytné pro diagnostikování stavu a zachycení vzniku poruchy projevující se při vysokých frekvencích, v řádu jednotek až desítek kilohertz (kHz).



Obr. 3.17 Zdroje vibrací rotujících strojních zařízení

3.5 Nevývaha - Imbalance

Důvody vzniku nevyváženosti u rotačních součástí

a) Produkční a postprodukční důvody vzniku nevyváženosti

Při výrobě součástí může dojít ke vzniku závady vlivem nedostatečné jakosti materiálu. Tím že v daném materiálu se mohou vyskytovat póry nebo trhliny. Dále může docházet k nedokonalostem ve výrobním procesu, a to zejména při obrábění součástí, kde může dojít k nedodržení výrobních tolerancí. Při sestavování celku může dojít k vyosení či posunutí ploch vůči středu rotace, také může dojít k deformaci jednotlivých součástí, jak při transportu, tak při samotné montáži.

[8], [12]

b) Provozní důvody vzniku nevyváženosti

Za provozu zařízení se mohou postupem času projevit závady vlivem nerovnoměrného opotřebení rotoru.

c) Nevyvážený rotor

Nevyvážený rotor je důvodem vzniku odstředivých sil. To vytváří vibrace a hluk. Tyto vibrace mají shodnou frekvenci s otáčkami. Vlivem těchto vibrací dochází k nadměrnému opotřebení ložisek což snižuje jejich životnost. Dále dochází k nárůstu dynamického namáhání. Tím dochází ke snižování spolehlivosti zařízení.

[8]

Hlavní názvosloví pro nevyváhu

Centrální hlavní osa setrvačnosti – osa rotoru neležající se v těžišti

Osa rotace – Teoretická osa otáčejícího tělesa, v této ose je nulová obvodová rychlost

Tuhý rotor – rotor jež je dostatečně tuhý, aby se za provozu nedeformoval vlivem nevyváhy

Pružný rotor – rotor jež není dostatečně tuhý aby zamezil provozním deformacím

Nevyváženost – situace ve které dochází k posunutí centrální hlavní osy setrvačnosti

Statická nevyváženost – typ nevyváhy u které dochází k posunutí centrální hlavní osy setrvačnosti a zároveň je tato osa rovnoběžná s ideální osou rotace

Momentová nevyváženost – typ nevyváhy u které dochází k posunutí centrální hlavní osy setrvačnosti různoběžně k ideální ose rotace přičemž má společný bod v těžišti rotoru

Dynamická nevyváženost – typ nevyváhy u které dochází k posunutí centrální hlavní osy setrvačnosti a zároveň je tato osa mimoběžná s ideální osou rotace

Vyvažovací rovina – rovina určená k vyvažování za pomoci přidávání, ubírání či posouvání korekční hmoty, tato rovina je vždy kolmá k ose rotoru

Měřicí rovina – rovina určená pro měření hodnot nevyváženosti rotoru, tato rovina je vždy kolmá k ose rotoru

Provozní vyvažování – Při provozu stroje se měří hodnoty vibrační a odstředivé síly dle naměřených hodnot dochází k vyvažování

Vyvažování má za cíl co nejvíce přiblížit osu těžiště k ose rotace, tím idealizovat polohu těžiště rotoru tak aby nedocházelo k tvorbě odstředivých sil. To zamezí tvorbě periodického zatěžování shodného s otáčkami zařízení.

[8]

„Je-li rotor, resp. hřídel, tzn. rotující objekt vyvážen, tak jeho hmotnostní osa se kryje s určenou konstrukční osou. Jakýkoliv jiný případ znamená porušení rovnováhy, tzn. vznik nevyváhy a vykázaní nevyvážku.“ [8]

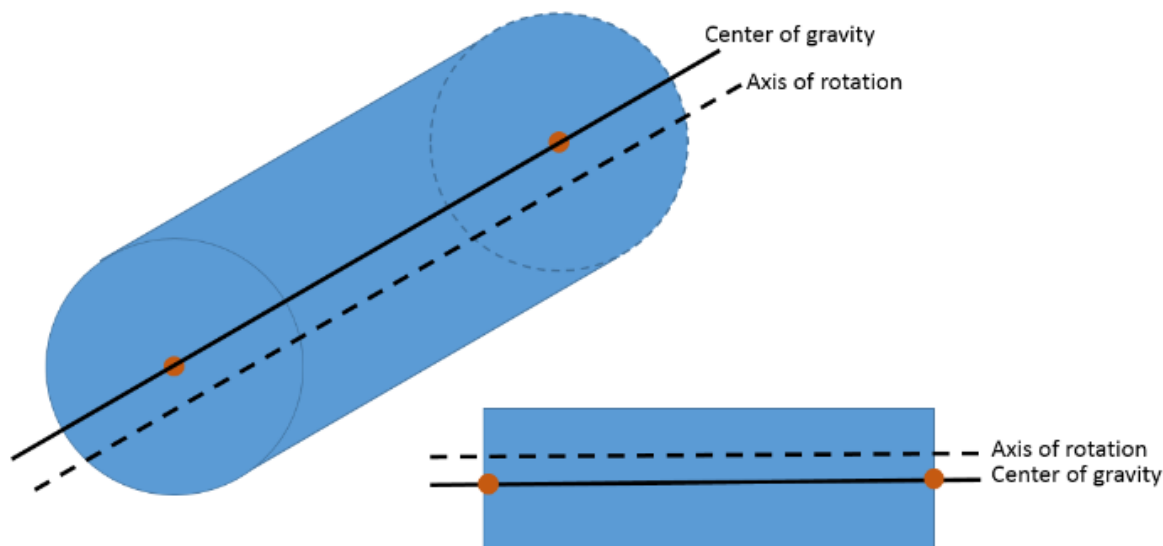
Při frekvenční analýze je nezbytné určit, zda jde o vibrace s samou frekvencí která má amplitudu pro veškeré radiální směry totožnou. Zda se projevuje jako sinus a zda se vyskytuje s frekvencí každou otáčku, tj. jedenkrát za otočení. Pokud nejde o nadměru silné vibrace pozorované spektrum nemá harmonické násobky frekvence. Při zvyšování otáček dochází k nárůstu amplitudy při dosažení kritických otáček není možné provádět vyvažování.

[8]

3.5.1 Statická nevyváha

Tento typ závady vzniká paralelním posunutím hlavní osy setrvačnosti ku ose otáčení. Toto posunutí je shodné s posunutím těžiště rotujícího objektu. Statickou nevyváhu vytváří pouze jedna síla. Tu je možné pozorovat ustavením rotoru tak že jej přiblížíme k rovině, kde nejtěžší bod zaujme nejnižší polohu. Takto lze vyvažovat v jedné vyvažovací rovině.

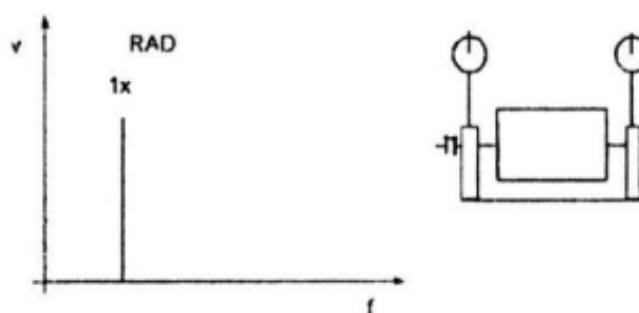
[8]



Obr. 3.18 Statická nevyváha [16]

Průběh statické nevyváhy je stacionární a souběžně i ve fázi. Nevyváženost způsobuje zvětšení amplitudy vlivem otáček. Tím amplituda roste druhou mocninou což se projevuje že čtyřnásobném zvýšení otáček dojde k šestnáctinásobnému nárůstu vibrací. Identifikace je možná měřením vibrací ložiskových domků.

[8]

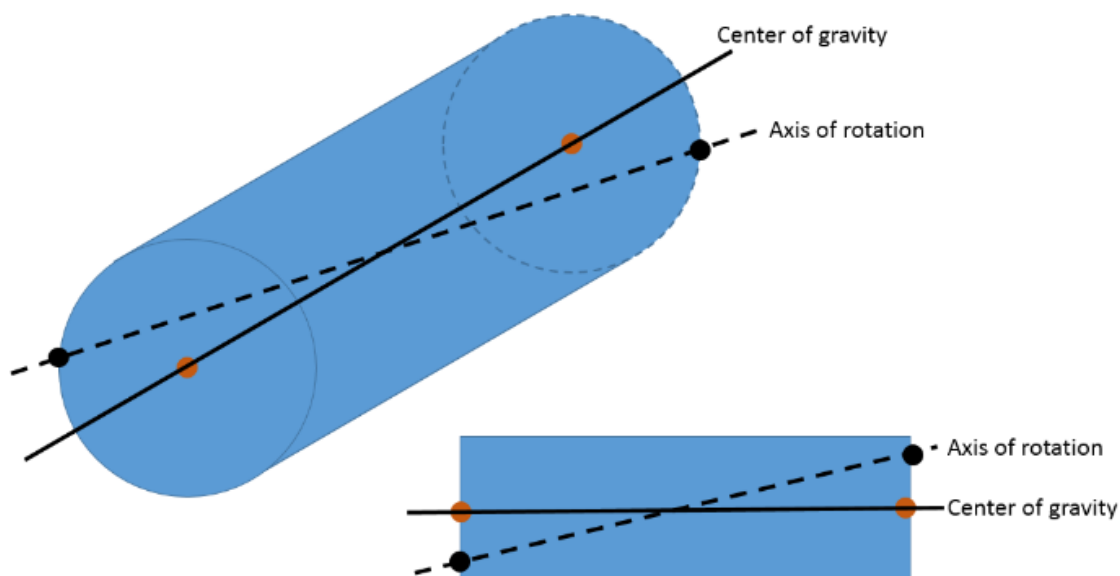


Obr. 3.19 Statická nevyváha [8]

3.5.2 Momentová nevyváha

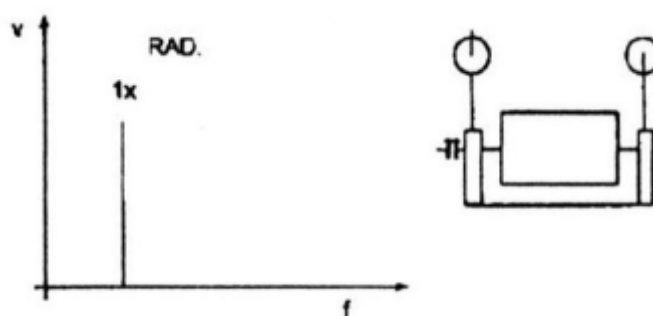
Momentovou nevyváhu způsobuje vyosení osy rotace od ideální osy v určitém úhlu. Přičemž osy procházejí středem těžiště. To způsobuje symetričnost nevyváženého stavu což nedovoluje tuto nevyváhu odhalit za klidového stavu. Při chodu zařízení se dle měřených vibrací provádí vyvažování.

[8]



Obr. 3.20 Momentová nevyváha [16]

Průběh momentové nevyváhy má snahu o posun fáze o 180° u daného hřídele. V měřeném spektru se vždy projevuje první harmonická frekvence, která tomuto spektru převládá. Amplituda roste druhou mocninou což se projevuje tak že při čtyřnásobném zvýšení otáček dojde k šestnáctinásobnému nárůstu vibrací. Opět je možná identifikace za pomoci měření vibrací ložiskových domků.

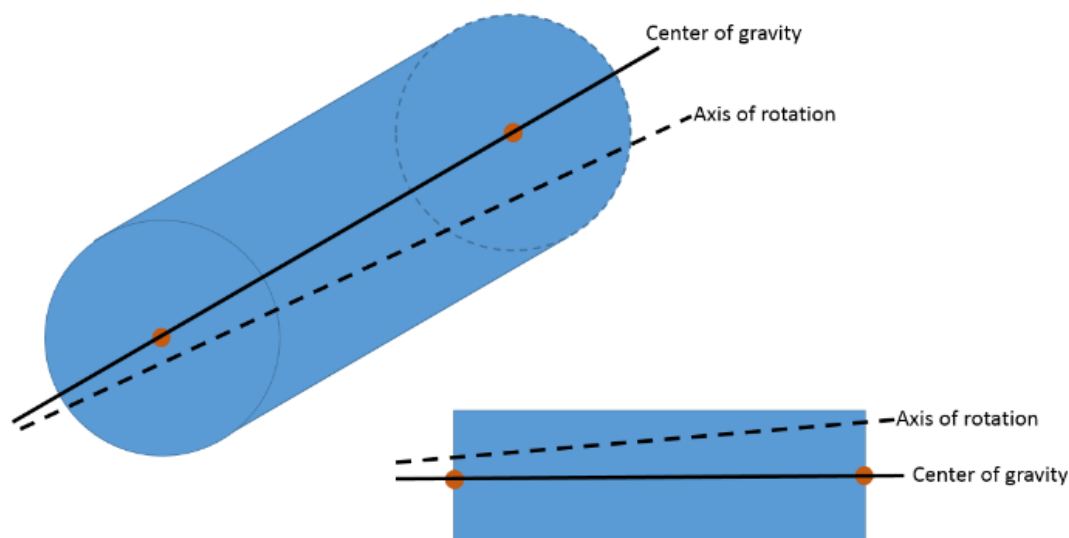


Obr. 3.21 Momentová nevyváha [8]

3.5.3 Dynamická nevyváha

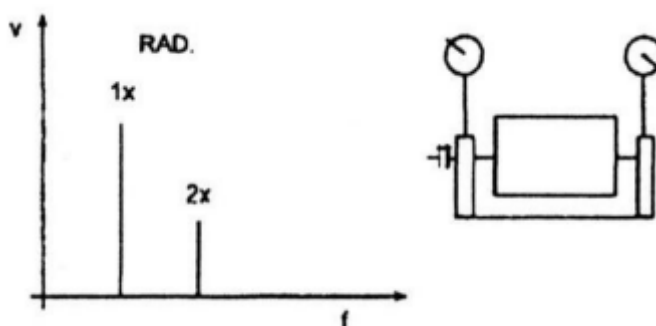
Dynamická nevyváženost je složena z nevyváhy statické a momentové. Postup vyvažování probíhá nejprve vyvážením statické nevyváhy a až následně probíhá odstranění momentové nevyváhy. Jednoduché zařízení trpívají převážně na statickou nevyváhu u složitějších zařízení s více než jednou spojkou převládá momentová nevyváženost.

[8]



Obr. 3.22 Dynamická nevyváha [16]

Průběh dynamické nevyváhy způsobuje mimoběžnost osy rotoru a centrální osy setrvačnosti. Převládající amplitudu způsobuje otáčková frekvence rotoru. Rozdíl mezi fázemi není ovlivněn jednotlivými fázemi. Nadměrná nevyváha má tendenci vytvářet nelinearitu a způsobit amplitudu s dvojnásobnou otáčkovou frekvencí. Opět je možná identifikace za pomoci měření vibrací ložiskových domků.

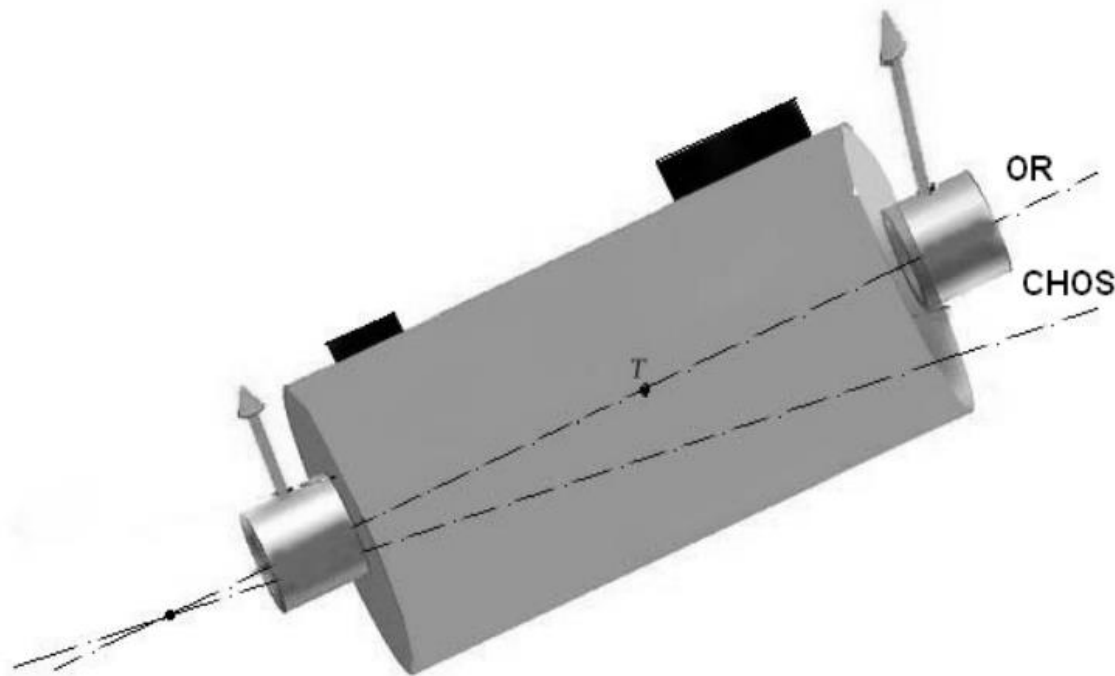


Obr. 3.23 Dynamická nevyváha [8]

3.5.4 Kvazistatická nevyvaha

Kvazistatická nevyvaha se vztahuje k situacím, kdy osa setrvačnosti protíná osu rotace mimo těžiště tím součásti nejsou v rovnovážném stavu, což vede ke vzniku vibrací.

[8]



Obr. 3.24 Kvazistatická nevyvaha [17]

Určení nevyvahy se provádí za pomoci změření celého rozsahu frekvenčního spektra vibrací i fáze. To umožní vypočítat místo i hmotnost pro uložení vyvažovacího závaží.

Vyvažování má daný postup, ve kterém musí být provedeny následující operace. Nejprve je nutné provést referenční měření. Provádí se za pomoci referenčního závaží, to se přilepí na rotor a následně se zařízení uvede do pracovních otáček. Proveďte se měření a hodnoty se uloží.

3.6 Nesouosost - Misalignment

Složením hnaných a hnacích strojních zařízení vytváří strojní celky které užíváme k výkonu práce. Za účelem vysoké efektivity a dlouhodobé životnosti těchto celků je podstatné provést precizně mechanické spojení jednotlivých zařízení, a to za pomoci spojek tyto spojky musí být dostatečně robustní pro přenos maximálních momentů a zároveň geometricky přesné ve výrobních tolerancích, aby do celku nevnášely nesouosost.

[8]

Při montáži je nezbytné dbát na souosost propojovaných komponent, tak aby nedocházelo k dotyku čelních ploch spojek. Při nedodržení montážních podmínek dochází při provozu ke

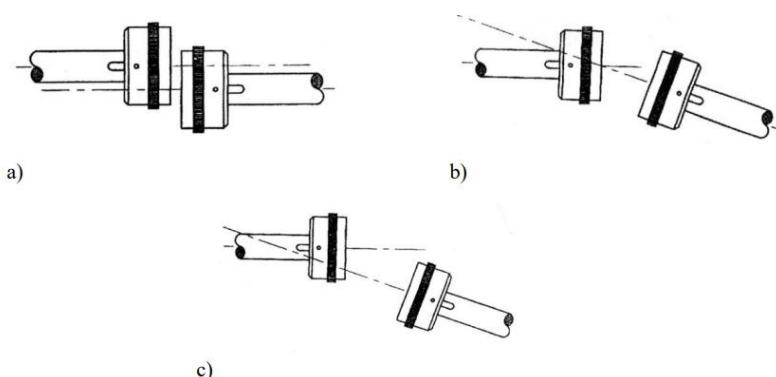
vzniku vibrací, které zatěžují jednotlivé komponenty zařízení hřídele, spojky ložiska a ostatní. Dojde-li k překročení předepsaných tolerancí pro ustavování bude docházet k nadměrnému opotřebením jednotlivých komponent zařízení.

[8]

Nesprávné usazení, vyrovnaní os a závada spojek zaujímá druhé místo v závadách strojních zařízení mezi nejčastější patří nevyvážení rotorů. Této situaci lze dobře předcházet provedením odborného ustavení kde lze upravit polohu či natočení rotorů vůči sobě. Tím dojde k snížení nepřesností.

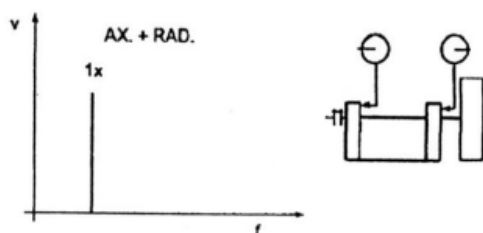
Chybné ustavení zapříčiňuje vyosení ve spojení přírub spojek. Toto vyosení zapříčiňuje oběh hřídele okolo osy rotace, a to zapříčiňuje vznik ohybových momentů při rotaci rotoru. Což přináší zvýšenou statickou zátěž na ložiska daného strojního zařízení.

Nesousost vytvářejí tři typy ustavení, ty jsou znázorněny na Obr. 3.25.

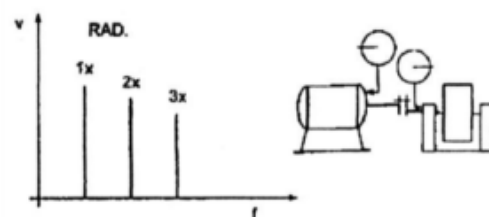


Obr. 3.25 Druhy nesousosti [8]

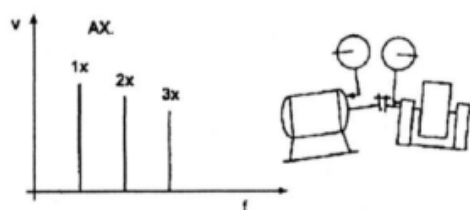
a) paralelní přesazení, b) úhlové přesazení, c) paralelní a úhlové přesazení



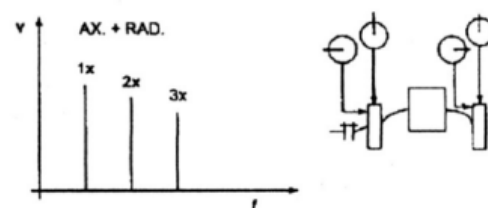
Obr. 3.26 Spektrum paralelního přesazení [8]



Obr. 3.28 Spektrum rovnoběžné nesousosti [8]



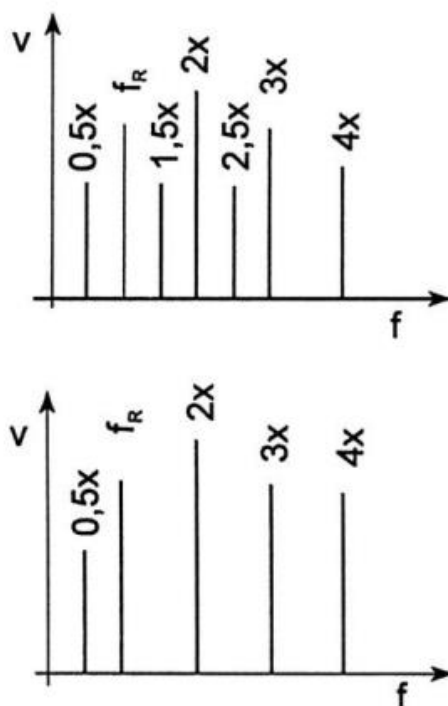
Obr. 3.27 Spektrum úhlové nesousosti [8]



Obr. 3.29 Spektrum ohnutého hřídele [8]

3.7 Uvolněný základ

Mechanické uvolnění se zpravidla projevuje jako série nezvykle vysokých amplitud vyšších harmonických složek. Velikost těchto amplitud by měla být vyšší o 20% než je hodnota základní otáčkové frekvence. Lokalizace probíhá za pomoci metody zviditelnění provozních tvarů kmitů. Důvodem může být uvolněný šroubový spoj, trhlina a nebo nadměrná vůle komponent. [8]



Obr. 3.30 Spektrum mechanického uvolnění, trhlin a vůlí [8]

3.8 Normy

Výběr norem zabývajících se problematikou vibrodiagnostiky

TNI ISO/TR 19201 Vibrace - Metodika výběru vhodných norem pro vibrace strojů

ČSN ISO 19499 Vibrace - Vyvažování - Informace o vyvažovacích normách a návod k jejich používání

ČSN ISO 15261 Systémy generující vibrace a rázy - Slovník

ČSN ISO 2041 Vibrace, rázy a monitorování stavu – Slovník

ČSN ISO 5805 Vibrace a rázy - Expozice člověka – Slovník

ČSN EN ISO 8041-1 Vibrace působící na člověka - Měřicí přístroje - Část 1: Vibrometry k obecnému použití

ČSN ISO 2631-1 Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím - Část 1: Všeobecné požadavky

ČSN ISO 2631-2 Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím - Část 2: Vibrace v budovách (1 Hz až 80 Hz)

ČSN ISO 20816-1 Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny

ČSN ISO 16063-11 Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů - Část 11: Primární kalibrace vibracemi pomocí laserové interferometrie

ČSN ISO 20816-2 Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 2: Plynové turbíny, parní turbíny a generátory nad 40 MW s kluznými ložisky, na pozemních základech a jmenovitými otáčkami 1 500 r/min, 1 800 r/min, 3 000 r/min a 3 600 r/min

ČSN ISO 20816-4 Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 4: Plynové turbíny nad 3 MW s kluznými ložisky

ČSN ISO 20816-5 Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 5: Soustrojí ve vodních elektrárnách a přečerpávacích elektrárnách

ČSN ISO 20816-8 Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 8: Pístové kompresory

ČSN ISO 20816-9 Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 9: Převodovky

ČSN ISO 10816-6 Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 6: Stroje s vratným pohybem se jmenovitým výkonem nad 100 kW

ČSN ISO 10816-7 Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 7: Odstředivá čerpadla pro průmyslová použití včetně měření na rotujících hřídelích

ČSN ISO 10816-21 Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 21: Větrné turbíny s vodorovnou osou rotoru s převodovkou

ČSN ISO 21940-2 Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 2: Slovník

ČSN ISO 21940-14 Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 14: Posuzování chyb vyvážení

ČSN ISO 21940-13 Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 13: Kritéria a bezpečnostní opatření pro vyvažování středních a velkých rotorů in situ

ČSN ISO 21940-12 Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 12: Postupy a tolerance pro rotory v pružném stavu

ČSN ISO 21940-11 Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 11: Postupy a tolerance pro rotory v tuhém stavu

ČSN ISO 21940-23 Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 23: Kryty a jiná ochranná opatření pro měřicí stanoviště vyvažovacích strojů

ČSN ISO 21940-31 Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 31: Náchylnost a citlivost strojů na nevyváženost

ČSN ISO 21940-32 Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 32: Zohlednění per u hřídelů a kol

ČSN ISO 18431-1 Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 1: Obecný úvod

ČSN ISO 18431-2 Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 2: Časová okna pro analýzu Fourierovou transformací

ČSN ISO 18431-3 Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 3: Metody časově-frekvenční analýzy

ČSN ISO 18431-4 Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 4: Analýza spektra rázové odezvy

ČSN ISO 2017-1 Vibrace a rázy - Pružné systémy uložení - Část 1: Technické informace pro provedení izolace vibrací

ČSN ISO 14839-2 Vibrace - Vibrace točivých strojů vybavených aktivními magnetickými ložisky - Část 2: Hodnocení vibrací

4 SIMULÁTOR PORUCH

4.1 Průmyslový simulátor poruch vyvažování a ložisek

Jako inspirace pro tuto práci bylo použito Simulátor poruch vyvažování a ložisek od firmy SpectraQuest, Inc. Tento profesionální simulátor (viz. Obr. 4.1) slouží po demonstraci poruch a nevyváhy ložisek. Technické parametry jsou uvedeny v Tab. 4.1 Technické parametry simulátoru poruch Tab. 4.1.



Obr. 4.1 Simulátor poruch vyvažování a ložisek [18]

Tab. 4.1 Technické parametry simulátoru poruch [18]

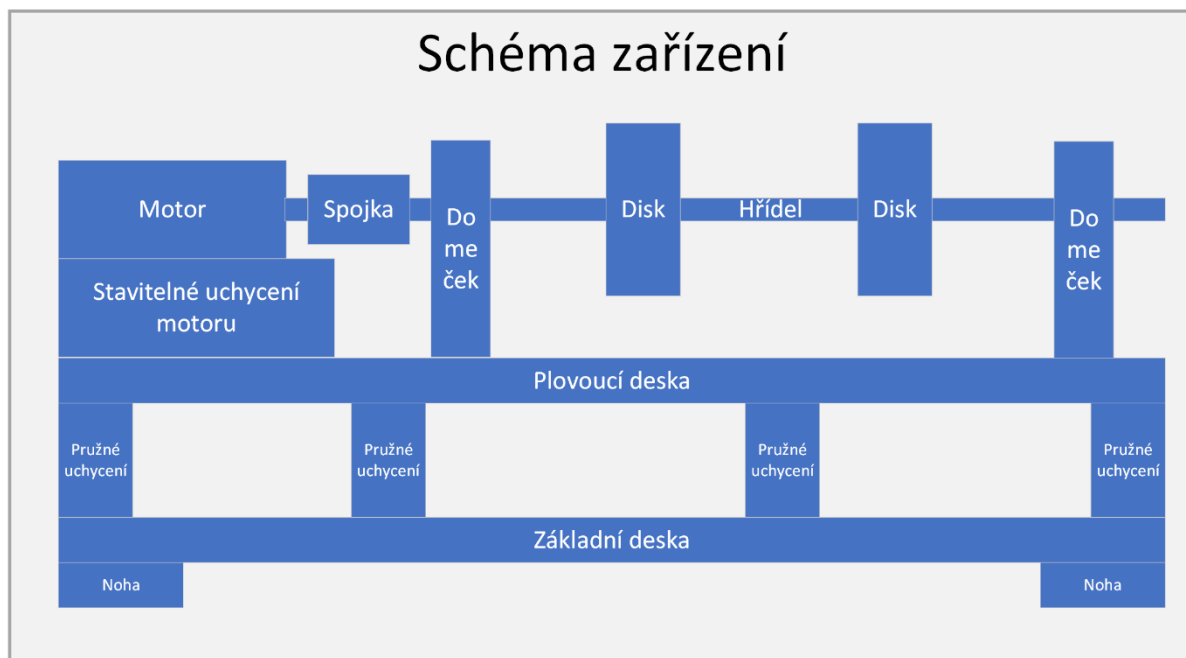
Elektrický	
Motor	3fázový motor s výkonem 1/2 HP, předem zapojený samonastavovací systém pro snadnou instalaci / demontáž
Řídit	Frekvenční měnič s variabilním kmitočtem 1/2 HP s programovatelným radičem na předním panelu
Rozsah otáček	0 až 6000 ot / min (krátké trvání) s proměnnými otáčkami
Tachometr	Integrovaný otáčkoměr s LCD displejem a analogovým výstupem TTL s jedním pulzem na otáčku pro účely DAQ
Napětí	115/230 VAC, jednofázové, 60/50 Hz
Mechanické	

Hřídel	Průměr 5/8 " ; Soustružená, broušená a leštěná (TGP) ocel
Ložisko	Dva utěsněné valivé elementy v hliníkovém horizontálně děleném držáku pro snadnou výměnu, se závitem pro montáž snímače. Úchyty ložisek lze namontovat v pěti různých polohách pro variabilní rozpětí rotoru
Základna rotoru	15 palců dlouhý, zcela pohyblivý pomocí šroubů pro snadné vodorovné vychýlení a standardní podložky pro svislé vychýlení. Připnuto pro snadné nastavení
Rotory	Dva 6 "hliníkové disky s 36 otvory se závitem v 10stupňových intervalech pro zavedení nevyváženosti
Bezpečnostní kryt	Uzamykatelný čirý, nárazuvzdorný sklopný plastový kryt s blokovacím spínačem motoru k vypnutí motoru při zvednutí krytu
Nadace	12 "(12,7 mm) tlakově litý hliníkový podstavec, výztuha základny a šest pryžových izolátorů
Fyzický	
Hmotnost	Přibližně 45 lb (100 lb)
Rozměry	L = 32 " (80 cm), W = 14 " (36 cm), H = 22 " (55 cm)

[18]

4.2 Návrh a předběžný výěr komponent

Na obrázku níže je zjednodušeně znázorněno zamýšlené zařízení formou blokového schématu. Ve kterém jsou znázorněny hlavní části zamýšleného simulátoru poruch. Jednotlivé bloky zařízení budou popsány z hlediska funkčních požadavků.



Obr. 4.2 Schéma zařízení

4.2.1 Hřídel

Požadavky :

- Vysoká tuhost
- Odolnost vůči prasknutí

Volba hřídel dle materiálu:

1. Laminátová tyč
2. Uhlíková tyč
3. Ocelová tyč
4. Buková kulatina

Nevhodnější volbou pro toto zařízení se jeví použití tažené kruhové tyče. Tyto tyče jsou při výrobě válcované za studena v toleranci h9. V rozměrech o průměru 10, 12, 15, 16, 18 mm. V těchto rozměrech jde o toleranci od nuly do mínus čtyř setin mm daného průměru. Tato výchozí tolerance je již dostatečně přesná pro to tyč bude pouze nadělena na požadovanou délku.

4.2.2 Akcelerometr GY-61 ADXL335

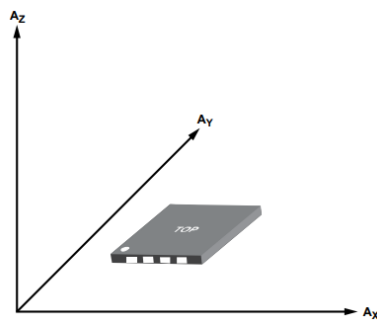
Jde o malý kompaktní akcelerometr s možností měření zrychlení ve všech třech osách. Měřitelný rozsah pro osu x a y je v hodnotách 0.5 až 1600 Hz u osy z je měřicí rozsah snížen na hodnoty 0,5 až 550 Hz. [19] Směry jednotlivých os určuje Obr. 4.3. Tato nižší hodnota u osy z nemá vliv na zařízení, protože nebude použita. Měření bude probíhat pouze v ose x a y. Zástavbové rozměry jsou 4 x 4 x 1,5 mm. Napěťová citlivost snímače je 300mV/g

Napěťová citlivost

$$B_{qa} = \frac{q}{a} B_{ua} = \frac{U}{a} [V/g] \quad [-] \quad (4.1)$$

q – je elektrický náboj

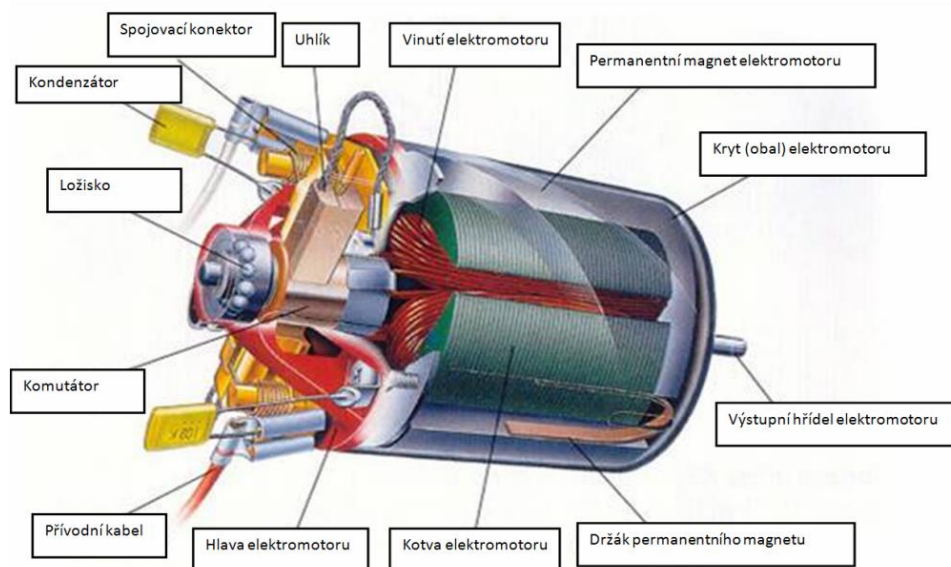
U – je elektrický náboj



Obr. 4.3 Osy akcelerometru [19]

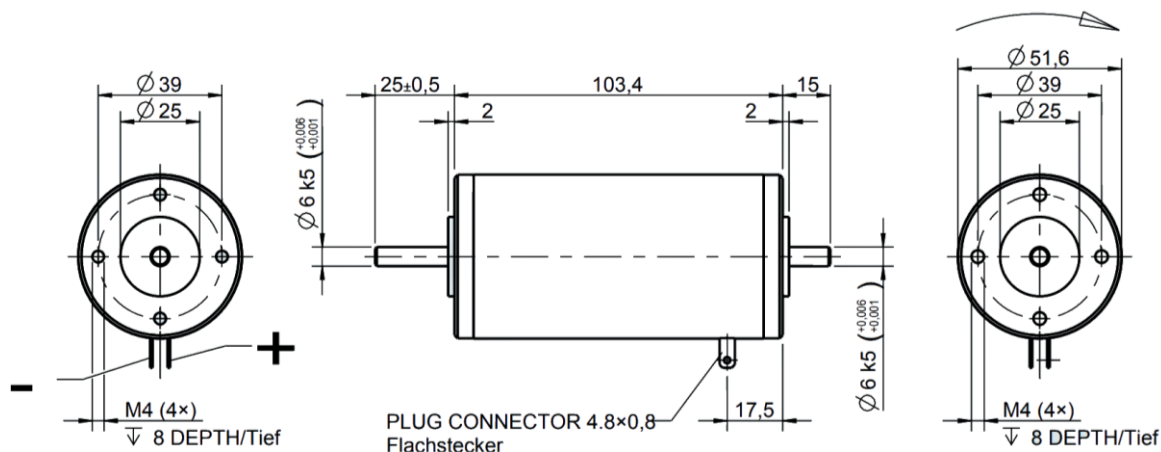
4.2.3 Motor

Na Obr. 4.4 je schematicky vyobrazený použitý typ elektromotoru, jedná se o DC variantu.



Obr. 4.4 Konstrukce komutátorového elektromotoru (s buzením pomocí permanentního magnetu) [20]

Na Obr. 4.5 jsou vyobrazeny zástavbové rozměry použitého elektromotoru.



Obr. 4.5 Zástavbové rozměry motoru [21]

4.2.4 Rotor

Rotor tvoří hřídel a sestava disku vytištěná na 3D tiskárně.

4.2.5 Stojan ložiska

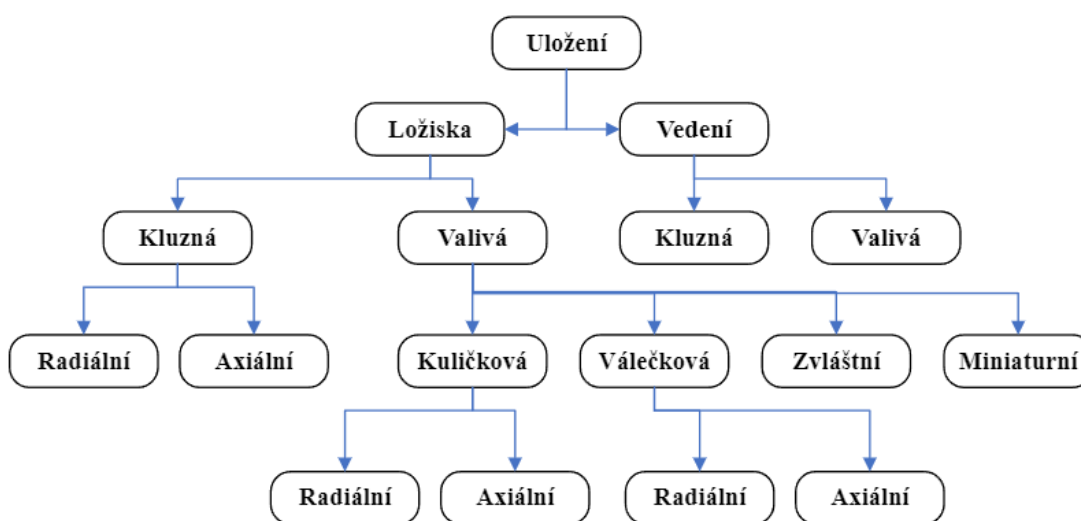
Stojan ložiska musí být dostatečně pevný, aby snesl namáhání od nevyváženého rotujícího disku. Přitom musí být dostatečně pružný.

4.3 Uložení

Uložení je druh propojení strojních částí, díky kterému je umožněno vzniku rotačního či posuvného pohybu. Na následující tabulce je uvedeno obecné rozdělení způsobů rozdělení uložení.

[22]

Tab. 4.2 Rozdělení uložení [22]

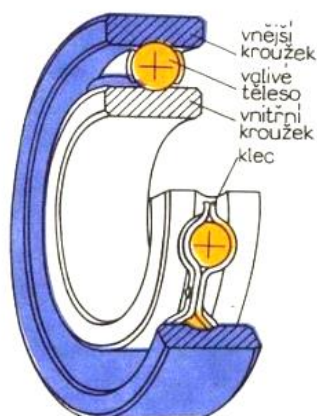


Účelem ložiska je umožnění vzniku točivého uložení mezi čepem nebo hřídelí a zbylými částmi zařízení při zajištění stálé polohy rotujících komponent. [22]

Valivá ložiska

U valivých ložisek nedochází k tření dvou povrchů o sebe, ale nastává odvalování na rotačních částech, jde o kuličky, válečky, jehličky, soudečky a jiné. Tím dochází k odstranění smykového tření a jeho nahrazení valivým třením. Na obrázku níže je náčrt kuličkového ložiska.

[22]



Obr. 4.6 Náčrt kuličkového ložiska [22]

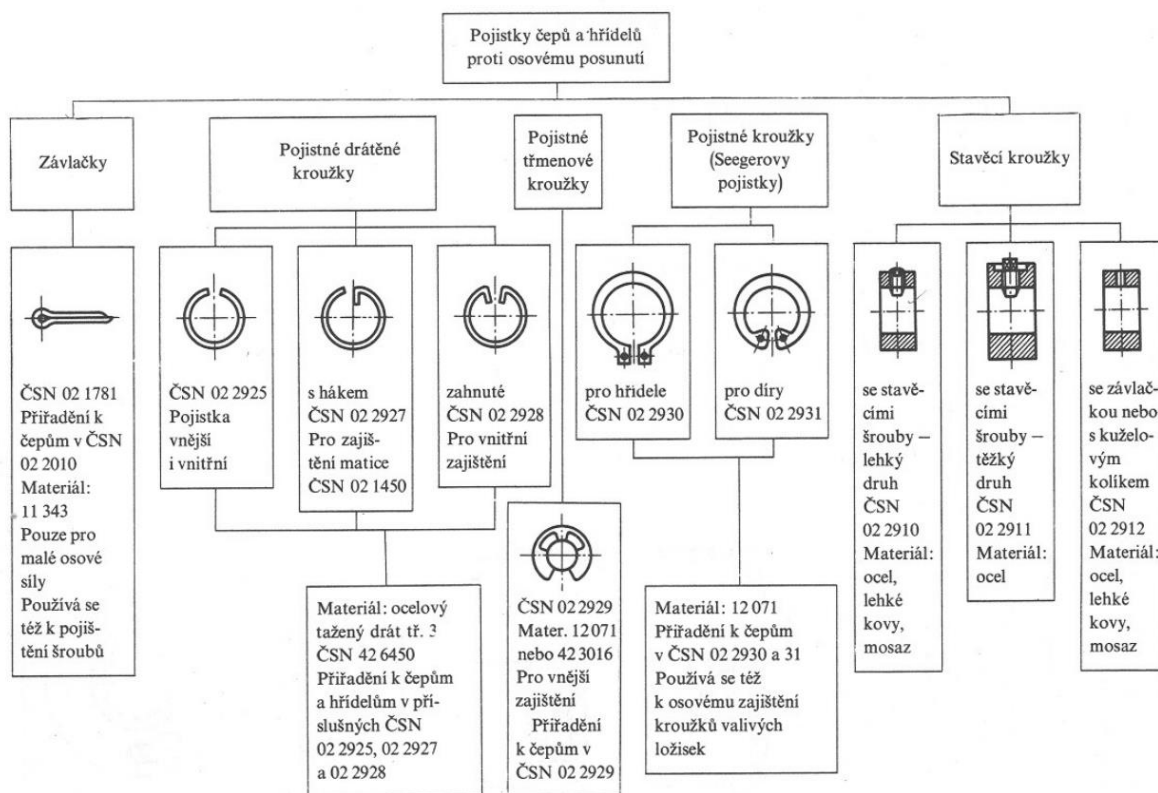
4.3.1 Valivá ložiska

Valivá ložiska jsou vyráběna v mnoha provedeních i variantách. Při výběru samotného ložiska je brán ohled na zástavbové rozměry, tak aby bylo možno použít i jiné typy ložisek. Samotné ložisko bude zatěžováno především radiálními silami. Možné axiální síly jsou pro tento model zanedbatelné. Z tohoto důvodu je nejvhodnějším řešením užití radiálního ložiska. Výchozím rozměrem pro volbu samotného ložiska je průměr hřídele.

4.3.2 Zajištění ložisek

Pro zajištění ložiska v domečku proti vypadení bude použit pojistný kroužek. Pojistný kroužek bude uchycen v domečku aby zabránil vysunutí ložiska mimo. Z toho důvodu bude použit vnitřní pojistný kroužek pro díry ČSN 02 2931. V tabulce níže jsou uvedeny typy pojistných kroužků ze kterých byl vybrán uvedený pojistný kroužek. [22]

Tab. 4.3 Druhy pojistných kroužků a závlaček [22]



4.4 Spoj hřídele s nábojem

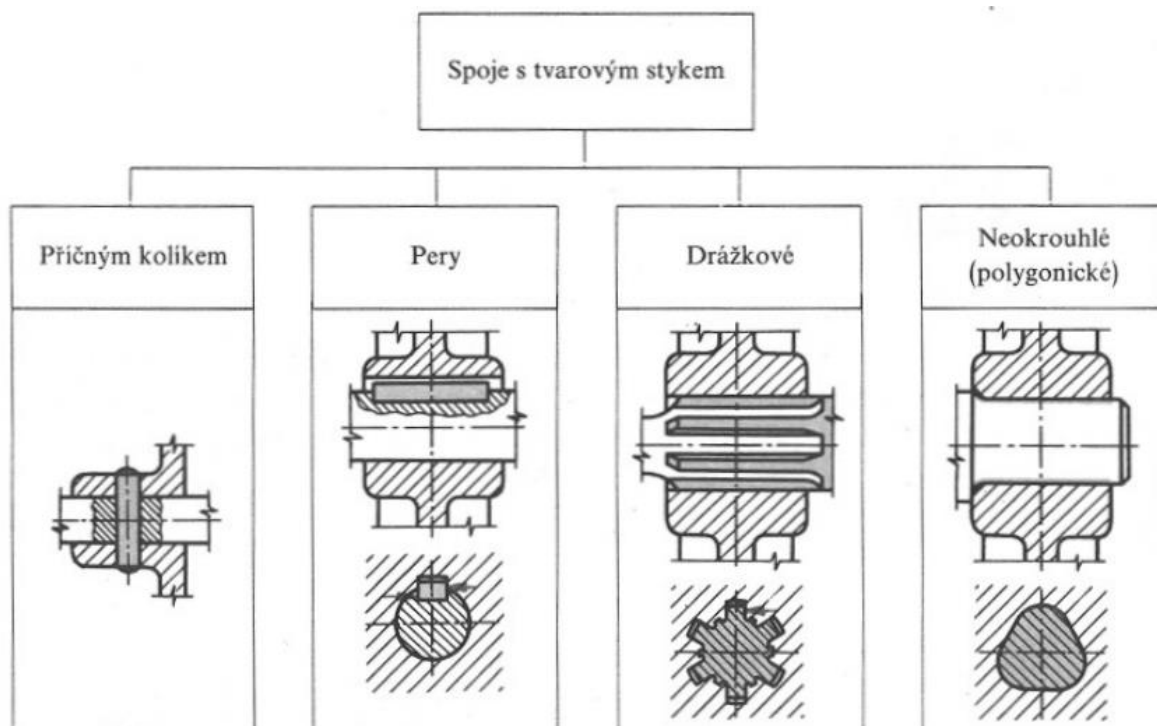
Spoje hřídele s náboje lze provést tvarovým nebo silovým stykem. U silového styku vzniká mezi hřídelem a nábojem tlak. Tento tlak umožňuje přenést kroutící moment. [22]

Mezi silové spoje patří spoj svěrný se šroubem, spoj svěrný s kuzelem, spoj rozpěrný s pružnými kroužky a spoj tlakový. Jednotlivé příklady jsou znázorněny v tabulce níže.

Svěrný spoj je vhodné použít po menší kroutící momenty. Výhodou je snadná montáž i demontáž. Výhodou je absence osového zajištění což umožňuje stavitelnost v celém rozsahu otočení. Tlakový spoj umožňuje přenášet velké střídavé a rázové momenty. Nevýhodou je jeho obtížná rozebiratelnost.

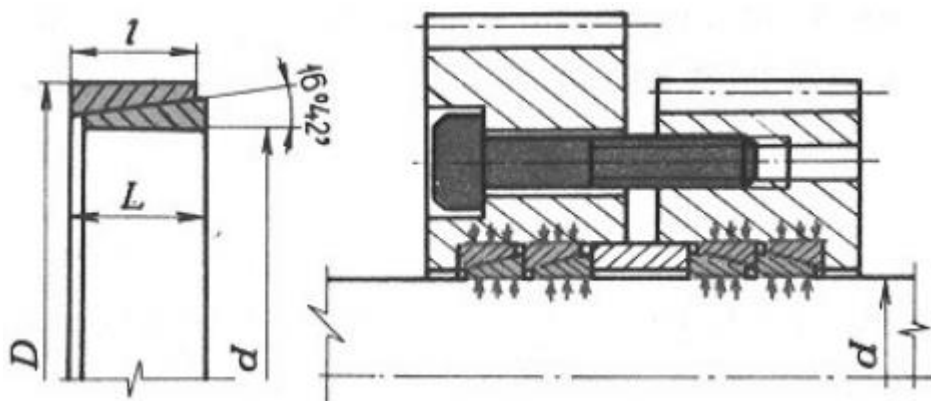
[22]

Tab. 4.4 Druhy silových spojů hřídel/náboj [22]



4.4.1 Rozpěrný spoj

Rozpěrný spoj (Obr. 4.7) se používá pro silové spojení hřídele s nábojem na hladkém hřídeli. Utažením spoje v axiálním směru dochází k rozepršení a tím vznikne silový spoj. Takovýto typ spoje je příhodný pro uchycení ozubených kol setrvačnicků a řemeni. [22]



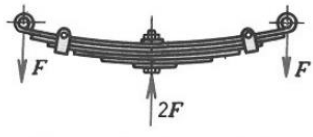
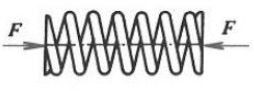
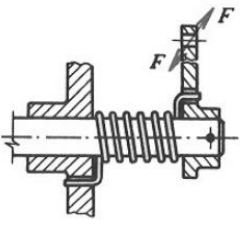
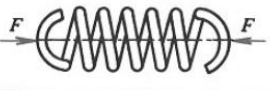


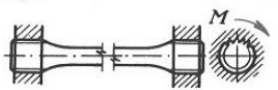
Obr. 4.7 Rozpěrný spoj [22]

4.5 Pružiny


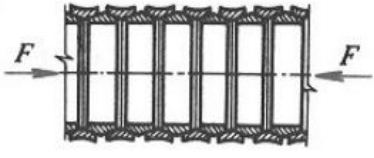
Pružiny mají schopnost akumulovat energii, pohlcovat a utlumovat rázy, silově zajišťovat vykonání pohybu a nebo zachovávat rovnováhu sil.

Pružiny lze rozdělit de typu namáhání a to na pružiny namáhané ohybem, pružiny namáhané krutem a pružiny namáhané kombinovaně tyto typy pružin znázorňuje **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Tab. 4.5 Pružiny namáhané ohybem a krutem [22]

Pružiny namáhané ohybem	Pružiny namáhané krutem
Pružnice a svazky pružnic 	Šroubovitě pružiny tlačné 
Šroubovitě pružiny zkrutné 	Šroubovitě pružiny tažné 
Spirálové pružiny 	Šroubovitě pružiny kuželové 
	Zkrutné tyče 

Tab. 4.6 Pružiny namáhané kombinovaně [22]

Pružiny namáhané kombinovaně	
Taliřové pružiny 	Kroužkové pružiny 

4.6 Spojky

Spojky se dělí dle ČSN 026400 na spojky:

- mechanicky ovládané
- mechanicky neovládané
- hydraulické

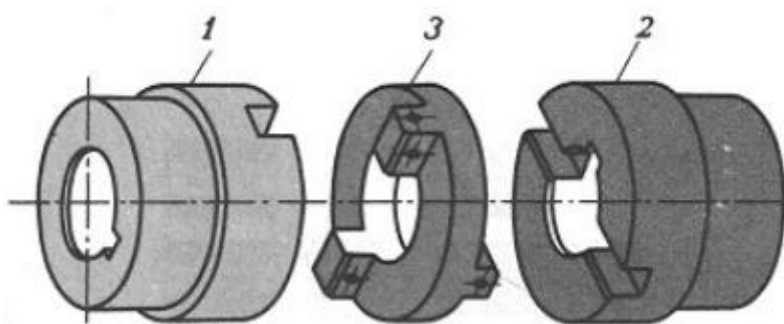
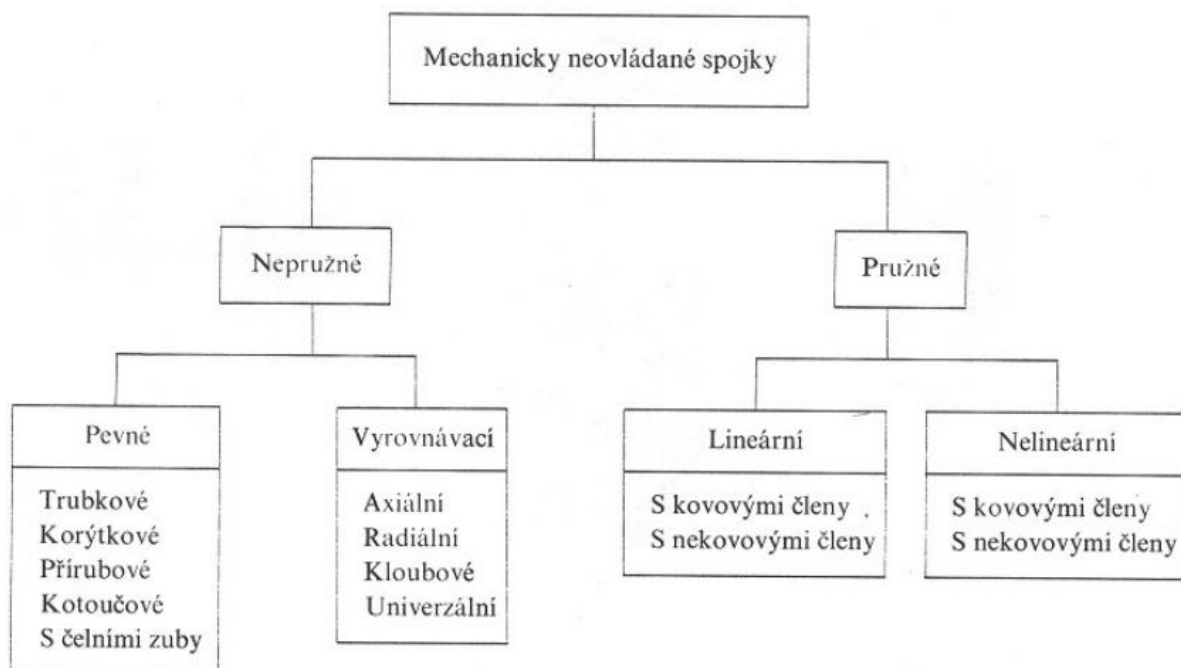
- elektrické
- magnetické

Pevné spojky

Při použití pevné spojky je nutné dbát na zvýšenou přesnost souososti hřídelů. Tyto spojky jsou vhodné zejména pro přenos málo proměnlivých kroutcích momentů nejvhodnější variantou pro tuto spojku je přenos trvalého kroutcího momentu.

[22]

Tab. 4.7 Typy spojek [22]



Obr. 4.8 Radiální spojka s křížovým kotoučem [22]

4.7 Zdroj

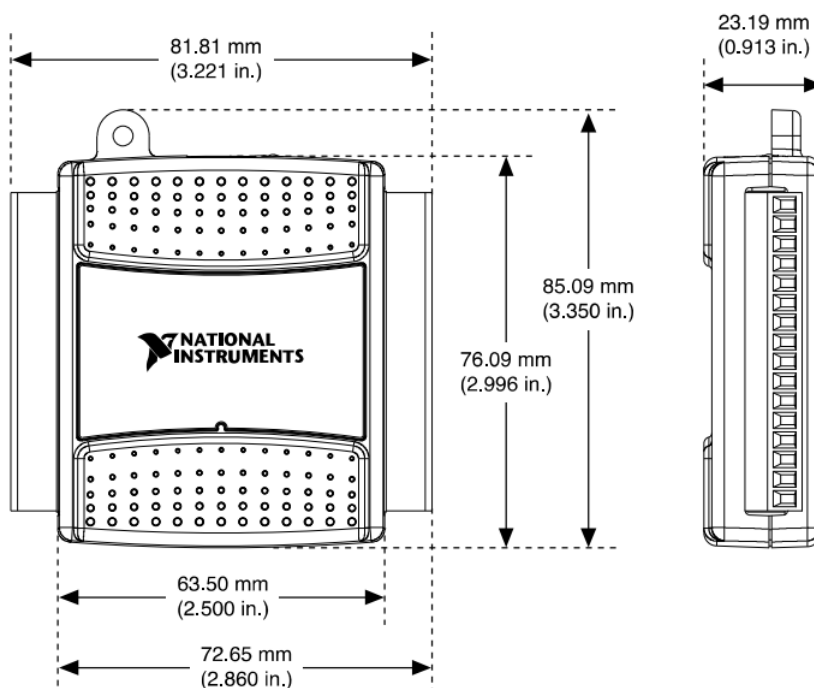
Napájení simulátoru poruch bude obstarávat laboratorní zdroj. Výstupní napětí zdroje je v rozsahu 0-30V s plynulou regulací napětí. Samotné napětí je stejnosměrné.



Obr. 4.9 Laboratorní zdroj [23]

4.8 Převodník

Pro sběr dat bylo použito Multifunkční I/O Zařízení které umožňuje dosáhnout vzorkovací frekvence 48kSPS při rozlišení 14bit. Maximální počet vstupních kanálů je 8, což je pro měření dostačující. Rozměry zařízení jsou 82x85x23 mm což je viditelné na Obr. 4.10. [24]



Obr. 4.10 Multifunkční I/O Zařízení - USB-6009 [24]

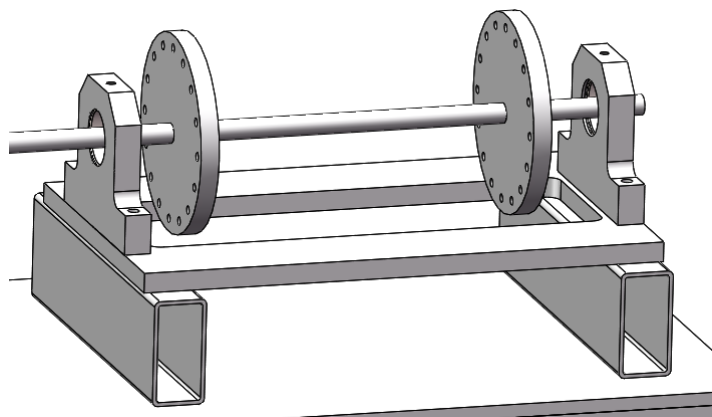
5 NÁVRH A VÝBĚR VHODNÉHO ŘEŠENÍ.

Při navrhování simulačního zařízení pro vibrodiagnostiku bylo navrženo několik variant možného řešení. Realizováno bylo pouze poslední konstrukční řešení. Předchozí řešení nebyly realizována pro jejich náročnost na výrobu nebo nevhodnost samotné konstrukce. Návrhy jsou popsány postupně jak tak probíhal i samotný vývoj. Při popisu jednotlivých návrhů je navazováno na popis předchozích návrhů.

5.1 První návrh

První návrh simulačního zařízení pro vibrodiagnostiku vychází z modelu, který je již vyráběn pro průmyslové použití. Návrh je znázorněn na Obr. 5.2 První návrh.

Hlavní částí zařízení jsou dva disky viz. Obr. 5.1 První návrh – detail Obr. 5.1. Na tyto disky budou upevňována závaží, které budou způsobovat nevývahu. Průměr disků je 150 mm a tloušťka 20 mm. Disky jsou nasazeny na hřídel. Ta je zhotovena z tažené ocele v toleranci h9. Průměr hřídele je zvolen 15 mm dle vnitřního průměru ložisek. Ložiska jsou umístěna v domečkách a zajištěna vnitřními pojistnými kroužky. Domečky jsou frézované z hliníkové desky o tl. 2 mm. Na tyto domečky jsou připevněny akcelerometry. Domečky jsou usazeny na stavitelné desce tl. 15 mm vyrobené z EN AW 5083. Tato deska je odlehčena obdélníkovým otvorem po celé délce desky. Deska je usazena na dvojici obdélníkových profilů. Tyto profily jsou usazeny na základní desce. Domečky jsou sešroubovány se stavitelnou deskou, ta je sešroubována se základní deskou přes obdélníkové profily.

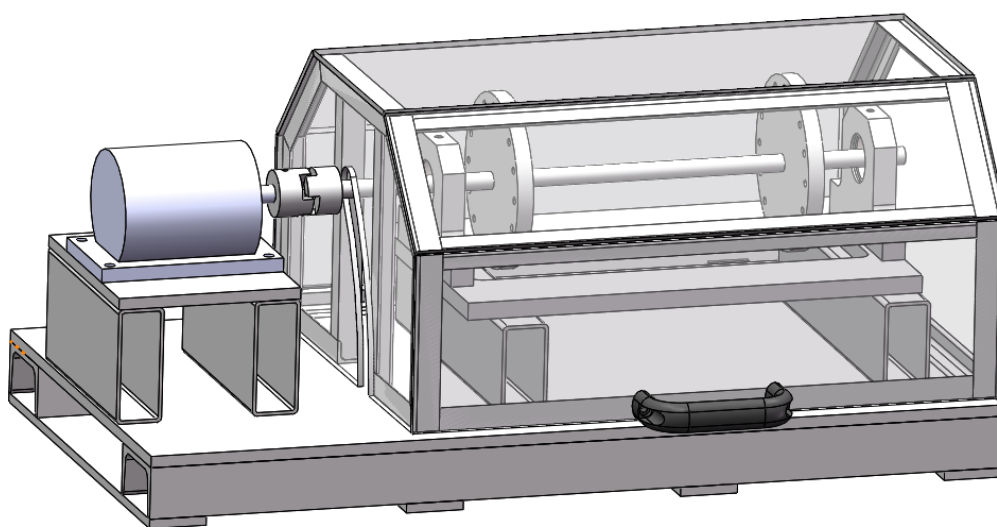


Obr. 5.1 První návrh – detail

Jako základní deska celého zařízení byla použita ocelová deska o tloušťce 10 mm. Tato deska byla následně ze spodní strany podélně vyztužena za pomoci U profilů. Na U profily byly příčně umístěny výztuhy – pásovina o tloušťce 5 mm a šířce 40 mm. U profil i výztuhy měly být připevněny svary.

Na tuto základnu byly dále umístěny další dva obdélníkové ocelové profily. Které slouží jako podpora upínací desky motoru. Na desce motoru je usazen 3 fázový asynchronní elektromotor o výkonu 200W. Otáčku motoru jsou regulovatelné za pomoci frekvenčního měniče, který má na vstupu jednu fázi a na výstupu 3 fáze. Motor je spojen s hřídelí za pomoci pružné spojky.

Sestava disků s domečkou je uzavřena krytem, který je tvořen rovnoramennými úhelníky (20x20x2 mm). Z úhelníku je vytvořen rám, na který je uchycena polykarbonátová deska. Rám je ze zadní strany uchycen panty k základní desce. Na přední straně krytu je umístěno madlo pro snadné otevírání a zavírání. Celkové rozměry sestavy jsou 750x400x320 mm.



Obr. 5.2 První návrh

Tento návrh byl v tomto stavu rozpracování ukončen. Hlavními důvody pro ukončení návrhu byla nutnost obrábění domečku a disků. Svařování základního rámu. Celková velikost sestavy.

5.2 Druhý návrh

Druhý návrh simulačního zařízení pro vibrodiagnostiku vychází z prvního návrhu s ohledem na zjednodušení výroby jednotlivých dílů tak aby bylo snadné toto zařízení duplikovat. Návrh je zobrazen na Obr. 5.5.

Tento návrh se zaměřuje a co nejsnazší výrobu. To lze dosáhnout za pomoci 3D tisku. Toto řešení má jedno výrazné omezení. Rozměr tisknutelné plochy. Volba této plochy je zvolena dle dostupné 3D tiskárny. Rozměr plochy pro tisk je 180x180x180 mm. Materiál pro tisk je zvolen ABS pro jeho dobré mechanické vlastnosti. Při tisku musí být zohledněna tepelná roztažnost. Pro ABS je hodnota koeficientu lineární teplotní roztažnosti $\alpha = 93,6 [10^{-6} K^{-1}]$ [25].

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad [4] \text{ s. 502} \quad [m] \quad (5.1)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad [^{\circ}C] \quad (5.2)$$

L_0 – Délka modelu po smrštění

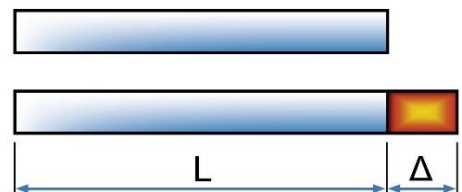
α – Součinitel teplotní roztažnosti

ΔT – Rozdíl teplot

L – Délka modelu pro tisk

T_1 – Pokojová teplota – 20 °C

T_2 – Teplota tiskové podložky – 110 °C



Obr. 5.3 Teplotní roztažnost

Příklad výpočtu vzdálenosti stojanů ložisek pro upevnění motoru (Obr. 5.4 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), který má vzdálenost mezi přírubami pro upnutí k domečku 141 mm. Samotná vzdálenost stojanů ložisek musí být zvětšena o smrštění které nastane po vychladnutí výtisku. To je znázorněno na Obr. 5.3.

Rozdíl teplot po zchladnutí výtisku ΔT je rozdílem pokojové teploty tj. 20 °C a teploty vyhřívání podložky při tisku. Pro ABS je podložka vyhřívána na teplotu 110 °C.

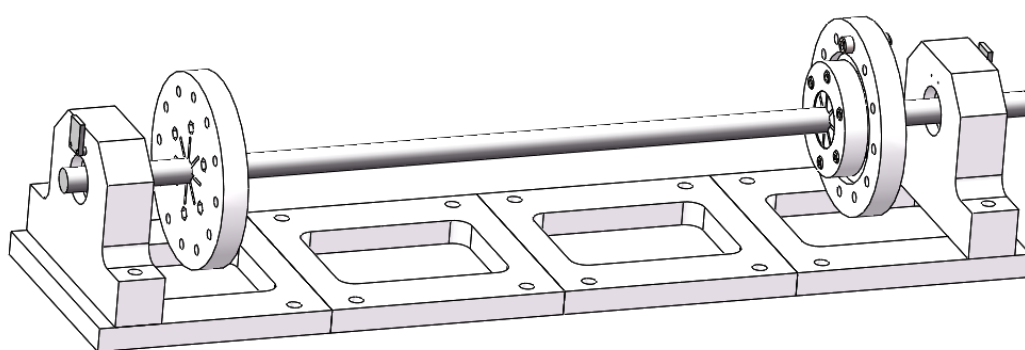
$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad [^{\circ}C] \quad (5.3)$$

$$\Delta T = 110 - 20 = 90 \text{ } ^{\circ}C \quad (5.4)$$

$$L = 141 \cdot (1 + 93,6 \cdot 10^{-6} \cdot 90) = 142,188 \text{ mm} \quad (5.5)$$

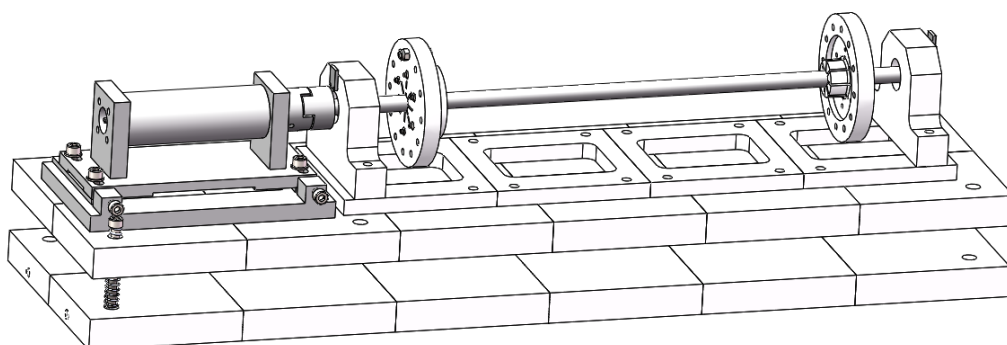
Výpočtem byla stanovena vzdálenost mezi domečky 142,19 mm.

Ve druhém návrhu byly disky zmenšeny na průměr 120 mm. Materiál disku byl změněn na ABS, proto byl i změněn způsob aretace disku to je viditelné na Obr. 5.4. V předchozím návrhu byl použit červík pro přenos rotace. Při tisku z ABS by toto řešení nemuselo být spolehlivé, proto došlo ke změně uchycení disku. Střed disku byl zesílen pro stabilnější uchycení na hřídeli. Středový otvor disku je $\varnothing 15\text{mm}$, po vytisknutí by měl být otvor cca o 0,1mm menší. Pro dostatečné zajištění disku proti pootočení je na zesíleném středu disku zhotoven úkos $1,5^\circ$ na které dosedá svěrné pouzdro. Svěrné pouzdro je stahováno šesti šrouby směrem k disku. Pro zvýšení přitlačné síly je zesílený střed disku „naříznut“ pro pevnější sevření svěrným pouzdem. Domečky v tomto návrhu byly také upraveny na tisknutelnou variantu z ABS a zesíleny na tloušťku 30 mm pro zvýšení stability. Stavitelná deska je vytvořena ze 4 jednotlivých výtisků, které jsou slepeny za pomoci lepidla na ABS. Jednotlivé segmenty jsou odlehčeny pro urychlení tisku a úsporu materiálu.

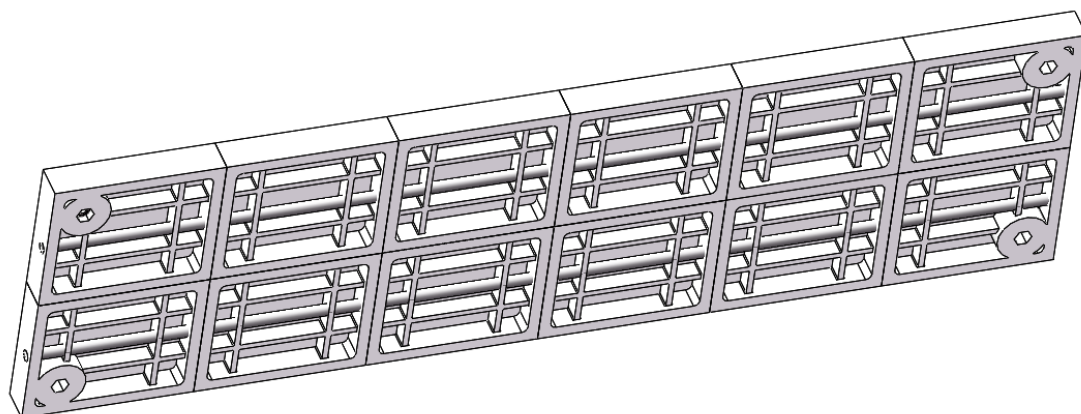


Obr. 5.4 Druhý návrh - detail

Při tvorbě druhého návrhu byla základní deska přepracována. Rozdělena na spodní pevnou základní desku a odpruženou horní desku (Obr. 5.5). Odpružení modelu umožní lépe rozvíbrovat horní desku. Obě desky jsou opět složeny z jednotlivých výtisků. Výška výtisku je 30 mm. Jednotlivé segmenty jsou takto vysoké pro zvětšení lepené plochy a zvýšení pevnosti lepeného spoje. Segmenty jsou ze spodní strany odlehčeny a vyztuženy žebrováním. Složená a slepená deska z těchto dílů je vyztužena závitovou tyčí M8 po celé délce desky (viz. Obr. 5.6).



Obr. 5.5 Druhý návrh



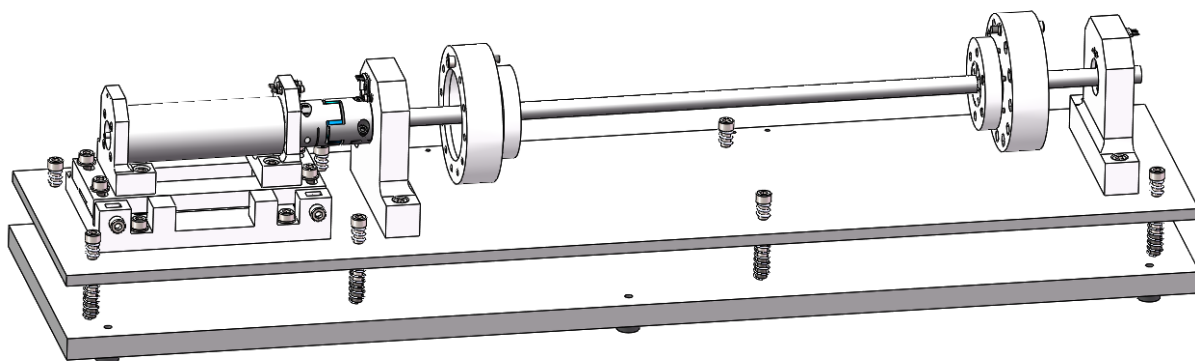
Obr. 5.6 Druhý návrh - základní deska

Tento návrh byl zastaven při pokusu o zkušební tisk jednotlivých segmentů pro základní desku, kde bylo účelem otestovat pevnost lepeného spoje. Tisk nebyl proveden, časový výpočet tisku jednoho segmentu vycházel cca na 14 hodin čistého tisku. Pro obě desky celkem 24 segmentů tento čas vycházel 336 hodin tisku. Tento čas by ještě navýšili dodatečné úpravy pro uchycení desek a noh zařízení. Hmotnost jednoho segmentu byla 350g. Orientační cena jednoho výtisku pouze za cenu materiálu a energie na tisk vycházela cca 140 Kč. Při této ceně bych jedna deska vycházela 1680 Kč. Pouze za materiál a energii spolu s časovými nároky na samotný tisk byl tento návrh ukončen.

5.3 Třetí návrh

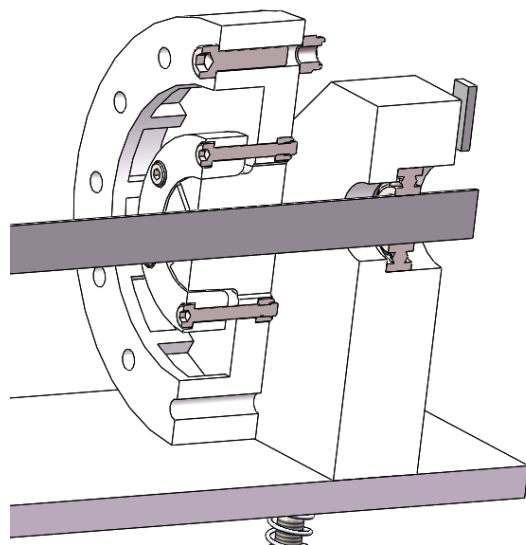
Třetí návrh simulačního zařízení pro vibrodiagnostiku je kombinací předešlých návrhů.

V návrhu byly nahrazeny tisknuté desky za kombinaci ocelové základní desky a hliníkové odpružené desky (Obr. 5.7). Odpružená deska je navržena z hliníku z důvodu nižší hmotnosti. Tím bude možno použít méně tuhé pružiny, které budou následně více pružit. Pro možnost nastavení a ladění tuhosti pružin je přidána sada pružin i nad odpruženou desku. To umožní za pomoci dosažení šroubů, na kterých jsou pružiny navlečeny dotažením zvýšit tuhost jednotlivých pružin dle potřeby. Tímto způsobem lze zvýšit tuhost pružin, ale nelze desky pevně sevřít. V případě nutnosti zamezení pružení odpružené desky je nutno pružiny odstranit a desky stáhnout přímo na sebe. Tím přestane odpružená deska pružit.

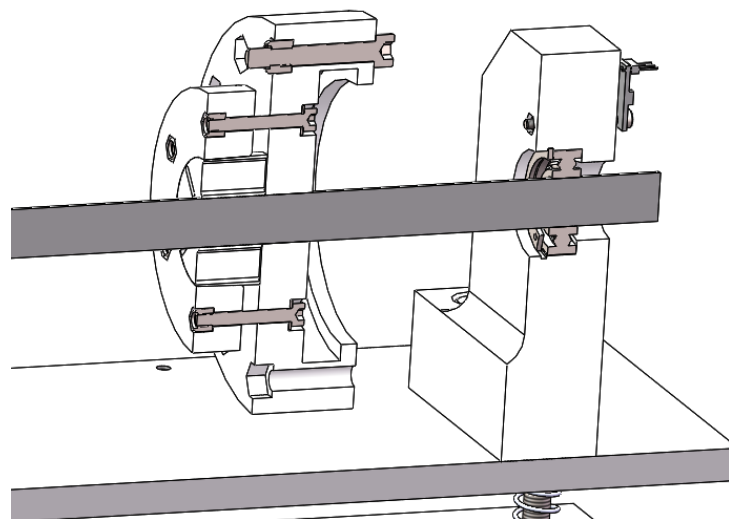


Obr. 5.7 Třetí návrh - detail

Disk byl doplněn o kapsy po celém obvodu pro možnost vložení závaží například plastelíny, která způsobí nevyváhu. Obr. 5.9 tento disk by následně přepracován tak aby byl snáze tisknutelný.

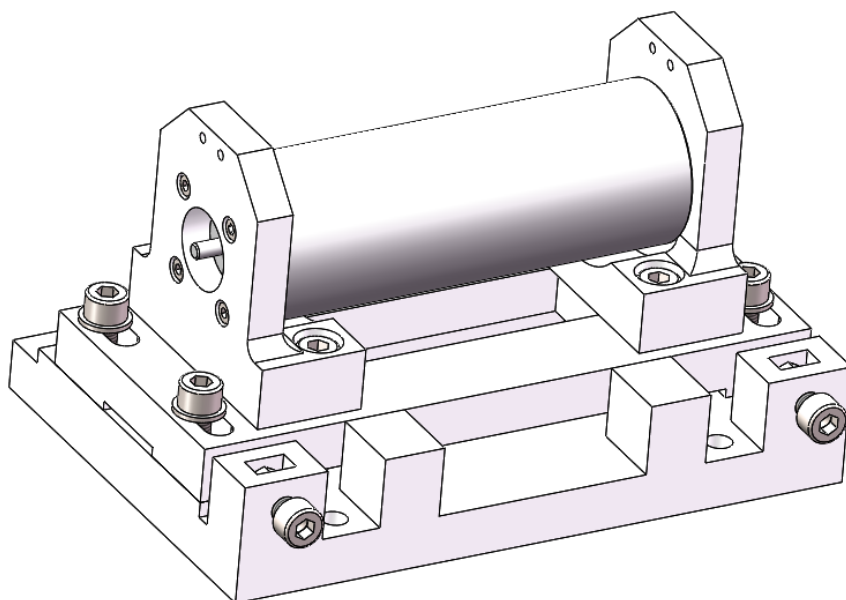


Obr. 5.9 Třetí návrh řez diskem



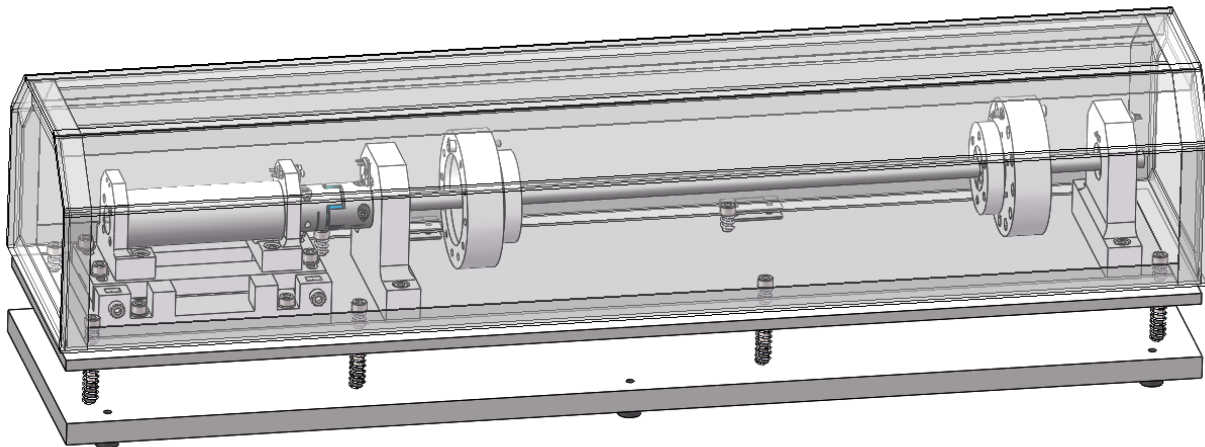
Obr. 5.8 Čtvrtý návrh – řez diskem

V této variantě bylo přepracováno uchycení motoru. Základní deska úchytu motoru byla opatřena dorazy pro horní desku. Tyto dorazy jsou doplněny pro snadné seřízení úchytu motoru do nulové polohy. Dále byly upraveny úchyty motoru pro snadnou montáž a demontáž motoru v celé sestavě bez nutnosti otáčení, klopení či demontáže celého uchycení.



Obr. 5.10 Uchycení motoru

Návrh je doplněn o kryt, který zakrývá všechny rotující části (Obr. 5.11). Je zhotoven z ohýbaného L profilu o rozměru 10x10x2 mm. Konstrukce rámu krytu je kreslena jako svařovaná. Rám je uchycen za pomoci pantů k odpružené horní desce. Obal rámu včetně čel tvoří ohýbaná polykarbonátová deska o tloušťce 3 mm. Která je následně nýtována k rámu.



Obr. 5.11 Třetí návrh

Tento třetí návrh byl následně i vyroben. Sestavení prototypu proběhlo bez větších komplikací. Následně proběhl první test bez zapojení akcelerometrů. Bylo pouze testováno roztočení, při prvním spuštění vyšel najevo velký nedostatek konstrukce, a to že umístěný ochranný kryt na plovoucí desce hlasitě rezonoval. Proto byl tento kryt sejmut a testování probíhalo bez krytu za zvýšené opatrnosti při nižších otáčkách. Zbylá část testování proběhla bez dalších komplikací. Všechny komponenty plnili svou původně zamýšlenou funkci.

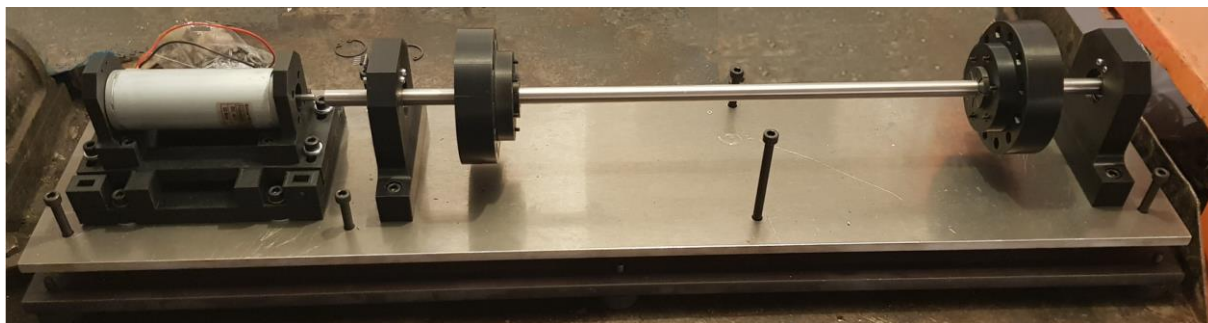
Z důvodu nepříjemného hluku, který vydával usazený kryt (Obr. 5.12) na plovoucí desce byl následně tento prototyp rozebrán a opět přepracován.



Obr. 5.12 První varianta krytu

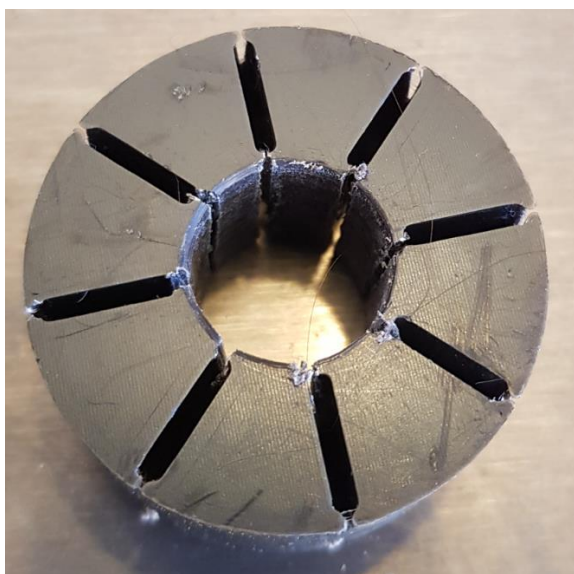
5.4 Montáž sestavy

Montáž sestavy proběhla bez vážnějších komplikací, k nejnáročnějším úkonům při montáži patřilo řezání závitů M8 do základní desky za pomoci ručního závitníku. Pro zjednodušení pracnosti a zvýšení přesnosti byl první závitník vždy naveden za pomoci stojanové vrtačky, díky tomu byla dodržena kolmost řezaného závitu vůči rovině desky. Následně byla deska osazena silenbloky



Obr. 5.13 Montáž sestavy - první ustavení

Dále bylo nutno upravit tištěný svěrný kroužek, vnitřní spoje segmentů byly odstraněny, aby bylo umožněno snadné stažení hřídele. Následovalo volné ustavení plovoucí desky, následně nastalo osazování desky jednotlivými podsestavami, nejprve sestava uchycení motoru, následně byly na hřídel nasazeny sestavy disků. Poté byly na hřídel nasazeny kompletní stojany ložisek takto vytvořená podsestava byla umístěna na plovoucí desku a sešroubována. Následovalo osazení spojky, kde nastala komplikace, zvolená spojka měla předvrtané otvory, tyto otvory byly o průměru 8 mm, následovalo převrtání jedné strany spojky na průměr hřídele tj 15mm a na druhé straně musel být vymezena vůle kovovými podložkami. Následovalo osazení krytu a první spuštění při kterém se projevilo vibrování krytu na plovoucí desce.



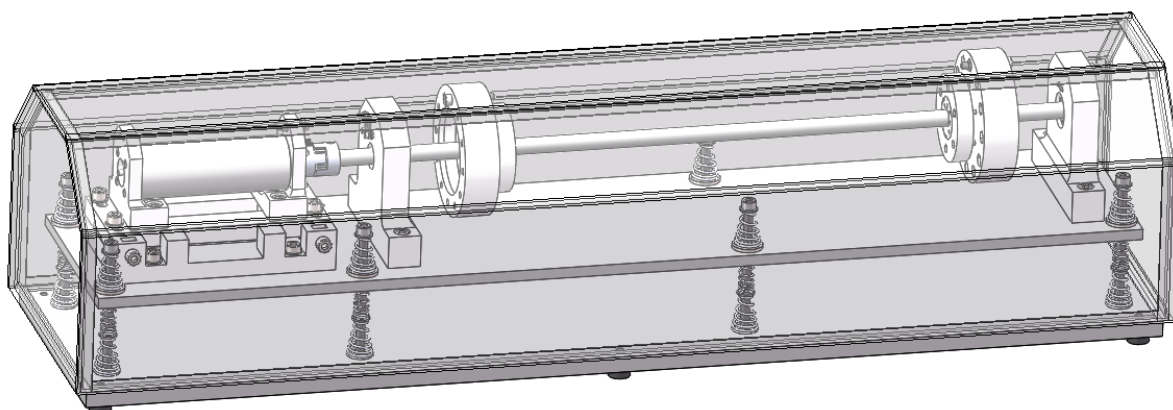
Obr. 5.14 Svěrný kroužek obepínající hřídel



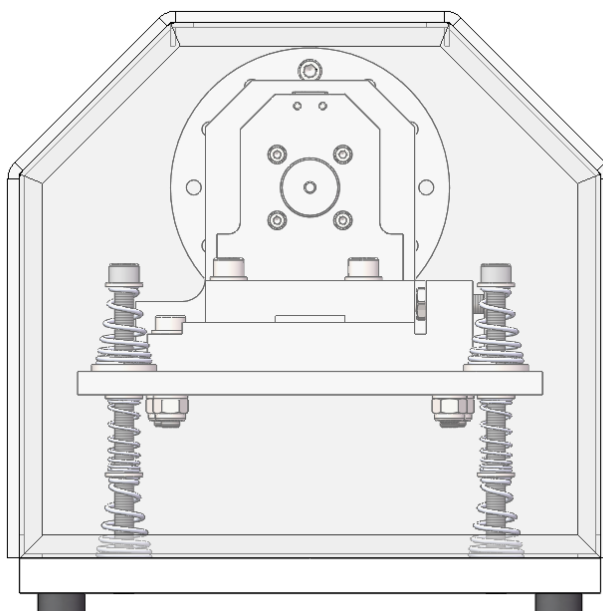
Obr. 5.15 Díly tištěné na 3D tiskárně

5.5 Čtvrtý návrh

Čtvrtý finální návrh. V tomto návrhu byly došlo k úpravě plovoucí desky. Ta byla po obvodě seříznuta. Tak aby nezakrývala základní desku. Tímto seříznutím vznikl dostatečný prostor pro nasazení prodlouženého krytu přímo na základní desku. Tato deska je dostatečně hmotná, aby utlumila vibrace přenášené přes odpružení sloupků. Díky tomu usazený kryt na základní desce není vystaven vibracím a nehluků. Tento finální návrh je zobrazen na Obr. 5.16 a také na Obr. 5.17. kde je vidět čelní pohled.



Obr. 5.16 Čtvrtý návrh



Obr. 5.17 Čtvrtý návrh - pohled z čela

5.6 Výpočty

Výpočet dostředivá síla působící na šroub s maticí umístěný v disku při 3000 ot/min.

$$F_{do} = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad [\text{N}] \quad (5.6)$$

$$F_{do} = 0.0155 \cdot 0,05 \cdot 314^2 = 76,4\text{N} \quad (5.7)$$

m – hmotnost šroubu s maticí - 15.5 g

Výpočet dostředivá síla působící na šroub s maticí umístěný v disku při 2300 ot/min.

$$F_{do} = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad [\text{N}] \quad (5.8)$$

$$F_{do} = 0.0155 \cdot 0,05 \cdot 240^2 = 44,6\text{N} \quad (5.9)$$

Výpočet kinetické energie působící na šroub umístěný v disku.

$$K_{sr} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r \cdot \omega)^2 \quad [\text{J}] \quad (5.10)$$

$$K_{sr} = \frac{1}{2} \cdot 0.012 \cdot (0,05 \cdot 314)^2 = 1.48\text{J} \quad (5.11)$$

F_{do} - je dostředivá síla

m - hmotnost šroubu (12g) [Kg]

r - je poloměr otáčení [m]

ω – úhlová rychlost [rad/s]

Volba krytu dle normy ČSN ISO 21940-23 Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 23: Kryty a jiná ochranná opatření pro měřicí stanoviště vyvažovacích strojů

$\omega_o = 3000 \text{ ot/min} = 50 \text{ ot/sec}$

$$\omega = \omega_o \cdot 2\pi = 50 \cdot 2\pi = 100\pi \text{ rad/s} \quad (5.12)$$

$$v = \omega r = 100\pi \cdot 0.05 = 15,7 \text{ m/s} \quad (5.13)$$

A_p – nejmenší plocha příčného průřezu

$$A_p = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 4^2 = 50,27 \text{ mm}^2 \quad (5.14)$$

E_{abs} – absolutní energie částice

$$E_{abs} = m \cdot v^2 = 0.012 \cdot 15,7^2 = 2,96 \text{ mN} \cdot \text{m} \quad (5.15)$$

E_{spec} – Plošně specifická energie

$$E_{spec} = \frac{E_{abs}}{A_p} = \frac{m \cdot v^2}{2A_p} \quad [\text{mN} \cdot \text{m}/\text{mm}^2] \quad (5.16)$$

$$E_{spec} = \frac{m_{sr} \cdot v^2}{2A_p} = \frac{0.012 \cdot 15,7^2}{2 \cdot 50,27} = 0.029 \text{ mN} \cdot \text{m}/\text{mm}^2 \quad (5.17)$$

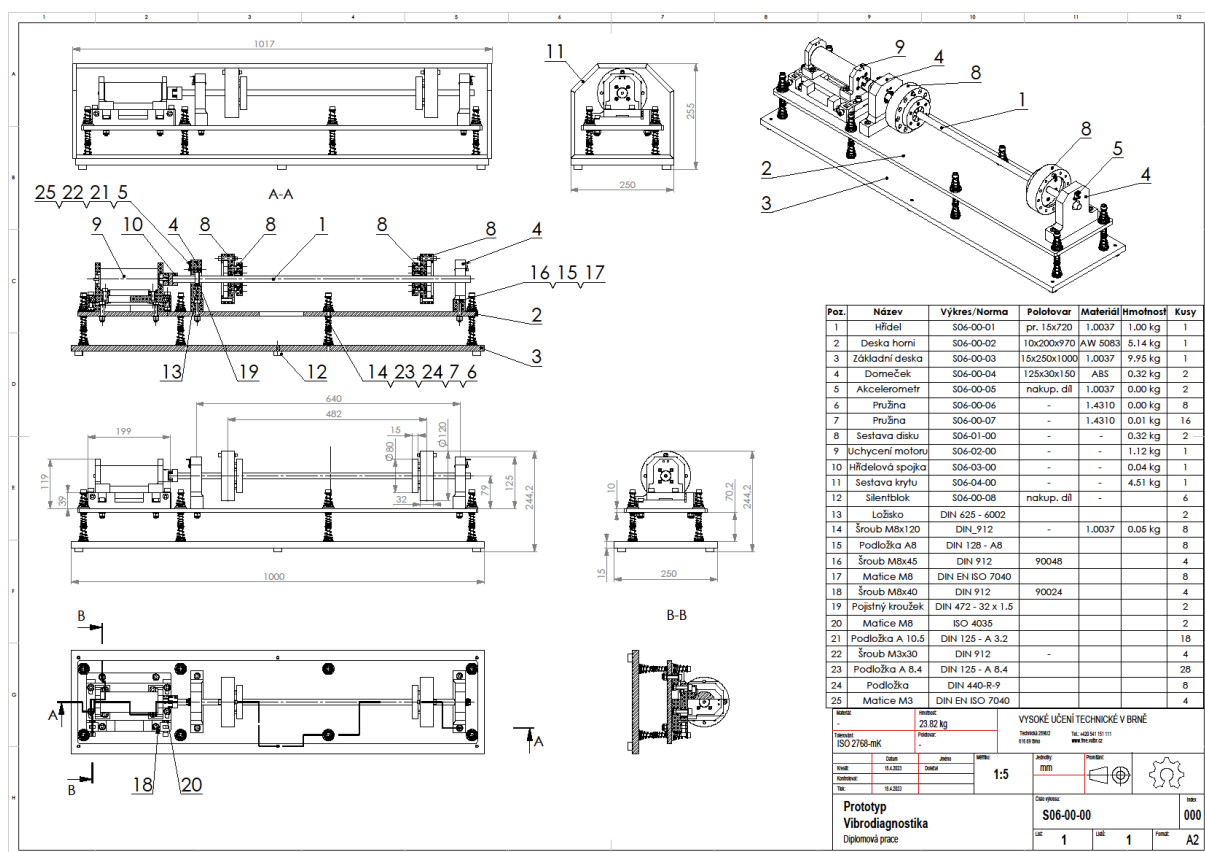
Dle provedeného výpočtu vybírám z normy označení krytu C 6/50.

5.7 Výkresová dokumentace

Výkresová dokumentace byla vypracována za pomoci CAD programu.

Sestava

Na výkresu sestavy je zakreslen prototyp simulátoru poruch jde o čtvrtý návrh. V sestavě jsou okotovány hlavní rozměry spolu s rozměry rozestupů hlavních komponent. Dále jsou v této sestavě opozicovány vstupující podsestavy a díly.



Mezi vstupující podsestavy patří sestava uchycení motoru, sestava disku, sestava krytu, a dále jednotlivé komponenty. Jednotlivé výkresy podstav a jednotlivých komponent jsou umístěny v příloze 1.

6 TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉHO SIMULÁTORU PORUCH

Testování proběhlo v laboratoři pro výuku diagnostiky. K zaznamenání dat bylo použito laboratorní záznamové zařízení, které následně přeneslo data do souboru.

Podmínky měření:

- - Teplota: 20 °C
- - Tlak: 104 kPa
- - Vlhkost: 45 %

Pro samotný záznam byl použit tento výukový skript. Ve skriptu je nastavena vzorkovací frekvence 2000. Délka záznamu byla stanovena 0.5s.

```
clear
clc

disp('zalozeni sesion:')
s = daq.createSession('ni'); %zalozeni sesion

karta='Dev1';
disp('Pridani kanalu:')
ch1= addAnalogInputChannel(s,karta, 0, 'Voltage'); % pridani kanalu
ch1.Range = [-5,5];
ch1.TerminalConfig = 'SingleEnded';

ch2= addAnalogInputChannel(s,karta, 1, 'Voltage'); % pridani kanalu
ch2.Range = [-5,5];
ch2.TerminalConfig = 'SingleEnded';

ch3= addAnalogInputChannel(s,karta, 2, 'Voltage'); % pridani kanalu
ch3.Range = [-5,5];
ch3.TerminalConfig = 'SingleEnded';

ch4= addAnalogInputChannel(s,karta, 3, 'Voltage'); % pridani kanalu
ch4.Range = [-5,5];
ch4.TerminalConfig = 'SingleEnded';

ch5= addAnalogInputChannel(s,karta, 4, 'Voltage'); % pridani kanalu
ch5.Range = [-10,10];
ch5.TerminalConfig = 'SingleEnded';

disp('Zmena vzorkovaci frekvence:')
s.Rate = 2000; % zmena vzorkovaci frekvence

disp('Nastaveni doby mereni :')
s.DurationInSeconds = 0.5; % doba mereni

disp('start mereni:')
[data,time] = s.startForeground; % start mereni
otacky=data(:,5)-1;
zrychleni=data(:,1:4);

zrychleni=zrychleni-mean(zrychleni);
plot (time,zrychleni(:,1:2),time,otacky)
ylim([min(zrychleni(:))*1.2,max(zrychleni(:))*1.2])

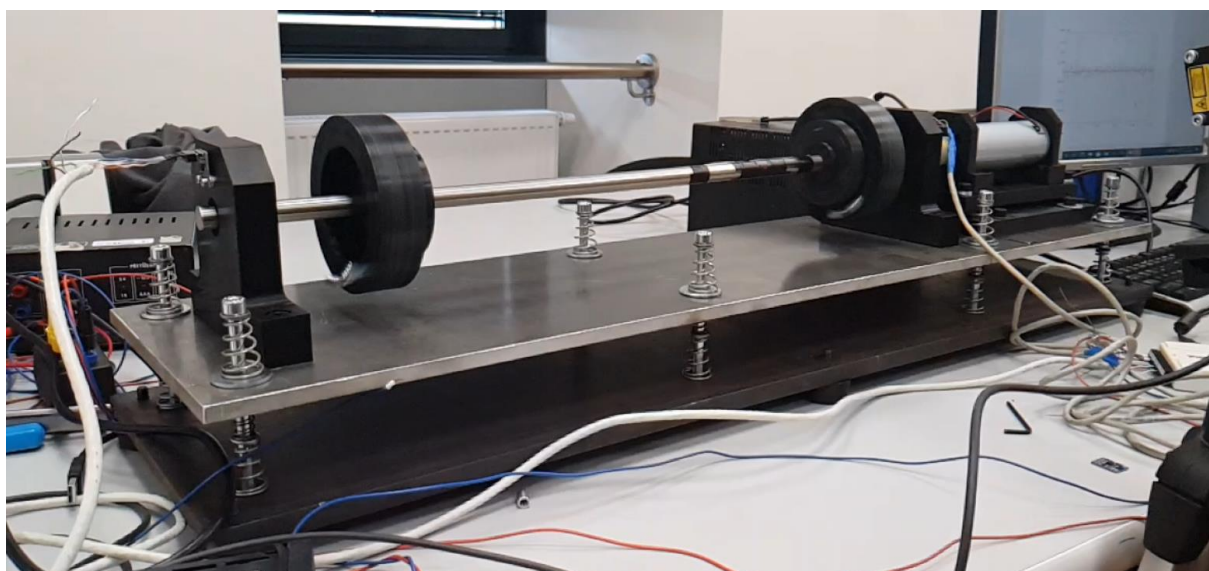
save('test1_24v','time','data')
```

V následující tabulce je ukázka zaznamenaných dat z akcelerometrů

Tab. 6.1 Zaznamenaná data Akcelerometr

Čas	Akcelerometr 1 osa X	Akcelerometr 1 osa Y	Akcelerometr 2 osa X	Akcelerometr 2 osa Y
0	1,399	1,815	1,667	1,836
0,0005	1,394	1,815	1,675	1,836
0,001	1,392	1,817	1,672	1,836
0,0015	1,402	1,840	1,657	1,836
0,002	1,399	1,838	1,672	1,841
0,0025	1,399	1,835	1,672	1,844

Samotné testování proběhlo ve školní laboratoři.

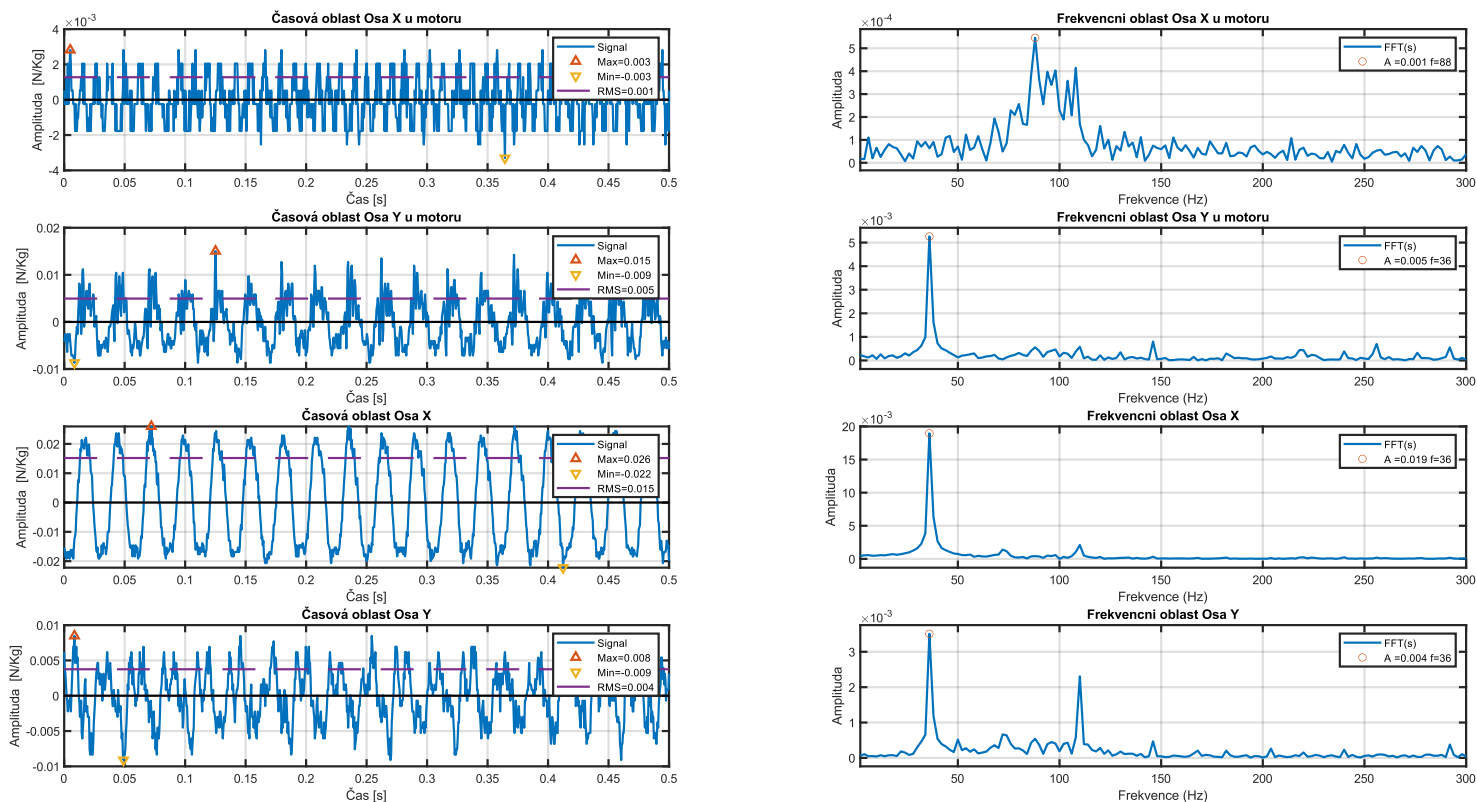


Zpracování dat

Data byly zpracovány v programu matlab za pomoci skriptu, který vytvořil grafy v následující Tab. 6.1. Tyto grafy vyobrazují

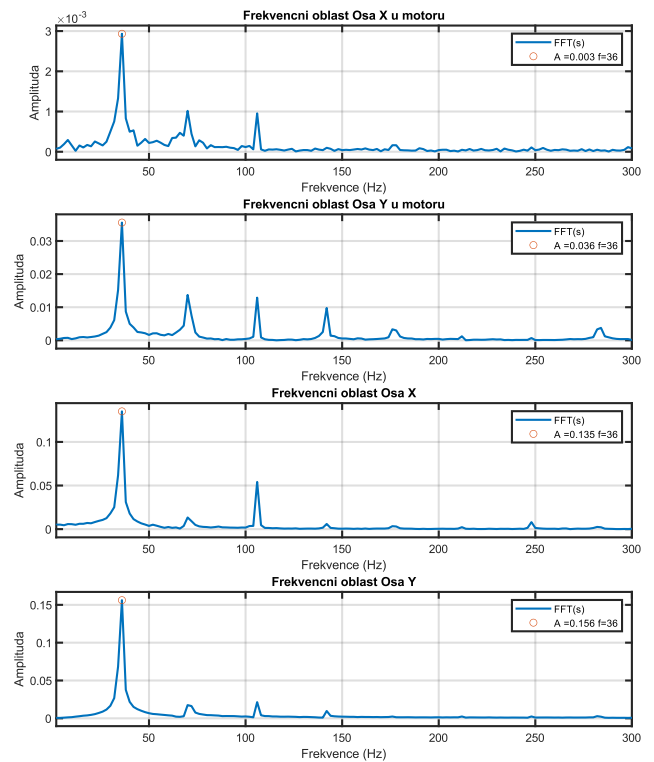
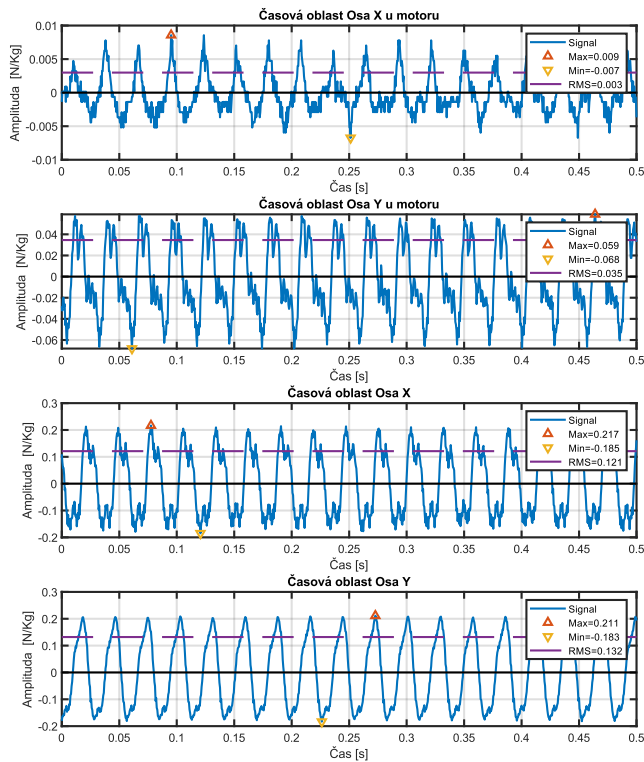
Bezporuchový stav

Tab. 6.2 Test 1 - Bezporuchový stav - 2300 ot



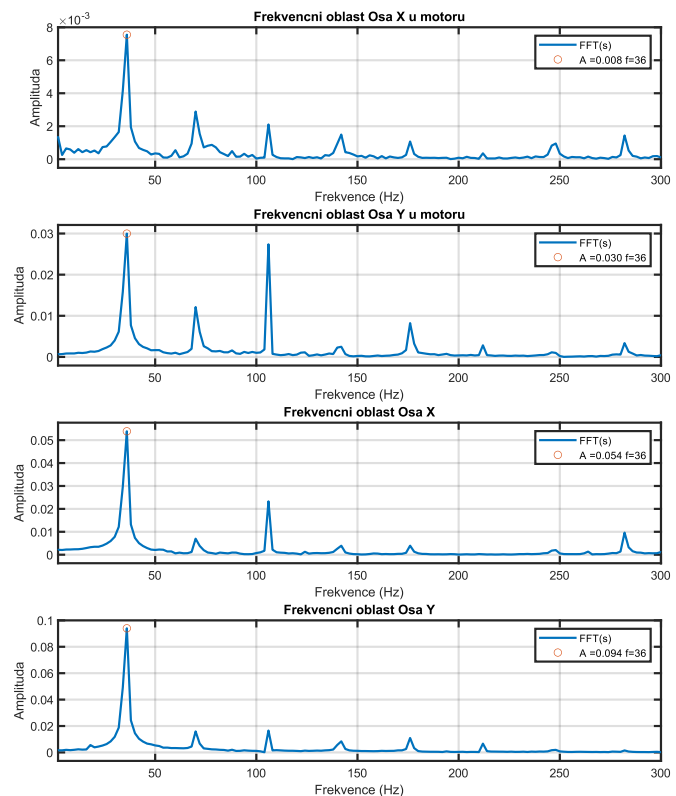
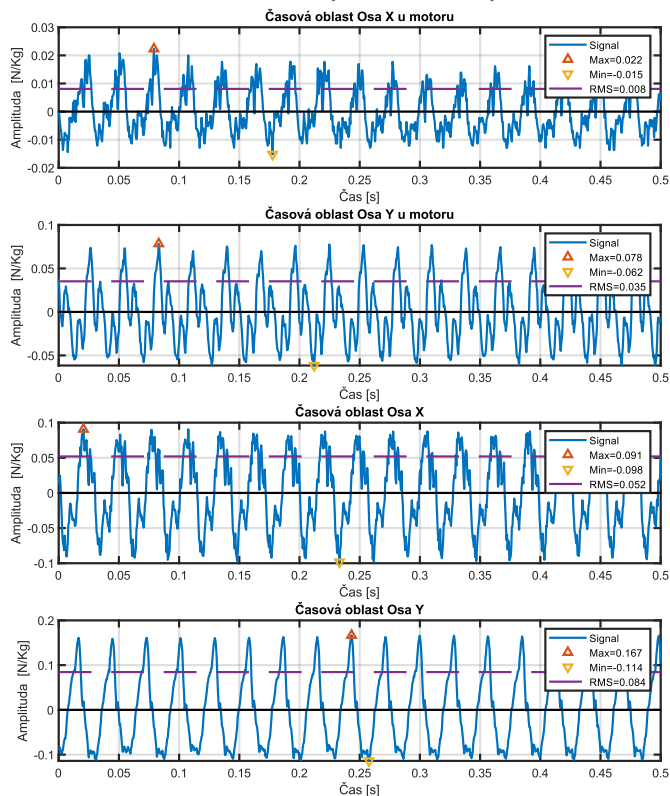
Statická nevyváha

Tab. 6.3 Test 5 Statická nevyváha 2 šrouby - 2300 ot.



Momentová nevyváha

Tab. 6.4 Test 6 Momentová nevyváha dva šrouby - 2300 ot.



Na základě provedeného lze prohlásit že vyrobený vibrodiagnostický simulátor funguje. I přesto že výsledná data nejsou ideální. Do dat vstupuje závada typu nesouosost a tím zkresluje výsledky měření. Z těchto výsledků měření vyplývá že zařízení bude potřebovat zkalibrovat. Dále bylo zjištěno že použitá spojka není vhodná pro zamezení vzniku axiálních sil na hřídel. To se projevilo posunutím rotoru a následném rozpojení spojky. Z toho důvodu by bylo zapotřebí spojku vyměnit za typ který přenesse lehké axiální zatížení, případně do sestavy hřídele a stojanu ložiska doplnit axiální aretaci například formou svěrného kroužku v blízkosti stojanu ložiska. .

7 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ PRO PRAXI.

Problematika vibrodiagnostiky strojních objektů je dosti složitý celek, který zahrnuje měření analýzu a vyhodnocení výsledků měření. Tyto měření mohou být ovlivněny mnoha vlivy, proto je podstatné ke každému typu zařízení přistupovat individuálně. Maximálně eliminovat vnější vlivy, jejich rušení a dbát na správné postupy a techniky měření.

Cílem práce bylo zhotovit model pro výuku vibrodiagnostiky s orientací na měření závad typu nevyváha a nesouosost, případně i uvolněný základ. Pro zhotovení modelu byly využity poznatky z průmyslových řešení těchto zařízení, kde byly převzaty některé technické aspekty. Návrh konceptu byl několikrát přepracován. Pro docílení snadné vyrobitelnosti při zachování funkčnosti. Do návrhu byly zahrnuty poznatky z technické praxe vedoucího práce. Pro vytvoření 3D modelu a výkresové dokumentace byl použit CAD program. Poslední konceptová varianta byla vyrobena a následně otestována.

Testování vibrodiagnostického zařízení probíhalo ve školní laboratoři. Kde bylo použito školní zařízení (laboratorní zdroj, převodník, počítač, matlab) pro uskutečnění měření. Měřením bylo otestována a potvrzena schopnost zařízení měřit závady typu nevyváha a nesouosost.

Přínosem této práce je zhotovení vibrodiagnostického zařízení, které bude využíváno v laboratoři pro výuku a laboratorní úlohy vibrodiagnostiky.

Zhotovené zařízení má výhodu v jednoduché konstrukci se zaměřením na snadnou vyrobitelnost. To dovoluje maximálně snížit náklady na pořízení a v ideálním případě umožní snadnou replikaci i pro jiné školní laboratoře.

Doporučení

Na základě poznatků doporučuji konstrukci zařízení přepracovat a pokusit se o zmenšení rozměrů při zachování funkčních parametrů, a to zejména rozstup mezi stojany ložisek, kde je minimální rozstup šestinásobkem vnějšího průměru disku. Důvodem je úspora místa v laboratoři při výuce vibrodiagnostiky na více zařízení současně.

Dále by bylo vhodné přepracovat stojan ložiska, doplnit ho ocelové destičky jednu v ose x a druhou v ose y. To by umožnilo měřit za pomoci magnetických snímačů, dále by ve středu destiček mohl být zhotoven závit po připevnění snímačů. To by umožnilo testovat vliv uchycení snímače na průběh měření. Uchycení destiček by bylo vhodné realizovat protažením šroubu přes celý domeček tak aby byl sevřen a předepnut pro maximální snížení ztrát přenosu signálu.

8 CITOVANÁ LITERATURA

Citovaná literatura

- JANOUSEK, Ivo, Josef KOZÁK, Oldřich TARABA, Blanka HYANOVÁ, Jan
- [1] KRČMÁŘ a Ladislav PEJŠA. *Technická diagnostika*. Vydání první. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 429 stran : ilustrace, fotografie (černobílé).
- SKŘIVÁNEK. M., Polívka., *Provozní spolehlivost a údržba strojů*. Praha, 1974.
- [2]
- BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky teorie a praxe*
- [3] [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-11-25]. ISBN ISBN978-80-248-2997-5.
- HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER a Petr DUB. *Fyzika*.
- [4] *Svazek 1. 2. přeprac. vyd.* Brno: VUTIUM, 2013. ISBN ISBN 978-80-214-4123-1.
- KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. : il. ISBN 80-7300-158-6.
- [5]
- TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*.
- [6] Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 s. : il. ISBN 80-901936-1-7.
- JANČA. *Základy zpracování signálů: Signál, úvod do MATLAB*. In:
- [7] www.youtube.com/ [online]. CVUTFEL [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=XRm5oRcDeNs&list=PLQL6z4JeTTQnjggQwXFoN4IfzPIpbnOc&ab_channel=CVUTFEL
- HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost II: Vibrodiagnostika* [online]. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004 [cit. 2023-04-26]. ISBN 80-248-0650-9. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Technicka-diagnostika-II-Vibrodiagnostika-skripta.pdf>
- ZUTH, Daniel. *ZUTH, Daniel. Analýza nejistot ve vibrodiagnostice. [s.l.], 2009. 95 s. , 5. VUT v Brně - Fakulta strojního inženýrství. Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí disertační práce Ing. František Vdoleček, CSc. .*
- [9]
- PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenk ČEPOVÁ. *Strojírenská metrologie: Studijní opora „Strojírenská metrologie“* [online]. První. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2023-01-01]. ISBN 978-80-248-2723-0. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2723-0.pdf>
- [10]
- ZUTH, Daniel a Vdoleček FRANTIŠEK. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*
- [11] [online]. In: . AUTOMA, 2010 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: [doi:http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf](http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf)

- JAUREGUI, J., Alejandro LOZANO GUZMAN a Juan JAUREGUI CORREA.
 [12] *Mechanical Vibrations and Condition Monitoring*. . San Diego: Elsevier, 2020. ISBN 9780128197967.
- Prime Faraday Technology Watch: An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)* [online]. Loughborough University, Loughborough, Leics LE11 3TU: Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, 2002 [cit. 2023-01-01]. ISBN ISBN 1-84402-020-7. Dostupné z: https://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/an-introduction-to-mems.pdf
- MEMS Accelerometers. In: *Silicon Sensing Systems Limited* [online]. Clifton Road, Southway, Plymouth, Devon, PL6 6DE, United Kingdom: Silicon Sensing Systems Limited, 2017 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.siliconsensing.com/technology/mems-accelerometers/>
- NOVÁK, Martin. *Technická měření*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018, 234 stran : ilustrace ; 30 cm. ISBN 978-80-01-06388-0.
 [15]
- Balancing: Static, Coupled, and Dynamic. In: *Community.sw.siemens.com* [online]. [16] -: Siemens 1996-2021, 2020 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/article/balancing-static-coupled-and-dynamic>
- TOMEH, Elias. *Technická diagnostika: vibrační diagnostika strojů a zařízení* [17] [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015 [cit. 2023-01-01]. ISBN 978-80-7494-174-0. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2983/skripta_TD_Tomeh.pdf
- Spectraquest. In: *Https://spectraquest.com/* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: [18] <https://spectraquest.com/simulators/details/bbs/>
- Akcelerometr GY-61 ADXL335. In: *Https://www.laskakit.cz/* [online]. [cit. 2023- [19] 01-01]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/user/related_files/adxl335.pdf
- FORMÁNEK, Josef. *Tvorba grafické vizualizace principu DC motoru a DC [20] servomotoru* [online]. In: . s. 11 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka-arvt/Data/ivk-arvt-soubory/08-F.pdf>
- Buhler motor: Stock service, DC Motor 51x141* [online]. In: . s. 2 [cit. 2021-05-19]. [21] Dostupné z: https://www.buehlermotor.com/fileadmin/user_upload/stock_service/datasheets/DC-Motor_51x103__1.13.044.4XX.pdf
- KŘÍŽ, Rudolf. *Stavba a provoz strojů I: Části strojů*. První. Praha: SNTL - Státní [22] nakladatelství technické literatury, 1977. ISBN 04-231-77.
- Laboratorní zdroj. In: *Conrad* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: [23] <https://asset.conrad.com/media10/isa/160267/c1-/cs/002347563PI00/image.jpg?x=2000&y=2000&format=jpg&ex=2000&ey=2000&align=center>

Data sheet: USB 6009 [online]. In: . [cit. 2023-01-01]. Dostupné z:
[24] https://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/National%20Instruments%20Corp%20PDF's/USB-6009_Spec.pdf

Plasty - tepelné vlastnosti. In: *E-konstrukter* [online]. Výstaviště 405/1, 603 00
[25] Brno: Vydavatelství Nová média, s. r. o., 2013 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-teplotni-vlastnosti>

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Seznam tabulek

Tab. 3.1 Frekvenční pásma [7].....	21
Tab. 4.1 Technické parametry simulátoru poruch [18].....	45
Tab. 4.2 Rozdělení uložení [22].....	49
Tab. 4.3 Druhy pojistných kroužků a závlaček [22].....	51
Tab. 4.4 Druhy silových spojů hřídel/náboj [22].....	52
Tab. 4.5 Pružiny namáhané ohybem a krutem [22].....	53
Tab. 4.6 Pružiny namáhané kombinovaně [22].....	53
Tab. 4.7 Typy spojek [22].....	54
Tab. 6.1 Zaznamenaná data Akcelerometr.....	72
Tab. 6.2 Test 1 - Bezporuchový stav - 2300 ot.....	73
Tab. 6.3 Test 5 Statická nevyvaha 2 šrouby - 2300 ot.....	74
Tab. 6.4 Test 6 Momentová nevyvaha dva šrouby - 2300 ot.....	74

9.2 Seznam obrázků

Obr. 2.1 Schéma Simulátoru poruch.....	16
Obr. 3.1 Identifikace opotřebení [3].....	18
Obr. 3.2 Spektrum elektromagnetických vln [4].....	19
Obr. 3.3 Charakteristiky pásmového filtru [6].....	20
Obr. 3.4 Signál a šum.....	22
Obr. 3.5 Složený signál.....	22
Obr. 3.6 Rozdělení signálů [1], [3].....	24
Obr. 3.7 Harmonické kmitání.....	25
Obr. 3.8 Uchycení piezo-snímačů [11].....	27
Obr. 3.9 Blokové schéma měřícího řetězce pro měření vibrací [5].....	27
Obr. 3.10 Mechanický akcelerometr [12].....	28
Obr. 3.11 Konstrukce piezoelektrického akcelerometru [12].....	29
Obr. 3.12 Lineární akcelerometr [14].....	30
Obr. 3.13 Kinematická dráha hřídele [5].....	31
Obr. 3.14 Coorbity - závislost na otáčkách [5].....	31
Obr. 3.15 Schéma funkce indukčního snímání vibrací [12].....	32
Obr. 3.16 Princip funkce optického akcelerometru [15].....	32
Obr. 3.17 Zdroje vibrací rotujících strojních zařízení.....	34
Obr. 3.18 Statická nevyvaha [16].....	36
Obr. 3.19 Statická nevyvaha [8].....	36
Obr. 3.20 Momentová nevyvaha [16].....	37
Obr. 3.21 Momentová nevyvaha [8].....	37
Obr. 3.22 Dynamická nevyvaha [16].....	38
Obr. 3.23 Dynamická nevyvaha [8].....	38
Obr. 3.24 Kvazistatická nevyvaha [17].....	39

Obr. 3.25 Druhy nesouososti [8]	40
Obr. 3.26 Spektrum paralelního přesazení [8]	40
Obr. 3.27 Spektrum úhlové nesouososti [8].....	40
Obr. 3.28 Spektrum rovnoběžné nesouososti [8].....	40
Obr. 3.29 Spektrum ohnutého hřídele [8]	40
Obr. 3.30 Spektrum mechanického uvolnění, trhlin a vůlí [8].....	41
Obr. 4.1 Simulátor poruch vyvažování a ložisek [18]	45
Obr. 4.2 Schéma zařízení	46
Obr. 4.3 Osy akcelerometru [19].....	48
Obr. 4.4 Konstrukce komutátorového elektromotoru (s buzením pomocí permanentního magnetu) [20].....	48
Obr. 4.5 Zástavbové rozměry motoru [21].....	49
Obr. 4.6 Nákres kuličkového ložiska [22]	50
Obr. 4.7 Rozpěrný spoj [22].....	52
Obr. 4.8 Radiální spojka s křížovým kotoučem [22]	54
Obr. 4.9 Laboratorní zdroj [23].....	55
Obr. 4.10 Multifunkční I/O Zařízení - USB-6009 [24].....	55
Obr. 5.1 První návrh – detail.....	57
Obr. 5.2 První návrh.....	58
Obr. 5.3 Teplotní roztažnost.....	59
Obr. 5.4 Druhý návrh - detail	60
Obr. 5.5 Druhý návrh	60
Obr. 5.6 Druhý návrh - základní deska	61
Obr. 5.7 Třetí návrh - detail	62
Obr. 5.8 Čtvrtý návrh – řez diskem.....	63
Obr. 5.9 Třetí návrh řez diskem	63
Obr. 5.10 Uchycení motoru.....	63
Obr. 5.11 Třetí návrh.....	64
Obr. 5.12 První narianta krytu.....	64
Obr. 5.13 Montáž sestavy - první ustavení	65
Obr. 5.14 Svěrný kroužek obepínající hřídel	65
Obr. 5.15 Díly tištěné na 3D tiskárně.....	65
Obr. 5.16 Čtvrtý návrh	66
Obr. 5.17 Čtvrtý návrh - pohled z čela.....	66

9.3 Seznam příloh

Příloha 1 Výkresová dokumentace

Příloha 2 Provedená měření

Příloha 3 Sestava testovacího modelu