

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V  
PRAZE**

**TECHNICKÁ FAKULTA**

**Katedra jakosti a spolehlivosti strojů**

**VIBRODIAGNOSTIKA ROTAČNÍCH  
STROJŮ**

**Diplomová práce**

Vedoucí: **prof. Ing. Josef Pošta, Csc.**  
Vypracoval: **Bc. Milan Zetka**

Praha 2009

Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze	Fakulta: technická
Katedra: jakosti a spolehlivosti strojů	Akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant: **Bc. Milan Zetka**

Studijní obor: Silniční a městská automobilová doprava

Studijní zaměření:

Název práce: Vibrodiagnostika rotačních strojů

Zásady pro vypracování:

### Cíl práce:

Popis základních vlastností a charakteristik veličiny „chvění“ a možností jejich využití jako diagnostických signálů, experimentální stanovení citlivosti signálů a přesnosti diagnózy na jejich základě.

### Osnova práce:

1. Technická diagnostika strojů – přehled metod
2. Vibrodiagnostika – principy, možnosti, postupy
3. Vibrodiagnostické metody pro sledování stavu rotačních strojů
4. Ověření citlivosti vybraných diagnostických signálů
5. Doporučení pro aplikaci vibrodiagnostiky
6. Hodnocení a závěry

### Metodika práce:

Bude provedena literární rešerše k zadanému tématu a zpracován přehled principů a teoretických základů vibrodiagnostiky. Na vhodných objektech bude experimentálně ověřena citlivost vybraných vibrodiagnostických signálů na změny provozních podmínek, výsledky budou analyzovány a zhodnoceny, bude vypracováno doporučení pro provozní aplikaci ověřovaných vibrodiagnostických signálů.

Rozsah práce: 40 – 60 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Seznam doporučené odborné literatury:

JANOŮŠEK, I.-KOZÁK, J.-TARABA, O. aj.: Technická diagnostika. SNTL, Praha, 1988, 432 s.

POŠTA, J.: Vybrané technologie údržby strojů. In: Management jakosti v údržbě.

/Učební texty České společnosti pro jakost/. ČSJ, Praha, 2. přepracované vydání, 2003

<http://www.adash.cz>

<http://www.fixturlaser.se>

<http://www.cmms.cz>

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Josef Pošta, CSc.

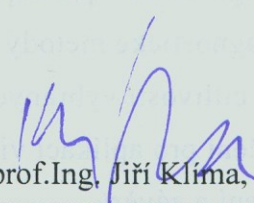
Datum zadání diplomové práce: 30. 11. 2007

Termín odevzdání diplomové práce: 30. 4. 2009



prof. ing. Josef Pošta, CSc.

vedoucí katedry



prof. Ing. Jiří Klíma, CSc.

děkan

V Praze dne 10.12.2007

## **Prohlášení**

**Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vibrodiagnostika rotačních strojů vypracoval samostatně a použil jsem pramenů, které cituji a uvádím v příložené bibliografii.**

**V Praze, dne 30. dubna 2009**

.....

**podpis**

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce nás seznamuje s problematikou vibrodiagnostiky rotačních strojů, prozkoumává současný stav v oblasti metod diagnostiky, popisuje základní pojmy, podmínky a principy v oblasti měření vibrací.

Dále je uvedena stručná charakteristika základních metod měření vibrací a zařízení pro měření vibroakustických parametrů strojů. Následný přehled objasňuje oblast jejich praktického použití a možnosti projevu a detekce vibračních signálů.

V poslední části je popsáno a vyhodnoceno experimentální měření, zkoumající citlivost vybraného diagnostického signálu.

## **Klíčová slova**

vibrace, vibrodiagnostika, hluk, poruchy ložisek, snímače vibrací, vibrační signál, FFT

## **Abstrakt**

This thesis deals with the problematic of the vibrodiagnostics of rotatory machines. It investigates current state of diagnostic methods, describes terminology, conditions and principles in vibrations measuring.

Brief characteristics of basic methods of vibration measuring and devices for vibroacoustic parameters measuring of machines is included. Overview of the methods and devices describes their practical application. Possibilities of demonstrations and detections of vibration signals are part of the overview.

Last chapter of the thesis describes and evaluates experimental measuring examining sensitivity of representative diagnostic signal.

## **Keywords**

vibration, vibrodiagnostic, noise, bearing breakdown, vibration, sensors, vibration signal, FFT

## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Technická diagnostika - přehled metod .....</b>	<b>2</b>
2.1. Vizuální metody .....	3
2.2. Kapilární metody .....	3
2.3. Magnetické metody .....	3
2.4. Elektromagnetická defektoskopie vířivými proudy .....	4
2.5. Akustická emise .....	4
2.6. Defektoskopie prozařováním.....	4
2.7. Infračervená defektoskopie.....	5
2.8. Ultrazvukové metody.....	5
<b>3. Vibrodiagnostika - principy, možnosti, postupy.....</b>	<b>6</b>
3.1. Hluk.....	6
3.2. Vibrace .....	7
3.2.1. Harmonické kmity .....	7
3.2.2. Neharmonické periodické kmity.....	10
3.2.3. Vlastní kmity, nucené kmity a rezonance .....	10
3.3. Vliv vibrací a hluku na člověka .....	11
3.4. Vliv vibrací a hluku na stroje a pracovní procesy .....	13
3.5. Metody boje proti vibracím a hluku .....	14
3.6. Nejčastější příčiny chvění.....	16
3.7. Senzory.....	22
<b>4. Vibrodiagnostické metody pro sledování stavu rotačních strojů... 25</b>	<b>25</b>
4.1. Základní měřené veličiny .....	27
4.2. Celkové vibrace.....	28
4.3. Analýza časového průběhu .....	30
4.4. Analýza FFT .....	31
4.5. Alternativní metody k měření ložisek.....	32
4.5.1. Technologie SEE .....	32
4.5.2. Obálková metoda.....	34
4.6. Vysokofrekvenční detekce .....	35
4.7. Orbitální analýza .....	35
4.8. Multiparametrické monitorování .....	37

<b>5. Ověření citlivosti vybraných diagnostických signálů .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1. Měřené přístroje.....</b>	<b>38</b>
<b>5.2. Měřicí přístroje.....</b>	<b>39</b>
<b>5.3. Metodika .....</b>	<b>41</b>
<b>5.4. Naměřené hodnoty .....</b>	<b>42</b>
<b>5.5. Vyhodnocení experimentu .....</b>	<b>43</b>
<b>6. Doporučení pro aplikaci vibrodiagnostiky .....</b>	<b>47</b>
<b>7. Závěr .....</b>	<b>48</b>
<b>8. Přílohy.....</b>	<b>50</b>



## 1. Úvod

Většina dnešních výrobních společností pracuje s minimálními zisky, což samozřejmě vede k nutnosti snižování výrobních nákladů a právě proto se v moderním podnikání stává mocným nástrojem i řešení dříve opomíjených problémů. K těmto mocným nástrojům patří také řešení údržby, včetně její zajištění za podmínek systémového procesního chápání dané problematiky.

K nejdůležitějším prostředkům zajištění údržby patří metody technické diagnostiky, které v celé své šíři působnosti nejvýrazněji ovlivňují obsah údržby v celé své komplexnosti. V praxi tzn., že technická diagnostika je hlavním nástrojem kontrolně inspekční a revizní činnosti (zjišťování technického stavu a opotřebení), rozhoduje o nutnosti a rozsahu prováděných oprav (odstraňování následků opotřebení), patří k nástrojům a prostředkům autonomní údržby (snižování rychlosti opotřebení), kde ohodnocuje dodržování zásad správného provozu.

Technická diagnostika je tedy základním atributem ovlivňujícím rozhodujícím způsobem bezpečnost provozu, tzn. je také prostředkem ke snižování rizika v obecném smyslu.

## 2. Technická diagnostika - přehled metod [1]

Technická diagnostika metoda tvoří nedílnou část kontroly jakosti výrobku jak v předvýrobní a výrobní etapě tak v provozu. Bez diagnostiky by nebyla zajištěna bezporuchovost, spolehlivost a bezpečnost v letectví, v jaderné energetice, v chemickém průmyslu, ale i např. mostů, přehrad nebo lyžařských lanovek apod. Obecně se zabývá testováním struktury kovových i nekovových materiálů a vnitřních nebo povrchových vad objektů bez zásahů do jejich celistvosti. Za vadu materiálu nebo výrobku považujeme nesprávné chemické složení, vady struktury, odchylky od požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností, necelistvosti (trhliny, praskliny), dutiny (bubliny, póry, staženiny, řediny), vměstky (struskovitost, nekovové a kovové vměšky), tvarové vady, koroze, opotřebení aj. Pro získání správných výsledků je však zapotřebí určitá zručnost a teoretická znalost. I když manuální testování obnáší řadu výhod vyplývajících z intuice a zkušenosti kvalifikovaného pracovníka, nelze vyloučit lidské pochybení s možnými nedozírnými následky. Z tohoto důvodu se dnes ve výrobním procesu budují zcela automatizované systémy umožňující jak testovat vybrané výrobní vzorky, tak 100% výrobní kontrolu. Manuální testování ale nelze nahradit např. při revizi letadel, dopravních prostředků apod. Obvykle se manuální metody také používají při podrobnější analýze vyřazených objektů z automatizovaných defektoskopických linek. Cílem technické diagnostiky není jen vyřazení vadných výrobků, ale také ujištění, že dobré výrobky jsou dle technických podmínek provozuschopné. Existuje řada defektoskopických metod, ale není žádná jednotlivá metoda, která by byla jednoznačně použitelná k pokrytí všech požadavků za všech okolností. Při volbě metody je nutné vycházet z řady faktorů (mechanické a dle použité metody také elektromagnetické vlastnosti testovaného materiálu, rozměry objektu, okolní prostředí, umístění objektu z hlediska přístupnosti aj.). Současným trendem diagnostických metod je kromě zjištění vady také stanovení typu a rozměrů této vady a její lokalizace v objektu. V případě zjištění vady je nutné rozhodnout o její závažnosti z hlediska předpokládaného použití výrobku. Pokud výrobní proces připustí maximální velikost vady a četnost jejich výskytu, znamená to zvýšené nároky na závěry z defektoskopického testu. Jde o to, zda bude takový díl označen jako zmetek, opraven, nebo z hlediska jeho ceny ponechán pro provoz se sníženými provozními parametry.

## 2.1. Vizuální metody [1]

Odražené světlo od objektu se vyhodnocuje okem nebo na světlo citlivými detektory.

**Výhody:** nežádoucí změny, tj. vady materiálu, tvarové odchylky a odchylky rozměrů, kvalitativní úroveň jakosti povrchu apod. jsou při vizuálním zkoušení vyhodnocovány přímo a okamžitě, materiálově neomezené možnosti použití, přenosné vybavení, bez přípravy objektu, minimální zaškolení.

**Nevýhody:** lze vyhodnotit pouze povrchové defekty, je nutné osvětlení a přístup k objektu.

## 2.2. Kapilární metody [1]

Kapalina obsahující viditelné nebo fluorescenční barvivo je nanášena na povrch objektu a necelistvosti se zviditelní na základě kapilárního působení.

**Výhody:** použitelnost prakticky pro všechny nesavé materiály bez povrchového pokrytí a čisté, metoda je citlivá na velmi malé necelistvosti, požadavek minimální zkušenosti, přenosné vybavení.

**Nevýhody:** lze vyhodnotit pouze povrchové otevřené necelistvosti, nutná předcházející příprava objektu, rychlost metody do 30 min., unavující vizuální hodnocení.

## 2.3. Magnetické metody [1]

Objekt je zmagnetizován a je vyhodnocováno magnetické rozptylové pole buď zviditelněním necelistvosti prostřednictvím malých feromagnetických částic nanesených na povrch nebo elektrickými senzory magnetického pole.

**Výhody:** metoda je citlivá na malé necelistvosti, zařízení může být přenosné, v porovnání s kapilárními metodami jde o metodu relativně rychlou, požadavek minimální zkušenosti, možnost využití v automatických linkách.

**Nevýhody:** omezení na povrchové a těsně podpovrchové defekty, lze použít pouze na feromagnetické materiály, citlivost je závislá na orientaci magnetického pole vůči necelistvosti, povrch objektu nesmí být hrubý, objekt musí být přístupný, je nutná předcházející příprava objektu, je nutná demagnetizace po testu.

## 2.4. Elektromagnetická defektoskopie vířivými proudy [1]

Metoda je založená na vyhodnocení výsledného magnetického toku budicí cívky a na toku vy buzených vířivých proudů v testovaném objektu. Hustota vířivých proudů se mění vlivem necelistvosti v materiálu.

**Výhody:** rychlá a citlivá metoda, možnost využití v automatických linkách.

**Nevýhody:** použitelnost jen pro elektricky vodivé materiály, omezení frekvenčně závislou hloubkou vniku elektromagnetického pole, povrch objektu musí být přístupný pro umístění sondy a hladký, je požadována značná zkušenost obsluhy, velká časová náročnost při manuálním použití.

## 2.5. Akustická emise [1]

Vznikající a rozšiřující se necelistvost v materiálu nebo unikající kapalina z potrubí a nádob generuje elastické vlny, které se na povrchu objektu snímají piezoelektrickými senzory.

**Výhody:** možnost monitorování velké plochy z hlediska rozrušování struktury a predikce závažných defektů.

**Nevýhody:** senzor nebo zvukovod k senzoru je v kontaktu s povrchem tělesa, je zapotřebí umístit současně více senzorů, pro vyhodnocení je nutné zpracování změřených signálů.

## 2.6. Defektoskopie prozařováním [1]

Zkoušky prozařováním jsou založeny na vyhodnocování závislosti absorpce (koeficientu záření) rentgenového nebo gama záření v důsledku přítomnosti případných povrchových nebo vnitřních necelistvosti v testovaném materiálu.

**Výhody:** použitelnost pro většinu materiálů včetně kompozitu nezávisle na jejich tvaru a povrchu.

**Nevýhody:** omezení tloušťky dle hustoty materiálu, kritická vzájemná orientace rovinné necelistvosti a paprsku záření, nebezpečné radiační prostředí, požadavek značné zkušenosti při interpretaci vyhodnocení vady, nemožnost lokalizace hloubky vady.

## 2.7. Infračervená defektoskopie [1]

Změna struktury a rozměru tělesa, u něhož dochází k vývinu nebo absorpci tepla, se projeví změnou jeho povrchové teploty. K vyhodnocení teploty se používají pyrometry a termovize.

**Výhody:** použitelnost pro většinu materiálů včetně kompozitu, citlivost na velmi malé změny teploty, aplikace jak pro malé tak velké plochy povrchu tělesa, možnost průběžného záznamu signálu.

**Nevýhody:** metoda není efektivní pro trhliny v tenkém materiálu, k vyhodnocení vad je nutná zkušenost.

## 2.8. Ultrazvukové metody [1]

Vysokofrekvenční akustické pulsy ze sondy prostupují objektem a odrážejí se zpět na strukturním rozhraní.

**Výhody:** velká citlivost na nečelistvosti uvnitř objektu, lze testovat většinu materiálů, okamžité výsledky testu, minimální příprava objektu.

**Nevýhody:** povrch objektu musí být přístupný a hladký pro umístění sondy, při kontaktních metodách je nutné vazební prostředí mezi sondou a objektem, citlivost metody závisí na orientaci akustického paprsku vůči orientaci nečelistvosti, je požadována velká zkušenost pro nastavení zařízení a vyhodnocení výsledků.

### **3. Vibrodiagnostika - principy, možnosti, postupy [7]**

Vibrace a hluk jsou průvodními jevy pracovních procesů všech strojních zařízení – výrobních strojů, dopravních prostředků, různých domácích spotřebičů apod. Nelze proto vibrace a hluk zcela z pracovního a životního prostředí úplně odstranit, lze je pouze redukovat na přijatelnou hodnotu.

Vibrace a hluk jsou proto součástí životního prostředí nejen lidí, ale vlastně všech živých organismů na naší Zemi. Vibrace a hluk působí negativně na živé organismy. Z tohoto důvodu je v současnosti jedna z nejdůležitějších úloh celé společnosti cílevědomá systematická starost o ochranu a tvorbu životního prostředí.

Vibrace pružných médií (pevných látek, tekutin) vznikají v důsledku časově proměnných silových účinků, působících v některých místech sledovaného média. Vibrace se pak šíří od zdroje do ostatních částí prostředí.

Hlukem je nazýván jakýkoliv nežádoucí, obtěžující a rušivý zvuk. Je obtížné jinak definovat hluk, neboť velmi záleží na vztahu člověka k danému zvuku. Pro někoho může být daný zvuk nepříjemným hlukem, ale pro jiného příjemným a zábavným poslechem. Zvuk je proto obecnějším pojmem než je hluk.

Hluk vzniká v oblastech neustálého proudění tekutiny (plynu, kapaliny), nebo kde dochází k výrazným změnám tlaku (vzniká tlakový spád) a tím dochází ke vzniku vlnění příslušného média (ventilátory, kompresory, sání a výfuk spalovacích motorů, únik stlačeného plynu nebo kapaliny z potrubí nebo trysky, výbuch apod.).

#### **3.1. Hluk [7]**

Nadměrný hluk zaujímá v řadě faktorů, ohrožujících naše životní a pracovní prostředí, stále důležitější místo. V programech ochrany životního prostředí, které realizují vyspělé státy světa se řadí hluk zpravidla hned za znečištění ovzduší exhalacemi a za ochranu vodních zdrojů. Jednou nejzávažnější vlastností zvuku a hluku je, že se šíří na poměrně velké vzdálenosti, stovky metrů i více. Přitom se šíří stejně dobře jako vzduchem, vodou i pevnými látkami (např. konstrukcí obytných domů a průmyslových budov).

Komplexní řešení tvorby a ochrany životního prostředí se vyžaduje uvědomělý a aktivní postoj všech členů společnosti. Proto každý z nás by měl mít základní znalosti i z oblasti ochrany a tvorby životního prostředí a znát základní principy jak jej pozitivně ovlivnit.

V literatuře se uvádí, že nárůst hlučnosti v našem životním prostředí je asi 1 dB(A) za rok. Tato realita nás varuje před dalším možným nepříznivým vývojem.

Nebezpečí totiž spočívá hlavně ve skutečnosti, že lidský organismus prakticky nemá proti působení vibrací a hluku výraznější ochranné mechanismy.

Mezi závažné úkoly, před kterými stojí naši konstruktéři, technologové a výzkumní pracovníci je jednak snižování hmotnosti konstrukcí strojů a dalších strojních zařízení, jednak současně zvyšovat jejich výkonnost a produktivitu. Tyto intenzivní faktory mají často výrazný vliv na zvyšování vibrací i hlučnosti sledovaných strojních zařízení. Pak je nutno hledat cesty jak tyto negativní dopady intenzifikačních faktorů vhodně eliminovat.

S tím souvisí snižování hlučností strojů v pracovním procesu, ale i zařízení spotřebitelského charakteru. Snahou je také zvýšit zájem o vyráběná zařízení na našich i světových trzích. V tržní ekonomice je totiž mezi zákazníci menší zájem o strojní zařízení, vykazující zvýšené vibrace a hluk.

### **3.2. Vibrace [14]**

Vibrace, kmitavý pohyb těles a vlnivý pohyb hmotného prostředí je jen zvláštním druhem pohybu mechanických soustav. Pohybem se obecně rozumí změna stavu s časem. Pojímáme-li pohyb takto, pak ovšem kmitavý a vlnivý pohyb vykonávají i nemechanické soustavy, např. soustavy elektrické a magnetické.

V širším smyslu slova se kmity rozumí každý pohyb, který probíhá střídavě a s omezenou amplitudou kolem určité rovnovážné polohy. Kmity, které se vyznačují takovou pravidelností, že libovolná výchylka se opakuje se stálou periodou  $T$ , se nazývají periodické. Zvláštním případem kmitů periodických jsou kmity harmonické, které mají nejjednodušší matematický popis.

### 3.2.1. Harmonické kmity [5,14]

Hmotný bod nebo těleso, které se pohybuje po přímé dráze tak, že jeho okamžitou polohu lze popsat jednou z rovnic (1), koná harmonické kmity (harmonické oscilace).

$$x = \Lambda \cdot \cos \omega t \quad (1a)$$

$$y = \Lambda \cdot \sin \omega t \quad (1b)$$

kde:  $\Lambda$ ...amplituda – maximální hodnota kmitající fyzikální veličiny

$\omega$ ...úhlová frekvence(kmitočet) ( $s^{-1}$ )

$t$ ...čas

$x, y$ ...poloha

Amplituda jako maximální hodnota kmitání je základní charakteristikou harmonického kmitání. Podle toho, jakou veličinu kmitů sledujeme, jestli zrychlení, rychlost nebo výchylku, je amplituda udávána v  $ms^{-2}, ms^{-1}$  a v m. Pro amplitudy těchto veličin platí:

amplituda výchylky =  $x$

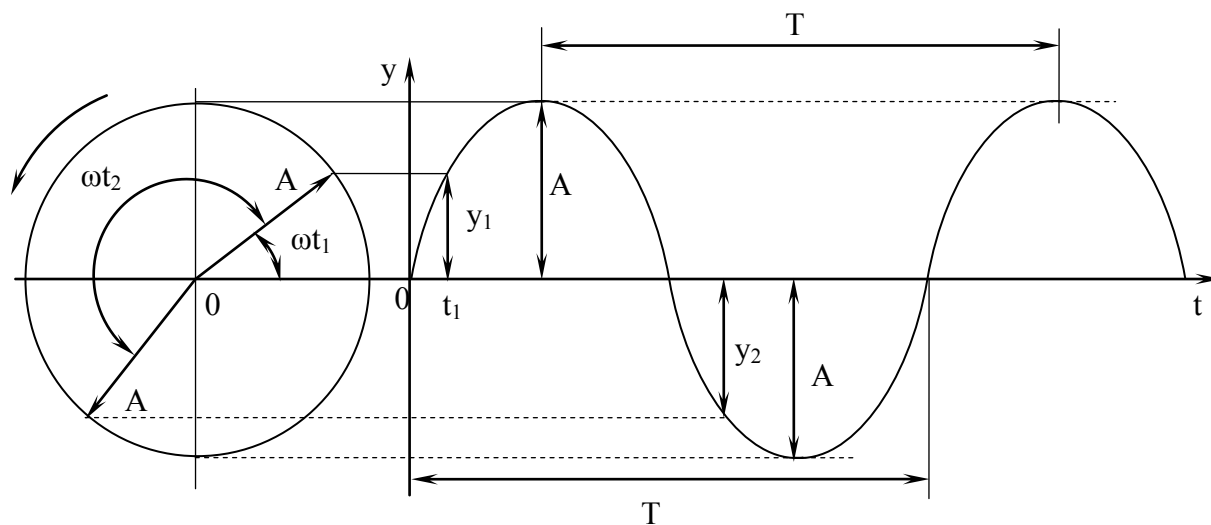
amplituda rychlosti =  $\omega y$

amplituda zrychlení =  $\omega^2 y$

Obvykle se dává přednost vyjádření kmitů ve tvaru (3.1b).

Časový rozvoj pohybu, tj. závislost polohy  $y$  na čase  $t$ , je vyjádřen na obrázku (obr. 1) Vzdálenost hmotného bodu (tělesa) od počátku v určitém čase se nazývá výchylka. Na obrázku je zakreslena výchylka  $y_1$  v čase  $t_1$  a výchylka  $y_2$  v čase  $t_2$ . Poloha  $y = 0$  se nazývá rovnovážná poloha.





Obr. 1 Perioda kmitu (doba kmitu) – T [14]

Perioda je určena rovností (2):

$$\omega T = 2\pi \quad (2a)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2b)$$

S ohledem na periodičnost funkce sinus platí (3):

$$A \cdot \sin(\omega t + 2\pi) = A \cdot \sin \omega t \quad (3)$$

Frekvence (kmitočet) f je definován vztahem(4) a jeho jednotkou je hertz (Hz):

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (4)$$

kde: f...je frekvence (Hz, s<sup>-1</sup>)

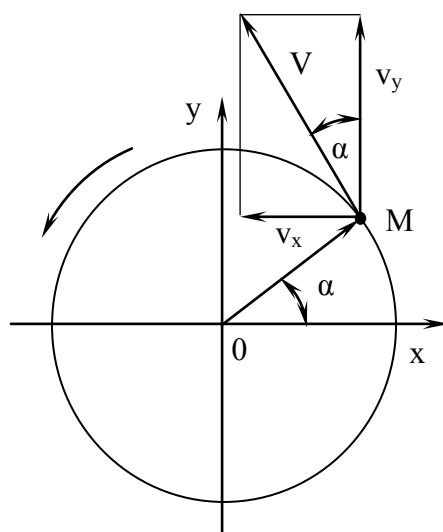
Rychlost harmonického pohybu určíme jako složku v<sub>y</sub> obvodové rychlosti V. Z obrázku (obr. 2) je patrné, že platí:

$$v_y = V \cos \alpha \quad (5)$$

kde: v<sub>y</sub>...je rychlost harmonického pohybu (m.s<sup>-1</sup>)

V...je obvodová rychlost (m.s<sup>-1</sup>)

α...je úhlová dráha (rad)



Obr. 2 Obvodová rychlost a její rozklad [14]

### 3.2.2. Neharmonické periodické kmity [5]

Neharmonické ale periodické kmitání vznikne složením jednoduchých harmonických kmitů jejichž poměry kmitočtů jsou racionální čísla. Důležité je, že tato poučka platí i opačně, takže každý neharmonický signál s periodickým průběhem lze rozložit na řadu harmonických složek.

Neharmonické, periodické kmity jsou charakterizovány těmito veličinami:

- základní perioda je nejdelší perioda kmitů
- základní kmitočet je převrácenou hodnotou základní periody
- výkmit je maximální hodnota výchylky, rychlosti nebo zrychlení kmitání během základní periody
- rozkmit je rozdíl kladné a záporné extrémní hodnoty kmitů během základní periody
- harmonická složka (harmonické složky) je harmonický kmit s kmitočtem, který je celistvým násobkem základního kmitočtu

### **3.2.3. Vlastní kmity, nucené kmity a rezonance [5]**

#### **Vlastní kmity soustavy**

Soustava, v níž působí na těleso jen elastická nebo kvazielastická síla, vykonává vlastní (zvnějšku neovlivňované) harmonické kmity. Soustava, ve které působí kromě elastické síly také odporující síly prostředí, vykonává vlastní tlumené kmity. Kmitočet vlastních kmitů soustavy (oscilátoru) se nazývá vlastní kmitočet soustavy (oscilátoru).

#### **Nucené kmity**

Působí-li na soustavu vnější periodická síla, vykonává soustava nucené kmity. Soustava, v níž má vnější periodická síla původ, se nazývá budící soustava. K tomu, aby došlo k nuceným kmitům, musí existovat mezi budící soustavou a oscilační soustavou s vlastními kmity určitá vazba. Takové dvě soustavy se pak nazývají vázané nebo spřažené. Vazba se hodnotí podle množství energie, kterou je schopna přenést z budící soustavy na vlastní oscilační soustavu.

#### **Rezonance**

Za předpokladu, že budící síla je harmonická, vykonává soustava schopná vlastních kmitů harmonické kmity, avšak s úhlovou frekvencí budící síly. Při dané vazbě je amplituda těchto kmitů současně ovlivněna růzností úhlových kmitočetů. Je-li rozdíl obou kmitočetů velký, je amplituda nucených kmitů velmi malá (při větším tlumení a slabé vazbě téměř nulová). Zmenšuje-li se rozdíl mezi oběma kmitočty, amplituda prudce narůstá a dosahuje výrazného maxima při rovnosti obou kmitočetů. Tento jev se nazývá rezonance.

V soustavě, která by nebyla tlumená, by při rezonanci vzrostla amplituda nucených kmitů nad všechny meze. U tlumených soustav je sice omezena, ale dosahuje vysokých hodnot i při velmi slabých vazbách. V soustavách, které mají velmi tlumené vlastní kmity, je rezonance nevýrazná až zanedbatelná.

Taková soustava vykonává pouze nucené kmity, jejichž amplituda skoro nezávisí na kmitočtu budící síly. Navenek se taková soustava chová, jako by byla schopna rezonance pro široký obor budících kmitočetů. (příkladem jsou různé ozvučnice používané v hudebních nástrojích).

Rezonance může mít velmi škodlivé účinky. Konstrukce z pružných materiálů jsou soustavy schopné vlastních kmitů. Působí-li na takové konstrukce periodická síla (např. od

motoru), vznikají nucené kmity a při rezonanci se může konstrukce rozkmitat tak, že překročí meze pevnosti materiálu. Takto se může poškodit i robustní konstrukce (tzv. rezonanční katastrofa).

### **3.3. Vliv vibrací a hluku na člověka [7]**

Lidský organizmus nemá pro registraci mechanického kmitání speciální smyslový orgán, takže jej vnímá jinými smysly. Mechanické kmity mohou na člověka působit celkově (dopravní prostředky) nebo lokálně (sbíječky, ruční vrtačky atd.).

V závislosti na frekvenci a amplitudy kmitání a také místa působení na tělo člověka vznikají nejčastěji poruchy činností některých orgánů a funkčních systému člověka:

- Celkové kmity s frekvencí (0,15 až 0,3) Hz zasahují především vestibulární funkci. Tyto poruchy se prezentují stavy utlumení provázené kroužením hlavy, žaludečními těžkostmi, narušováním koordinace pohybů, dezorientaci a psychofyzickými iluzemi.
- Do 1Hz člověk kmity vnímá hlavně zrakem
- Do 10Hz kmity s vyššími amplitudami jsou vnímány vestibulárním systémem, který registruje změnu polohy
- Nad 20Hz člověk vnímá tyto kmity i sluchem

Při působení vibrací na člověka dochází k vynucenému kmitání některých částí lidského organismu nebo celého těla, tj. dochází k jejich rezonanci. Znalost těchto jevů je důležitým předpokladem pro správnou konstrukci strojů a různých zařízení, se kterými je člověk v bezprostřední interakci.

Znalost mechanických vlastností lidského těla je nutná při jeho modelování jako mechanické soustavy. Lidský organizmus se chová jako mechanická soustava o větším počtu stupňů volnosti. Používané diskrétní modely lidského těla lze použít přibližně do frekvence 100Hz.

Rezonanční kmitočty jednotlivých částí těla:

- základní rezonance těla e směru svislém je (3 až 6)Hz
- základní rezonance těla ve směru vodorovném 3Hz

- systém hlava-krk-ramena okolo (20 až 30)Hz
- systém břišně-hrudní (3 až 6)Hz
- systém čelist-lebka (100 až 200)Hz
- rezonance očních bulv (20 až 60)Hz je spojena s neostrým viděním

V důsledku vibrací dochází k dynamickému namáhání částí lidského těla a jeho vnitřních orgánů. To má za následek zhoršení oběhového systému lidského organismu, projevující se nejdříve jako únava a později jako poruchy vegetativní nervové soustavy.

Člověk se necítí dobře v prostředí s neobvykle nízkou hladinou hluku. Hodnoty blízké 20dB(A) většina lidí považuje za hluboké ticho a za nepříjemný stav. Z tohoto důvodu v kosmických kabinách bylo nutno vytvářet vhodné hlukové pozadí, aby se kosmonauti cítili jakoby v přirozeném prostředí.

Při hladině hluku nad 130dB(A) se účinky hluku zpravidla mění na bolest sluchového orgánu (práh bolesti). Při hladinách hluku nad 160dB(A) dochází již k poruše bubínku sluchového orgánu..

Obtěžující účinky hluku závisí na více faktorech:

- na intenzitě a frekvenci
- na době trvání a šíře jeho frekvenčního pásma
- na rozdílu mezi hlukem zdroje a hlukem pozadí
- na frekvenci přerušování
- na impulznosti hluku a jeho neočekávání
- na osobních dispozicích člověka a jeho vztahu ke zdroji hluku
- na době vnímání (časová expozice) hluku subjektem apod.

Negativní účinky na zdraví člověka se především projevují v oblasti sluchového orgánu. Nejčastějším projevem poškození sluchového orgánu je trvalý posun sluchového prahu slyšitelnosti. Mimosluchové účinky hluku:

- podráždění vegetativního a nervového systému, projevující zvýšenou frekvencí srdce, zvýšením krevního tlaku, zhoršením látkové výměny, organismus je stresovaný atd.

- poruchy spánku, projevující se jeho nedostatečnou hloubkou a trváním, dochází k narušení nutných regeneračních pochodů v organismu
- psychické poruchy, projevující se podrážděností, apatií, bolestí v zažívacím traktu a celkovou nervozitou
- poruchy výkonnosti, projevující se ve snižování pozornosti a reakčního času, což má za následek snížení produktivity a také zvýšení počtu úrazu v provozech

### **3.4. Vliv vibrací a hluku na stroje a pracovní procesy [7]**

Vibrace mají nepříznivý vliv nejen na člověka a živé organismy, ale i na pracovní či výrobní stroje a jejich části. Vibrace zhoršují pracovní podmínky pracovních procesů včetně technologických pracovních procesů. Tím se zhoršuje kvalita opracovávaných ploch a povrchů výrobku.

Vibrace ostří nástroje způsobují změnu řezné rychlosti obrábění, čímž se výrazně snižuje životnost nástrojů. Vibrace nástrojů a obrobků rovněž zhoršují přesnost opracovávaných součástí. Vibrace stroje způsobují jeho výrazná dynamická namáhání včetně vzniku únavových poruch jeho uzlů. Tím dochází ke snížení spolehlivosti stroje a celkové jeho životnosti.

Vibrace nedovolují plné využití výkonu stroje, neboť při zvýšených vibracích nelze například obrábět a tím samozřejmě dochází ke snížení produkce daného stroje. Na udržování vibrací a hluku se spotřebuje část mechanické energie, takže se tím zhoršuje mechanická účinnost stroje.

Mechanických kmitů lze naopak výhodně využít např.:

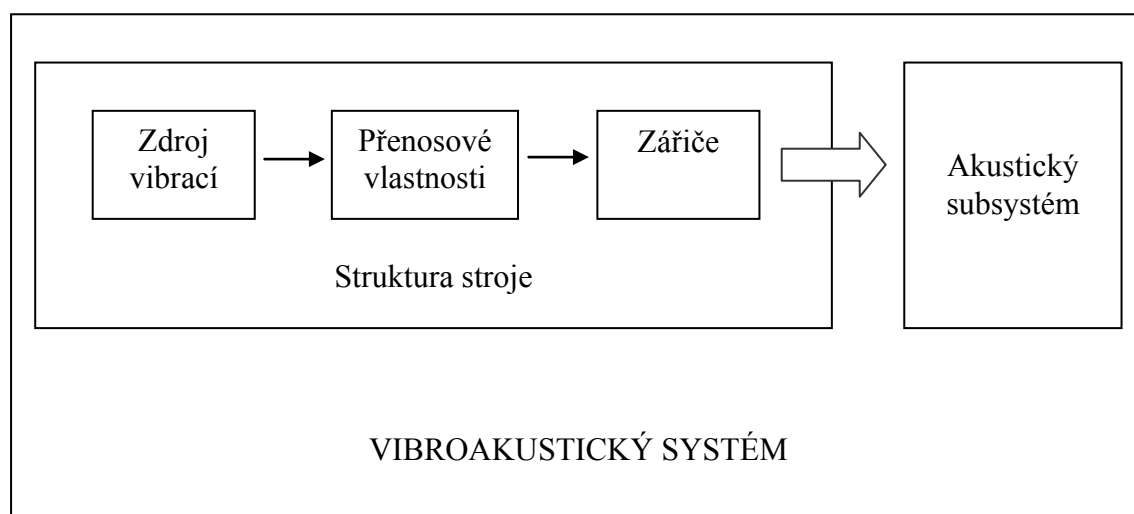
- u některých technologických pracovních procesů (vibrační síta, vibrační silniční válce, vibrační obrábění apod.)
- vibroakustických signálů generovaných stroji lze použít při diagnostice vad sledovaných strojů z jejich uzlů
- v hudební oblasti (konstrukce hudebních nástrojů)

### 3.6. Metody boje proti vibracím a hluku [7]

Problematika snižování vibrací různých zařízení je náročnou technikou disciplínou. Nelze doporučovat jakékoliv amatérské postupy, neboť různé amatérské doplňky mohou účinek vibrací nejen zvýšit, ale současně mohou způsobit i vážné poškození vlastního mechanicky kmitajícího zařízení.

Při sledování hlučnosti strojů je nutno sledovat celý řetězec od zdrojů vibrací (budící síly) až po akustické prostředí s obsluhou stroje (obr. 3). Řetěze se skládá ze čtyř bloků, přičemž každý z těchto bloků může výrazně ovlivnit hladinu hluku. Z tohoto důvodu je nutno věnovat patřičnou pozornost každému z těchto čtyř bloků.

První tři jsou součástí struktury stroje (subsystém struktury), čtvrtý je součástí akustického subsystému. Oba tyto subsystémy tvoří společný vibroakustický systém (strukturálněakustický systém).



Obr. 3 Vznik a šíření hluku a vibrací [7]

Podle zásahu do jednotlivých bloků dle obr. 3 se metody vibrací a hlavně hluku dělí na metody:

- primární (aktivní metody)
- sekundární (pasivní metody)

### **a) primární metody**

Mezi tyto metody patří úpravy a snížení budících silových účinků, zlepšují se přenosové vlastnosti struktury strojů (frekvenční ladění) a upravují se zářiče hluku (povrchy strojů).

Je nutno především věnovat zvýšenou pozornost výrobě jednotlivých součástí stroje, jejich vyvažování, opracování, přesnosti, technologické montáži, vhodného výběru konstrukčního materiálu, použití vhodných tlumících vložek, vhodné tvarování potrubí zamezení vzniku nestacionárního proudění kapaliny apod. Stejně dobře lze použít pružného uložení stroje za účelem snížení přenosu vibrací ze stroje do okolního podloží a obráceně.

Dále je vhodné provádět úpravu nebo náhradu příslušného technologického pracovního procesu jiným méně hlučným (náhrada nýtováním např. šroubovým spojením apod.).

### **b) sekundární metody**

Sekundární metody se uplatňují tam, kde nelze použít některou z primárních metod. Patří mezi tyto metody zejména:

- Vibrační a hlukové izolace zdrojů hluku (např. strojů) od chráněného prostoru např. vhodnou karotáží, kryty a uložení zdroje hluku. Cílem těchto metod je zamezit šíření mechanické a akustické energie do okolního prostoru nebo na sousední stroje, přístroje, konstrukce apod.
- Vhodné prostorové rozmístění hlučných strojů a zařízení v daném prostoru tak, aby výsledná hlučnost dosahoval minimální hodnoty.
- Správné projektování výrobních hal, tj. zabezpečit dostatečnou prostornost hal se stěnami s vysoce pohltivými materiály, jednotlivé zdroje hluku oddělit zvukoizolačními stěnami apod.
- Využíváním osobních ochranných prostředků (sluchové chrániče, přilby, vhodné pracovní oděvy, antivibrační rukavice, obuv atd.). Tyto pomůcky je nutno použít tam, kde nebylo možné upravit hluk výše uvedenými metodami, neboť tyto pomůcky zatěžují pracovníka a ztěžují jeho pracovní aktivitu.
- Mezi sekundární metody patří i tzv. aktivní řízení (regulace) zvuku, kdy se využívá jevu interference zvukových vln primárního a sekundárního zdroje.



### 3.7. Rozbor závad rotačních systémů dle pásma [16]

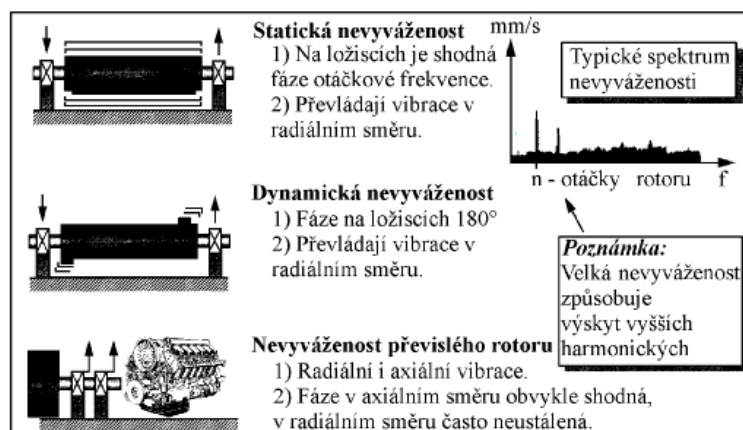
Příklady spekter typických poruch rotačních součástí a jejich spekter jsou uvedeny na obr. 4 – 13 Příklady ukazují nevyváženost, nesouosost, ohnutí, excentricitu, mechanické uvolnění, zadírání rotoru, poruchy kluzných ložisek, poruchy valivých ložisek a poruchy převodovky.

#### 3.7.1. Oblast nízkých kmitočtů [1,16]

Odpovídá kmitočtovému pásmu otáček hřídele. Kmitočtové spektrum je od 40 % do několikanásobku základní harmonické odpovídající otáčkám komponenty stroje a obsahuje následující diagnostické informace.

##### Nevyváženost hřídele

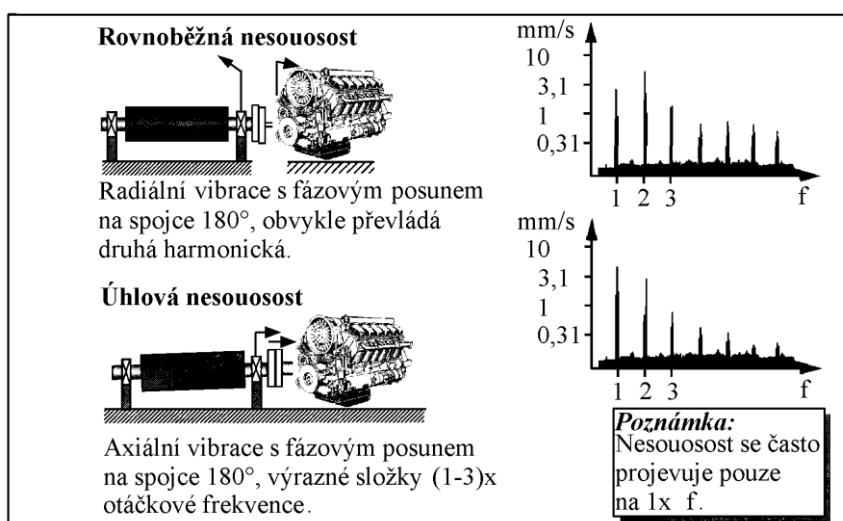
Je reprezentovaná nerovnoměrným rozložením hmoty točivé části stroje okolo jeho osy otáčení, přičemž hlavní osa setrvačnosti se neshoduje s osou rotace. Nevyváženost může být statická, momentová, dynamická nebo dynamická při letném uložení setrvačné hmoty. V praxi se prakticky nevyskytuje nevyváženost statická (osa rotace  $O_1$  je rovnoběžná s osou setrvačnosti  $O_2$ ) a nevyváženost momentová (osa rotace  $O_1$  není rovnoběžná s osou setrvačnosti  $O_2$ , ale těžiště  $T$  je na ose setrvačnosti a síla  $F_y = F_2$ ). Nejčastějším typem je nevyváženost dynamická. Dynamická nevyváženost způsobuje vznik vibrací stroje na frekvenci shodné s jeho otáčkovou (základní) frekvencí a obvykle i na dvojnásobku této frekvence, a to jak v radiálním, tak v axiálním směru dle, přičemž převládají vibrace v radiálním směru.



Obr. 4 Statická a dynamická nevyváženost rotačních součástí [16]

## Nesouosost

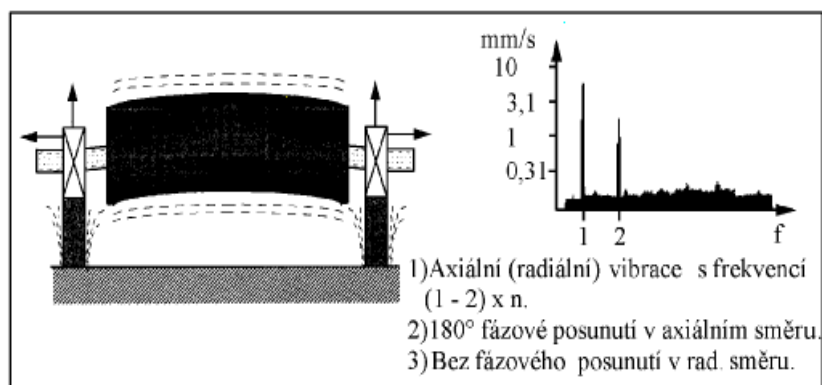
Může být paralelní (tj. rovnoběžná) nebo úhlová. Při úhlové nesouososti jsou charakteristické vibrace v axiálním směru fázově navzájem posunuté přes spojku o  $180^\circ$ . Typická je složka na frekvenci shodné s otáčkovou frekvencí, ale nejsou výjimečné další harmonické složky. Při paralelní nesouososti jsou charakteristické vibrace v axiálním směru fázově také navzájem posunuté přes spojku o  $180^\circ$ . Typická je složka na dvojnásobku otáčkové frekvence, přičemž její amplituda bývá větší než u základní složky.



Obr. 5 Nesouosost rotačních součástí [16]

## Ohnutý hřídel

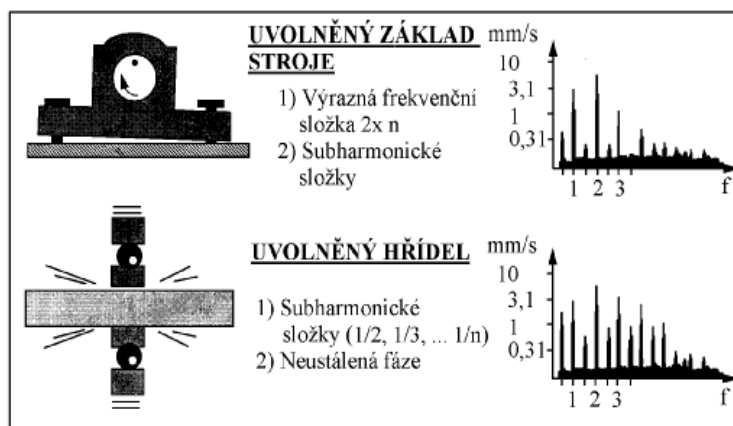
Způsobí vibrace na základní a na dvojnásobné frekvenci otáček.



Obr. 6 Ohnutí rotační součásti (hřídele) [16]

## Mechanická vůle

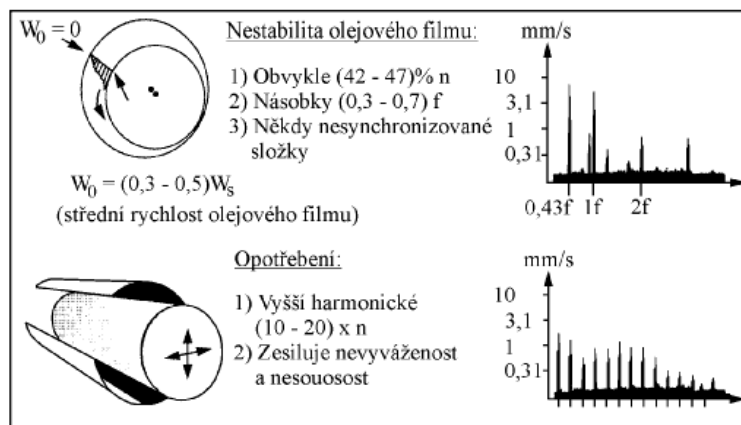
Mezi zdroje kmitů patří mechanické vůle (např. uvolnění kotvicích šroubů, vůle ložiska v domku aj.), strukturální vůle a deformace základů, které při uvolnění generují násobky (až do dvacetinásobku) harmonických a násobky subharmonických složek (tj. 0,5 resp. 0,3 základní harmonické) otáčkové frekvence. Vibrace jsou převážně v radiálním směru, ale jsou často silně směrově závislé v oblasti  $\pm 30^\circ$ .



Obr. 7 Uvolnění mechanických částí [16]

## Poruchy kluzných ložisek

Nestabilita olejového filmu u kluzného ložiska generuje radiální kmitů dle obr. 8.



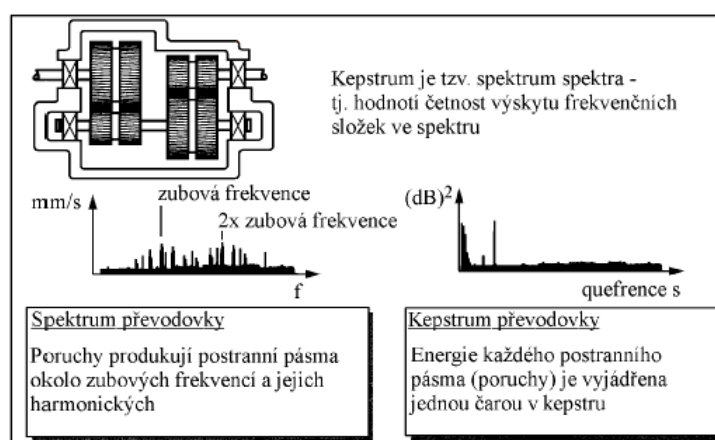
Obr. 8 Porucha kluzných ložisek [16]

### 3.7.2. Oblast středních kmitočtů [1,16]

Odpovídá kmitočtovému pásmu zubových frekvencí ozubených kol převodovek a závad na elektrických motorech.

#### Poruchy převodovek

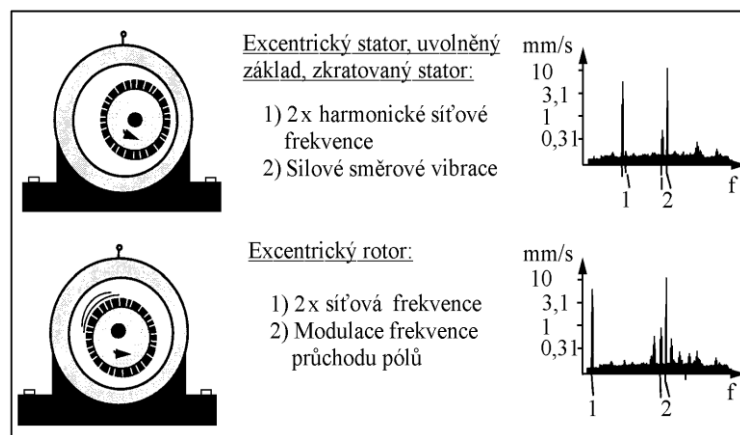
Základem analýzy převodovek jsou zubové frekvence, které vznikají při záběru dvou nebo více ozubených kol a závisí na počtu zubů a rychlosti otáčení jednotlivých kol. Zubová (také záběrová) frekvence se vyskytuje i u nových bezvadových převodovek a je dána periodicky proměnnou tuhostí spojení ozubených kol v záběru (mění se místo styku a tuhost se nemění sinusově) a rázy při styku dvou zubů vlivem neideálního tvaru profilu zubu. Následkem této skutečnosti jsou ve spektru kromě základních spektrálních složek vyšší harmonické a boční pásma způsobené amplitudovou modulací během otáčky kola. Nosný signál amplitudové modulace je dán zubovou frekvencí, modulační signál pak otáčkovou frekvencí. Oba dva signály obsahují vyšší harmonické.



Obr. 9 Poruchy převodovek [16]

#### Poruchy elektrických strojů

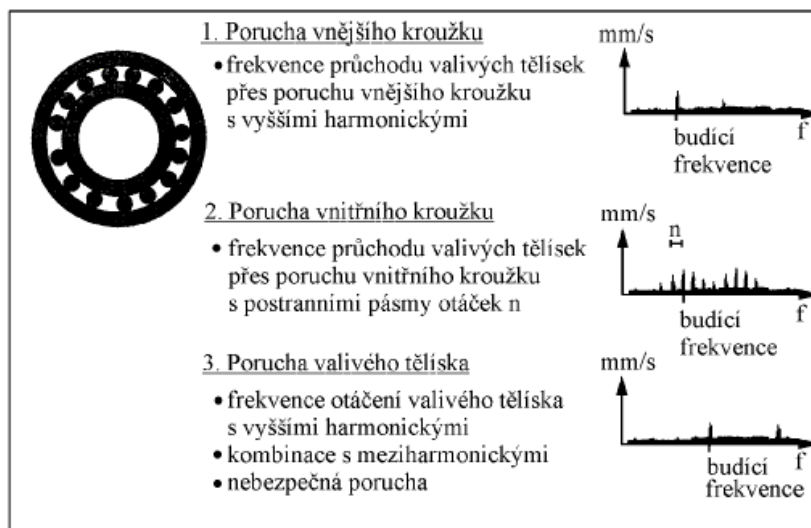
Výstřednost rotoru, proměnná vzduchová mezera a defekty v železe rotoru se ve spektru projeví navýšením druhé harmonické složky síťové frekvence včetně postranního pásma vůči složce první harmonické.



Obr. 10 Poruchy elektrických strojů [16]

### 3.7.3. Oblast vysokých a velmi vysokých kmitočtů [1,16]

Odpovídá kmitočtovému pásmu závad valivých ložisek. U ložisek dochází povrchovou únavou materiálu ložiskových elementů k vydrolování materiálu povrchové vrstvy (tzv. pitting), ořezu s nárůstem vůle, korozi, rýhování, prohlubeninám a poruchám klece.



Obr. 11 Porucha valivých ložisek [16]

### 3.5. Senzory [3, 10, 11,15]

Při měření vibrací by měl výstupní signál co nejvěrněji odpovídat průběhu mechanického kmitání, toto není úkol jednoduchý, a proto se tato kapitola může zdát příliš rozsáhlá. Pokusím se zde nastínit pouze to nejdůležitější z této problematiky.

Je možno uvést, že ve své podstatě existují dva základní typy snímačů pro monitorování vibračního stavu.

- **Seismická zařízení**, která se běžně instalují na konstrukci stroje a jejichž výstup je mírou absolutních vibrací konstrukce
- **Snímače relativní výchylky**, které měří vibrační výchylku a střední polohu mezi rotujícími a nerotujícími elementy.

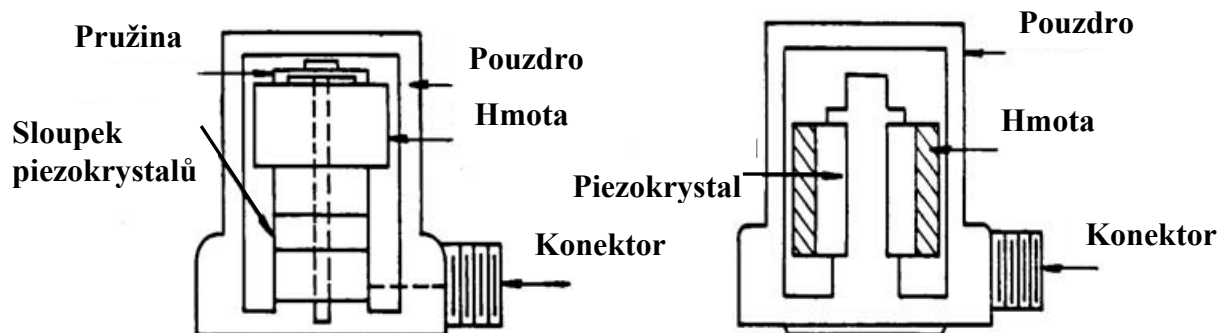
Existují jistá měření na strojích, která vyžadují jiné typy snímačů, jako jsou tenzometry. Avšak jejich použití pro monitorování vibračního stavu je méně obvyklé.

Vlastní výběr odpovídajících snímačů závisí na dané aplikaci, tzn. měřené veličině (výchylka, rychlost, zrychlení) vibrací, zda měříme absolutní nebo relativní vibrace (relativní např. vibrace hřídele vůči ložiskovému domku), zda provádíme měření nízkofrekvenčních, či běžných frekvenčních vibrací apod. Takže snímače pro monitorování stavu vibrací pak jsou následující.

- Nejrozšířenější jsou **akcelerometry**, jejichž výstup může být zpracován tak, aby dával libovolnou veličinu (zrychlení, rychlost, výchylku vibrací). Akcelerometr je seismické zařízení, které generuje výstupní signál úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Obecně se akcelerometry instalují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje.

Akcelerometry jsou dostupné s různými montážními rezonančními frekvencemi, v typickém případě od 1 kHz výše. Obecně se doporučuje, aby lineární rozsah namontovaného akcelerometru pokrýval sledované frekvence. Je obvyklé integrovat výstup z akcelerometru tak, aby dával signál úměrný rychlosti. Avšak je nezbytné dávat pozor při dvojnásobné integraci na výchylku, zejména při nízkých frekvencích. Akcelerometry jsou dostupné v různých velikostech. Jsou charakterizovány velkým dynamickým rozsahem (1 ku  $10^6$ ) a širokým frekvenčním rozsahem. Jsou přednostně používány v aplikacích s malými objekty majícími

malou montážní plochu, při vysokých teplotách prostředí nebo v silných magnetických polích. Typický akcelerometr obsahuje jeden nebo několik piezoelektrických krystalových elementů. Piezoelektrický krystal vytváří elektrický náboj, který je úměrný působící síle, a podle jeho umístění a hmoty ve snímači rozeznáváme dva druhy akcelerometru, tlakový(obr. 12) a smykový(obr. 13)



Obr. 12 Tlakový akcelerometr [15]

Obr. 13 Smykový akcelerometr [15]

- **Snímač rychlosti** vibrací, jehož výstup lze integrovat na výchylku vibrací. Snímač rychlosti je seismické zařízení, které generuje napěťový signál úměrný mechanické vibrační rychlosti tělesa. Obecně se snímače rychlosti montují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje. Typický snímač rychlosti vibrací má uvnitř snímače cívku, která vlivem vibrací kmitá v poli permanentního magnetu.
- **Bezdotyková sonda** Jejíž výstup je přímo úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotujícími a nerotujícími elementy stroje (používá se u orbitální analýzy). U rotujících strojů zejména u velkých rozhodujících turbinových strojů, a u strojů, u nichž hmotnost nosné konstrukce je velká ve srovnání s hmotností rotoru, může být nezbytné měřit relativní výchylku mezi rotorem a konstrukcí statoru. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které může přímo ověřit vibrační výchylku rotujícího hřídele vůči stacionárnímu ložisku nebo skříni stroje. Snímač výchylky dává střídavou složku pro vibrační pohyb a stejnosměrnou složku pro polohu. Když je snímač výchylky použit v kombinaci se seismickým snímačem na skříni, jehož signál je integrován tak, aby dával výchylku, lze získat měření absolutní výchylky hřídele tak, že se vektorově sečtou dva

signály výchylky. Pokud je fázový posun výstupních signálů seismického snímače a snímače výchylky různý, musí být tento kompenzován v zařízení na úpravu signálů pro kombinaci snímačů. Většina používaných snímačů výchylky pracuje na principu vířivých proudů. Cívka, kterou prochází vysokofrekvenční střídavý proud generuje vysokofrekvenční magnetické pole. Pokud jsou do tohoto pole vloženy elektricky vodivé materiály (například hřídel stroje), jsou v materiálu generovány vířivé proudy, které berou energii z vysokofrekvenčního magnetického pole.

V praxi je možno se setkat i s pojmem **duální snímače** (sondy). Jedná se o snímače, které měří absolutní a relativní vibrace hřídele, tzn. jedná se o kombinaci bezdotykového snímače na vířivé proudy a seismického snímače rychlosti.

Správné měření vibrací strojů je v rozhodující míře závislé na správném přenosu pohybu na snímače, o tom rozhoduje **přípevnění snímačů**. Doporučený způsob uchycení závisí na přístupnosti, vhodnosti, ekonomické a technické úvaze. Danou problematikou se zabývá norma ČSN ISO 5348. Je nutno uvést, že způsob uchycení nejvýrazněji ovlivní frekvenční odezvu snímače, zejména při měření na vysokých frekvencích.

Ve shrnutí je pak možno uvést, že k základním požadavkům na snímače vibrací patří:

- **Rezonanční kmitočet** - výrazně (min 5 x) vyšší než horní mezní kmitočet měření
- **Hmotnost** - snímače včetně úchyty by měla být min 10 x nižší než hmotnost vyšetřované soustavy
- **Těžiště** - přípevnění snímače má být nad těžištěm zdroje vibrací,

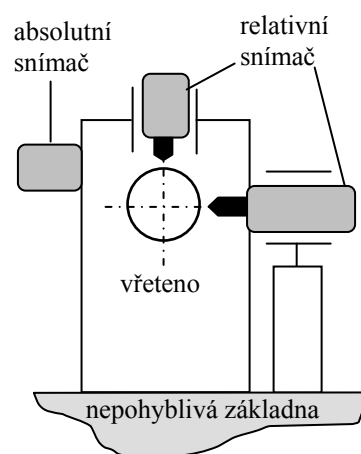
což v aplikaci na akcelerometry a nejrozšířenější druh měření - měření frekvenčních vibrací znamená, že:

- **Rezonanční frekvence** - je vyšší než vysokofrekvenční signál v měřené struktuře (některé požadavky leží nad 70 kHz)
- **Metody uchycení** - pevné uchycení pomocí šroubu je nejvhodnější způsob pro měření nad 10 kHz
- **Kalibrace** - u širokopásových akcelerometru je možnost kalibrace nad 10 kHz běžná (nejlehčí snímače kalibrují frekvenční odezvu až do 50 kHz).



## 4. Vibrodiagnostické metody pro sledování stavu rotačních strojů

Chvění a hluk jsou přirozenými projevy každého mechanického stroje při provozu. Vnímáme je svými sluchovými orgány ihned po spuštění stroje. Chvění je nejčastěji způsobeno rotujícími částmi (rotor, hřídel atd), ale také přímočaře se pohybujícími částmi (i pohybem plynů či kapalin). Tyto vibrace se přes hřídel přenášejí na ložiska a dále pak na skříň nebo rám. Ložiska a jejich okolí jsou tedy prvním místem, kde lze tyto projevy chodu zachytit. Hluk vycházející z povrchu stroje může být zachycen měřicím mikrofonem a může sloužit k určení technického stavu přístroje nebo jejich součástí. Nikdy však nezachytíme celý hlukový signál a tak část uniká do okolí. Poté se odráží od stěn místnosti nebo jiných strojů, vrací se zpět a je zachycován mikrofonem což bývá příčinou chyb měření a ztěžuje celkové vyhodnocení měření. Nejmodernější metoda měření tyto chyby snižuje na minimum, ale zatím není moc rozšířena. I přesto mikrofon jako bezkontaktní snímač, vzdálený od místa zdroje hluku, neposkytuje tolik informací o závadě jako dotykové snímače. Proto se častěji snímá mechanické chvění kontaktními snímači.



Obr. 14 Schéma měření relativního a absolutního chvění

Celkové chvění stroje se používá hlavně pro určení celkového stavu stroje. Pro stanovení technického stavu jednotlivých částí se provádí analýza chvění doplněná o fázi kmitání a charakteristickou veličinou ložisek, vypočítanou ze zrychlení, rychlosti či výchylky kmitů nebo z energetických parametrů kmitavého pohybu.

Měření chvění je zpravidla výhodné kombinovat s dalšími diagnostickými metodami a měřit i některé další provozní parametry, jako jsou například teplota, otáčky rozběhové a doběhové doby, tlak, síly, kroutící momenty, hlučnost, charakteristické veličiny olejových náplní, elektrické veličiny atd. Přehled možností indikace je uveden v tab. 1. Chvění lze v zásadě měřit:

- a) absolutně, seizmickými snímači
- b) relativně mezi dvěma body

Tab. 1 Vypovídací schopnost diagnostických signálů

	nevývahy rotorů	nesouosost hřídelů	poškození val. ložisek	poškození valivého vedení	poškození kluzného ložiska	poškození kluzného ložiska	poškození ozubeného kola	mechanické vůle	vady řemenů	vady elektromotorů
Chvění										
absolutní	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
relativní	x	x	x	x	x	x				
fáze kmitů		x								
charakt. ložisek			x	x						
Teplota		x	x	x	x	x				
Otáčky			x	x	x	x				
Rozběh			x	x	x	x				
Doběh										
Hlučnost			x	x			x	x		
Výkonnost stroje			x	x	x	x				
Stav olejových náplní			x	x	x	x	x			
Elektrické veličiny										x

V tabulce 1 jsou jako samostatné veličiny uvedeny absolutní a relativní kmity. Spíše než o druh chvění se jedná o metodu měření. Absolutní chvění se měří vzhledem k nějakému pevnému (nehybnému) bodu v prostoru. Relativní chvění měříme mezi dvěma kmitajícími body stroje. Tak např. na obr. 14 absolutně měří snímač upevnění ke skříni převodovky a mající svou konstrukci uspořádanou jako kmitavý systém s jedním stupněm volnosti se setrvačnou hmotou, pružinou a tlumičem. Vůči této hmotě se měří chvění skříně. Relativní chvění může měřit snímač, jehož hrot snímá kmity výstupního hřídele a těleso snímače je upevněno ke skříni. Měří se tak relativní chvění hřídele.

## 4.1. Základní měřené veličiny [13]

Měření vibrací je vlastně měřením periodického pohybu. Sledováním kmitavého pohybu jako změny výchylky v čase obdržíme sinusovou vlnu. Počáteční bod, kdy je hmotné těleso v klidové poloze, je nulovým bodem. Jeden úplný cyklus představuje kladné i záporné vychýlení tělesa vzhledem k jeho referenčnímu bodu. Výchylka je změnou vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k jeho referenční poloze. Velikost výchylky je měřena jako amplituda. Existují dvě měřitelné derivace výchylky: rychlost a zrychlení.

Z toho je zřejmé, že vibrace lze charakterizovat třemi měřitelnými veličinami: výchylkou, rychlostí a zrychlením. Přestože tyto tři veličiny jsou matematicky vzájemně závislé, jedná se o zcela odlišné charakteristiky. Aby bylo možné získat očekávané poruchové charakteristiky, je potřeba k měření vibrací zvolit vhodný způsob měření a typ snímače.

### Výchylka

Výchylka představuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze. K měření výchylky se obvykle používá snímač výchylky (displacement probe) nebo sonda na vířivé proudy (eddy probe). Měří se v [ $\mu\text{m}$ ].

### Rychlost

Rychlost je časová změna výchylky vibračního signálu. Tato hodnota má největší vypovídací hodnotu pro hodnocení vibrací, a proto se jedná o nejběžnější způsob měření vibrací. K měření rychlosti se používají snímače rychlosti, ale v dnešní době, s příchodem levných a mnohostranných akcelerometrů, je většina hodnot měření rychlosti získávána integrováním hodnot zrychlení. Měří se v [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

### Zrychlení

Zrychlení představuje časovou změnu rychlosti. Vibrace ve formě zrychlení jsou měřeny pomocí akcelerometrů. Jednotkami zrychlení jsou [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ].

## 4.2. Celkové vibrace [5,13]

Celkové vibrace představují celkovou vibrační energii měřenou v jistém frekvenčním rozsahu. Měřením celkových vibrací stroje nebo jeho částí (rotoru ve vztahu ke stroji nebo strojní konstrukci) a porovnáním této hodnoty s její normální úrovní (normou) získáme informaci o stavu stroje. Zjistíme-li vyšší než normální úroveň celkových vibrací, pak lze říci, že existuje "něco", co způsobuje tyto vyšší hodnoty.

Vibrace jsou považovány za nejlepší provozní parametr, podle něhož lze posuzovat nízkofrekvenční dynamické stavy, jako je nevyváženost, nesouosost, mechanické vůle uložení, rezonanci konstrukce, nedostatečně tuhé základy, ohnutý hřídel, nadměrné opotřebení ložisek nebo ulomení lopatek rotoru.

### Frekvenční rozsah

Frekvenční rozsah, ve kterém je prováděno měření celkových vibrací, závisí na typu použitého monitorovacího zařízení. Některé datové kolektory mají předdefinovaný frekvenční rozsah, ve kterém provádějí měření celkových vibrací. Jiné datové kolektory umožňují uživateli volbu frekvenčního rozsahu. Neustále ale trvá diskuse, jaký frekvenční rozsah je pro měření celkových vibrací nejlepší (přestože norma je již organizací ISO definována). Důležité z tohoto důvodu je, aby při porovnávání naměřených hodnot bylo zajištěno, že měření obou hodnot byla prováděna ve stejném frekvenčním rozsahu.

### Vyjádření amplitudy signálu

Porovnáváme-li celkové hodnoty, musí být stejný způsob měření amplitudy signálu, který určuje, jak je měření prováděno.

Měření celkových vibrací používá tato vyjádření (obr. 15):

- špičková hodnota (peak)
- špička - špička (peak - to - peak)
- průměrná hodnota (average)
- efektivní hodnota (RMS)

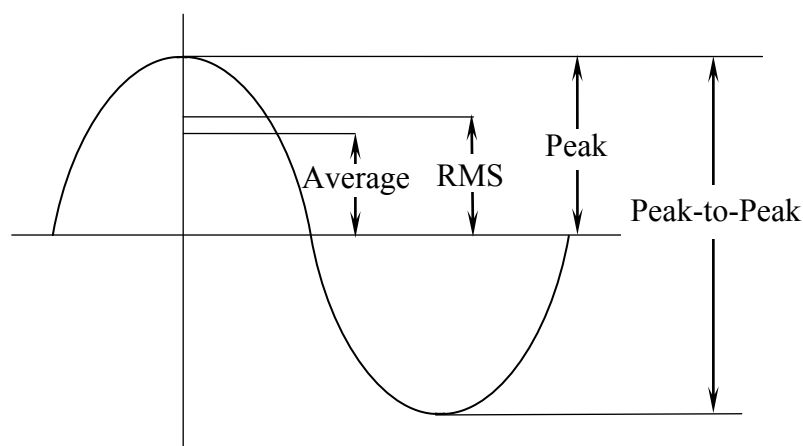
Pokud pracujeme se sinusovým signálem, pak jsou tyto způsoby vyjádření amplitudy navzájem v přímém vztahu:

špička (Peak) = 1

špička–špička (Peak-to-Peak) = 2 x špička

průměrná hodnota (Average) = 0,637 x špička

efektivní hodnota (RMS) = 0,707 x špička



Obr. 15 Vyjádření amplitudy signálu [11]

**Špičková hodnota** reprezentuje vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní. Tato hodnota může být přímo naměřená, nebo vypočtena z efektivní hodnoty.

**Špička–špička (rozkmit)** je vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny. Tato hodnota může být přímo naměřena, nebo vypočtena z efektivní hodnoty.

**Průměrná hodnota** je průměrnou hodnotou amplitudy průběhu vlny. Průměrná hodnota u ideálního sinusového průběhu se rovná nule (průběh v kladném i záporném směru je stejný). Většina průběhů vln však není ideální sinusovou křivkou a nejsou tudíž symetrické vůči ose. Proto je ve většině případech průměrná hodnota nenulová.

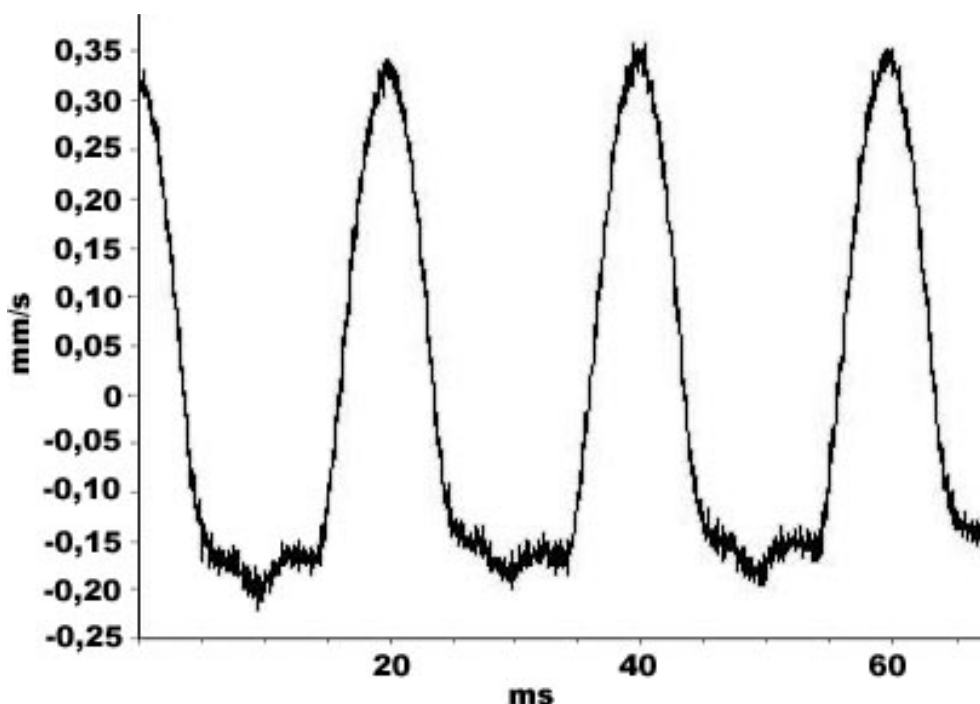
**Efektivní hodnota** je odvozena buď matematickou cestou, nebo porovnáním energií, případně výkonů stejnosměrného a střídavého proudu. U ideální sinusové křivky je efektivní hodnota rovna 0,707 ze špičkové hodnoty.

Přístroje pro monitorování stavu strojů tyto hodnoty automaticky vypočítávají. Při porovnávání hodnot celkových vibrací je nutné, aby tyto hodnoty byly změřeny ve stejném frekvenčním rozsahu a ve stejném vyjádření amplitudy.

### 4.3. Analýza časového průběhu [13]

Níže uvedený průběh (obr. 16) ukazuje, jak vypadá výstupní signál z akcelerometru nebo snímače rychlosti. Zobrazuje závislost rychlosti na čase. Tento typ vibračního grafu je nazýván časovým průběhem nebo časovým grafem.

Časové průběhy zobrazují krátký časový vzorek nezpracovaných vibrací. Přestože nebývá analýza časového průběhu tak užitečná jako jiné způsoby analýzy, může poskytnout klíč k odhalení stavu stroje, který nemusí být vždy zřejmý z frekvenčního spektra, a proto by měla být zahrnuta do programu analýzy stroje.



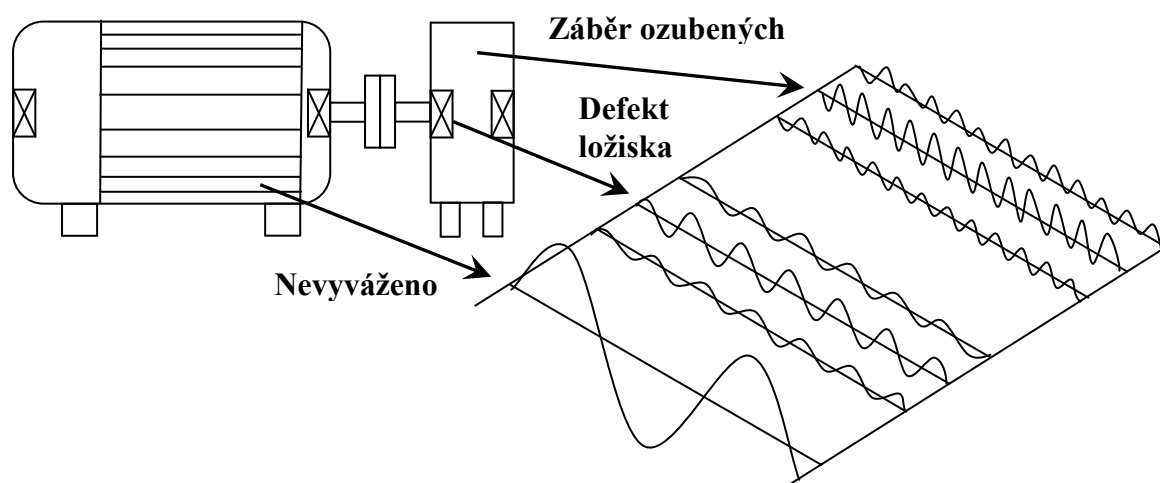
Obr. 16 Časový průběh rychlosti vibrací [13]

#### 4.4. Analýza FFT [13]

Nejvhodnější metodou pro sledování vibračních signálů způsobem vhodným pro jejich analýzu je metoda FFT - Fast Fourier Transformation (Rychlá Fourierova transformace). V nematematickém vyjádření to znamená, že signál je rozložený na určité amplitudy odpovídající různým frekvenčním složkám.

Budeme například měřit amplitudu signálu při frekvenci 10 Hz, pak při 20 Hz atd., až budeme mít k dispozici hodnoty pro všechny frekvence, z nichž je signál složen. Tyto hodnoty - amplitudy, budou zaznamenány do grafu ve frekvenční škále. Počet frekvenčních složek, na které je signál rozložen, považujeme za počet čar rozlišení. Výsledné spektrum nazýváme FFT spektrem, viz. obr 17.

Spektrum FFT je velmi užitečným nástrojem. V případě, že se strojem není něco v pořádku, jsou spektra FFT schopna poskytnout informace, které pomáhají závadu lokalizovat, určit její příčinu a pomocí trendování stanovit, za jak dlouho se může stát problém pro stroj kritický. Jelikož víme, že jistá závada se objevuje při jistých frekvencích, přistupujeme k analýze spekter FFT tak, že sledujeme změny amplitudy v těchto frekvenčních rozsazích.



Obr. 17 Frekvenční spektrum znázorňující složky vibračního signálu při různých frekvencích [13]

## 4.5. Alternativní metody k měření ložisek [3]

Vedle časových průběhů, frekvenční analýzy apod. jsou vibrační signály zpracovány jinými metodami, které umožňují lepší analýzu daného objektu, konstrukčního uzlu či elementu, lépe respektují provozní podmínky atd. Toto další možné zpracování vibračního signálu nabízí nejen další způsob analýzy, ale především má pro dané měření větší vyhovovací schopnost k určení technického stavu. Typickým příkladem uvedených alternativních metod jsou především metody k měření technického stavu valivých ložisek.

Činnost valivých ložisek a záběr ozubených kol jež má opakující charakter vytváří vibrační signály s mnohem nižší amplitudou a vyššími frekvencemi, než u vibračních signálů buzených otáčkovou frekvencí. Odfiltrováním otáčkových vibračních signálů a zesílením opakujících se složek signálů od defektu valivého ložiska dosáhneme požadovaných výsledků měření. Je nutno podotknout, že různé firmy používají různé metody, proto v následujících řádkách uvádím komplexní přehled.

### 4.5.1. Technologie SEE (Spectral Emitted Energy) [3]

Poskytuje velmi včasnou detekci závad ložisek a převodů ozubených kol měřením akustické emise generované kovem, je-li tento poškozen nebo nastanou-li jiné specifické podmínky.

- Defekty ložisek
- Nedostatečné mazání
- Mikroprokluzování/tření
- Kavitace/proudění
- Třískové obrábění kovu
- Elektrický oblouk
- Elektrický šum
- Znečištění mazacího tuku
- Dynamické přetížení
- Tření ložiska
- Elektricky generované signály
- Styk rotoru kompresoru se statorem
- Tvoření trhlinek nebo "křupání" cínu
- Kontakt kov-kov

Technologie SEE používá speciální snímače akustické emise, které „slyší“ ultrazvukovou akustickou emisi vznikající následkem poškození elementů ložisek (tato akustická emise se objevuje ve frekvenční oblasti 150 - 500 kHz). Takový signál není ani



tak vibračním signálem , jedná se spíše o zvuk o vysoké frekvenci, přesto název vibrace je běžně užívaným technickým termínem.

Pokud hodnoty SEE stoupají, monitoruje se ložisko podrobněji (zkrátí se intervaly měření a použije se multiparametrické monitorování). Trendování hodnot získaných metodou SEE, obálko váním, měřením teplot a vibrací nám nejlépe umožní analyzovat problém a určit nejvhodnější dobu pro opravu. Dobrá znalost stroje a logický přístup k řešení problémů významně napomáhá správně určit nápravné kroky.

Z pohledu analýzy pak nejčastěji mluvíme o:

- Numerické analýze SEE - protože signál SEE indikuje defekt v blízkosti (okolí) monitorujícího snímače, je znalost částí stroje v této oblasti zásadní věcí. Např. pokud v ložisku, na kterém provádíme měření SEE, přiléhá převodovka, může být akustická emise z převodovky přičítána k hodnotám SEE naměřeným v ložisku. V takovém případě mohou vysoké hodnoty SEE indikovat „dobrý“ stav monitorovaného ložiska. Obecně však vyšší než normální hodnoty indikují defekt. Pokud není normální průběh signálu SEE znám, použije se k hodnocení mohutnosti signálu SEE následující tabulka jako vodítko:

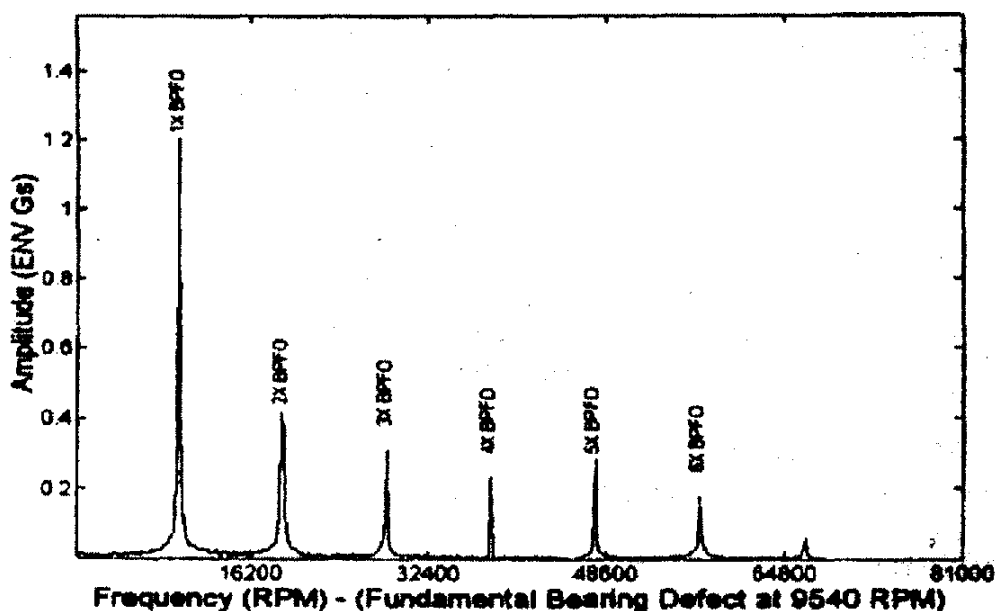
0-3	žádná identifikovatelná závada
3-20	problém s mazáním, znečištění, defekt ložiska při malém zatížení nebo malý defekt při normálním zatížení
20 -100	defekt ložiska nebo znečištění
100 +	vadná závada ložiska

Tato čísla slouží jen pro orientaci. Zkušenost s trendováním měřených hodnot pomůže zjistit, které hodnoty platí pro monitorovaný objekt.

- Spektrální analýza SEE - počínající mikroskopické defekty ložisek nejsou na normálních vibračních spektrech rychlosti a zrychlení vůbec porovnatelné, ale opakující se akustické signály vznikající působením počínajícího defektu jsou zesilovány, tzn. projeví se jako špičky na poruchové frekvenci. Lze tedy říci, že pokud se na SEE spektrech neobjeví žádné špičky, pak to znamená, že neexistuje žádný akustický signál SEE.

#### 4.5.2. Obálková metoda (Envelop) [13]

Činnost ložisek a záběr ozubených kol, jež mají opakující se charakter, vytváří vibrační signály s mnohem nižší amplitudou a vyššími frekvencemi, než je tomu u vibračních signálů buzených otáčkami nebo konstrukcí, např. pokud se u ložiska s valivými elementy objeví defekt na jeho vnější dráze, pak každý valivý element procházející tímto místem vyvolá malý opakující se signál s frekvencí odpovídající závadě v ložisku. Tento signál má ovšem tak nízkou energii, že se při běžném měření (celkové frekvenční spektrum) zcela ztratí v šumu a dalších budících otáčkových frekvencích. Příklad měření je na obr. 18.



Obr. 18 Příklad obálkového spektra vnějšího kroužku valivého ložiska [13]

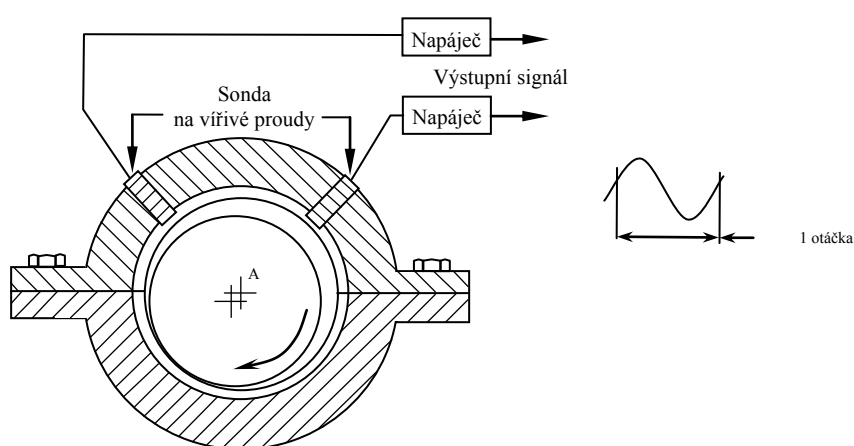
#### 4.6. Vysokofrekvenční detekce [12]

Vysokofrekvenční detekce HFD (High Frequency Detection) je schopna včas upozornit na závadu ložiska. Metoda HFD dává číselnou hodnotu celkové úrovně vibrací generovaných ve vysokofrekvenčním pásmu (5 kHz ÷ 60 kHz) malými vadami.

K zesílení nízkourovňového signálu generovaného malými vadami se používá rezonanční frekvence vlastního snímače, která leží uvnitř tohoto pásma. Jelikož se jedná o vysoké frekvence, je měření prováděno akcelerometry a hodnoty uváděny v (gE). Měření HFD lze provádět jako měření špičkové hodnoty nebo efektivní hodnoty.

#### 4.7. Orbitální analýza [3]

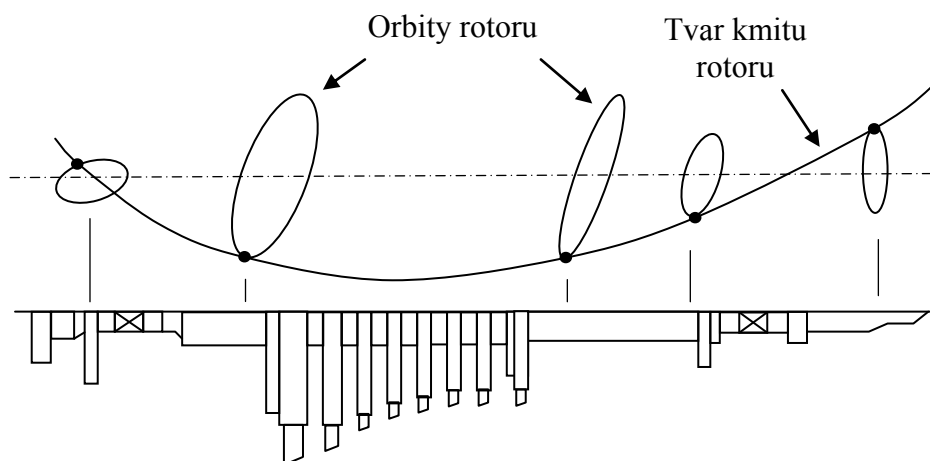
Orbit tvoří dynamická (kinetická) složka vibrací ze dvou vzájemně kolmých bezdotykových radiálních snímačů výchylky vynesená v kartézských souřadnicích. Snímače se umísťují v jedné rovině v navzájem kolmých směrech (obr. 19). Je to alternativní zobrazení časového signálu, které přináší i další diagnostické informace, a které lze realizovat i na běžném osciloskopu s X-Y funkcí. Zobrazení vibrací ve formě orbity je zobrazení pohybu středu hřídele za jednu či více otáček kotem statické polohy středu hřídel. Synchronizační značka udává moment synchronizačního impulsu 1 x za otáčku. Takto lze snadno zjistit směr precesního pohybu hřídele vůči směru otáčení (souběžná a protiběžná precese), odhadnout velikost amplitudy - špička - špička, (obr. 19).



Obr. 19 Umístění snímačů na principu vířivých proudů pro měření relativního pohybu hřídele (orbity) [3]

Měření orbity není možné bez určení absolutní fáze vibrací, která je definovaná jako zpoždění prvního kladného maxima signálu na daném snímači za signálem synchronizační značky v úhlových jednotkách, kdy jednomu cyklu vibrací odpovídá  $360^\circ$ . Fázi vibrací lze takto určovat pro otáčkovou frekvenci i pro všechny celočíselné násobky a podíly otáčkové frekvence. Je to reference mezi polohou rotoru a měřeným signálem vibrací.

Z tvaru orbity lze usuzovat na směr působení radikálních sil v ložisku. Standardní eliptický tvar orbity se vlivem závad souososti a tím vzniku radiálního předpětí podle velikosti nesouososti zplošťuje, mění na banánový a dokonce dostává tvar „osmičky“. Směr hlavní osy orbity je pak kolmý na směr působení radiální síly. Další použití orbity je při diagnostice přidírání, ložiskových vůlí, nestabilit rotoru v kluzných ložiskách, trhlinách rotoru atd. Analýza se provádí na orbitu širokopásmového signálu i na orbitu signálu filtrovaného na harmonické a subharmonické složky. Vždy je potřeba sledovat zároveň statickou polohu středu hřídele, která spolu s orbitem vypovídá o skutečném pohybu hřídele v měřené rovině a o nebezpečí přidírání ložiska, což dokumentuje obr. 20.



Obr. 20 Určení pohybu hřídele turbokompresoru v oblasti kritických otáček [3]

#### **4.8. Multiparametrické monitorování [3]**

Základem každé předpovědi délky provozu stroje do nutné opravy je objektivní znalost technického stavu sledovaného objektu s co nejvyšší jistotou rozhodnutí. Multiparametrický přístup umožní odhalit závady nezjistitelné při použití pouze jedné měřicí (diagnostické) metody, a tím zvýšit jistotu rozhodnutí o technickém stavu se všemi s tím souvisejícími výhodami.

Multiparametrický přístup k provozní diagnostice strojů a zařízení spočívá v použití několika měřících, resp. diagnostických metod, což umožňuje nejen zvýšení jistoty rozhodnutí o technickém stavu, ale zároveň zlepšuje detekci a diagnostiku závad. Použití tohoto multiparametrického přístupu umožní odhalit závady nezjistitelné při použití pouze jedné měřicí (diagnostické) metody.

Vlastní multiparametrická diagnostika má dvojí možný postup:

- Multiparametrická diagnostika při použití alternativních diagnostických metod (např. průměrná hodnota obálky a špičková hodnota obálky)
- Multiparametrická diagnostika při použití několika metod technické bezdemontážní diagnostiky (např. vibrodiagnostika + tribodiagnostika + termodiagnostika)

## 5. Ověření citlivosti vybraných diagnostických signálů

Měření bylo prováděno na Katedře jakosti a spolehlivosti strojů, která mi poskytla jak přístroj k měření vybraného signálu tak i stroje na kterých bylo měření prováděno.

Cílem měření bylo zjištění stavu stroje a ověření citlivosti vybraných signálů při simulování poškození stroje.

### 5.1. Měřené přístroje

Pro provedení experimentu byla použita nástěnná bruska značky Bosh, která byla pro měření uzpůsobena pomocí umístěných měřících ploch viz. obr. 21. Na obrázku je také vidět jejich označení. Motor na třífázový proud o napětí 400 V. Výkonné motory uložené v kuličkových ložiskách, prachotěsně zapouzdřené v tělese, které je celé odlito z litiny. Ochranné kryty z kovového odlitku. Stabilní uložení obrobku s možností nastavení. Snadnější výměna kotouče. Pryžové podložky tlumící vibrace. Vypínač chráněný před prachem. Ostatní parametry jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Parametry brusky

Hmotnost bez kabelu	15,6 kg
Průměr brusných kotoučů	200 mm
Šířka brusných kotoučů	25 mm
Otvor brusných kotoučů	32 mm
Zrnitost	35 + 60
Jmenovitý příkon	550 W
Jmenovité otáčky	2,950 ot/min



Obr. 21 Umístění měřících ploch na brusce Bosh

## 5.2. Měřicí přístroje

Pro měření zrychlení byl použit přístroj Adash 4101 obr. 22.

### Technické specifikace:

**Vstupy:** INPUT pro snímač vibrací (napájení ICP) nebo pro AC vstup  $\pm 3$  V, TRIG pro spouštěcí impulsy, otáčky (3 - 5 V) (pouze Pro), RS 232 pro optickou otáčkovou sondu, konektor rozhraní komunikace s uživatelským software

**Sběrnice:** RS 232 pro komunikaci s uživatelským software

**Snímač:** akcelerometr s ICP napájením, jmenovité citlivosti 10, 50, 100, 500 mV/g a uživatelské nastavení

**Měřicí rozsahy:** 0,01 – 300 m/s<sup>2</sup> (snímač 100 mV/g)

0,1 – 3000 m/s<sup>2</sup> (snímač 10 mV/g)

**Měřicí cesty:** LF rychlost v mm/s v pásmu 10 až 1000 Hz, signál integrován

LIN zrychlení v m/s<sup>2</sup> v pásmu 0,8 Hz až 16 kHz

HF zrychlení v g ( $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>) v pásmu 5 až 16 kHz

ENV zrychlení v m/s<sup>2</sup> v pásmu 5 až 16 kHz, signál obálkově modulován (Trend, Pro)

**Vyvažování:** rychlost v mm/s v pásmu 10 až 200 Hz (600 až 12000 ot/min), signál integrován

**Měřená data:** hodnoty TRUE-RMS, TRUE-PEAK, Crest faktor

Kurtosis faktor, otáčky ( Pro, pro Trend lze objednat)

měření časového záznamu ( uložit do paměti lze pouze v Pro)

měření spektra signálu ( Pro)

řadová analýza ( pro Pro lze objednat)

provozní vyvažování stroje v jedné i ve dvou rovinách ( pro Pro lze objednat)

**PC software:** DDS 2000, A4000 Download

**Průměrování:** max. 64

**Spouštění:** auto, ručně, externím signálem

**Zobrazení:** grafický LCD displej s podsvětlením

**Paměť dat:** 512 kB (lze objednat 1Mb) (Trend, Pro)

**Napájení:** 4 ks alkalických článků 1,5 V nebo 4 ks akumulátorů 1,2 V (velikost AA)

**Velikost:** 223 x 105 x 40 mm

**Hmotnost:** přibližně 500 g



Obr. 22 Měřicí přístroj Adash 4101



### 5.3. Metodika

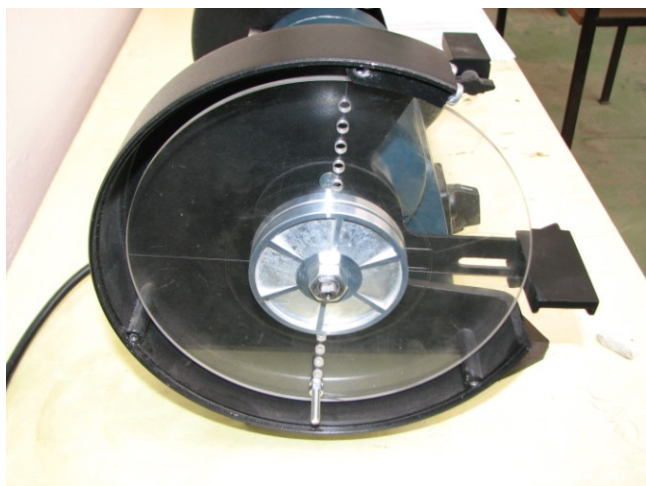
Při měření vibrací je nejdůležitější umístění měřících míst. V mém případě byla bruska vybavena vložkami, které vedly skrz rám stroje až na ložisko. Tímto provedením se vibrace přenášejí z ložiska přímo k měřicímu čidlu a nedochází tak ke zkreslení přenosem přes rám stroje. Snímač je k vložce připevněn silným neodymován magnetem, který zajišťuje konstantní přítlak.

Dále je potřeba při měření zajistit provozní podmínky. To zajistíme spuštěním naprázdno, pro ustálení provozních podmínek (otáčky, teplota).

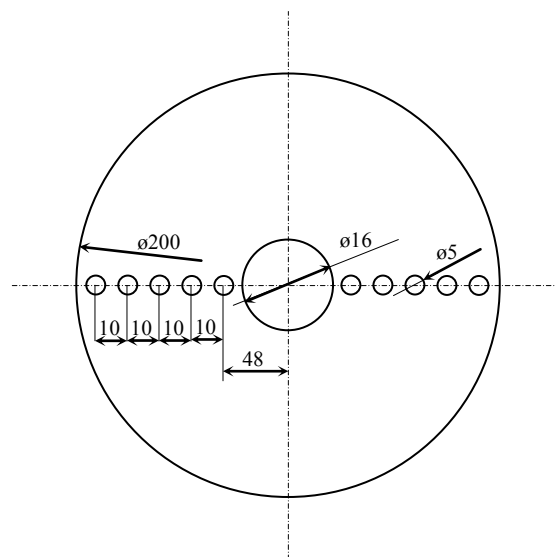
Pro měření bude vyroben kotouč, na kterém bude simulována nevyváženost (obr. 23). Na pěti různých obvodech budou vyvrtány otvory, do kterých bude vkládán šroub o známe hmotnosti, a tím vznikla nevyváženost. Otvory budou vždy na průměru dva otočeny o  $180^\circ$ , aby byl kotouč vyvážen. Přesné rozměry kotouče jsou na obr. 24.

Jako diagnostický signál bylo zvoleno zrychlení. Na přístroji adash bude měřena špička PEAK, efektivní hodnota RMS a CRST, což je jejich vzájemný poměr.

Měření bude opakováno 20x na každé vložce a mezi každým měřením bude posunuto závaží. Jako závaží byl použit šroub s matkou o hmotnost 5,813 g.



Obr. 23 Krouček pro simulaci nevyváženosti



Obr. 24 Schéma kroučku

## 5.4. Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty jsou z důvodu velkého počtu uvedeny v příloze. Zde jsou uvedeny tabulky 3-6 výsledných průměrných hodnot. Tabulky 7 - 12 s kompletními údaji jsou uvedeny v příloze.

Tab. 3 Průměrné hodnoty Horizontální Levá vložka

HL				
Počet závaží	Ø RMS [mm/s <sup>2</sup> ]	Ø PEAK [mm/s <sup>2</sup> ]	Ø CRST [mm/s <sup>2</sup> ]	F [N]
0	3,55	8,86	2,49	0,00
1	5,90	12,59	2,16	26,63
2	6,69	13,67	2,06	32,18
3	7,60	14,78	2,01	37,73
4	8,47	15,66	1,86	43,29
5	9,35	16,90	1,81	48,84

Tab. 4 Průměrné hodnoty Vertikální Levá vložka

VL				
Počet závaží	Ø RMS [mm/s <sup>2</sup> ]	Ø PEAK [mm/s <sup>2</sup> ]	Ø CRST [mm/s <sup>2</sup> ]	F [N]
0	4,55	9,79	2,15	0,00
1	9,30	16,88	1,83	26,63
2	10,66	18,51	1,75	32,18
3	11,71	20,23	1,74	37,73
4	13,11	22,29	1,71	43,29
5	14,19	23,93	1,69	48,84

Tab. 5 Průměrné hodnoty Horizontální Pravá vložka

HP				
Počet závaží	Ø RMS [mm/s <sup>2</sup> ]	Ø PEAK [mm/s <sup>2</sup> ]	Ø CRST [mm/s <sup>2</sup> ]	F [N]
0	4,24	10,01	2,36	0,00
1	4,51	10,61	2,35	26,63
2	4,27	9,91	2,32	32,18
3	4,40	10,19	2,32	37,73
4	4,38	10,11	2,31	43,29
5	4,65	10,79	2,33	48,84

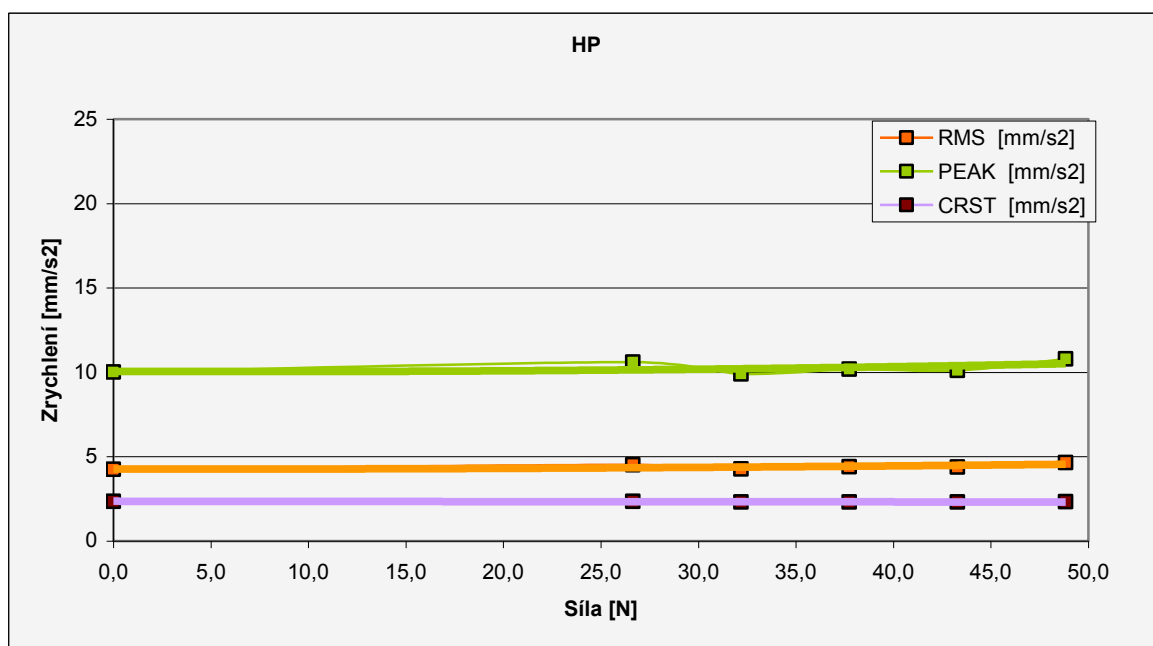
Tab. 6 Průměrné hodnoty Vertikální Pravá vložka

VP				
Počet závaží	Ø RMS [mm/s <sup>2</sup> ]	Ø PEAK [mm/s <sup>2</sup> ]	Ø CRST [mm/s <sup>2</sup> ]	F [N]
0	4,83	11,60	2,40	0,00
1	6,34	14,33	2,28	26,63
2	6,53	14,42	2,22	32,18
3	6,89	14,96	2,18	37,73
4	7,21	15,51	2,16	43,29
5	7,74	16,34	2,12	48,84

## 5.5. Vyhodnocení experimentu

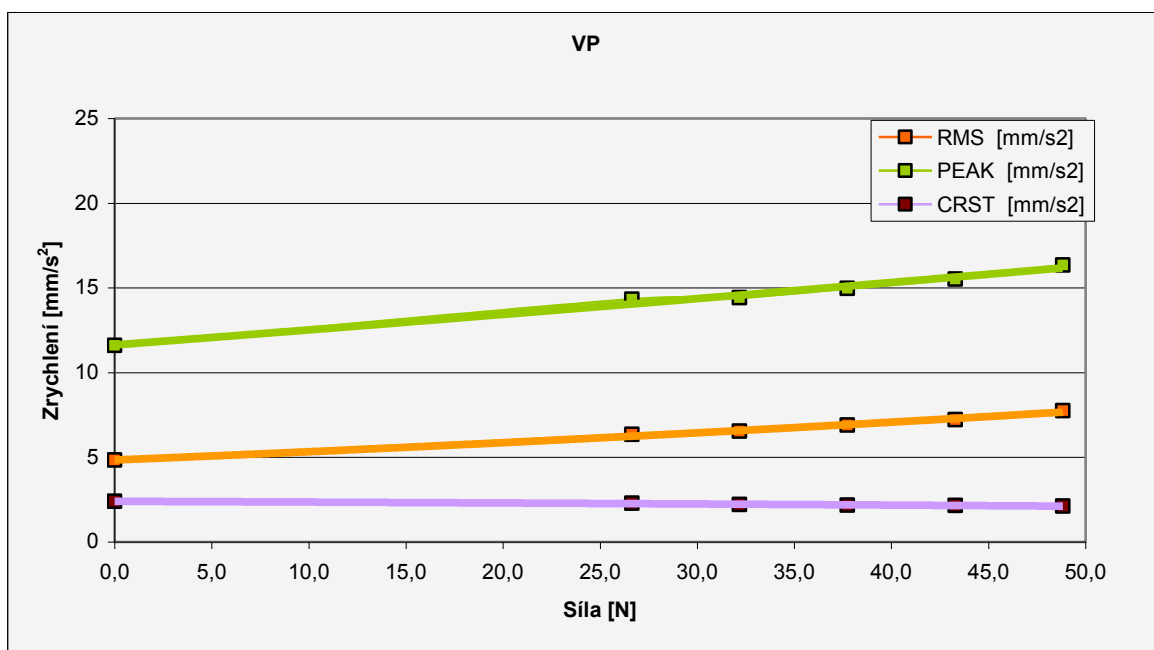
### Zrychlení

Z grafu obr. 25 je patrné, že na horizontální pravé vložce se nevyváženost prakticky neprojevila z důvodu větší vzdálenosti od nevyváženosti než levá strana. Přímký jsou téměř vodorovné.



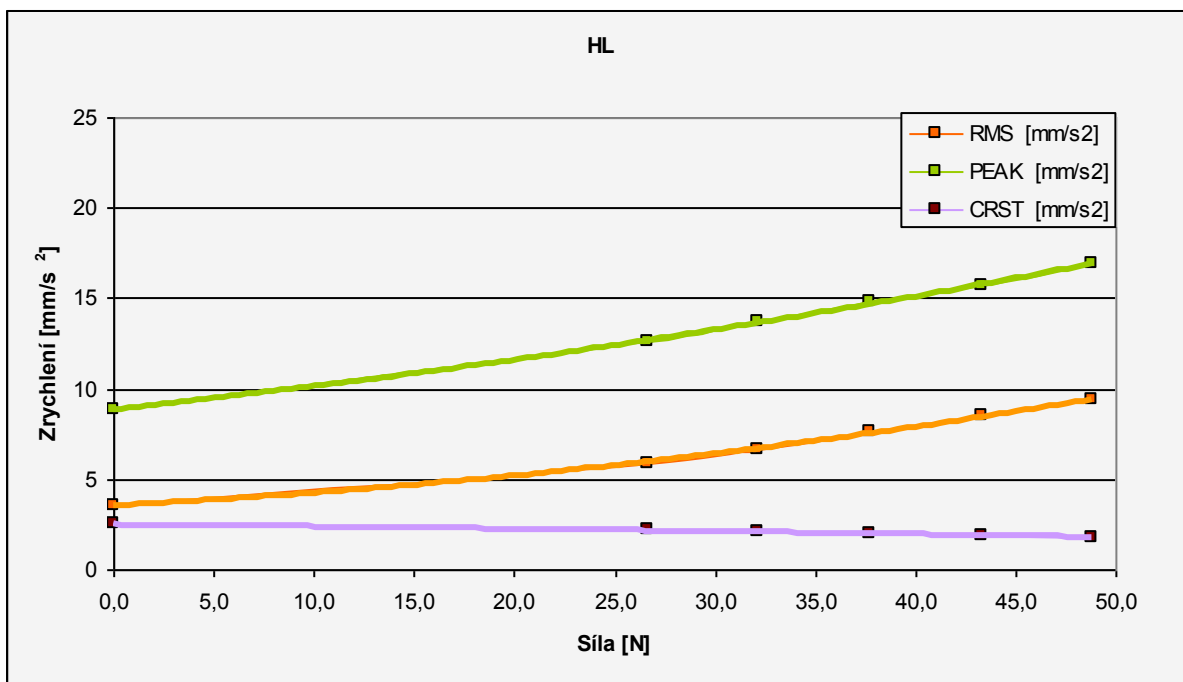
Obr. 25 Graf HP

Vertikální pravá vložka (obr. 26) už byla ovlivněna a na grafu se nevyváha projevila hlavně díky působení normálové síly.



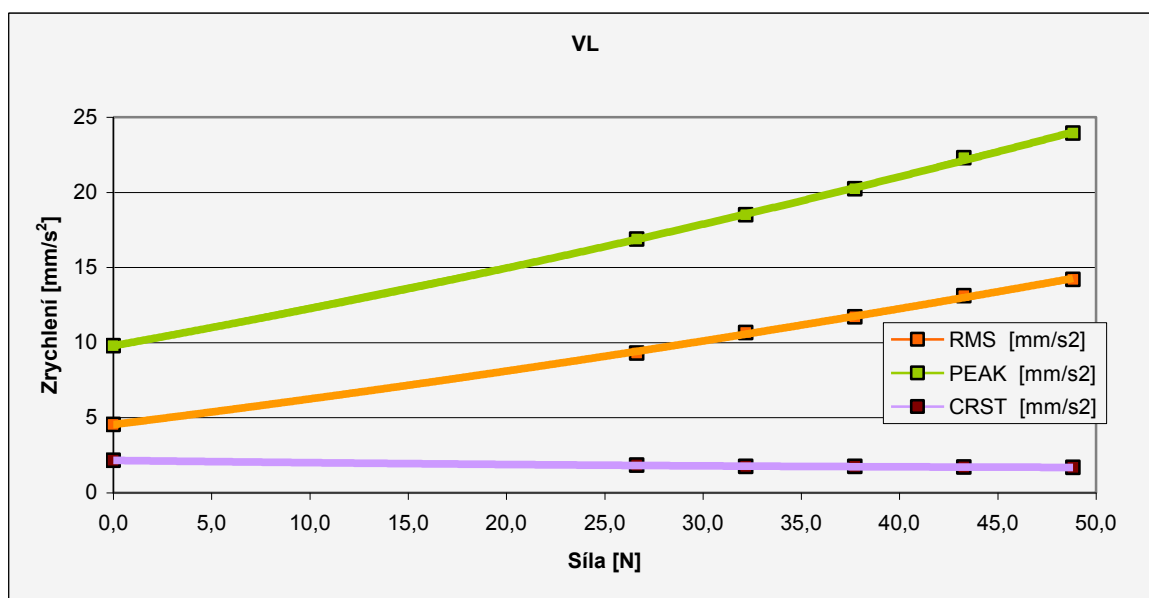
Obr. 26 Graf VP

Levá strana byla ovlivněna nejvíce, především VL (obr. 28) opět díky normálové síle a umístění neváhy.



Obr. 27 Graf HL

Na grafech je vidět, že ložiska jsou ve stejném stavu, protože jejich počáteční hodnoty bez nevyváhy jsou téměř shodné. Hodnoty RMS a PEAK mají stoupající tendenci, zatímco CRST faktor má tendenci spíše klesající.



Obr. 28 Graf VL

V tabulce 13 je uvedeno procentuální nárůst zrychlení mezi jednotlivými měřeními. Změřených hodnot zrychlení má nejmenší přírůstek crest faktor, který se používá pro hodnocení ložisek.

Tab. 13 Procentuální nárůst mezi jednotlivými měřeními

	RMS	PEAK	CRST
VL	26,9%	18,0%	1,6%
HL	24,3%	12,2%	3,5%
VP	7,2%	4,3%	1,7%
HP	0,8%	0,4%	0,2%

### Citlivost zrychlení

V tabulce 14. je uvedena citlivost zrychlení na 1 N. Největší nárůst je na straně nevyváhy ve vertikálním směru. Naopak nejmenší citlivost byla dle očekávání na pravé straně v horizontálním směru.

Tab. 14 Citlivost zrychlení - změna zrychlení na 1 N

	RMS [mm/s <sup>2</sup> ]	PEAK [mm/s <sup>2</sup> ]	CRST [mm/s <sup>2</sup> ]
VL	0,197	0,290	-0,009
HL	0,119	0,165	-0,014
VP	0,060	0,097	-0,006
HP	0,008	0,016	-0,001

## **6. Doporučení pro aplikaci vibrodiagnostiky**

Při aplikaci vibrodiagnostiky se jako jedna z nejdůležitějších podmínek projevila příprava měřících míst. Měření bylo nejprve prováděno na brusce značky Ferm, u které došlo k uvolnění měřících vložek a měření tak bylo dále nemožné, protože výsledné hodnoty byly zcela scestné.

Dále je důležité udržení měřících vložek a hlavně magnetu na měřícím čidlu v čistotě. Protože magnet musí silný, aby byl signál co nejpřesněji přenesen, a měření probíhá v provozu, kde se vyskytují železné piliny, je třeba magnet chránit mezi měřeními pouzdem. Jejich následné odstranění je celkem problémové.

## 7. Závěr

Cílem této práce bylo prozkoumat současný stav principů, metod a přístrojů v oblasti vibrodiagnostiky rotačních strojů a experimentálně ověřit citlivost vybraných diagnostických signálů.

Pro experiment jako diagnostický signál bylo zvoleno zrychlení, které bylo měřeno na přístroji Adash 4101 se snímačem s magnetickým uchycením. Měření bylo prováděno na dvoukotoučové brusce Bosh GSM 200 D.

Experimentem byla zjištěna závislost zrychlení na uměle vyvolané neváze a graficky znázorněna. Pro použití k posuzování neváhy by bylo potřeba provedení více měření na různých druzích strojů s podobnými parametry a tato měření statisticky zpracovat.

Diagnostika se zavádí z důvodu optimalizace a zefektivnění procesů řízení údržby, a tím snížení nákladů na opravy a údržbu. Tím se sníží výrobní náklady a zároveň zvýší zisky. Při výběru metod a zařízení pro vibrodiagnostiku je důležitou poměr nákladů na diagnostiku a zisků plynoucích z použití diagnostiky. Je důležité, aby zvolená varianta byla odpovídající stroji a jeho důležitosti.

Pro diagnostiku malých jednoduchých strojů, kde v mnoha případech nejsou ani připraveny měřicí body, nemá smysl používat drahé přístroje např. datakolektory. V těchto případech je výhodnější sledovat stav stroje orientačně, jednoduchými ručními přístroji a v případě závady vyměnit poškozenou součást, případně celý stroj. Naopak u drahých a velkých strojních zařízení, jejichž provoz, údržba a opravy se pohybují v řádech statisíců, je vhodné pořídit on-line měřicí systémy. To se projeví snížením nákladů na prostoje, údržbu a opravy.



## Seznam použité literatury:

- [1] KREIDL, M. aj., Technická diagnostika, 1. vydání, Praha : BEN, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6
- [2] HAVLÍČEK, J. aj., Provozní spolehlivost strojů, 2. vydání, Praha : SZN, 1989. 616 s. ISBN 80-289-0020-2
- [3] HELEBRANT, F. aj., Technická diagnostika a spolehlivost II, Ostrava : VŠB, 2004. 178s. ISBN 80-248-0650-9
- [4] JANOUŠEK, I. aj., Technická diagnostika, Praha : SNTL 1988. 432s
- [5] PEJŠA, L. aj., Technická diagnostika, 1. vydání, Praha : Česká zemědělská univerzita, 1995. 195 s. ISBN 80-213-0249-6
- [6] TŮMA, J., Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT, 1. vydání, Praha : Sdělovací technika, 1997. 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
- [7] MIŠOUN, V., Vibrace a hluk, 1. vydání, Brno: Fakulta strojní VUT, 1998. ISBN 80-124-1262-3
- [8] OBRAZ, J., Ultrazvuk v měřicí technice, 2. vydání, Praha : SNTL 1984. 488s.
- [9] LAMI KAPPA, s.r.o., Teplice: <http://www.lamikappa.cz>
- [10] WILCOXON RESEARCH, Industrial Vibration Sensor Selection: Piezovelocity Transducers (PVT) [Technical Note 18-TN18], Gaithersburg: Wilcoxon Research, Inc., 2003. p. 1-4
- [11] SKF Condition monitoring, Inc., Goteborg, Sweden: <http://www.skfcm.com>
- [12] COMMTEST INSTRUMENTS, Manuál:Ascent VB200T, Christchurch(New Zealand): Cmmtest Instruments Ltd., 2003.100 p.
- [13] SKF Condition Monitoring, Průvodce vibrační diagnostikou, 1. vydání, Praha : SKF Ložiska a.s., 1994. 65 s.
- [14] URGOŠÍK, B., Fyzika, 2. vydání, Praha : SNTL, 1987. 296 s. ISBN 80-04-320-87. s. 124 – 136
- [15] WILCOXON RESEARCH, Industrial Vibration Sensor Selection : Piezovelocity Transducers (PVT) [Technical Note 18-TN18], Gaithersburg :Wilcoxon Research, Inc., 2003. p. 1 – 4
- [16] STODOLA,J.: Sylaby k přednáškám z předmětu „Diagnostika motorových vozidel“.VUT Brno. Elektronické medium. 2003 (288 stran)

## 8. Přílohy

Tab 7. Bez závaží

HL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	3,06	7,60	2,49
2	3,59	8,91	2,48
3	3,63	9,00	2,48
4	3,55	8,66	2,44
5	3,51	8,57	2,44
6	3,62	8,78	2,42
7	3,52	8,74	2,48
8	3,66	9,01	2,46
9	3,52	8,84	2,51
10	3,73	9,25	2,48
11	3,58	9,06	2,53
12	3,64	9,10	2,50
13	3,61	9,04	2,51
14	3,59	9,01	2,51
15	3,42	8,69	2,54
16	3,59	9,04	2,52
17	3,57	9,03	2,53
18	3,53	8,84	2,51
19	3,57	9,13	2,55
20	3,54	8,86	2,50
Průměr	3,55	8,86	2,49

VL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	5,20	10,50	2,02
2	4,48	9,66	2,16
3	4,71	10,10	2,15
4	4,77	10,30	2,15
5	4,45	9,69	2,18
6	4,62	10,00	2,17
7	4,50	9,78	2,18
8	4,48	9,83	2,19
9	4,53	9,72	2,14
10	4,56	9,89	2,17
11	4,35	9,48	2,18
12	4,60	9,95	2,16
13	4,46	9,40	2,11
14	4,64	10,30	2,21
15	4,41	9,38	2,13
16	4,40	9,43	2,14
17	4,43	9,43	2,13
18	4,48	9,80	2,19
19	4,44	9,47	2,13
20	4,47	9,69	2,17
Průměr	4,55	9,79	2,15

HP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	4,75	11,20	2,35
2	3,92	9,74	2,49
3	4,52	10,40	2,30
4	4,49	10,60	2,36
5	4,39	10,40	2,37
6	4,10	9,87	2,41
7	4,24	9,87	2,33
8	3,96	9,53	2,41
9	4,41	10,70	2,43
10	4,11	9,39	2,28
11	4,66	10,80	2,31
12	4,04	9,34	2,31
13	4,18	9,48	2,27
14	4,00	9,27	2,32
15	4,41	10,60	2,41
16	3,96	9,50	2,40
17	4,21	9,81	2,33
18	3,94	9,63	2,44
19	4,29	10,10	2,36
20	4,13	9,89	2,39
Průměr	4,24	10,01	2,36

VP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	5,86	13,30	2,27
2	4,52	11,10	2,46
3	5,57	13,10	2,35
4	5,20	12,30	2,37
5	4,62	11,00	2,38
6	4,81	11,40	2,36
7	4,64	11,30	2,44
8	4,88	11,70	2,39
9	4,64	11,00	2,37
10	4,90	11,90	2,43
11	4,85	11,90	2,45
12	4,68	11,50	2,45
13	4,68	11,30	2,41
14	4,88	11,60	2,38
15	4,68	11,30	2,42
16	4,51	10,80	2,39
17	4,72	11,00	2,33
18	4,52	11,20	2,48
19	4,74	11,80	2,49
20	4,76	11,40	2,39
Průměr	4,83	11,60	2,40

Tab. 8 Závaží na prvním průměru

HL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	6,34	13,60	2,15
2	7,08	14,60	2,06
3	4,45	10,10	2,28
4	7,12	14,50	2,04
5	4,68	10,70	2,28
6	7,02	14,30	2,03
7	4,66	10,70	2,31
8	7,12	14,60	2,05
9	4,65	10,70	2,30
10	7,02	14,30	2,04
11	4,34	9,78	2,26
12	7,36	15,00	2,04
13	4,42	10,10	2,28
14	7,35	14,90	2,03
15	4,41	10,20	2,31
16	7,04	14,40	2,05
17	4,47	10,20	2,28
18	7,02	14,30	2,04
19	4,45	10,10	2,27
20	7,06	14,70	2,08
Průměr	5,90	12,59	2,16

VL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	12,40	21,90	1,76
2	10,60	18,90	1,77
3	7,29	13,80	1,89
4	11,90	20,60	1,74
5	7,05	14,20	2,01
6	11,30	19,50	1,73
7	7,03	14,10	2,00
8	11,10	19,40	1,75
9	6,87	13,30	1,94
10	11,20	19,80	1,77
11	6,98	13,20	1,89
12	11,40	19,80	1,74
13	6,86	13,30	1,94
14	11,40	20,30	1,78
15	6,89	13,10	1,90
16	10,60	18,90	1,77
17	6,93	13,00	1,88
18	10,70	18,70	1,75
19	6,83	13,10	1,91
20	10,60	18,60	1,75
Průměr	9,30	16,88	1,83

HP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	4,78	11,30	2,37
2	4,46	10,30	2,32
3	4,52	10,40	2,30
4	5,48	12,80	2,34
5	4,42	10,60	2,41
6	4,59	11,00	2,39
7	4,27	9,83	2,30
8	4,48	10,50	2,35
9	4,22	10,00	2,37
10	4,66	11,00	2,35
11	4,18	9,99	2,39
12	4,47	10,50	2,35
13	4,30	10,10	2,35
14	4,94	11,40	2,32
15	4,21	9,91	2,36
16	4,42	10,30	2,33
17	4,37	10,30	2,35
18	4,58	10,70	2,33
19	4,48	10,80	2,40
20	4,44	10,50	2,37
Průměr	4,51	10,61	2,35

VP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	8,51	18,60	2,19
2	6,77	14,50	2,15
3	6,05	14,70	2,43
4	6,92	15,10	2,19
5	5,28	12,30	2,34
6	6,90	15,10	2,19
7	5,27	12,00	2,28
8	7,30	16,10	2,20
9	5,38	12,70	2,36
10	7,21	15,50	2,15
11	5,44	12,80	2,35
12	6,64	14,60	2,20
13	5,60	13,00	2,32
14	6,78	15,10	2,23
15	5,43	13,20	2,43
16	6,81	14,80	2,18
17	5,48	13,20	2,41
18	6,75	14,60	2,16
19	5,44	13,90	2,56
20	6,77	14,80	2,19
Průměr	6,34	14,33	2,28

Tab. 9 Závaží na druhém průměru

HL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	7,22	14,70	2,03
2	7,88	15,60	1,97
3	5,22	11,40	2,19
4	7,97	15,50	1,95
5	5,39	11,80	2,19
6	7,81	15,30	1,96
7	5,41	11,90	2,21
8	7,94	15,50	1,95
9	5,38	11,80	2,19
10	7,98	15,40	1,93
11	5,09	11,30	2,22
12	8,27	16,40	1,98
13	5,15	11,40	2,21
14	8,24	16,00	1,94
15	5,13	11,20	2,18
16	7,85	15,40	1,96
17	5,04	10,90	2,16
18	7,94	15,50	1,95
19	5,10	11,10	2,17
20	7,87	15,30	1,95
Průměr	6,69	13,67	2,06

VL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	13,60	23,50	1,73
2	12,30	20,60	1,68
3	8,57	15,50	1,81
4	13,20	22,40	1,69
5	8,15	15,20	1,86
6	12,60	21,20	1,68
7	8,30	15,20	1,84
8	12,30	20,40	1,67
9	8,39	15,60	1,86
10	12,20	20,70	1,70
11	8,47	15,00	1,77
12	12,60	21,70	1,72
13	8,51	15,20	1,78
14	12,60	21,40	1,70
15	8,52	15,10	1,78
16	12,30	20,70	1,69
17	8,07	14,90	1,84
18	12,20	20,60	1,69
19	8,08	14,70	1,82
20	12,20	20,60	1,68
Průměr	10,66	18,51	1,75

HP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	4,59	10,70	2,34
2	4,61	10,70	2,33
3	4,49	10,20	2,28
4	4,60	10,60	2,31
5	3,94	9,10	2,31
6	4,26	9,70	2,28
7	4,08	9,59	2,35
8	4,21	9,78	2,33
9	3,95	9,06	2,29
10	4,40	10,20	2,33
11	4,01	9,25	2,30
12	4,27	10,10	2,36
13	4,08	9,56	2,34
14	4,27	9,86	2,31
15	4,13	9,53	2,31
16	4,40	10,30	2,33
17	4,21	9,91	2,35
18	4,40	10,20	2,31
19	4,06	9,59	2,36
20	4,39	10,30	2,35
Průměr	4,27	9,91	2,32

VP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	8,10	17,00	2,10
2	7,18	15,40	2,15
3	6,44	15,40	2,39
4	7,10	15,50	2,18
5	5,49	12,30	2,25
6	7,29	15,40	2,12
7	5,38	12,50	2,32
8	6,98	15,10	2,16
9	5,33	12,40	2,33
10	6,91	15,00	2,17
11	5,70	13,50	2,36
12	7,24	15,20	2,10
13	5,84	13,80	2,36
14	7,27	15,60	2,15
15	5,67	13,00	2,30
16	7,06	15,00	2,12
17	5,67	13,10	2,30
18	7,04	15,10	2,14
19	5,87	13,70	2,33
20	7,06	14,40	2,03
Průměr	6,53	14,42	2,22

Tab. 10 Závaží na třetím průměru

HL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	8,77	16,60	2,90
2	8,88	16,80	1,90
3	5,78	11,80	2,05
4	8,90	16,50	1,85
5	6,11	12,60	2,06
6	8,76	16,60	1,90
7	6,14	12,70	2,06
8	9,26	17,30	1,87
9	6,17	12,80	2,07
10	9,22	17,20	1,86
11	5,91	12,40	2,10
12	8,79	16,50	1,88
13	6,01	12,50	2,08
14	8,73	16,30	1,86
15	6,02	12,60	2,09
16	8,92	16,70	1,88
17	5,96	12,20	2,04
18	8,85	16,50	1,87
19	5,95	12,50	2,10
20	8,85	16,50	1,86
Průměr	7,60	14,78	2,01

VL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	13,40	22,30	1,66
2	13,30	22,50	1,69
3	9,86	17,00	1,72
4	13,70	22,70	1,65
5	9,42	17,10	1,82
6	13,30	22,40	1,69
7	9,72	17,80	1,83
8	13,70	23,00	1,68
9	9,67	17,50	1,81
10	13,70	23,50	1,71
11	9,39	16,90	1,80
12	13,40	22,90	1,71
13	9,33	16,90	1,81
14	13,30	22,50	1,69
15	9,82	17,80	1,81
16	13,30	22,60	1,70
17	9,37	16,90	1,80
18	13,60	22,70	1,67
19	9,38	17,00	1,81
20	13,50	22,60	1,67
Průměr	11,71	20,23	1,74

HP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	4,86	11,20	2,30
2	4,47	10,40	2,34
3	4,43	10,10	2,29
4	5,13	12,00	2,34
5	3,96	9,31	2,35
6	4,68	10,50	2,25
7	4,02	9,53	2,37
8	4,54	10,40	2,30
9	3,91	9,23	2,36
10	4,44	10,20	2,29
11	4,30	10,10	2,34
12	4,36	10,00	2,29
13	4,29	9,93	2,31
14	4,49	10,10	2,25
15	4,24	10,00	2,36
16	4,61	10,40	2,27
17	4,13	9,60	2,32
18	4,46	10,40	2,34
19	4,20	9,77	2,33
20	4,49	10,60	2,37
Průměr	4,40	10,19	2,32

VP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	7,74	16,00	2,07
2	7,42	15,40	2,07
3	7,01	16,10	2,29
4	7,62	16,30	2,14
5	5,79	13,20	2,38
6	7,76	16,90	2,11
7	5,84	13,90	2,38
8	7,22	15,20	2,11
9	5,82	13,20	2,26
10	7,25	15,10	2,08
11	6,24	14,20	2,28
12	7,44	15,40	2,08
13	6,08	13,80	2,28
14	7,68	15,90	2,07
15	6,09	13,50	2,21
16	7,54	15,70	2,08
17	6,15	14,00	2,28
18	7,42	15,40	2,07
19	6,17	14,60	2,36
20	7,45	15,40	2,07
Průměr	6,89	14,96	2,18

Tab. 11 Závaží na čtvrtém průměru

HL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	9,74	17,50	1,80
2	9,74	17,60	1,81
3	6,70	13,00	1,95
4	10,10	18,00	1,75
5	6,92	13,30	1,93
6	9,63	17,30	1,80
7	7,04	13,90	1,97
8	10,10	18,10	1,78
9	6,93	13,60	1,96
10	10,20	18,20	1,79
11	6,63	12,80	1,92
12	9,60	17,20	1,79
13	6,68	13,10	1,96
14	9,59	17,20	1,79
15	6,69	13,20	1,97
16	9,87	17,70	1,80
17	6,86	13,30	1,94
18	9,86	17,50	1,78
19	6,74	13,10	1,95
20	9,71	17,50	1,80
Průměr	8,47	15,66	1,86

VL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	14,90	24,40	1,64
2	14,50	24,10	1,66
3	11,20	19,30	1,73
4	15,30	25,40	1,66
5	11,00	19,60	1,78
6	14,50	24,40	1,67
7	10,80	19,10	1,77
8	15,10	25,10	1,66
9	11,20	19,40	1,74
10	15,00	25,20	1,68
11	10,90	19,10	1,75
12	14,70	24,90	1,70
13	10,90	19,30	1,76
14	14,60	24,80	1,70
15	10,90	18,90	1,74
16	14,60	24,30	1,67
17	11,00	19,40	1,77
18	14,80	24,50	1,66
19	11,40	19,80	1,74
20	14,80	24,80	1,67
Průměr	13,11	22,29	1,71

HP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	4,79	11,50	2,39
2	4,92	11,20	2,28
3	4,78	10,90	2,28
4	4,50	10,30	2,29
5	4,35	9,90	2,28
6	4,46	10,30	2,31
7	4,47	10,20	2,29
8	4,37	10,20	2,33
9	4,07	9,56	2,35
10	3,87	9,08	2,35
11	3,92	9,08	2,31
12	4,55	10,30	2,27
13	4,75	10,60	2,24
14	4,57	10,20	2,23
15	4,42	10,10	2,29
16	4,10	9,47	2,31
17	4,14	9,65	2,32
18	4,25	9,81	2,31
19	4,13	9,81	2,38
20	4,23	10,00	2,37
Průměr	4,38	10,11	2,31

VP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	8,39	18,00	2,14
2	7,05	16,30	2,32
3	8,09	16,90	2,09
4	7,89	16,20	2,06
5	7,48	15,70	2,10
6	7,29	15,10	2,08
7	7,54	15,60	2,07
8	7,52	15,30	2,04
9	6,33	14,40	2,27
10	6,21	14,00	2,26
11	6,16	13,60	2,21
12	8,01	16,60	2,08
13	7,85	16,20	2,06
14	7,73	16,10	2,08
15	7,92	16,50	2,09
16	6,47	14,40	2,23
17	6,57	15,20	2,31
18	6,48	14,70	2,27
19	6,61	14,50	2,20
20	6,51	14,80	2,27
Průměr	7,21	15,51	2,16

Tab. 12 Závaží na pátém průměru

HL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	10,60	18,60	1,70
2	10,40	18,60	1,79
3	7,72	14,40	1,86
4	10,50	18,40	1,75
5	7,88	14,60	1,76
6	10,70	19,20	1,79
7	8,01	15,00	1,87
8	11,00	19,40	1,75
9	8,00	15,10	1,89
10	11,00	19,20	1,74
11	7,48	14,00	1,87
12	11,10	19,50	1,75
13	7,42	14,00	1,89
14	11,10	19,50	1,75
15	7,58	14,20	1,87
16	10,40	18,40	1,77
17	7,58	14,30	1,88
18	10,40	18,60	1,78
19	7,63	14,40	1,89
20	10,50	18,50	1,77
Průměr	9,35	16,90	1,81

VL			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	15,80	25,60	1,62
2	15,20	25,30	1,67
3	12,60	21,40	1,70
4	15,60	25,90	1,66
5	12,10	21,70	1,79
6	15,90	26,50	1,67
7	12,40	21,50	1,73
8	16,20	27,20	1,68
9	12,40	21,60	1,74
10	16,20	27,20	1,68
11	11,80	20,10	1,70
12	16,60	27,90	1,68
13	11,80	20,00	1,69
14	16,40	27,50	1,68
15	12,40	20,60	1,67
16	15,50	26,10	1,69
17	12,30	20,80	1,69
18	15,30	25,70	1,67
19	11,80	20,10	1,71
20	15,40	25,80	1,68
Průměr	14,19	23,93	1,69

HP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	5,06	11,70	2,32
2	4,77	11,00	2,31
3	4,80	11,10	2,32
4	4,63	10,30	2,24
5	4,27	10,10	2,37
6	4,77	10,80	2,27
7	4,22	10,00	2,37
8	4,66	10,60	2,28
9	4,60	10,80	2,35
10	4,63	10,60	2,28
11	4,66	10,60	2,27
12	4,81	11,30	2,36
13	4,58	11,00	2,40
14	4,63	10,90	2,37
15	4,60	10,80	2,35
16	4,79	11,20	2,35
17	4,48	10,90	2,43
18	4,74	10,90	2,39
19	4,58	10,60	2,31
20	4,67	10,60	2,26
Průměr	4,65	10,79	2,33

VP			
Číslo měření	RMS	PEAK	CRST
1	8,59	17,90	2,08
2	8,37	17,20	2,07
3	7,27	16,30	2,24
4	8,89	18,10	2,04
5	6,78	15,30	2,25
6	8,21	16,60	2,02
7	6,90	15,20	2,21
8	7,74	15,70	2,03
9	7,18	16,20	2,26
10	7,72	15,80	2,05
11	7,37	16,00	2,17
12	8,03	16,30	2,02
13	7,27	15,60	2,14
14	7,94	15,70	1,98
15	7,16	15,70	2,20
16	8,40	17,20	2,05
17	7,21	16,30	2,26
18	8,24	16,80	2,04
19	7,31	16,20	2,22
20	8,20	16,70	2,03
Průměr	7,74	16,34	2,12