

# **Snímanie vibrácií brúsnych kotúčov on-line**

Bc. Ľudovít Husár

---

Diplomová práca  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ludovít HUSÁR**  
Osobní číslo: **T10962**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Snímání vibrací brusných kotúčův on-line**

Zásady pro vypracování:

**Teoretická část:**

- 1. Uvedenie základných pojmov z teórie vibrácií**
- 2. Uvedenie základných informácií o snímačoch vibrácií**
- 3. Popíšte spôsoby vyvažovania brusných kotúčův**

**Praktická část:**

- 1. Spravte vyváženie vybraného typu brusného kotúča**
- 2. Spravte meranie vibrácií brusných kotúčův on-line**
- 3. Spravte matematicky štatistické vyhodnotenie nameraných veličín**
- 4. Posúďte vliv vibrácií na kvalitu obrábaného povrchu**



Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Norma ČSN EN ISO 6103

2. K. Juliš, R. Brepta a kol.: **Mechanika, Díl 1, Statika a kinematika.**

3. V. Chudý, R. Pálenčár a kol.: **Meranie technických veličín**

4. M. Kreidl, R. Šmíd: **Technická diagnostika**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Dr. Ing. Vladimír Pata**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
děkan



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
ředitel ústavu

# PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1</sup>;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému,
- na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2</sup>;
- podle § 60<sup>3</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;

---

<sup>1</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47b Zveřejňování závěrečných prací:

- (1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.
- (2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výtisky, opisy nebo rozmnoženiny.
- (3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

- (3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

- (1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

- podle § 60<sup>4</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo –diplomovou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům.

Prohlašuji, že:

- jsem diplomovou práci zpracoval/a samostatně a použité informační zdroje jsem citoval/a;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 02.05.2012

Ghusein

<sup>4</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

- (2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.
- (3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práca „ Snímanie vibrácií brúsnych kotúčov on-line “ sa skladá z dvoch hlavných častí. V prvej časti sa teoreticky zaoberá vibráciami, vibračnou diagnostikou, snímačmi vibrácií, spôsobom hodnotenia vibrácií ( FFT ), vyvažovaním brúsiacich kotúčov.

Druhá časť rieši otázku zmeny vibrácií brúsiacich kotúčov pred a po brúsení a rieši otázku možnosti nahradenia laserového interferometra značky Renishaw typ XL80, dotykovým meracím prístrojom značky Balantron pomocou štatistického vyhodnotenia .

Kľúčové slová:

vibrácie, technická diagnostika, meranie, FFT, snímanie, vyvažovanie brúsiacich kotúčov

## **ABSTRACT**

The thesis „ Scanning of abrasive wheel vibration on-line“ is divided into two main parts. First main part is concerned with vibration, vibration diagnostics, vibration sensor, FFT - Fast Fourier Transformation, abrasive wheel equilibration.

Second main part address the question change of vibration abrasive wheel before grinding and vibration abrasive wheel after grinding with the help of statistical evaluation measured values and address the question or can touch-measuring device Balantron replace laser interferometer Renishaw XL 80 with the help of statistical evaluation measured values.

Keywords:

vibration, technical diagnostics, measurements, FFT, sensing, balancing grinding wheels

Touto cestou by som sa rád poďakoval môjmu vedúcemu diplomovej práce doc.Dr.Ing. Vladimírovi Patovi za pomoc pri riešení problematiky, za odborný dozor pri riešení práce, za poskytovanie odbornej literatúry a v neposlednom rade za čas strávený pri riešení tejto diplomovej práce.

Čestne prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronicky nahraná do IS/STAG sú totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČASŤ .....</b>	<b>11</b>
<b>1 VIBRÁCIE VŠEOBECNE .....</b>	<b>12</b>
1.1 VÝCHYLKA, ZRÝCHLENIE A RÝCHLOSŤ VIBRÁCIÍ.....	14
1.1.1 Výchylka.....	14
1.1.2 Rýchlosť .....	15
1.1.3 Zrýchlenie.....	15
1.2 HLUK A VIBRÁCIE.....	17
<b>2 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA.....</b>	<b>18</b>
2.1 ABSOLÚTNE SENZORY VÝCHYLKY, RÝCHLOSTI A ZRÝCHLENIA .....	19
2.1.1 Piezoelektrické ( nábojové ) akcelerometre .....	22
2.1.2 Piezoelektrické snímače s integrovanou elektrinou ( IEPE ) .....	25
2.1.3 Piezorezistívne snímače zrýchlenia ( PR ) .....	25
2.1.4 Kapacitný snímač zrýchlenia ( VC ) .....	26
2.2 LASEROVÉ INTERFEROMETRICKÉ VIBROMETRE.....	27
2.3 CHYBY VZNIKNUTÉ NEVHODNÝM POSKLADANÍM INTERFEROMETRA .....	30
<b>3 RÝCHLA FURIEROVA TRANSFORMÁCIA FFT .....</b>	<b>33</b>
3.1 FREKVENČNÁ ANALÝZA .....	33
<b>4 VYVAŽOVANIE BRÚSIACICH KOTÚČOV.....</b>	<b>36</b>
4.1 DRUHY VYVAŽOVANIA.....	37
4.1.1 Statické vyvažovanie.....	37
4.1.2 Dynamické vyvažovanie .....	39
4.2 OROVNÁVANIE BRÚSIACICH KOTÚČOV .....	40
<b>II PRAKTICKÁ ČASŤ .....</b>	<b>41</b>
<b>5 MERANIE VIBRÁCIÍ A ICH ANALÝZA.....</b>	<b>42</b>
5.1 POUŽITÉ ZARIADENIA A MATERIÁLY.....	42
5.2 POSTUP PRI MERANÍ.....	43
5.3 ANALÝZA ZAZNAMENANÝCH PRIEBEHOV VIBRÁCIÍ LASEROVÉHO INTERFEROMETRA ZNAČKY RENISHAW XL80.....	44
5.3.1 Výsledné hodnoty získané z vyhodnocovacieho softwaru pre Renishaw XL80.....	46
5.4 ANALÝZA NAMERANÝCH HODNÔT Z PRÍSTROJA BALANTRONU POMOCOU SOFTWARE SIGWIEV32 VERZIA 2.4.0 .....	47
5.4.1 Výsledné hodnoty získané z vyhodnocovacieho softwaru Sigwiev32 verzia 2.4.0 .....	48



<b>6</b>	<b>ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE .....</b>	<b>49</b>
6.1	ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE VÝBEROVÝCH SÚBOROV NAMERANÝCH Z VIBRÁCIÍ BRÚSIACEHO KOTÚČA Z KUBICKÉHO NITRIDU BÓRU TYP B107 K100 B-III.....	49
6.1.1	Porovnanie prvých harmonických frekvencií medzi dátami získanými laserovým interferometrom XL80 Renishaw a systémom Balantron z brúsiaceho kotúča KNB typ B107 K100 B-III .....	52
6.1.2	Porovnanie hodnôt získaných pred brúsením a po brúsení brúsiaceho kotúča KNB typ B107 K100 B-III pomocou laserového interferometra Renishaw XL80.....	54
6.2	ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE VÝBEROVÝCH SÚBOROV NAMERANÝCH Z VIBRÁCIÍ BRÚSIACEHO KOTÚČA Z DIAMANTU TYP D100 K100 B-VI.....	55
6.2.1	Porovnanie prvých harmonických frekvencií medzi dátami získanými laserovým interferometrom XL80 Renishaw a systémom Balantron z brúsiaceho kotúča Diamant typ D100 K100 B-VI .....	58
6.2.2	Porovnanie hodnôt získaných pred brúsením a po brúsení brúsiaceho kotúča Diamant typ D100 K100 B-VI pomocou laserového interferometra Renishaw XL80 .....	60
	<b>ZÁVER .....</b>	<b>61</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....</b>	<b>63</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....</b>	<b>65</b>
	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>66</b>
	<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>68</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH VZORCOV .....</b>	<b>69</b>
	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>70</b>

## ÚVOD

Cieľom tejto diplomovej práce je porovnanie vibrácií pred brúsením a po brúsení brúsiacich kotúčov, ako aj porovnanie zhody nameraných hodnôt medzi bezkontaktným laserovým interferometrom značky Renishaw typ XL80 a kontaktným meracím prístrojom značky Balantron.

Práca bude zameraná na vibrácie a vibračnú diagnostiku brúsiacich kotúčov. V dnešnej dobe má táto diagnostika veľké uplatnenie pri výrobe. Umožňuje napríklad kontrolovať zariadenie, čím predchádza možným poruchám, alebo k presnejšej výrobe dielov pri brúsení.

Hlavnou úlohou bude zistiť, či starší a kontaktný, ale rádovo lacnejší prístroj Balantron, ktorý sa nachádza na univerzite Tomáša Bati v Zlíne, je schopný nahradiť drahé zariadenie od spoločnosti Renishaw typ XL 80. Ďalej sa práca bude zaoberať aj hodnotením zmenenia vibrácií po brúsení.

Od tejto diplomovej práce očakávam praktické využitie poznatkov, nadobudnutých počas štúdia a rozšírenie poznatkov v oblasti vibrácií a FFT analýzy ako aj štatistického vyhodnotenia údajov.

## **I. TEORETICKÁ ČASŤ**

## 1 VIBRÁCIE VŠEOBECNE

Podľa normy ČSN ISO 2041/2010 je vibrácia definovaná ako mechanické kmitanie okolo rovnovážnej polohy, kmitanie môže byť periodické alebo náhodné.

**Mechanické kmitanie** je kolísanie veľkosti veličiny, obvykle v čase, vzhľadom na stanovenú frekvenciu, ak je veľkosť veličiny striedavo väčšia a menšia ako stanovená referencia. V obecnom zmysle slova sa za kmitanie považujú aj také tokové kolísania ako sú rázové procesy alebo tečenie.

**Rovnovážna poloha** je poloha tuhého telesa v pokojovom stave (nepohybujúceho sa), pri ktorej je výslednica všetkých síl pôsobiacich na teleso nulová a aj výsledný moment všetkých síl je nulový.

**Periodické vibrácie** sú vibrácie, u ktorých sa hodnoty parametrov vibrácií opakujú v istých zhodných prírastkoch nezávislej časovej premennej.

Periodická veličina  $\gamma$ , ktorá je funkciou času  $t$ , môže byť vyjadrená ako:

$$\gamma = f(t) = f(t.r.n_r) \quad (1.1)$$

kde:

$t$  – nezávislá časová premenná

$r$  – perióda

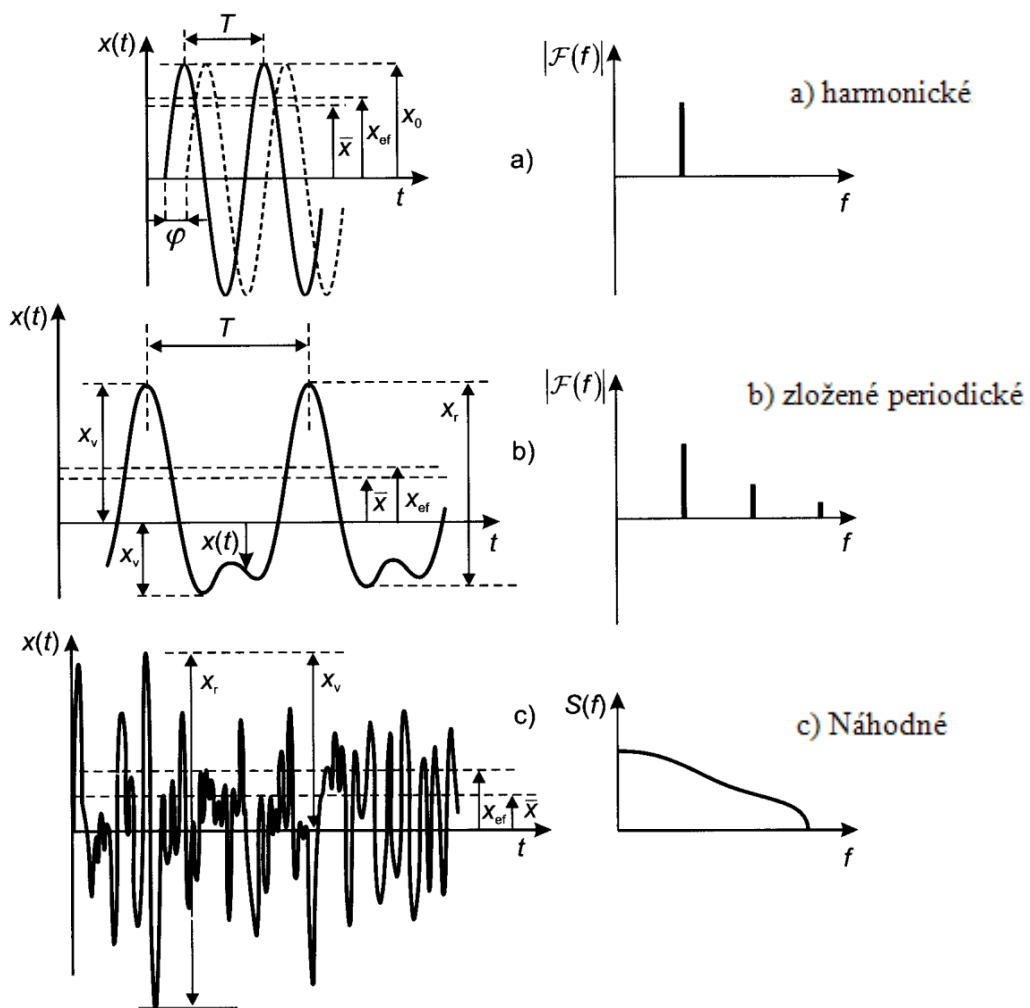
$n$  – celé číslo

**Náhodné vibrácie** sú vibrácie, u ktorých okamžitá hodnota nemôže byť dopredu určená. Pravdepodobnosť, že veľkosť náhodných vibrácií je v danom pásme, môže byť popísaná funkciou rozdelenia pravdepodobnosti.

**Torzné vibrácie** predstavujú periodické vibrácie vyvolané krútením objektu okolo jeho vlastnej osi. Je to vibrácia, ktorá je pridružená ku trom rotačným stupňom voľnosti bodu na telese. [1]

**Harmonické vibrácie** sú periodické vibrácie, obsahujúce jedinú frekvenciu a sú dané vzťahom (1.2). Pre harmonické vibrácie stačí stanoviť jednu z určujúcich veličín a to je výchylka, rýchlosť a zrýchlenie a ostávajúce veličiny sa potom dajú určiť pomocou vzťahov.

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \tag{1.2}$$



Obr. 1.1 Grafické zobrazenie časového priebehu vibrácií [1]

**Periodické zložené vibrácie** vzniknú superpozíciou náhodných vibrácií, ich periódy sú v pomeroch daných racionálnymi číslami. Ak je jediný pomer zložiek zložených vibrácií vyjadrený iracionálnym číslom, sú vibrácie neperiodické. Harmonické vibrácie sa vyskytujú iba u budičov vibrácií. U vibrácií strojov sa najčastejšie vyskytne superpozícia zložených vibrácií a náhodných vibrácií t.j. šumu. [2]

**Šum** je definovaný ako nežiaduci signál, všeobecne náhodnej povahy, ktorého spektrum nevykazuje jasne definované frekvenčné zložky. [1]

## 1.1 Výchylka, zrýchlenie a rýchlosť vibrácií

### 1.1.1 Výchylka

Vyhodnotenie výchylky je v diagnostike strojov vhodné pre meranie vôlí v mechanizmoch. Tieto vôle sú obvykle merateľné v nízkofrekvenčných oblastiach kmitov, lebo pri vyšších otáčkach stroja kinematika hriadeľa už neodpovedá maximálnym hodnotám vôlí. [2]

Výchylka sa udáva v  $\mu\text{m}$ . Je to časovo premenná veličina, ktorá špecifikuje zmenu polohy bodu na telese vzhľadom k referenčnej sústave súradníc. Výchylku môžeme označiť ako Relatívnu Výchylku, ak sa meria vzhľadom k inej sústave súradníc a nie k prvotnej základnej referenčnej sústave súradníc priradenej k danému prípadu. Výchylka môže mať charakter kmitavého pohybu. V tom prípade ide jednoduché harmonické zložky definovať amplitúdou výchylky, alebo môže byť náhodná. V tom prípade sa dá k určeniu pravdepodobnosti, že výchylka bude nadobúdať hodnôt v danom rozsahu, použiť efektívne hodnoty výchylky. Výchylky s krátkymi dobami trvania sa definujú ako prechodové výchylky. Výchylky, ktoré nemajú charakter kmitavého pohybu, sa definujú ako trvalé výchylky, pokiaľ majú dlhú dobu trvania, alebo ako pulzy výchylky, pokiaľ majú krátku dobu trvania. [1]

### 1.1.2 Rýchlosť

Rýchlosť je obecné časovo závislá. Rýchlosť sa označuje ako relatívna rýchlosť, ak sa meria vzhľadom k inej referenčnej sústave, ako k prvotnej základnej referenčnej sústave súradníc priradených k danému prípadu. Relatívna rýchlosť medzi dvoma bodmi je vektorový rozdiel rýchlostí týchto dvoch bodov.

Rýchlosť môže mať charakter kmitavého pohybu, v tom prípade sa dajú jednoduché harmonické zložky definovať amplitúdou rýchlosti, alebo môže byť náhodná a v tom prípade sa dajú k učeniu pravdepodobnosti, že rýchlosť bude nadobúdať hodnôt v danom rozsahu, použiť efektívne hodnoty rýchlosti.

Rýchlosti s krátkou dobou trvania sa definujú ako prechodové rýchlosti. Rýchlosti, ktoré majú charakter kmitavého pohybu, sa definujú ako trvalé rýchlosti, pokiaľ majú dlhú dobu trvania. [1]

### 1.1.3 Zrýchlenie

Je obecné časovo závislé. Zrýchlenie môže reprezentovať rotačný vektor, translačný vektor, alebo oba vektory a Conolisovo zrýchlenie.

Zrýchlenie sa označuje ako relatívne zrýchlenie, ak sa meria vzhľadom k inej referenčnej sústave ako prvotnej základnej referenčnej sústave súradníc priradené k danému prípadu. Relatívne zrýchlenie medzi dvoma bodmi je vektorový rozdiel zrýchlenia týchto dvoch bodov. [1]

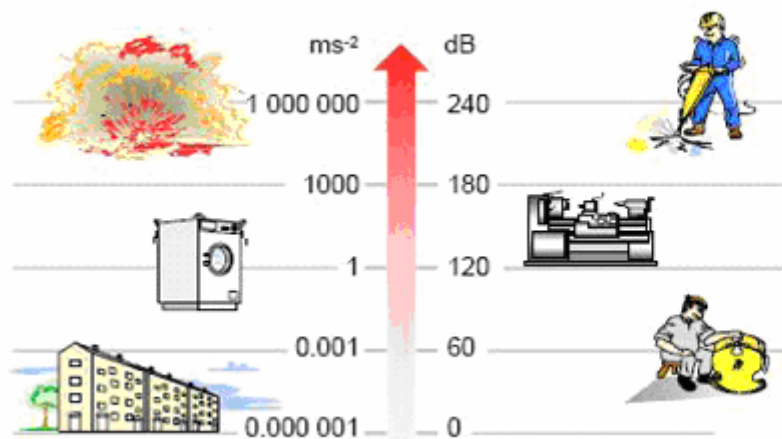
Jednotkou zrýchlenia je  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Často sa ale vyjadruje v počte  $g$  ( $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) alebo v decibeloch. Súvisí so zotrvačnými účinkami kmitajúceho objektu. Hladina zrýchlenia vibrácií (efektívna hodnota zrýchlenia vibrácií)  $L(a)$ :

$$L(a) = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (1.3)$$

Kde :  $a$  – efektívna hodnota zrýchlenia vibrácií

$a_0$  – referenčná hodnota zrýchlenia, ktorá je u nás stanovená na  $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  napr.:

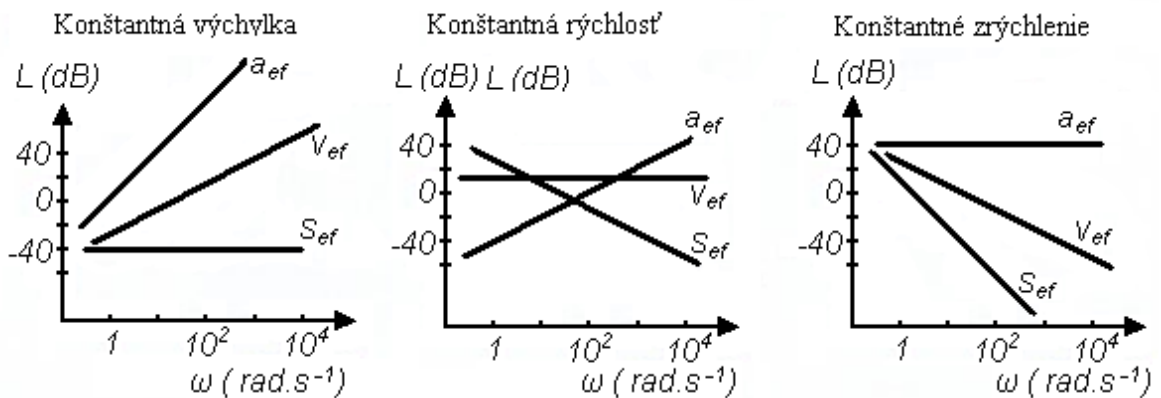
$L(a) = 140 \text{ dB}$  pre  $g=9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [3]



Obr. 1.2 Úrovně zrýchlenia vibrácií v reálnom svete [7]

Ak chceme zvýrazniť vysokofrekvenčné zložky vibrácií, je vhodné vyhodnocovať efektívnu hodnotu zrýchlenia, a naopak pre zvýraznenie nízkych kmitočtov je optimálne vyhodnocovať efektívne hodnoty výchylky. Ak budeme považovať jedu z veličín za frekvenčne nezávislú veličinu, tak ide uvedené zvýraznenia pre harmonické vibrácie dokumentovať na obrázku (Obr. 1.3).





Obr. 1.3 Frekvenčná závislosť základných veličín vibrácií [1]

## 1.2 Hluk a vibrácie

Príčinou hluku a chvenia v životnom ako aj pracovnom prostredí spôsobujú procesy, v ktorých dynamické sily vyvolávajú kmitanie mechanických sústav a konštrukcií.

Účinky hluku a chvenia sú väčšinou nepriaznivé a nežiaduce. Účinky hluku a chvenia na strojných zariadeniach, dopravných prostriedkoch a stavebných konštrukciách sa môžu prejavovať na zvýšenom opotrebení, znížení výkonu, nesprávnou funkciou, alebo dokonca ako poruchy a trvalého poškodenia.

Mechanické chvenie a hluk sú navzájom tesne spojené. Hluk je časťou pohybovej energie kmitajúcej konštrukcie, ktorá je premenená na zmenu tlaku vzduchu. Väčšina problémov vzťahujúcich sa k hluku a chveniu, je spojená s rezonanciami. Rezonancie vznikajú tam, kde dynamické sily budia vlastné kmity mechanických sústav alebo ich častí.

Každý mechanický proces je nevyhnutne sprevádzaný určitým hlukom a chvením. Preto je treba tento hluk merať. Výsledky merania hluku môžu byť porovnané s odpovedajúcou normou či odporúčením. Tak je možné určiť, či sa hluk nachádza v prípustných medziach, prípadne či problém hluku vyžaduje riešenie. Výsledky merania chvenia sa niekedy dajú porovnať s údajmi výrobcu, avšak častejšie je nutnosť riešenia problému, spojených s mechanickým chvením, indikované zhoršenie stavu alebo dokonca poruchou zariadenia. [5]

## 2 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Technická diagnostika je všeobecná náuka, ktorá sa zaoberá zisťovaním stavu strojov a zariadení rôznymi spôsobmi využitia dostupných diagnostických prostriedkov – snímačov, prístrojov atď. Technická diagnostika je definovaná ako odbor zaoberajúci sa metódami a prostriedkami zisťovania technického stavu objektu. Diagnostický systém je tvorený :

- diagnostickými prostriedkami
- objektom diagnostiky
- obsluhou diagnostického systému [6]

Pri diagnostike strojov je nutné rozlišovať absolútne a relatívne vibrácie znázornené na obrázku (Obr. 2.1). U absolútnych vibrácií telesa sa pohyb telesa vzťahuje ku gravitačnému poľu Zemegule. Relatívne vibrácie telesa sú vyhodnocované voči zvolenému reálnemu bodu, to jest bodu, ktorý môže byť taktiež v pohybe.

Podľa takéhoto princípu delíme aj senzory vibrácií na :

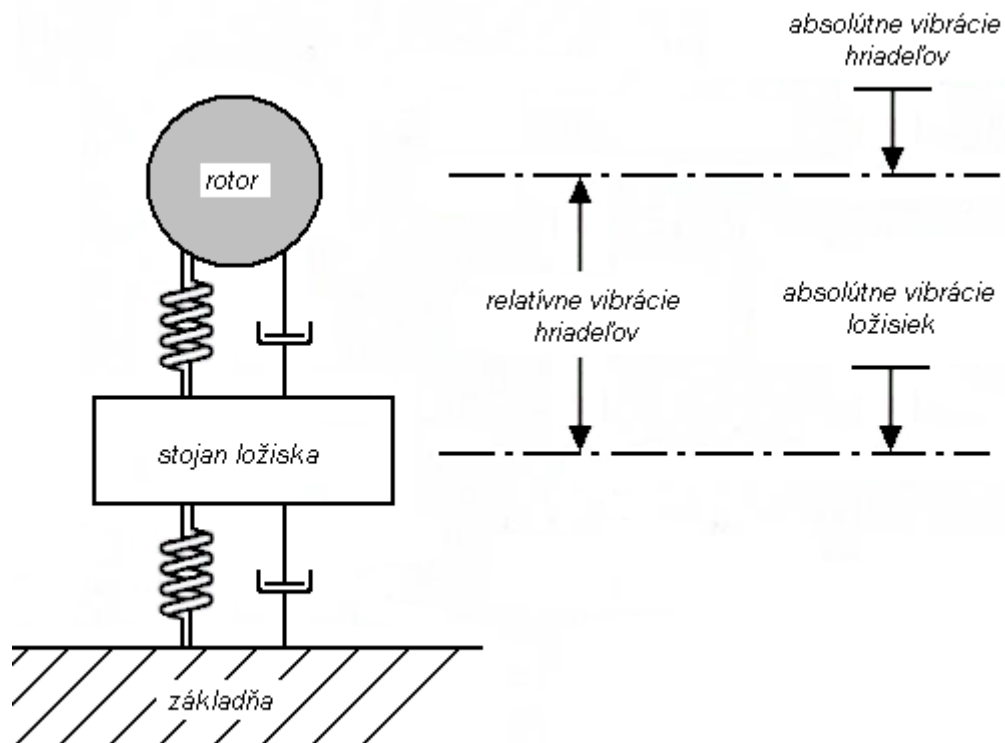
- absolútne senzory vibrácií
- relatívne senzory vibrácií

### **Absolútny senzor**

Absolútny senzor vibrácií meria veličinu mechanických vibrácií ohľadom k vlastnej zotrvačnej takzvanej seizmickej sústave. Absolútny senzor sa používa tam, kde nie je k dispozícii vhodný relatívny pevný bod k upevneniu vzťažného bodu senzoru.

## Relatívny senzor

Relatívny senzor vibrácií je určený napríklad pri vyhodnocovaní vibračného pohybu jednej časti stroja voči druhej. V súčasnej dobe sa pre relatívne meranie používajú bezdotykové senzory.



Obr. 2.1 Absolútne a relatívne vibrácie

[2]

## 2.1 Absolútne senzory výchylky, rýchlosti a zrýchlenia

### Absolútny senzor výchylky

Činnosť absolútneho senzora výchylky vibrácií vyplýva z modelu absolútneho senzora vibrácií (Obr. 2.2). Pružné prvky sústavy sú charakterizované tuhosťou  $k$  (N.m). Tuhosť je pomer sily a odpovedajúcej zmeny deformácie pružného prvku. Súčiniteľ lineárne-

ho tlmenia je parametrom tlmiča u sústavy s jedným stupňom voľnosti a je definovaný silou pri jednotkovej rýchlosti.

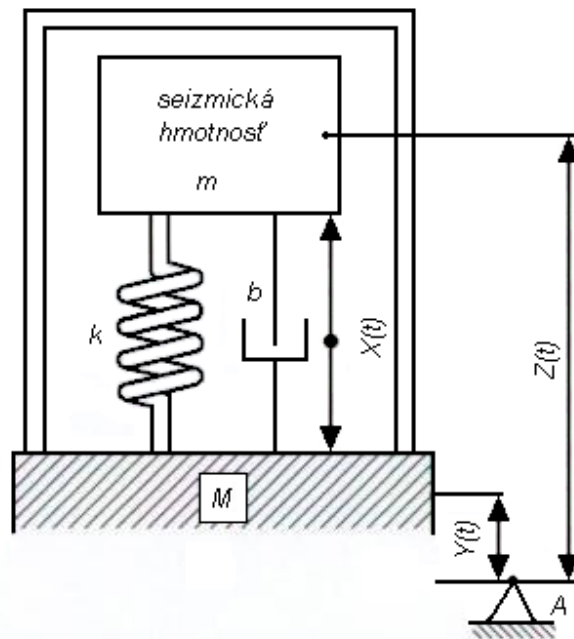
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1)$$

Kde  $m$  predstavuje hmotnosť sústavy.

Ak budeme predpokladať, že vibrujúce teleso  $M$  vykonáva časovo premenný pohyb  $y(t)$  voči fiktívnemu kludnému bodu, a že toto vibrujúce teleso je budičom sily mechanickej sústavy, potom pre rovnováhu síl pôsobiacich na hmotnosť  $m$  sústavy platia podľa obrázku (Obr. 2.2) tieto vzťahy

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = -m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2.2)$$



Obr. 2.2 Model absolútneho senzoru vibrácií

[2]

### Absolútny senzor rýchlosti

Pre meranie rýchlosti vibrácií ide použiť senzor zrýchlenia s tým, že hodnotu rýchlosti vibrácií získame následnou integráciou, alebo pomocou absolútneho elektrodynamického senzora. Absolútny elektrodynamický senzor, je založený na absolútnom senzore amplitúdy vibrácií. Senzor vo svojej podstate meria výchylku vibrácií, ale vzhľadom k vnútornému usporiadaniu dochádza pri vzájomnom pohybe magnetu a cievky k indukcií napätia na cievke. Magnetický tok sa mení v závislosti na výchylke vibrácií a vstupné napätie na cievke je úmerné derivácií premenného magnetického toku a teda rýchlosti vibrácií.

Výhodou absolútnych elektrodynamických senzorov rýchlosti je vysoká úroveň výstupného signálu a malý vnútorný odpor. Senzor je možno používať bez zdroja napájania a napätie sa dá merať ľubovoľným číslicovým multimetrom bez špeciálnych zosilňovačov. Nevýhodou týchto senzorov je obmedzený horný kmitočet ( 2000 Hz – 3 500 Hz ), väčšie rozmery a citlivosť na parazitné magnetické pole .

U akcelerometrov nebude vzt'azná seizmická hmota v pokoji. Pracovná oblasť je pod kmitočtom vlastných netlmených kmitov. Veľké hodnoty vlastných kmitov sa u absolútnych senzorov zrýchlenia dosahujú veľkou hodnotou tuhosti a malou hodnotou seizmickej hmotnosti. [2]

Snímače merania kmitania podľa princípu činnosti delíme na :

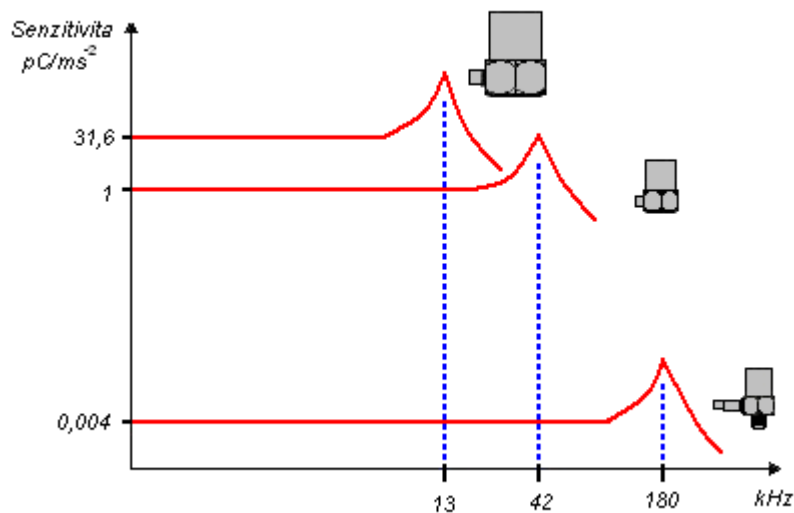
Aktívne – sú to také, ktoré generujú na svojom vstupe elektrickú veličinu. Napríklad piezoelektrické, elektrodynamické.

Pasívne – u týchto sa vyžaduje prívod energie. Modulujú nejakú elektrickú veličinu alebo parameter elektrického obvodu.

Na meranie zrýchlenia sa najčastejšie používajú snímače :

- Piezoelektrické
- Piezoelektrické s vstavanou elektronikou
- Piezoresistívne
- Kapacitné [7]

Citlivosť a frekvenčný rozsah snímača zrýchlenia sú viazané. Všeobecne platí, že čím je snímač väčší, tým väčšia je citlivosť a menší užitočný frekvenčný rozsah a naopak.



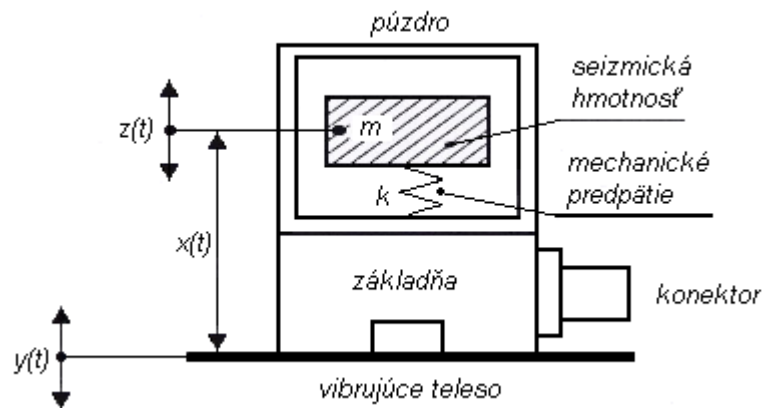
Obr. 2.3 Snímače zrýchlenia

[7]

### 2.1.1 Piezoelektrické ( nábojové ) akcelerometre ( PE )

Piezoelektrický ( nábojový ) akcelerometer je najvyužívanejší typ absolútnych senzorov vibrácií. Princíp činnosti spočíva v piezoelektrickom elemente, na ktorý pri kmitavom pohybe snímača pôsobí sila, ktorá je úmerná zrýchleniu kmitajúcej hmoty snímača. Sila pôsobiaca na piezoelektrický element generuje na výstupe náboj, ktorý je úmerný zrýchleniu. [7]

Pre piezoelektrické elementy sa používa modifikácia kremeňa ( $\text{SiO}_2$ ), piezokerami-  
ky, pre extrémne teploty  $\text{LiNbO}_3$  a niektoré piezoelektrické polyméry (PVC, PVDF). [2]

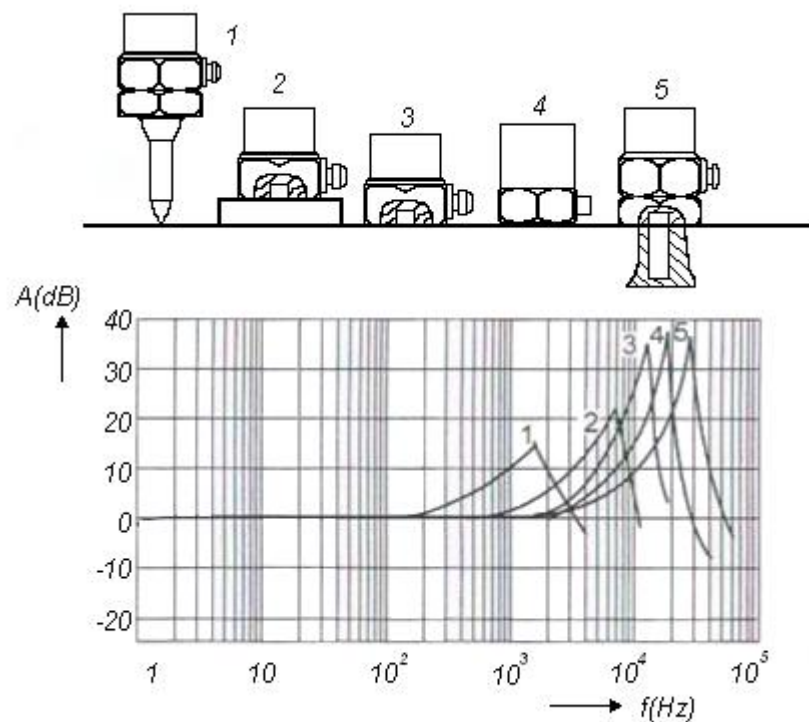


Obr. 2.4 Model piezoelektrického akcelerometra [2]

Výhodou piezoelektrických snímačov je veľký dynamický rozsah, veľký frekvenčný rozsah, náboj sa generuje sám, robustnosť a kompaktnosť, vysoká stabilita a nízka hmotnosť. Nevýhodou je vysoko impedančný výstup a to, že nemeria kvázi-statickú zložku zrýchlenia. [7]

Frekvenčné charakteristiky a odpovedajúce frekvenčné rozsahy akcelerometrov závisia od hodnoty Seizmickej hmotnosti ( 2.1 ). Z uvedeného vzťahu vyplýva, že zväčšovaním seizmickej hmotnosti klesá hodnota vlastného uhlového kmitočtu, a tým narastá citlivosť akcelerometru.

Frekvenčná charakteristika je ďalej závislá na spôsobe pripevnenia akcelerometra k meranému objektu. Ručná sonda je použiteľná len pre orientačné merania. Použitie permanentného magnetu predpokladá feromagnetický a hladký povrch meraného objektu. Lepenie podložky so šróbom, alebo lepenie akcelerometra k povrchu predpokladá rovinný tvar stykovej plochy a môže spôsobiť problém pri demontáži. Pri montáži akcelerometra je nutné brať ohľad na pomer hmotnosti objektu  $m_O$  a hmotnosti akcelerometra  $m_A$ . Aby akcelerometer neovplyvnil vlastný kmitočet a zrýchlenie meraného objektu je doporučovaný pomer  $m_O / m_A > 10$ . [2]



Obr. 2.5 Vplyv montáže akcelerometrov na frekvenčné charakteristiky [2]

Na obr. 2.5 sú znázornené vplyvy montáže z :

1. ručná sonda
2. upevnená šróbom cez permanentný magnet
3. prilepená kovová podložka so šróbom
4. priame prilepenie akcelerometra k objektu lepidlom alebo samolepiacou podložkou, prípadne upevnenie cez včelí vosk
5. upevnenie cez zavítaný šrób do objektu s možnosťou elektrickej izolácie od objektu



### 2.1.2 Piezoelektrické snímače s integrovanou elektrinou ( IEPE )

Princíp činnosti je rovnaký ako pre piezoelektrické snímače ( PE ). Piezoelektrické snímače s integrovanou elektrinou sú však vybavené vnútornou integrovanou elektronikou ( IEPE ). Výstupný signál zo snímača je vo forme napäťovej modulácie prúdu, ktorým sa napája zabudovaná elektronika. Majú nízko impedančný výstup na rozdiel od PE snímačov.

Výhodou snímača IEPE oproti snímaču PE je štandardný koaxiálny kábel, dlhé káble bez navýšenia šumu, TEDs. Nevýhodou je pracovná teplota do 150 °C, zložitejšia konštrukcia a menšia odolnosť. [7]

TEDs je elektronický katalógový list senzoru, ktorý spolu s rozhraním MMI je súčasťou moderných akcelerometrov. TEDs obsahuje základné parametre senzoru, umožňuje identifikovanie senzoru na princípu „plug nad play“, čo vlastne znamená, riadenie ktoré nevyžaduje nastavenia, umožňuje zapísanie umiestnenia senzoru, obsahuje kalibračné údaje s možnosťou novej kalibrácie po sieti, umožňuje automaticky nastaviť citlivosť senzoru atď. [2]

### 2.1.3 Piezorezistívne snímače zrýchlenia ( PR )

Princíp týchto snímačov spočíva v tom, že elektrický odpor piezorezistívneho materiálu sa mení v závislosti od mechanického napätia konštrukcie, vyvolané vonkajšou silou.[7]

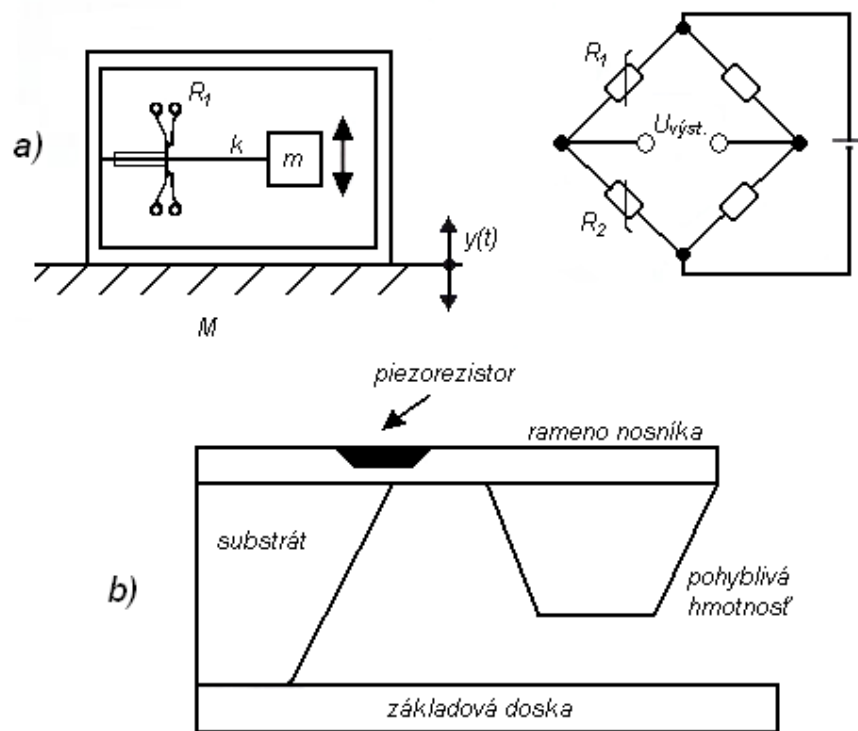
Ako materiál sa používa obohatený polovodič Si-p<sup>+</sup>. Pre zmenu odporu  $R$  platí :

$$\frac{\partial R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2.3)$$

kde  $\pi_l, \pi_t$  sú piezorezistívne súčinitele

$\sigma_l, \sigma_t$  sú zložky napätia v pozdĺžnom a priečnom smere

Pri namáhaní ohybom sa mení rezistivita piezorezistívnych elementov usporiadaných obvykle do Wheastoneova mostíka. Rezonančný kmitočet je do 30 kHz, frekvenčný rozsah od 0 Hz do 7 kHz, dynamický rozsah od 1,5  $g_n$  do 2000  $g_n$ . Zo všetkých typov akcelerometrov majú tieto najväčší pomer citlivosti voči hmotnosti a vzhľadom ku stabilite napäťovej citlivosti sú vhodné k dlhodobým testom, ale sú teplotne závislé. [2]



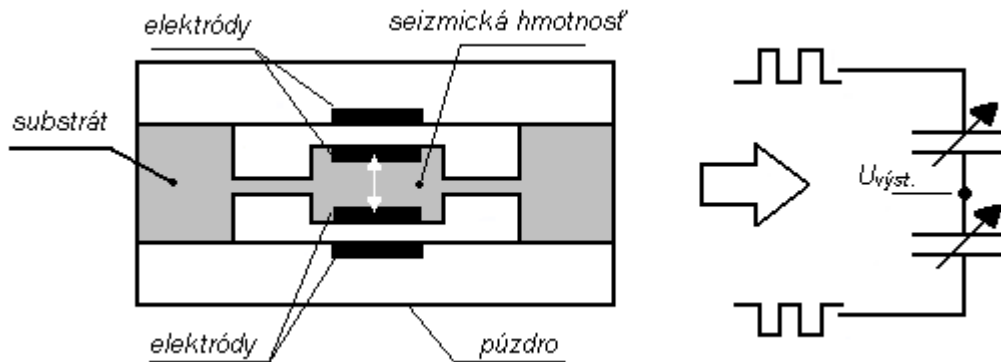
Obr. 2.6 Usporiadanie piezorezistívneho akcelerometra [2]

a) polovodičové tenzometre na votknutom nosníku b) princíp MEMS technologie

#### 2.1.4 Kapacitný snímač zrýchlenia ( VC )

Kapacitný snímač zrýchlenia sa skladá z 3 kremíkových mikroelektromechanických častí. Horná a dolná časť sú elektródy a stredná časť je membrána. Vzduch je dielektrikum. Ak začne pôsobiť zrýchlenie, membrána sa deformuje a mení sa kapacita. Zabudovaná elektronika transformuje náboj na napätie úmerné zrýchleniu. Snímač VC je založený na MEMS technológií.

Tento typ snímača zrýchlenia je určený pre meranie malých zrýchlení, t.j. menších ako 100g a pri nízkych frekvenciách, t.j. 0 až 1 kHz. Používa sa napríklad na meranie trajektórie, hodnotenie konštrukcie dopravných prostriedkov, skúšky bŕzd a odpruženia, pohyb robota, oddeľovanie stupňov rakety a podobne. [7]



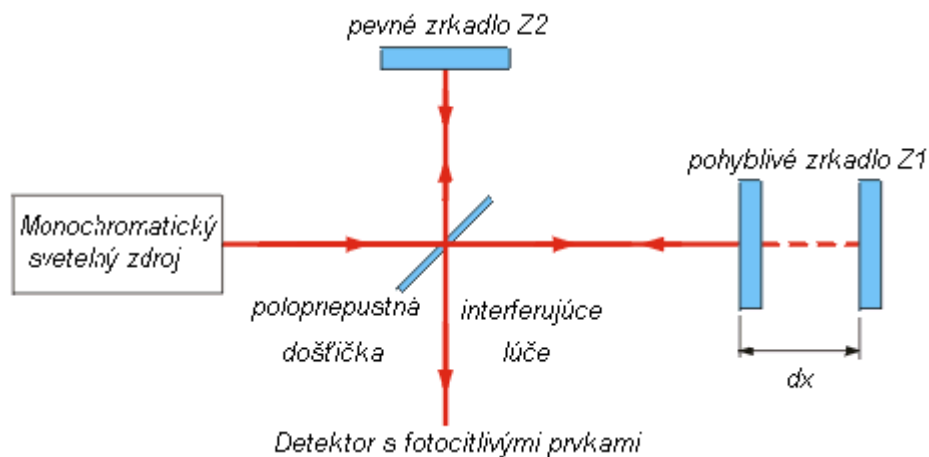
Obr. 2.7 Usporiadanie kapacitného akcelerometra [2]

## 2.2 Laserové interferometrické vibrometre

Názov Laser pochádza z Anglických slov : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Znamená to Zosilňovanie svetla stimulovanou emisiou žiarenia. Svetelný zväzok vystupujúci z laseru si môžeme predstaviť ako svetelnú vlnu so sínusovým priebehom.

Svetelná vlna vystupujúca z laseru má tri základné vlastnosti :

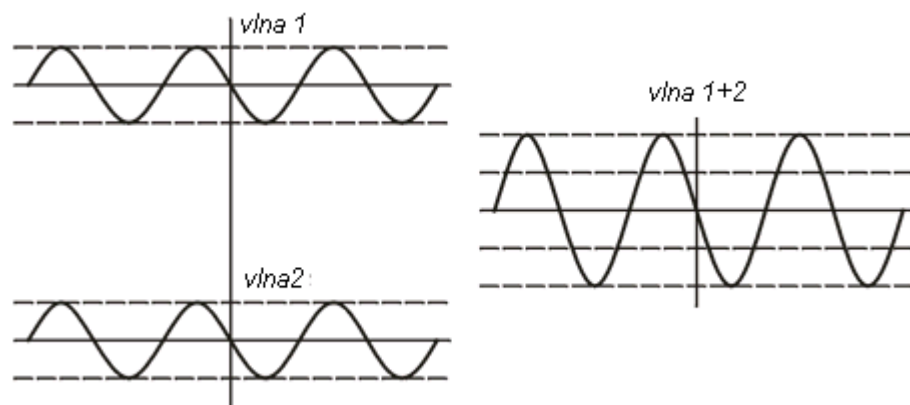
- vlnová dĺžka žiarenia je relatívne presne známa a dovoľuje robiť relatívne presné merania
- vlnová dĺžka je veľmi malá a umožňuje merať s vysokým rozlíšením
- všetky svetelné vlny majú rovnakú fázu a umožňujú vznik interferencie. To znamená skladaniu svetelných paprskov



Obr. 2.8 Základný princíp Michelsonovho interferometra [11]

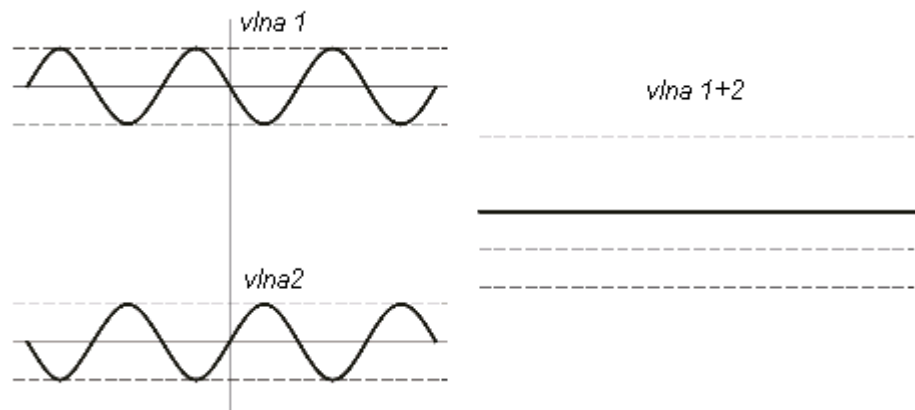
Ako je na obrázku (Obr. 2.8) vidno, základný princíp interferometra spočíva v tom, že lúč monochromatického svetla vychádza zo zdroja a dopadá na slabo postriebrenú polopriepustnú doštičku nastavenú pod uhlom  $45^\circ$  k smeru lúča. Lúč sa na doštičke rozdelí na dva navzájom kolmé lúče. Lúč, ktorý prešiel doštičkou, dopadá na zrkadlo Z1 a odrazený lúč dopadá na zrkadlo Z2. Po odraze na zrkadlách sa oba lúče vrátia na polopriepustnú doštičku, kde sa opäť rozdelia. Časť lúča sa vracia do zdroja a časť lúča postupujem smerom k detektoru s fotocitlivými prvkami, kde sa detekuje interferencia lúčov.

Pri skladaní vln môžu nastať javy ako konštruktívna interferencia alebo deštruktívna interferencia. Pri konštruktívnej interferencii sa vlna 1 a vlna 2 sčítajú ako znázorňuje obrázok (Obr. 2.9). Pri deštruktívnej interferencii sa vlny navzájom anulujú, ako znázorňuje obrázok (Obr. 2.10).



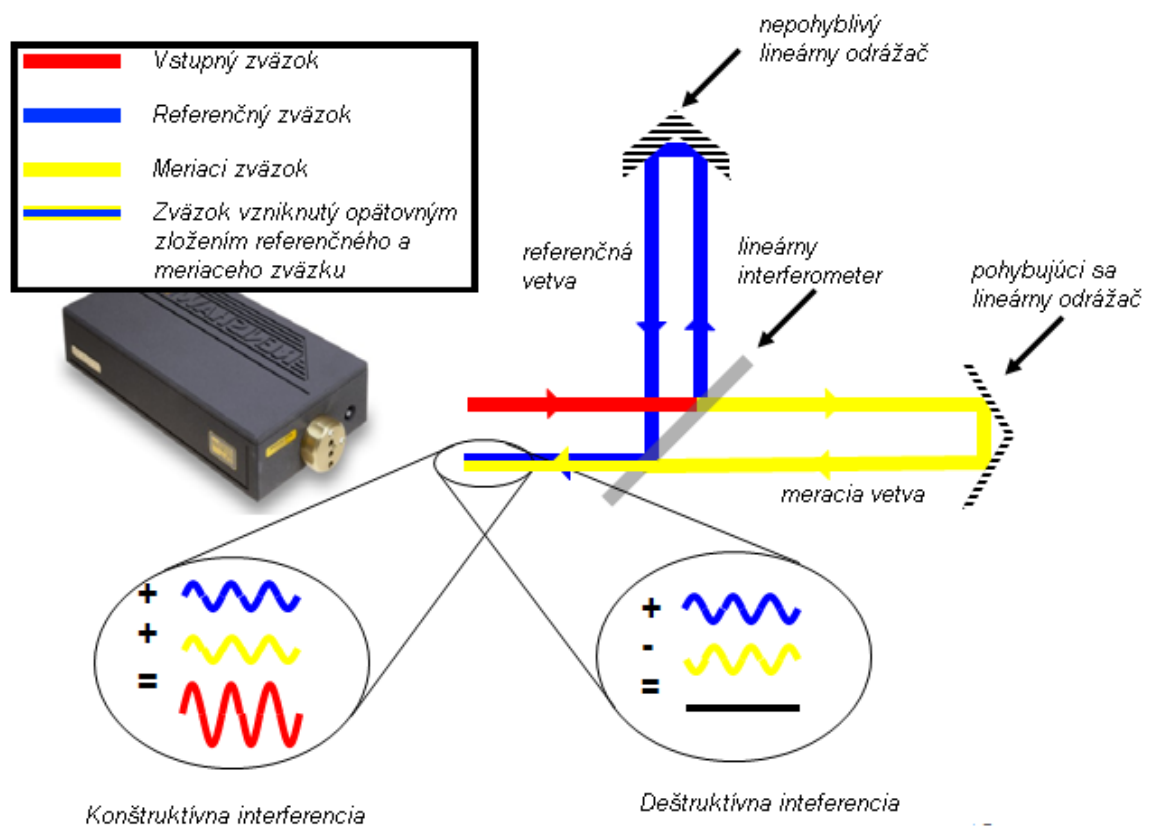
Obr. 2.9 Princíp konštruktívnej interferencie

[11]



Obr. 2.10 Princíp deštruktívnej interferencie

[11]



Obr. 2.11 Schéma činnosti laserového interferometra

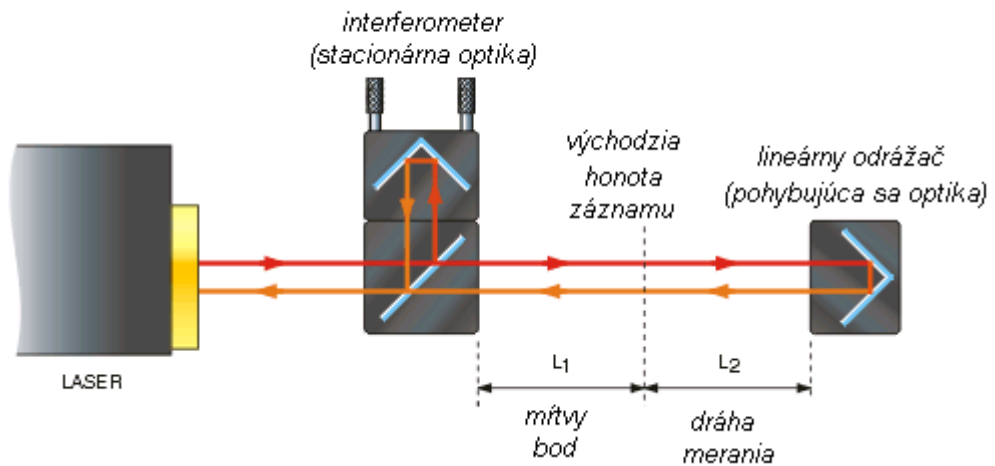
[11]

Laserový interferometer sa dá využiť na :

- polohovanie lineárnych osí
- meranie rovinnosti
- meranie kolmosti
- polohovanie rotačných osí
- rýchlosť, zrýchlenie pohyblivých cieľov
- priamosť vedenia a určenie priečnej vôle [11]

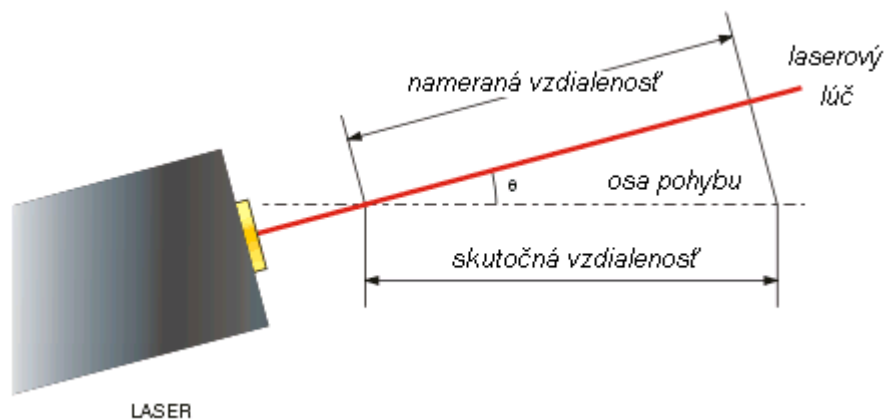
### 2.3 Chyby vzniknuté nevhodným poskladaním interferometra

Prvou chybou je chyba vznikajúca takzvanou mŕtvou dráhou. Táto chyba je chyba pridružená k zmenám prostredia, ktoré nastanú v priebehu lineárneho merania. Za normálnych podmienok je chyba mŕtvej dráhy bezvýznamná. Princíp tejto chyby znázorňuje obrázok (Obr. 2.12), kde vlastne táto chyba u laserového merania vzdialenosti  $L_2$ , je závislá na vzdialenosti medzi dvoma optickými prvkami pri nulovaní systému. Pokiaľ nedochádza k pohybu medzi interferometrom a reflektorom a menia sa podmienky prostredia v okolí laserového lúča, potom sa vlnová dĺžka vo vzduchu bude meniť pozdĺž celej dráhy ( $L_1 + L_2$ ), ale laserový meriaci systém ju bude kompenzovať iba pozdĺž dráhy  $L_2$ . Tým chyba mŕtvej dráhy zavedené do lúča  $L_1$  nebude kompenzovaná. Táto chyba bude zanedbateľná, pokiaľ sa stacionárna a pohyblivá optika dotýkajú v dobe, keď sa robí nulovanie.



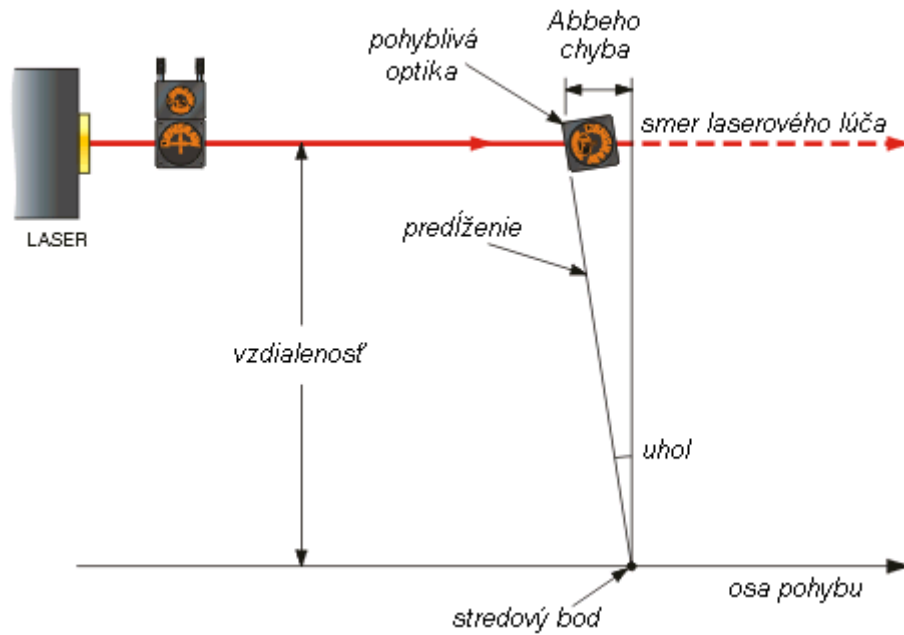
Obr. 2.12 Chyba vzniknutá tzv. mítnou dráhou [11]

Ďalšou chybou, ktorá môže nastať, je Cosínová chyba. Princíp tejto chyby spočíva v nesúosovosti laserového lúča a osi pohybu. V tomto prípade nastane situácia, že nameraná hodnota sa nerovná skutočnej. Tento jav zobrazuje obrázok (Obr. 2.13).



Obr. 2.13 Cosínová chyba [11]

Tretia chyba, ktorá môže nastať, je chyba vznikajúca nedodržaním tzv. Abbeho princípu. Abbeho princíp je definovaný tak, že os merania musí byť pokračovaním osi meracej stupnice. Obrázok (Obr. 2.14) ukazuje pootočeniu pohyblivej optiky a tým pádom os merania nie je pokračovaním osi meracej stupnice. [11]



Obr. 2.14 Chyba vznikajúca nedodržaním tzv. Abbeho princípu [11]



### 3 RÝCHLA FURIEROVA TRANSFORMÁCIA FFT

FFT je najvhodnejšou metódou na pozorovanie vibračných signálov spôsobom, pri ktorom sa ich snažíme analyzovať. Z matematického hľadiska to znamená, že signál je rozložený na určité amplitúdy odpovedajúcim rôznym frekvenčným zložkám. FFT spektrá poskytujú informácie o stave stroja, vďaka nim sme schopní závalu lokalizovať, určiť jeho príčinu a pomocou trendovania určiť, za aký dlhý čas sa stane daná závala kritická pre správny chod stroja. Podstatou je, že určitá závala sa objavuje pri určitej frekvencii, potom pri analýze FFT spektier sledujeme zmeny amplitúd v týchto frekvenčných rozsahoch.

#### 3.1 Frekvenčná analýza

V matematike je určené, že periodická funkcia  $f(t)$  s periódou  $T$  ide vyjadriť nekonečnou sumou rady funkcií sínus a kosínus. Frekvencia každej funkcie sínus a kosínus je daná celočíselným násobkom frekvencie pôvodnej funkcie. Ide o Fourierove rady, ktoré sa dajú vyjadriť v tvare:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n2\pi \frac{t}{T}) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n2\pi \frac{t}{T}) \quad (3.1)$$

kde koeficienty sú dané vzťahmi:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin(n2\pi \frac{t}{T}) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n2\pi \frac{t}{T}) dt \quad (3.2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n2\pi \frac{t}{T}) dt \quad (3.3)$$

$a_n$  a  $b_n$  vyjadrujú hodnoty amplitúd jednotlivých kmitočtových zložiek komplexného časového signálu  $f(t)$ .

Fourierove rady sa dajú používať iba pri periodickom kmitaní. Dá sa napísať, že  $T \rightarrow \infty$  a frekvencie kmitočtových zložiek nie sú celočíselné násobky elementárnej frekvencie, no môžu mať spojité spektrum hodnôt. [4]

Pre výpočet kmitočtových zložiek je treba použiť rovnice (3.3) využitím integrálov:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{priama transformácia}), \quad (3.4)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f)e^{j2\pi ft} df \quad (\text{inverzná transformácia}). \quad (3.5)$$

Funkcia  $S(f)$  je všeobecne komplexná, čo znamená prítomnosť reálnej i imaginárnej zložky. Je nositeľom informácie o amplitúdach a fázach všetkých harmonických frekvencií zahrnutých v  $x(t)$ .

Fourierova transformácia je daná spojitým analytickým integrálom. V diskretných časových momentoch vzdialených o  $t$  ide zachytiť časový signál vibračných detektorov. Ak poznáme iba  $x(t)$  – diskkrétne hodnoty funkcie a integrály Fourierovej transformácie je treba počítat' numericky:

$$S'(f) = \Delta t \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n\Delta t)e^{-j2\pi n f \Delta t} \quad (3.6)$$

V tomto prípade sú získané informácie nepresné. Funkcia  $S'(f)$  popisuje presne iba zložky z nižšou frekvenciou ako je  $f_{\max}$ , ktorá súvisí z veľkosťou vzorkovacieho intervalu  $\Delta t$ .

Meranie časového signálu prebehne v konečnom časovom intervale  $T$  (celková doba merania), tým nám zostáva k dispozícii iba obmedzený počet diskretných hodnôt  $x(n\Delta t)$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ,  $N = T / \Delta t$  ( $N$  - je počet vzorkou). Z toho vyplýva, že sa dajú určiť amplitúdy a fázy pre nekonečne veľá hodnôt frekvencie a intervalu medzi 0 a  $f_{\max}$ .

Dostávame diskkrétne kmitočtové zložky s krokom  $f$ . Môžeme si to predstaviť, že diskrétna Fourierova transformácia predstavuje sústavu  $m$  pásmových filtrov so šírkou pásma  $f$  (interval medzi kmitočtovými zložkami,  $\Delta f = 1/T$ ). Obmedzením počtu diskrétnych hodnôt  $x(n\Delta t)$ , dostávame vzťah :

$$C(m\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi m\Delta f n\Delta t} \quad (3.7)$$

pre  $m = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$

Účinný algoritmus pre výpočet tohto vzťahu pri diskkrétnej transformácii sa nazýva Rýchla Fourierova transformácia (FFT). Je používaný vo výpočtových technických programoch v PC. Pri používaní algoritmu FFT sa spravidla obmedzujeme iba na hodnoty  $N$ , ktoré sú rovné mocnине čísla 2, to je 256, 512, ... Avšak táto podmienka neplatí všeobecne pre Fourierovu transformáciu, ale je to cena, ktorú treba zaplatiť za rýchlosť algoritmu FFT, ktorá je pri frekvenčnej analýze vo väčšine prípadov oveľa dôležitejšia. Počet hodnôt kmitočtového spektra je rovný polovici počtu hodnôt časového signálu, pričom  $f_{\max}$  je rovná polovici vzorkovacej frekvencie  $f_{vz} = 1/\Delta t$ . To súvisí so Shannonovým vzorkovacím teorénom, podľa ktorého musí byť vzorkovacia frekvencia aspoň dvakrát väčšia (Nyquistova frekvencia) ako frekvencia najvyššej harmonickej zložky, obsiahnutej v meranom signáli. V digitálnej Fourierovej transformácii sa táto skutočnosť prejaví tým, že iba  $N/2$  hodnôt funkcie  $C(m\Delta f)$  vo vzťahu (3.4) je nezávislých. Pri skutočnom meraní signál zahŕňa rôzne rušivé zložky. Niektoré z nich majú náhodný charakter, iné sú harmonické zložky s vyššou frekvenciou, ako je maximálna frekvencia kmitočtových zložiek daná Shannonovým teorénom. Náhodné rušivé signály neovplyvňujú do značnej miery výsledky kmitočtovej analýzy. Ak je vzorkovacia frekvencia nižšia, ako by bolo žiaduce k najvyššej frekvencii meraného signálu, nachádza sa v kmitočtovom spektre „nepravé“ výrazné maximum (špička). Všeobecne platí, že každá zložka  $f_s > f_{\max}$  vytvorí v kmitočtovom spektre FFT maximum pri frekvencii  $f = f_{vz} - f_s$ . Tento jav sa nazýva kmitočtové skreslenie. [4]

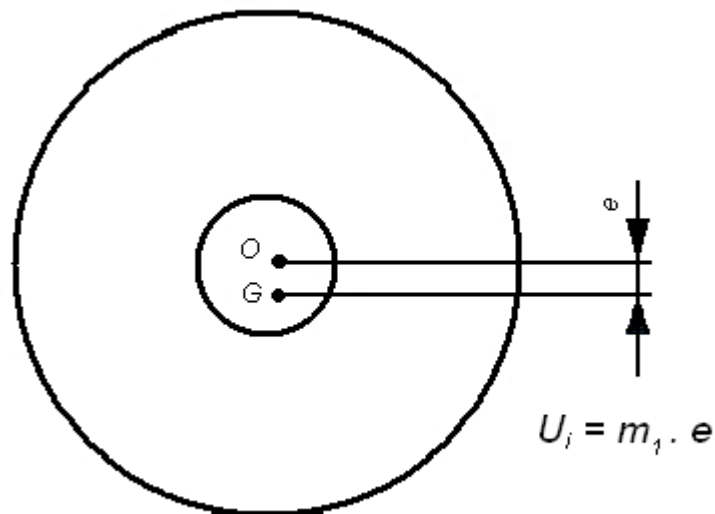
## 4 VYVAŽOVANIE BRÚSIACICH KOTÚČOV

Brúsiaci kotúč po upnutí na vreteno nesmie hádzat', musí byť vyvážený. Hmotnosť kotúča musí byť rovnomerne rozdelená tak, aby ťažisko rotujúceho kotúča bolo v osi vretena.

Nevyvážený kotúč spôsobuje :

- nadmerné namáhanie ložísk vretena
- chvenie, ktoré zhoršuje akosť brúseného povrchu
- znižuje sa výkon brúsiaceho stroja
- značné odstredivé sily, ktoré môžu brúsiaci kotúč roztrhnúť. [10]

Podľa normy ČSN EN ISO 6103/2005 sa nevyvážok definuje ako súčin polomerov v milimetroch a hmotnosti v gramoch, vyjadruje sa v grammilimetroch. Vnútorňý nevyvážok brúsneho kotúča  $U_i$  je súčin hmotnosti brúsneho kotúča  $m_1$  a vzdialenosti  $e$  medzi jeho stredom hmotnosti  $G$ , to jest ťažiskom a osou  $O$  jeho diery. [9]



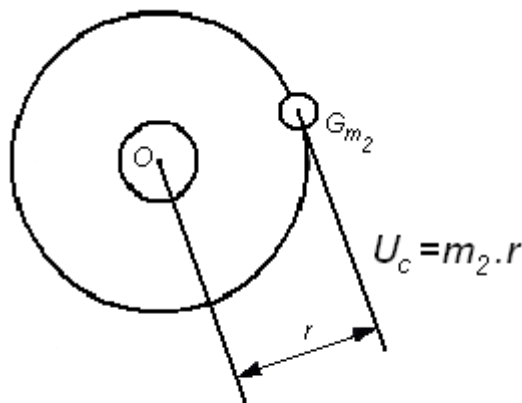
Obr. 4.1 Vnútorňý nevyvážok brúsiaceho kotúča [9]

## 4.1 Druhy vyvažovania

Medzi druhy nevyváženosti patrí statická a dynamická nevyváženosť. Ak je výška kotúča  $H > 0,1D$  je statické vyvažovanie nedostatočné, pretože nevyvážené hmoty sú rozložené v rôznych rovinách.

### 4.1.1 Statické vyvažovanie

Meraný nevyvážok  $U_c$  je definovaný ako súčin hmotnosti  $m_2$  pripevnenej k brúsiacemu kotúču pre jeho vyváženie a vzdialenosti medzi stredom hmotnosti  $G_{m_2}$  hmotnosťou  $m_2$  a osou diery  $O$  brúsneho kotúča. Táto vzdialenosť odpovedá prakticky polomeru  $r$  brúsneho kotúča.

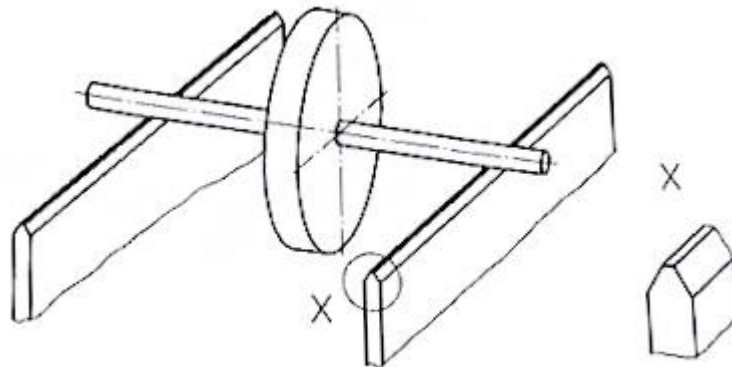


Obr. 4.2 Meraný nevyvážok

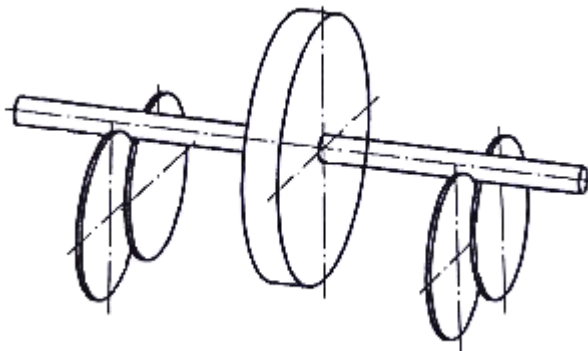
[9]

Meranie brúsiaceho nevyvážku sa robí tak, že do diery brúsiaceho kotúča sa zasunie vyvažovací trň, ktorý drží brúsiaci kotúč vo zvislej polohe. Ploché kotúče, alebo kotúče podobného tvaru, držia na trni bez ďalšieho podoprenia, kotúče iných tvarov môžu byť podoprené pomocou vhodných prírub.

Vyvažovací trň sa položí na dve rovnobežné vodiace lišty alebo valcové tyče, ktoré sú vyrovnané do vodorovnej roviny, ako je to na obrázku (Obr. 4.3), alebo na vyvažovací prípravok, ktorý je zostavený z dvoch párov prekryvajúcich sa a voľne otočných kotúčov, ako to je vidno na obrázku (Obr. 4.4). Brúsiaci kotúč v tom prípade dosiahne rovnovážnej polohy s minimálnym trením.



Obr. 4.3 Zobrazenie vyvažovacieho trňa na vodiacich tyčiach [9]



Obr. 4.4 Zobrazenie vyvažovacieho trňa na valcových tyčiach [9]

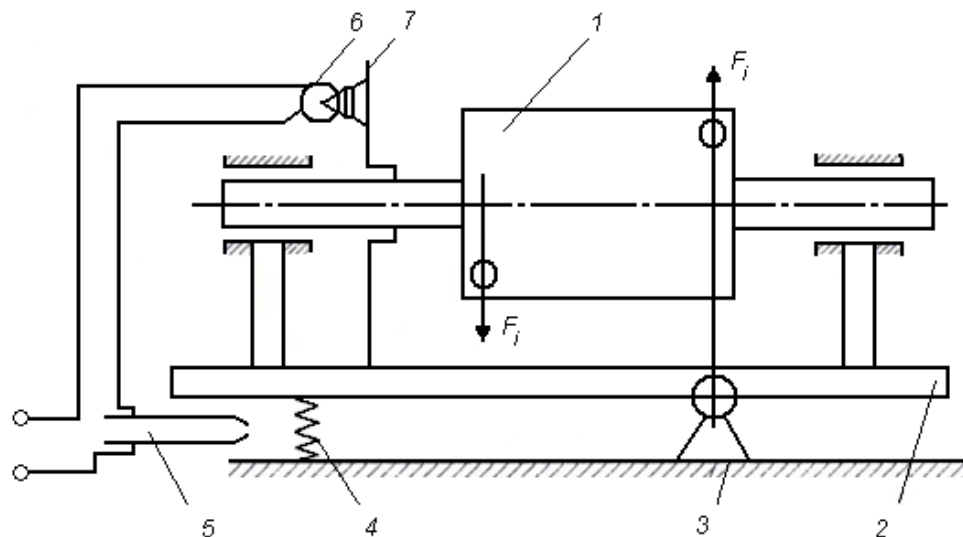
Vôľa medzi vyvažovacím trňom a dierou brúsiaceho kotúča nesmie presiahnuť 0,4 mm. Trň a oporu ako napríklad vodiace lišty, tyče musia mať dostatočnú tvrdosť povrchu a pre zníženie trenia primeranú kvalitu povrchu. Keď brúsiaci kotúč dosiahne rovnovážnej polohy, je jeho stred hmotnosti v najnižšej polohe. V tejto polohe sa brúsiaci kotúč v najvyššom bode jeho obvodu označí. Potom sa otočí o  $90^\circ$ , takže značka je vo vodorovnej rovine, ktorá prechádza osou trňa.

Ďalej sa určí hmotnosť  $m_2$ , ktorá pri pripevnení na obvod kotúča v mieste značky udrží brúsny kotúč v rovnovážnej polohe. Veľkosť takto zisteného nevyvážku  $U_c = m_2 \cdot r$ , je rovnaká ako veľkosť vnútorného nevyvážku a je na jeho opačnej strane. Hodnota hmotnosti  $m_2$  sa použije pre určenie vnútorného nevyvážku pomocou vzorca : [9]

$$U_i = U_c \cdot r \quad (4.1)$$

#### 4.1.2 Dynamické vyvažovanie

Na rozdiel od statického vyvažovania, dynamickú nevyváženosť nie je možné merať v pokojnom stave. Pôsobia tu dve rovnaké sily (hmoty) proti sebe (o  $180^\circ$ ), čo znamená, že v pokojnej polohe sa zariadenie zdá ako vyvážené. Aj napriek tomu zariadenie vibruje. V praxi sa najčastejšie objavuje dynamická nevyváženosť, ktorá je vykonávaná na mieste prevádzky, bez demontáže a väčšieho zásahu do stroja. Dynamické vyvažovanie má niekoľko výhod, medzi ktoré patrí rýchlosť celkového procesu (úspora času), nepotrebnosť rozoberať zariadenie, vyvažovanie celej sústavy, presná metóda a ekonomickosť, keďže demontáž, montáž zvyšujú náklady a sú strojcami ďalších zvyknutých chýb.



Obr. 4.5 Schéma dynamického vyvažovania brúsneho kotúča [8]

1- kotúč, 2 - rám, 3 - priečny čap, 4 - pružina, 5 - elektrický kontakt,  
6 - žiarovka, 7 - deliaci kotúč

Kotúč 1 je upevnený na otočnom trní v ložiskách rámu 2, ktorý sa môže pootáčať okolo čapu 3. Druhý koniec rámu pridržujú pružiny 4. Pri rotácii kotúča v dôsledku dynamickej nevyváženosti vzniká sila  $F_i$ , ktorá striedavo vychyluje rám 2 a stláča pružiny 4. Ak smeruje vektor sily  $F_i$  dole, pružina 4 sa stláča a uzatvára elektrický kontakt 5, ktorý zapne elektrický obvod neónovej lampy 6. Lampa 6 osvieti číslo dieliky na stupnici kotúča 7, ktorý určuje miesto pre odstránenie hmoty.

Moderné vyvažovacie poloautomatické stroje sú vybavené elektronickým zariadením, ktoré podľa veľkosti impulzu (uhla vychýlenia rámu) určuje i veľkosť odoberanej hmoty. Po prevedení korekcie sa kotúč s trníom otočia o  $180^\circ$  a vyvažuje sa na druhej čelnej ploche brúsiaceho kotúča. Pri rotácii dynamicky vyváženého kotúča sa rám nevychyluje a lampa sa nerozsvecuje. Povolená nevyváženosť závisí na hmote kotúča. [8]

## 4.2 Orovnávanie brúsiacich kotúčov

Tvar brúsiaceho kotúča pri brúsení veľmi vplýva na akosť brúseného povrchu a rezné sily. Opotrebovaný brúsiaci kotúč sa musí orovnať. Orovnanie je v podstate jemné obrábanie povrchu kotúča, pri ktorom sa odstraňujú opotrebované zrná z povrchu brúsiaceho kotúča. Cieľom orovnania je :

- vytvoriť alebo obnoviť na brúsiacom kotúči požadovaný tvar
- odstrániť brúsený materiál a prach z pórov kotúča
- ovplyvniť kvalitu brúseného povrchu.

V praxi sa používajú rôzne spôsoby orovnávania a rôzne typy orovnávačov. Orovnávače môžeme rozdeliť do dvoch skupín – nediamantové a diamantové orovnávače. Nediamantové orovnávače sú určené väčšinou na vytvorenie hrubého tvaru kotúča alebo na menej presné orovnanie. Orovnáva sa ručne alebo orovnávacím zariadením. [10]



## **II. PRAKTICKÁ ČASŤ**

## 5 MERANIE VIBRÁCIÍ A ICH ANALÝZA

Úlohou mojej diplomovej práce bolo dokázať, či dotykový merací prístroj značky Balantron meria vibrácie rovnako, ako laserový interferometer značky Renishaw. A či sa vibrácie zvolených brúsiacich kotúčov pred brúsením a po brúsení zmenili, alebo naopak, nezmenili.

### 5.1 Použité zariadenia a materiály

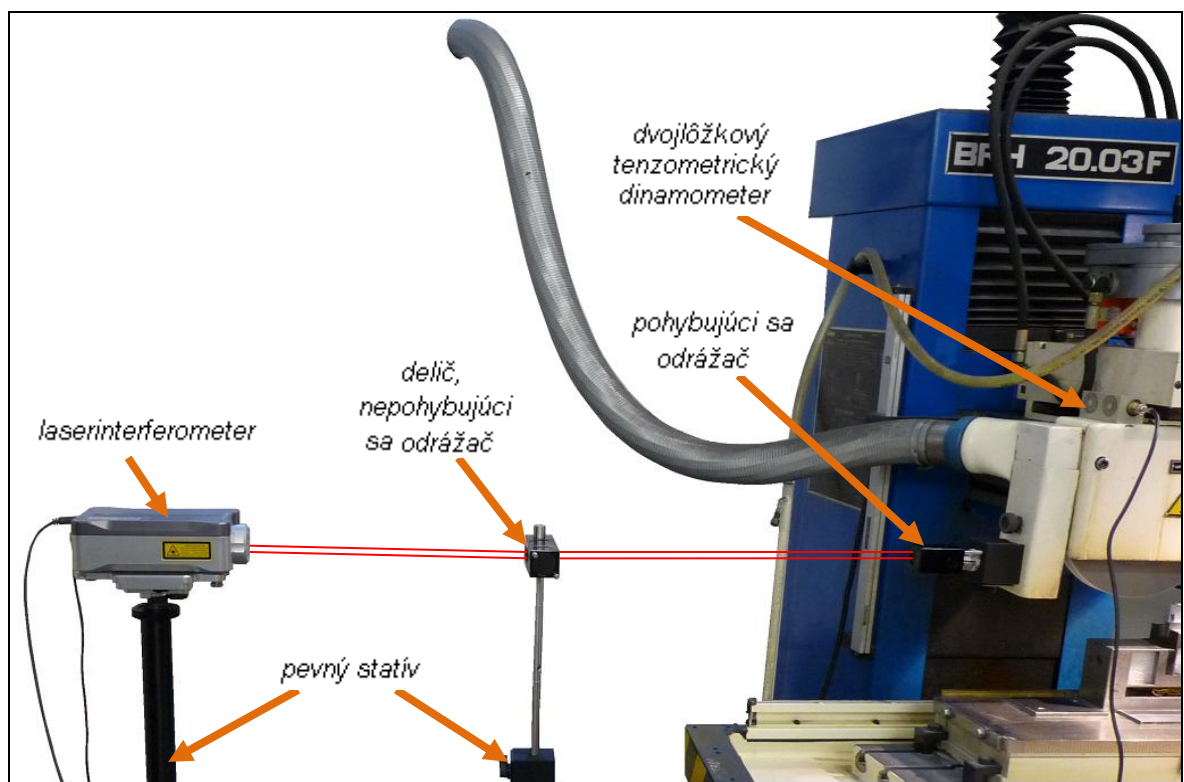
Na brúsenie materiálu v mojej praktickej časti bola použitá vodorovná rovinná brúška s typovým označením BRH 20,03 F. Z hľadiska koncepcie sa brúsky typu BRH 20,03 F vyznačujú tým, že hlavný otočný pohyb vykonáva brúsiaci kotúč, vedľajší posuvný pohyb vykonáva stôl a vertikálny pohyb vykonáva vreteník. Tento typ brúsky pracuje s ručnou obsluhou v uzavretom alebo neuzavretom automatickom cykle.

Na meranie vibrácií bol použitý laserový interferometer od spoločnosti Renishaw. Typové označenie XL-80. Presnosť lineárneho merania je  $\pm 0,5$  ppm vďaka presnému stabilizovanému laserovému zdroju a presnej kompenzácií vplyvov prostredia. Snímanie je možné vykonávať s frekvenciou až 50 kHz pri maximálnej rýchlosti lineárneho merania 4 m/sas lineárnym rozlíšením 1 nm aj pri maximálnej rýchlosti. Na porovnanie s kontaktným spôsobom merania bol použitý merací prístroj značky Balantron s frekvenciou 200 Hz.

Vibrácie boli merané na brúsiacom kotúči z diamantu typové označenie D100 K100 B-VI a brúsiacom kotúči z kubického nitridu bóru typové označenie B107 K100 B-III. Brúsený materiál bol z Ocele triedy 19 436.4, z Duralu, z Ocele triedy 14 109.4 a z Epoxidovej pryskyrice.

## 5.2 Postup pri meraní

V prvom rade bol umiestnený laserový interferometer značky Renishaw typové označenie XL80 s potrebným príslušenstvom. Tento merací prístroj a príslušenstvo bolo umiestnené v osi posuvu brúseného materiálu. Princíp merania je znázornený na obrázku (Obr. 2.11). Na kryt brúsiaceho kotúča bol umiestnený aj snímač Balantronu na kontaktné meranie.



Obr. 5.1 Zobrazenie schémy merania pomocou laserového interferometra značky Renishaw XL80

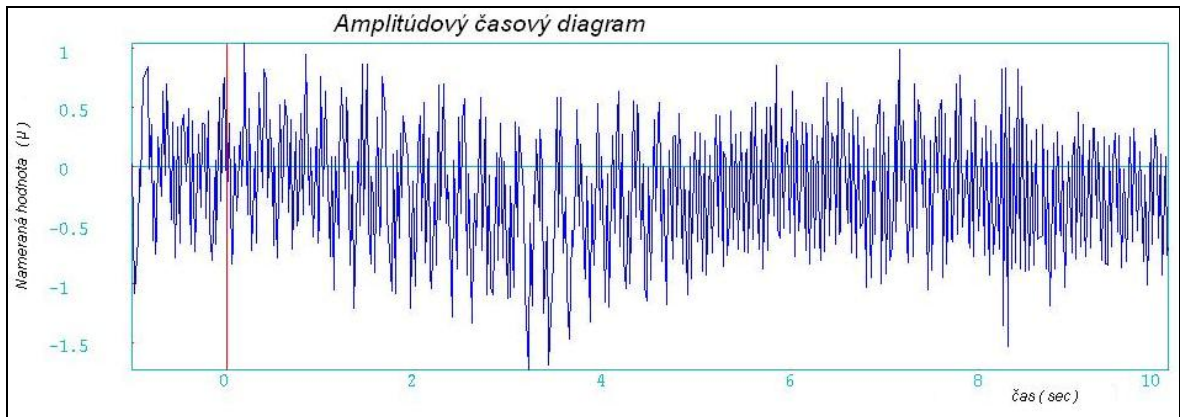
Ďalej bolo potrebné v programe Renishaw laserXL nastaviť teplotu, vlhkosť, tlak. Hodnoty boli získané z meteostanice typu Evolve pilot. Teplota bola nastavená na 24 °C, vlhkosť na 85% RH a tlak na 1013,25 mbar. Pre lepšie zachytenie všetkých vibrácií frekvenčného záznamu bola frekvencia nastavená na 1kHz. Čas začatia ukladania po prvej sekun-

de snímania. Čas ukončenia po 10 sekundách snímania. To jest celkový čas bol nastavený na 11 sekúnd.

Samotné meranie prebehlo nasledovne: vyvážený kotúč bol vložený do brúsky a bol spustený do chodu. Zaznamenala sa 30-krát vibrácia pomocou softwaru meracieho laserového interferometra značky Renishaw typ XL80 a 10-krát vibrácia pomocou softwaru Spider Corner-software pre prístroj Balantron, kde bolo treba pomocou stopiek odmerať približne 10 sekúnd, lebo software nebol schopný sám vymedziť čas merania. Každý nameraný graf bol uložený kvôli ďalšiemu vyhodnocovaniu. Potom brúsiaci kotúč zbrúsil všetky 4 materiály po obvode systémom, že na každom materiáli bral všetky 4 strany. Na prvej strane bral po 5 tisícinách, na ďalšej po 1 stotine, na ďalšej po 2 stotinách a na poslednej po 4 stotinách. Všetky zábery boli 5 krát opakované s posuvnou rýchlosťou 2,5 m / min. Po skončení brúsenia sa nechal brúsiaci kotúč v chode a zopakovalo sa meranie 30-krát pomocou softwaru meracieho laserového interferometra značky Renishaw typ XL80 a 10-krát pomocou softwaru Spider Corner-software pre prístroj Balantron. Tento postup bol rovnaký pre oba brúsiace kotúče.

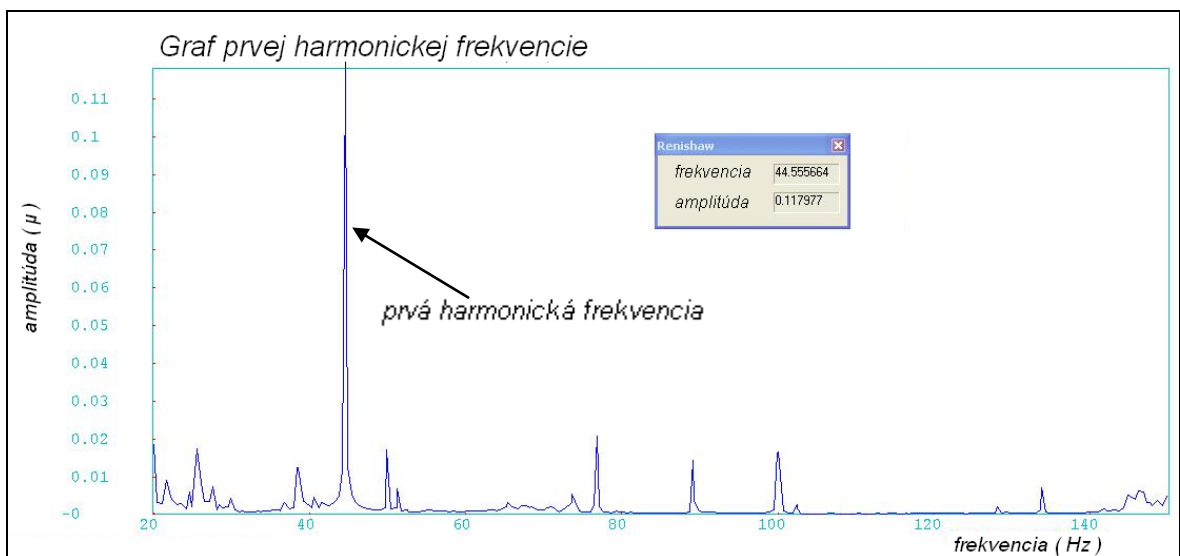
### **5.3 Analýza zaznamenaných priebehov vibrácií laserového interferometra značky Renishaw XL80**

Na začiatku bolo vo vyhodnocovacom software pre Renishaw XL80 modul vibroanalýza potrebné nastaviť veľkosti jednotiek v zodpovedajúcich osiach. V osi X sa nastavili mikrometre a v osi Y sekundy. Po nastavení jednotiek vznikol graf pripravený na analýzu.



Obr. 5.2 Amplitúdový časový diagram z vyhodnocovacieho softwaru pre Renishaw XL80

Maximálny nevyvážok odpovedá prvej harmonickej frekvencii. Na určenie bola nastavená stupnica osi X do 150 Hz, za účelom odfiltrovania vyšších harmonických. Vznikol graf (Obr. 5.3) znázorňujúci prvú harmonicкую frekvenciu. Znázorňovala ju maximálna hodnota na grafe. Získané hodnoty frekvencie a amplitúdy boli zapísané do štatistického softwaru Minitab verzia 14. Takýto postup bol pri všetkých grafoch získaných z vyhodnocovacieho softwaru laserového interferometra Renishaw XL80.



Obr. 5.3 Graf prvej harmonickej frekvencie nameraný pomocou prístroja Renishaw XL80

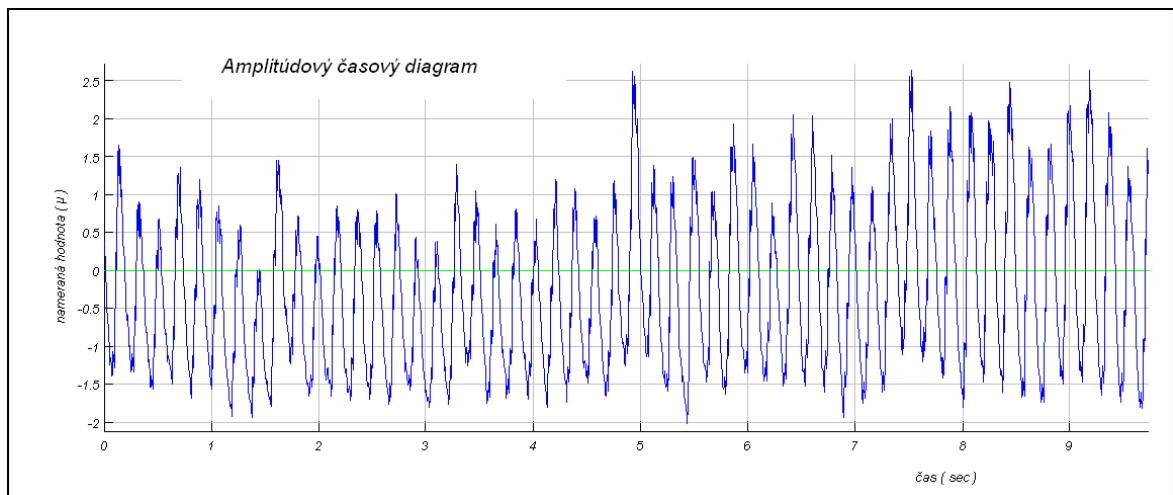
## 5.3.1 Výsledné hodnoty získané z vyhodnocovacího softwaru pre Renishaw XL80

Tabuľka 1 Výsledky FFT analýzy z vyhodnocovacího softwaru pre Renishaw XL80

Číslo merania	Kubický nitrid bóru				Diamant			
	Pred brúsením		Po brúsení		Pred brúsením		Po brúsení	
	Frekvencia (Hz)	Amplitúda ( $\mu$ )	Frekvencia (Hz)	Amplitúda ( $\mu$ )	Frekvencia (Hz)	Amplitúda ( $\mu$ )	Frekvencia (Hz)	Amplitúda ( $\mu$ )
1	44,556	0,118	44,617	0,131	44,556	0,323	44,556	0,324
2	44,556	0,129	44,617	0,142	44,556	0,324	44,556	0,314
3	44,556	0,130	44,556	0,130	44,556	0,317	44,556	0,323
4	44,556	0,134	44,617	0,124	44,556	0,290	44,556	0,327
5	44,556	0,130	44,617	0,131	44,556	0,317	44,556	0,320
6	44,556	0,134	44,617	0,129	44,556	0,304	44,556	0,319
7	44,556	0,135	44,617	0,124	44,556	0,279	44,556	0,319
8	44,556	0,135	44,556	0,129	44,556	0,311	44,556	0,322
9	44,556	0,134	44,556	0,124	44,556	0,304	44,556	0,312
10	44,556	0,131	44,556	0,130	44,556	0,317	44,617	0,284
11	44,556	0,132	44,556	0,125	44,556	0,316	44,556	0,314
12	44,556	0,134	44,617	0,132	44,556	0,310	44,556	0,318
13	44,556	0,135	44,556	0,124	44,556	0,316	44,556	0,326
14	44,556	0,135	44,556	0,125	44,556	0,318	44,556	0,326
15	44,556	0,133	44,556	0,132	44,556	0,320	44,556	0,324
16	44,556	0,129	44,617	0,133	44,556	0,319	44,556	0,317
17	44,556	0,133	44,556	0,124	44,556	0,314	44,556	0,311
18	44,556	0,128	44,556	0,126	44,556	0,304	44,556	0,323
19	44,556	0,133	44,556	0,129	44,556	0,304	44,556	0,320
20	44,556	0,135	44,556	0,136	44,556	0,300	44,556	0,326
21	44,556	0,130	44,617	0,126	44,556	0,300	44,556	0,309
22	44,556	0,131	44,556	0,132	44,556	0,309	44,556	0,320
23	44,556	0,133	44,617	0,134	44,556	0,310	44,556	0,327
24	44,556	0,126	44,617	0,127	44,556	0,307	44,556	0,295
25	44,556	0,135	44,617	0,123	44,556	0,309	44,556	0,283
26	44,556	0,133	44,556	0,128	44,556	0,278	44,556	0,303
27	44,556	0,135	44,556	0,130	44,556	0,297	44,556	0,315
28	44,556	0,135	44,556	0,122	44,556	0,303	44,556	0,304
29	44,556	0,134	44,556	0,131	44,556	0,299	44,556	0,325
30	44,556	0,135	44,556	0,131	44,556	0,298	44,556	0,323

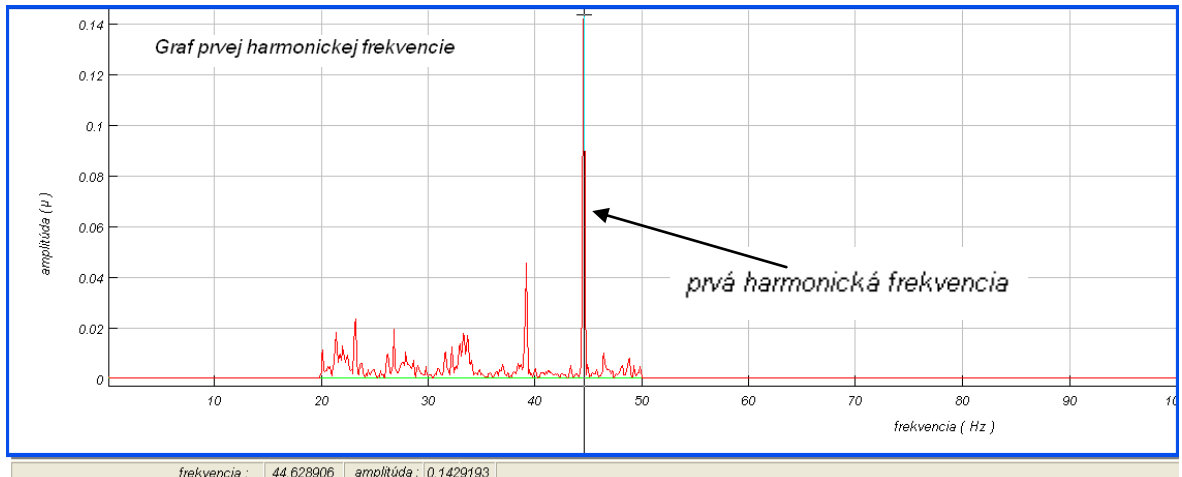
## 5.4 Analýza nameraných hodnôt z prístroja Balantronu pomocou softwaru Sigwiev32 verzia 2.4.0

Na vyhodnotenie hodnôt získaných zo softwaru Spider Corner-software bol použitý software Sigwiev32 verzia 2.4.0.



Obr. 5.4 Amplitúdový časový diagram softwaru Sigwiev32 verzia 2.4.0 pre hodnoty z prístroja Balantron

Na určenie bola nastavená stupnica osi X do 50 Hz, za účelom odfiltrovania vyšších harmonických. Vznikol graf, (Obr. 5.5) znázorňujúci prvú harmonickú frekvenciu. Znázorňovala ju maximálna hodnota na grafe. Získané hodnoty frekvencie a amplitúdy boli zapísané do štatistického softwaru Minitab verzia 14. Takýto postupoval bol pri všetkých grafoch získaných zo softwaru Sigwiev32 verzia 2.4.0 pre hodnoty z prístroja Balantron.



Obr. 5.5 Graf prvej harmonickej frekvencie nameraný pomocou prístroja Balatron

#### 5.4.1 Výsledné hodnoty získané z vyhodnocovacieho softwaru Sigwiev32 verzia 2.4.0

Tabuľka 2 Výsledky FFT analýzy z vyhodnocovacieho softwaru Sigwiev32 verzia 2.4.0

Číslo merania	Kubický nitrid bóru				Diamant			
	Pred brúsením		Po brúsení		Pred brúsením		Po brúsení	
	Frekvencia (Hz)	Amplitúda ( $\mu$ )	Frekvencia (Hz)	Amplitúda ( $\mu$ )	Frekvencia (Hz)	Amplitúda ( $\mu$ )	Frekvencia (Hz)	Amplitúda ( $\mu$ )
1	44,531	0,052	44,580	0,066	44,629	0,143	44,531	0,130
2	44,580	0,055	44,580	0,056	44,580	0,181	44,580	0,152
3	44,580	0,051	44,629	0,063	44,529	0,157	44,580	0,164
4	44,580	0,054	44,580	0,057	44,629	0,153	44,531	0,149
5	44,531	0,052	44,580	0,057	44,629	0,153	44,531	0,014
6	44,531	0,056	44,580	0,062	44,580	0,172	44,531	0,137
7	44,531	0,052	44,580	0,056	44,580	0,168	44,580	0,145
8	44,580	0,059	44,580	0,060	44,580	0,155	44,580	0,148
9	44,531	0,055	44,629	0,060	44,629	0,131	44,629	0,130
10	44,531	0,056	44,580	0,062	44,531	0,140	44,580	0,156

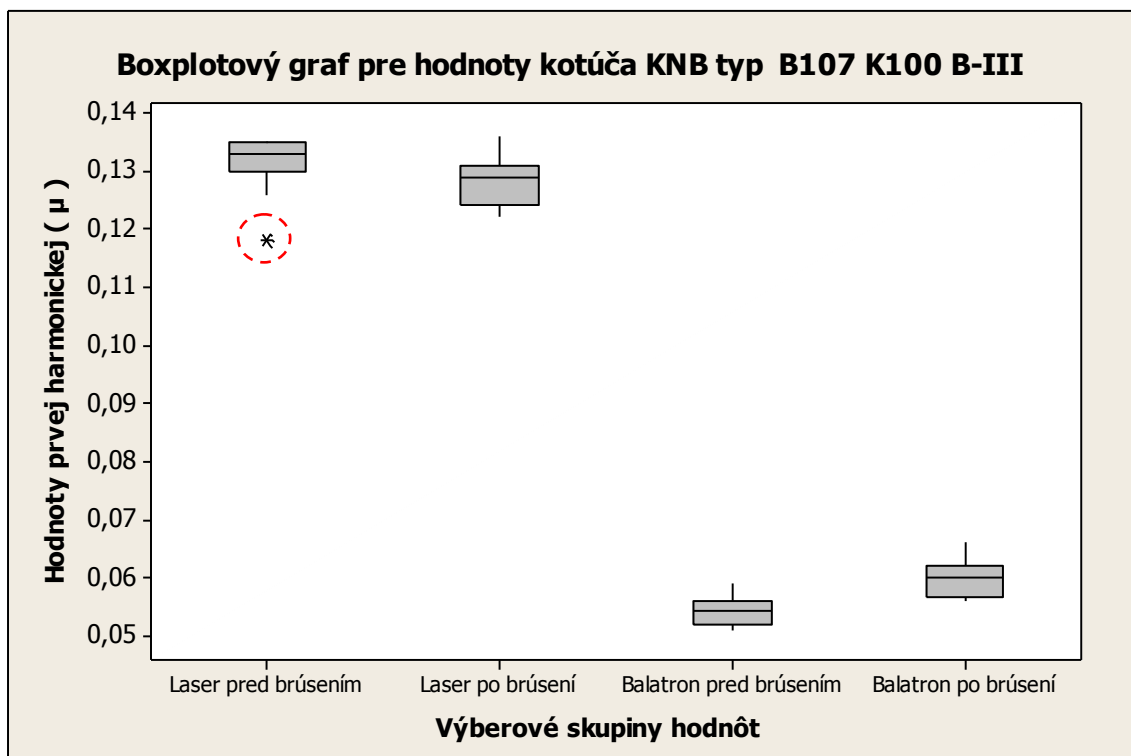


## 6 ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE

Na zistenie ako sa chová merací prístroj Balatron verzus laserový interferometer Renishaw XL80, a či je možné Balatron orientačne použiť namiesto laserového interferometra, existuje viac metód. Zvolená bola štatistická metóda. Na vyhodnotenie bol použitý software Minitab verzia 14.

### 6.1 Štatistické vyhodnotenie výberových súborov nameraných z vibrácií brúsiaceho kotúča z Kubického nitridu bóru typ B107 K100 B-III

Prvým krokom pre štatistické vyhodnotenie nameraných údajov sa spravila kontrola dát na vychýlené hodnoty. Kontrola sa robí pomocou metodiky vnútornej a vonkajšej hradby. Za vychýlenú hodnotu sa považuje taká hodnota, ktorá presiahne v boxplotovom diagrame 1,5 interquartilového rozpätia.



Obr. 6.1 Boxplotové grafy výberových skupín prvej harmonickej frekvencie kotúča KNB typ B107 K100 B-III

Boxplotový diagram ukázal jednu vychýlenú hodnotu. Hodnotu, ktorá je označená červeným prerušovaným kruhom. Bolo treba zistiť príčinu tohto extrému, lebo táto hodnota výrazne ovplyvní ďalší priebeh vyhodnocovania. Po analýze sa zistilo, že vychýlená hodnota bola zapríčinená zlým upevnením snímača. Vychýlená hodnota sa odstránila a znovu sa spravil Boxplotový graf. Teraz už nevykazoval žiadnu vychýlenú hodnotu a mohlo sa pristúpiť k ďalšiemu kroku.

Ďalším krokom bolo zistiť, či dané výberové súbory pochádzajú z normálneho rozdelenia. Stanovili sa hypotézy  $H_0$  a  $H_A$ . Hypotéza  $H_0$  bola definovaná, že s pravdepodobnosťou  $1-\alpha$ , to je s pravdepodobnosťou 95% nezamietam, že daný výberový súbor pochádza z normálneho rozdelenia. Hypotéza  $H_A$  bola definovaná, že s pravdepodobnosťou 95% zamietam, že daný výberový súbor pochádza z normálneho rozdelenia. Zvolil sa Kolmogorov-Smirnov test normality na zistenie správnosti hypotéz. Na potvrdenie hypotézy  $H_0$  musela byť hodnota  $P$  väčšia ako 0,050. Výsledky testu zobrazuje Tabuľka 3. Vo všetkých prípadoch sa potvrdila hypotéza  $H_0$ .

Tabuľka 3 Kolmogorov-Smirnov test normality pre výberové súbory KNB typ B107 K100

B-III

Názov výberového súboru	P-hodnota	Hodnoty pochádzajú z normálneho rozdelenia	
		zamietam	nezamietam
Laser pred brúsením	0,052		*
Laser po brúsení	> 0,150		*
Balantron pred brúsením	> 0,150		*
Balantron po brúsení	> 0,150		*

Keďže všetky výberové súbory pochádzajú s pravdepodobnosťou 95% z normálneho rozdelenia. Mohlo sa pristúpiť k ďalšiemu kroku. Ďalším krokom bolo spraviť štatistické charakteristiky všetkých výberových súborov.

Tabuľka 4 Štatistické charakteristiky výberových súborov KNB typ B107 K10

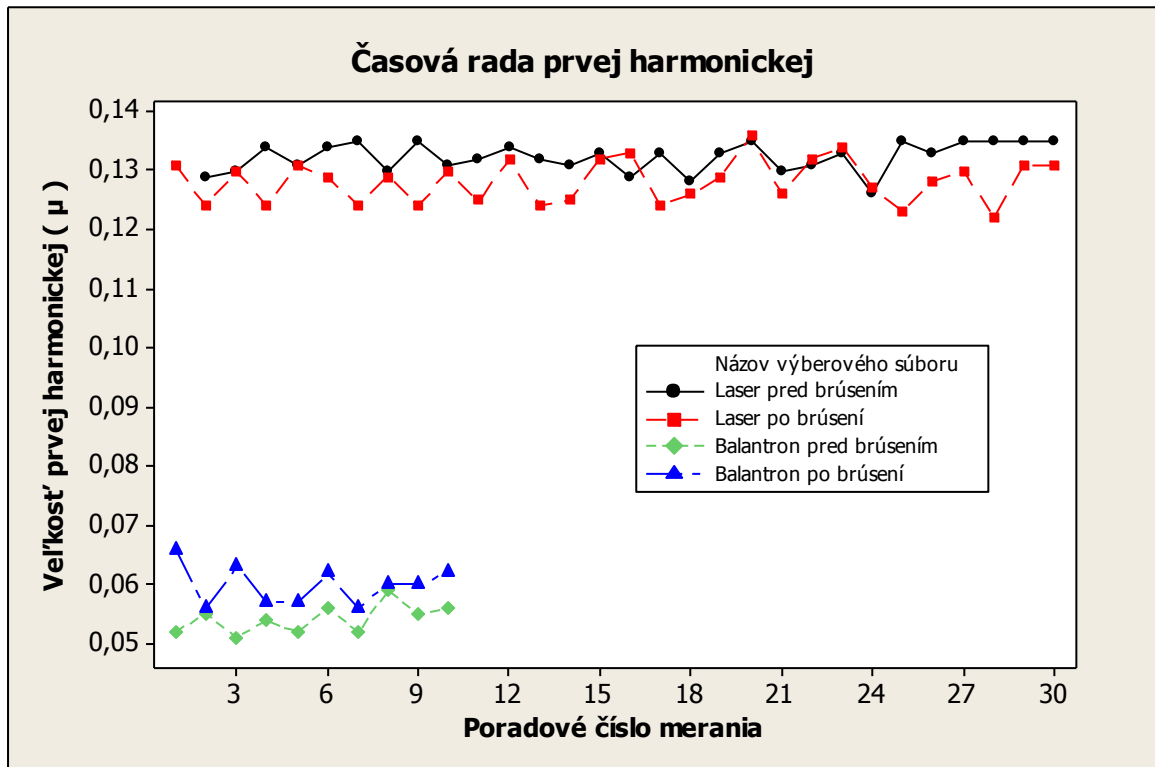
Názov výberového súboru	Veľkosť výberového súboru ( n )	Odhad aritmetického priemeru ( $\bar{x}$ ( $\mu$ ) )	Neistota merania typu A ( $U_A$ ( $\mu$ ) )	Odhad smerodatnej odchýlky ( s ( $\mu$ ) )
Laser pred brúsením	30	0,1323	0,00046	0,00248
Laser po brúsení	30	0,1282	0,00068	0,00375
Balantron pred brúsením	10	0,0542	0,00079	0,00249
Balantron po brúsení	10	0,0599	0,00107	0,00338

Názov výberového súboru	Variačný koeficient ( v (%) )	Minimálna hodnota ( $X_{min}$ ( $\mu$ ) )	Interquartilové rozpätie ( Iqr ( $\mu$ ) )
Laser pred brúsením	1,87	0,126	0,0045
Laser po brúsení	2,92	0,122	0,0070
Balantron pred brúsením	4,59	0,051	0,0040
Balantron po brúsení	5,64	0,056	0,0055

Názov výberového súboru	Prvý kvartil ( $q_1$ ( $\mu$ ) )	Medián ( $\tilde{x}$ ( $\mu$ ) )	Tretí kvartil ( $q_3$ ( $\mu$ ) )	Maximálna hodnota ( $X_{max}$ ( $\mu$ ) )
Laser pred brúsením	0,1305	0,1330	0,1350	0,135
Laser po brúsení	0,1240	0,1290	0,1310	0,136
Balantron pred brúsením	0,0520	0,0545	0,0560	0,059
Balantron po brúsení	0,0568	0,0600	0,0623	0,066

Štatistické charakteristiky ukázali veľmi nízky variačný koeficient všetkých výberových súborov. Keďže variačný koeficient ukazuje koľko percent smerodatnej odchýlky je zahrnuté v aritmetickom priemere. Variačný koeficient v tomto prípade je do 6 % čo znamená, že sú malé rozptyly a zároveň sa dá dôverovať aritmetickému priemeru.

Ďalšou úlohou bolo zistenie, ako sa v jednotlivých časových intervaloch menila prvá harmonická frekvencia. Použil sa graf časovej rady.



Obr. 6.2 Graf časovej rady výberových súborov pre kotúč KNB typ B107 K100 B-III

Z grafu (Obr. 6.2) opticky vyplýva, že namerané hodnoty prvej harmonickej frekvencie pre prístroj Balantron (ako pred tak aj po brúsení), tak laserový interferometer XL80 Renishaw (ako pred tak aj po brúsení), sú navzájom posunuté. Dá sa teda odhadovať, že prístroj Balantron značne podmeriava oproti laserovému interferometru XL80 Renishaw.

### 6.1.1 Porovnanie prvých harmonických frekvencií medzi dátami získanými laserovým interferometrom XL80 Renishaw a systémom Balantron z brúsiaceho kotúča KNB typ B107 K100 B-III

Na zistenie či hodnoty namerané na laserovom interferometri pochádzajú z rovnakého základného súboru ako hodnoty namerané na prístroji Balantron sa poslúžili F testy a T testy. Stanovili sa hypotézy  $H_0$  a  $H_A$ .

Hypotéza  $H_0$  pre F test bola definovaná, že s pravdepodobnosťou  $1-\alpha$ , to jest s pravdepodobnosťou 95%, rozptyl hodnôt výberových súborov získaných pomocou laserového interferometra je zhodný s rozptylom hodnôt výberových súborov získaných pomocou prístroja Balantron. Hypotéza alternatívna  $H_A$  pre F test bola definovaná, že s pravdepodobnosťou 95%, rozptyl hodnôt výberových súborov získaných pomocou laserového interferometra nie je zhodný s rozptylom hodnôt výberových súborov získaných pomocou prístroja Balantron.

Hypotéza  $H_0$  pre T test bola definovaná, že s pravdepodobnosťou  $1-\alpha$ , to jest s pravdepodobnosťou 95%, stredná hodnota výberových súborov získaných pomocou laserového interferometra, je zhodná so strednou hodnotou výberových súborov získaných pomocou prístroja Balantron. Hypotéza alternatívna  $H_A$  pre T test bola definovaná, že s pravdepodobnosťou 95% stredná hodnota výberových súborov získaných pomocou laserového interferometra nie je zhodná so strednou hodnotou výberových súborov získaných pomocou prístroja Balantron.

Tabuľka 5 F test a T test pre výberové súbory získané z brúsiaceho kotúča KNB typ B107  
K100 B-III

Porovnávané výberové súbory	F test			T test		
	P hodnota	Hypotéza $H_0$		P hodnota	Hypotéza $H_0$	
		Zamietam	Nezamietam		Zamietam	Nezamietam
Laser pred brúsením verzus Balantron pred brúsením	0,919		*	0,000	*	
Laser po brúsení verzus Balantron po brúsení	0,786		*	0,000	*	

Z tabuľky 5 vyplynulo nezamietnutie hypotézy  $H_0$  v prípade F testu a to v oboch prípadoch. To znamená, že s pravdepodobnosťou 95% nezamietam, že hodnoty získané pomocou laserového interferometra majú rozptyly zhodné s rozptylmi z hodnôt získaných pomocou prístroja Balantron.

V prípade T testu bola hypotéza  $H_0$  zamietnutá. To znamená že platí hypotéza  $H_A$  a s pravdepodobnosťou 95% stredná hodnota výberových súborov získaných pomocou laserového interferometra nie je zhodná so strednou hodnotou výberových súborov, získaných pomocou prístroja Balantron. T test ukázal, že stredné hodnoty sú od seba významné posunuté a prístroj Balantron nemeria zhodne s laserovým interferometrom značky Renishaw XL80. Prístroj Balantron viditeľne podmeriava, čo znázorňuje graf časovej rady (Obr. 6.2).

### **6.1.2 Porovnanie hodnôt získaných pred brúsením a po brúsení brúsiaceho kotúča KNB typ B107 K100 B-III pomocou laserového interferometra Renishaw XL80**

Aj v tomto prípade sa na hodnotenie použili F testy a T testy. Nulová hypotéza  $H_0$  pre F test bola definovaná, že s pravdepodobnosťou  $1-\alpha$ , to jest s pravdepodobnosťou 95%, rozptyl hodnôt výberových súborov získaných pred brúsením pomocou laserového interferometra, je zhodný s rozptylom hodnôt výberových súborov získaných po brúsení pomocou laserového interferometra. Alternatívna hypotéza  $H_A$  zamietá s pravdepodobnosťou 95% rovnosť rozptylov.

U T testu bola nulová hypotéza  $H_0$  definovaná, že s pravdepodobnosťou  $1-\alpha$ , to jest s pravdepodobnosťou 95%, stredná hodnota výberových súborov získaných pred brúsením pomocou laserového interferometra je zhodná so strednou hodnotou výberových súborov získaných po brúsení pomocou laserového interferometra. Alternatívna hypotéza  $H_A$  zamietá s pravdepodobnosťou 95% rovnosť stredných hodnôt.

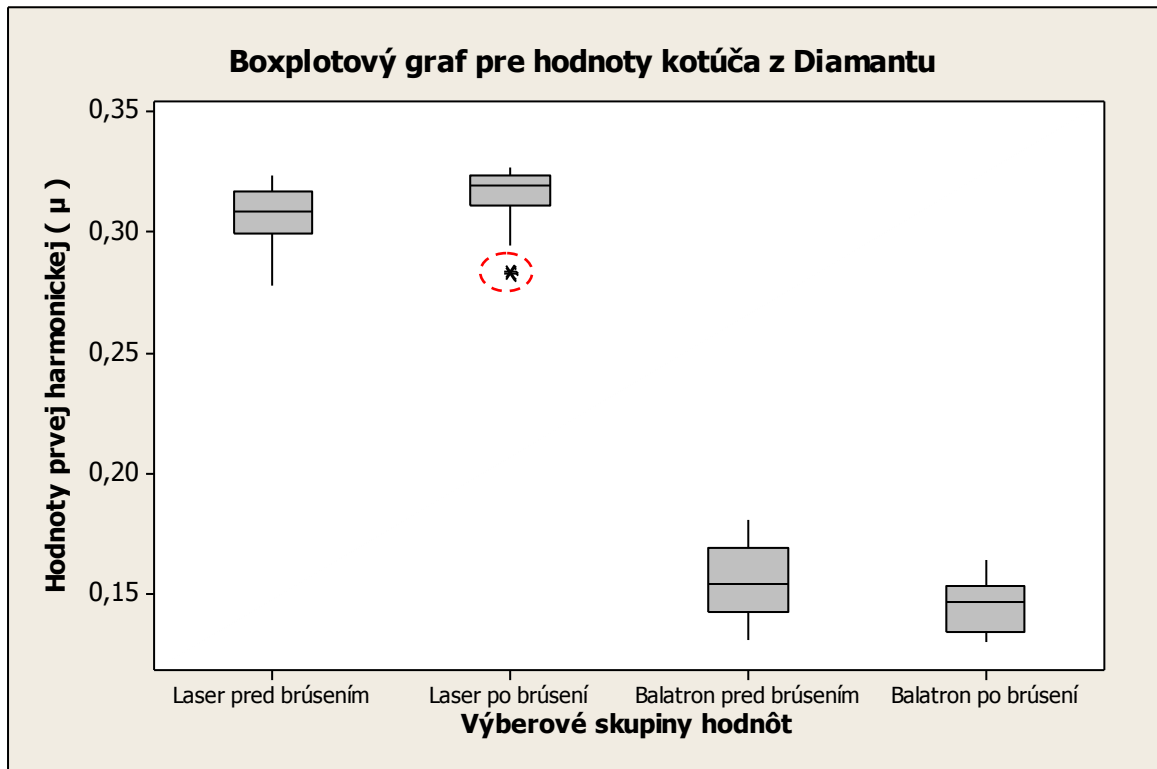
Tabuľka 6 F test a T test pre výberové súbory získané pomocou laserového interferometra pre brúsiaci kotúč KNB typ B107 K100 B-III

Porovnávané výberové súbory	F test			T test		
	P hodnota	Hypotéza $H_0$		P hodnota	Hypotéza $H_0$	
		Zamietam	Nezamietam		Zamietam	Nezamietam
Laser pred brúsením verzus Laser po brúsení	0,032	*		0,000	*	

P hodnota F testu bola menšia ako 0,5. Znamenalo to zamietnutie hypotézy  $H_0$ . Takže s pravdepodobnosťou na 95 % sa zamietla rovnosť rozptylov. Aj v prípade T testu bola hypotéza  $H_0$  zamietnutá, dôsledkom nulovej P hodnoty. Dokazuje to aj Boxplot (Obr. 6.1). Graf časovej rady (Obr. 6.2) ukázal, že kotúč po brúsení zmenšil hodnoty prvej harmonickej. Môj názor je, že daný kotúč sa pri brúsení orovnal dôsledkom odbrúsenia vyčnievajúcich čiastočiek brúsiacich zrn, a tým pádom kotúč zmenšil svoje vibrácie.

## 6.2 Štatistické vyhodnotenie výberových súborov nameraných z vibrácií brúsiaceho kotúča z Diamantu typ D100 K100 B-VI

Postup vyhodnocovania bol rovnaký ako pri brúsiacom kotúči z Kubického nitridu bóru typ B107 K100 B-III. Kontrola sa spravila pomocou metodiky vnútornej a vonkajšej hradby. Za vychýlenú hodnotu sa považovala taká hodnota, ktorá presiahla v boxplotovom diagrame 1,5 interquartilového rozpätia.



Obr. 6.3 Boxplotové grafy výberových skupín prvej harmonickej frekvencie kotúča Diamant typ D100 K100 B-VI

Boxplotový diagram ukázal vychýlené hodnoty. Hodnoty ktoré sú označená červeným prerušovaným kruhom na Boxplotovom grafe (Obr. 6.3). Vychýlené hodnoty boli zapríčinené zlým upevnením snímača. Vychýlené hodnoty sa odstránili a znovu sa spravil Boxplotový graf. Teraz už nevykazoval žiadnu vychýlenú hodnotu a mohlo sa pristúpiť k ďalšiemu kroku.

Ďalším krokom bolo zistiť, či dané výberové súbory pochádzajú z normálneho rozdelenia. Stanovili sa hypotézy  $H_0$  a  $H_A$ . Hypotéza  $H_0$  bola definovaná, že s pravdepodobnosťou  $1-\alpha$ , to jest s pravdepodobnosťou 95% nezamietam, že daný výberový súbor pochádza z normálneho rozdelenia. Hypotéza  $H_A$  bola definovaná, že s pravdepodobnosťou 95% zamietam, že daný výberový súbor pochádza z normálneho rozdelenia. Zvolil sa Kolmogorov-Smirnov test normality na zistenie správnosti hypotéz. Na potvrdenie hypotézy  $H_0$  musela byť hodnota  $P$  väčšia ako 0,050. Výsledky testu zobrazuje Tabuľka 7. Vo všetkých prípadoch sa potvrdila hypotéza  $H_0$ .



Tabuľka 7 Kolmogorov-Smirnov test normality pre výberové súbory pre Diamant typ D100

## K100 B-VI

Názov výberového súboru	P-hodnota	Hodnoty pochádzajú z normálneho rozdelenia	
		zamietam	nezamietam
Laser pred brúsením	> 0,150		*
Laser po brúsení	> 0,150		*
Balatron pred brúsením	> 0,150		*
Balatron po brúsení	> 0,150		*

Keďže všetky výberové súbory pochádzajú s pravdepodobnosťou 95% z normálneho rozdelenia. Mohlo sa pristúpiť k ďalšiemu kroku. Ďalším krokom bolo spraviť štatistické charakteristiky všetkých výberových súborov.

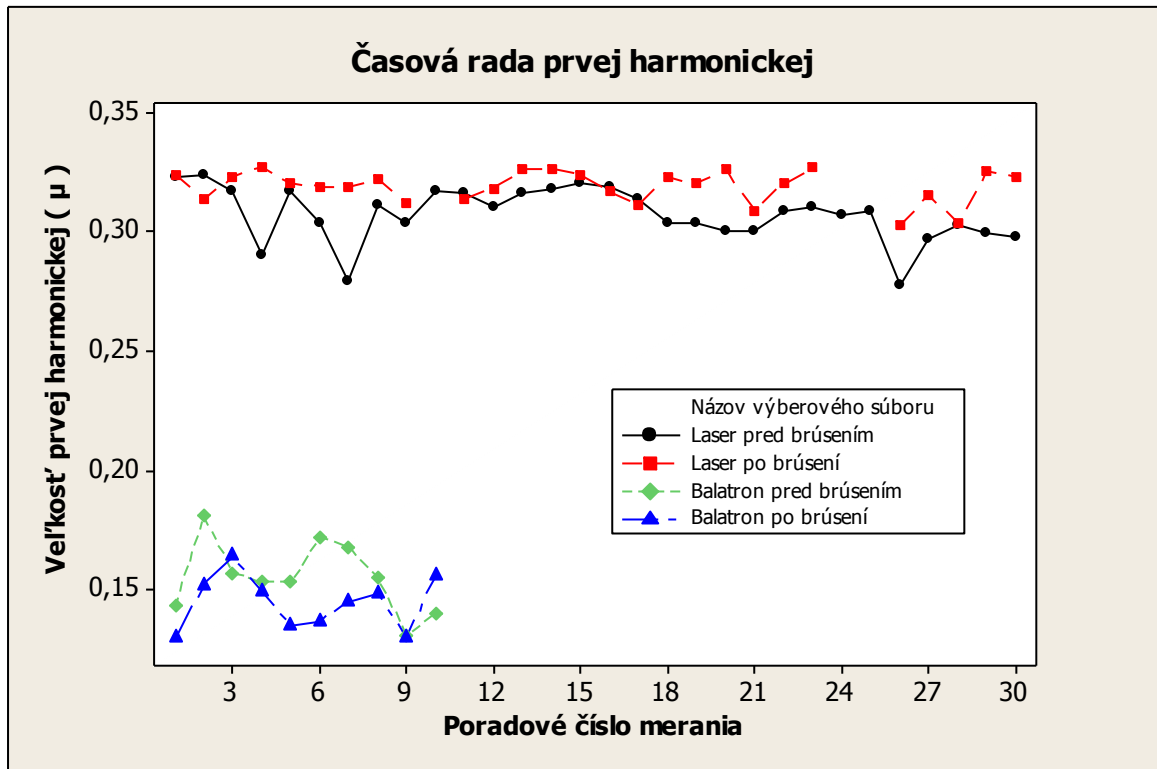
Tabuľka 8 Štatistické charakteristiky výberových súborov Diamant typ D100 K100 B-VI

Názov výberového súboru	Veľkosť výberového súboru (n)	Odhad aritmetického priemeru ( $\bar{x}$ ( $\mu$ ))	Neistota merania typu A ( $U_A$ ( $\mu$ ))	Odhad smerodatnej odchýlky (s ( $\mu$ ))
Laser pred brúsením	30	0,3072	0,0021	0,01151
Laser po brúsení	30	0,3189	0,0013	0,00675
Balatron pred brúsením	10	0,1553	0,0048	0,01524
Balatron po brúsení	10	0,1446	0,0036	0,01139

Názov výberového súboru	Variačný koeficient (v (%))	Minimálna hodnota ( $X_{\min}$ ( $\mu$ ))	Interquartilové rozpätie (Iqr ( $\mu$ ))
Laser pred brúsením	3,75	0,278	0,017
Laser po brúsení	2,12	0,303	0,010
Balatron pred brúsením	9,81	0,131	0,027
Balatron po brúsení	7,88	0,130	0,019

Názov výberového súboru	Prvý kvartil ( $q_1$ ( $\mu$ ))	Medián ( $\tilde{x}$ ( $\mu$ ))	Tretí kvartil ( $q_3$ ( $\mu$ ))	Maximálna hodnota ( $X_{\max}$ ( $\mu$ ))
Laser pred brúsením	0,300	0,309	0,317	0,324
Laser po brúsení	0,314	0,320	0,324	0,327
Balatron pred brúsením	0,142	0,154	0,169	0,181
Balatron po brúsení	0,134	0,147	0,153	0,164

Ďalšou úlohou bolo zistenie, ako sa v jednotlivých časových intervaloch menila prvá harmonická frekvencia. Použil sa graf časovej rady.



Obr. 6.4 Graf časovej rady výberových súborov pre kotúč Diamant typ D100 K100 B-VI

Z grafu (Obr. 6.4) opticky vyplýva, to isté ako z grafu (Obr. 6.2), že prístroj Balatron značne podmeriava oproti laserovému interferometru XL80 Renishaw.

### 6.2.1 Porovnanie prvých harmonických frekvencií medzi dátami získanými laserovým interferometrom XL80 Renishaw a systémom Balatron z brúsiaceho kotúča Diamant typ D100 K100 B-VI

Na potvrdenie odhadu, že prístroj Balatron nemeria totožne, ako laserový interferometer XL80 značky Renishaw sa vykonal F test a T test aj na tomto type brúsiaceho ko-

túča. Stanovili sa rovnaké hypotézy  $H_0$  a  $H_A$  pre F test a T test, ako v prípade brúsiaceho kotúča KNB typ B107 K100 B-III.

Tabuľka 9 F test a T test pre výberové súbory získané z brúsiaceho kotúča Diamant typ D100 K100 B-VI

Porovnávané výberové súbory	F test			T test		
	P hodnota	Hypotéza $H_0$		P hodnota	Hypotéza $H_0$	
		Zamietam	Nezamietam		Zamietam	Nezamietam
Laser pred brúsením verzus Balantron pred brúsením	0,243		*	0,000	*	
Laser po brúsení verzus Balantron po brúsení	0,036	*		0,000	*	

Hodnoty z Tabuľky 9 potvrdili, že v prípade T testu bola zamietnutá nulová hypotéza  $H_0$  a s pravdepodobnosťou 95% stredná hodnota výberových súborov získaných pomocou laserového interferometra nie je zhodná so strednou hodnotou výberových súborov získaných pomocou prístroja Balantron. Pomocou F testu dokonca na rozdiel od výsledkov získaných z výberových súborov z brúsiaceho kotúča KNB typ B107 K100 B-III vzniklo zmiatnutie hypotézy  $H_0$  v prípade výberového súboru laser pro brúsení verzus Balantron po brúsení.

T test aj v tomto prípade ukázal, že stredné hodnoty sú od seba významné posunuté a prístroj Balantron nemeria zhodne s laserovým interferometrom značky Renishaw XL80. Prístroj Balantron viditeľne podmeriava, čo znázorňuje graf časovej rady ( Obr. 6.4 ).

### 6.2.2 Porovnanie hodnôt získaných pred brúsením a po brúsení brúsiaceho kotúča Diamant typ D100 K100 B-VI pomocou laserového interferometra Renishaw XL80

Na hodnotenie sa použili F testy a T testy. Nulová hypotéza  $H_0$  a alternatívna hypotéza  $H_A$  pre F test a T test bola definovaná úplne rovnako ako v prípade posudzovania prvých harmonických pred brúsením a po brúsení brúsiaceho kotúča KNB typ B107 K100 B-III.

Tabuľka 10 F test a T test pre výberové súbory získané pomocou laserového interferometra pre brúsiaci kotúč Diamant typ D100 K100 B-VI

Porovnávané výberové súbory	F test			T test		
	P hodnota	Hypotéza $H_0$		P hodnota	Hypotéza $H_0$	
		Zamietam	Nezamietam		Zamietam	Nezamietam
Laser pred brúsením verzus Laser po brúsení	0,008	*		0,000	*	

P hodnota F testu bola menšia ako 0,5. Znamenalo to zamietnutie hypotézy  $H_0$ . Takže s pravdepodobnosťou na 95 % sa zamietla rovnosť rozptylov. Aj v prípade T testu bola hypotéza  $H_0$  zamietnutá, dôsledkom nulovej P hodnoty. Dokazuje to aj Boxplot (Obr. 6.3). Graf časovej rady (Obr. 6.4) ukázal, že kotúč po brúsení zväčšil hodnoty prvej harmonickej. V tomto prípade sa kotúč po brúsení rozvážil.

## ZÁVER

Cieľom mojej diplomovej práce bolo štatisticky vyhodnotiť možnosť rozváženia brúsiacich kotúčov a zistiť či rádovo lacnejší dotykový merací prístroj Balantron, môže adekvátne nahradiť laserový interferometer značky Renishaw.

Základom bolo sa riadne oboznámiť s problematikou vibrácií, s problematikou vibrodiagnostiky, ako aj s problematikou vyvažovania brúsiacich kotúčov. Získané poznatky z teoretickej časti som uplatnil na vyhodnotenie údajov v časti praktickej.

V praktickej časti som sa venoval dvom problematikám. Prvá bola, či merací prístroj Balantron meria štatisticky významne rovnako, ako laserový merací prístroj Renishaw. Druhá úloha bola, či skúmané kotúče zmenili významne svoje vibrácie pred a po brúsení.

Boxploty (Obr. 6.1, Obr. 6.3), časové rady (Obr. 6.2, Obr. 6.4), F testy a hlavne T testy ( Tabuľka 5, Tabuľka 9) dokázali, že prístroj Balantron nie je aktuálne schopný podávať pravdivé dáta o vibráciách a preto je na tento účel nepoužiteľný. Dáta získané pomocou prístroja Balantron získané s pravdepodobnosťou  $1-\alpha$ , to jest s pravdepodobnosťou 95%, sa nerovnajú dátam získaným z laserového meracieho prístroja.

Domnievam sa, že prístroj Balantron voči laserovému inteferometru môže mať systematickú chybu. Ale na overenie tohto názoru, odporúčam urobiť väčšie množstvo meraní pomocou prístroja Balantron pri rôznych podmienkach a zároveň v rovnakých podmienkach namerať hodnoty pomocou laserového inteferometra a porovnať, či chyba prístroja Balantron je pri daných rôznych podmienkach rovnaká. Ak by sa jednalo o systematickú chybu, stačilo by potom dáta z prístroja Balantron softwarovo upraviť. No v súčasnosti nejde podľa môjho názoru prístroj Balantron použiť ani ako orientačné meradlo.

Čo sa týka rozváženia brúsiaceho kotúča z Kubického nitridu bóru typ B107 K100 B-III. Boxplot ( Obr. 6.1), časová rada (Obr. 6.2), F test a T test ( Tabuľka 6) dokázali, že s pravdepodobnosťou  $1-\alpha$ , to jest s pravdepodobnosťou 95%, dáta výberových skupín nepochádzajú z rovnakého základného súboru. V prípade brúsiaceho kotúča z Kubického nitridu bóru typ B107 K100 B-III časová rada (Obr. 6.2) ukázala, pokles veľkosti prvej harmonickej frekvencie po obrúsení materiálu. Domnievam sa, že vyváženie nastalo dôsledkom samoostriaceho účinku. Dôsledkom samoostrenia brúsiaci kotúč vykazoval menšie vibrácie ako pred začatím brúsenia.

Aj v prípade brúsiaceho kotúča z Diamantu typ D100 K100 B-VI Boxplot ( Obr. 6.3), Časová rada (Obr. 6.4), F test a T test (Tabuľka 10) sa dokázalo, že s pravdepodobnosťou  $1-\alpha$ , to jest s pravdepodobnosťou 95%, dáta výberových skupín nepochádzajú z rovnakého základného súboru. V prípade brúsiaceho kotúča z Diamantu typ D100 K100 B-VI nastalo zvýšenie hodnôt prvej harmonickej frekvencie dôsledkom rozváženia brúsiaceho kotúča, ako dokazuje časová rada (Obr. 6.3).

**ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY**

- [1] ČSN ISO 2041/2010. *Vibrácie, rázy a monitorovanie stavu - Slovník*. Praha: Úrad pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšobníctvo, 2010.
- [2] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metódy, analýza signálu*. 1. Praha: BEN - Tachnická literatúra, 2006, s. 169-214. ISBN 80-7300-158-6.
- [3] KOVÁČ, Martin. *Meranie a analýza vibrácií elektrického stroja*. Brno, 2009. Dostupné z:  
[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15384](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15384).  
Bakalárska práca. Vysoká škola technická v Brne. Vedoucí práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [4] VDOLEČEK, František. [online]. Spolehlivost a technická diagnostika, 2002 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: <http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/FSD.pdf>. Skriptum. Vysoké učení technické v Brne.
- [5] BRÜEL & KJAER. *Skúšanie mechanických sústav*. Dánsko, 1988.
- [6] FERENCEY, Viktor a Marián GOGORA. *Technická diagnostika* [online]. Trenčín, 2002 [cit. 2012-04-03]. ISBN 80-88914-66-3. Dostupné z: [http://fsi.utc.sk/ktvi/leitner/2\\_predmety/KTS/Podklady/TD.pdf](http://fsi.utc.sk/ktvi/leitner/2_predmety/KTS/Podklady/TD.pdf)
- [7] HÁJEK, Vladimír. Nové neštandardné metódy merania a analýzy vibrácií. [online]. [cit. 2012-02-01]. Dostupné z:  
<http://www.matdesign.sav.sk/data/files/362.pdf>

- [8] VASILKO K., BOKUČAVA, *Brúsenie kovových materiálov*, Bratislava, ALFA, 1988, s.235
- [9] ČSN EN ISO 6103/2005. *Nástroje z pojného brusiva - Prípustné nevyvážky dodávaných brúsnych kotúčov - Statická skúška*. Praha: Český normalizačný inštitút, 2005.
- [10] MINÁRIK, Milan. *Technológia*. In: [online]. [cit. 2012-02-01]. Dostupné z: [http://www.sspmt.edu.sk/predmetove\\_komisie/odborne\\_predmety/minarik/POSZ\\_Z\\_technologia\\_1.pdf](http://www.sspmt.edu.sk/predmetove_komisie/odborne_predmety/minarik/POSZ_Z_technologia_1.pdf)
- [11] PATA, Vladimír. *Základné aplikácie laserových interferometrov v priemysle*. Zlín. Skriptum. Univerzita Tomáša Bati.



**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

$\gamma$ -	Periodická veličina
$\varphi$ -	[s] posunutý začiatok vibrácie
$\omega$ -	[rad/s] uhlová rýchlosť
atď. -	a tak ďalej
$f(t)$ -	periodická funkcia
FFT-	Rýchla Fourierova transformácia
$g$ -	[m.s <sup>-2</sup> ] jednotka zrýchlenia
IEPE -	piezoelektrické snímače s integrovanou elektrinou
KNB -	Kubický nitrid bóru
$m_A$ -	[kg] hmotnosti akcelerometra
MMI -	multimediálne rozhranie
$m_O$ -	[kg] hmotnosti objektu
PC -	počítačová zostava
PE -	piezoelektrické snímače
PR -	Piezorezistívne snímače zrýchlenia
T -	perioda
t -	[s] čas
t.j. -	to jest
TEDs -	elektronický katalógový list senzoru
VC -	kapacitný snímač zrýchlenia

**ZOZNAM OBRÁZKOV**

Obr. 6.5 Grafické zobrazenie časového priebehu vibrácií	[1]	str. 13
Obr. 6.6 Úrovne zrýchlenia vibrácií v reálnom svete	[7]	str. 16
Obr. 6.7 Frekvenčná závislosť základných veličín vibrácií	[1]	str. 17
Obr. 6.8 Absolútne a relatívne vibrácie	[2]	str. 19
Obr. 6.9 Model absolútneho senzoru vibrácií	[2]	str. 20
Obr. 6.10 Snímače zrýchlenia	[7]	str. 22
Obr. 6.11 Model piezoelektrického akcelerometra	[2]	str. 23
Obr. 6.12 Vplyv montáže akcelerometrov na frekvenčnej charakteristiky	[2]	str. 24
Obr. 6.13 Usporiadanie piezorezistívneho akcelerometra	[2]	str. 26
Obr. 6.14 Usporiadanie kapacitného akcelerometra	[2]	str. 27
Obr. 6.15 Základný princíp Michelsonovho interferometra	[11]	str. 28
Obr. 6.16 Princíp konštruktívnej interferencie	[11]	str. 28
Obr. 6.17 Princíp deštruktívnej interferencie	[11]	str. 29
Obr. 6.18 Schéma činnosti laserového interferometra	[11]	str. 29
Obr. 6.19 Chyba vzniknutá tzv. mŕtvou dráhou	[11]	str. 31
Obr. 6.20 Cosínová chyba	[11]	str. 31
Obr. 6.21 Chyba vznikajúca nedodržaním tzv. Abbeho princípu	[11]	str. 32
Obr. 6.22 Vnútorý nevyvážok brúsiaceho kotúča	[9]	str. 36
Obr. 6.23 Meraný nevyvážok	[9]	str. 37
Obr. 6.24 Zobrazenie vyvažovacieho tŕňa na vodiacich tyčiach	[9]	str. 38
Obr. 6.25 Zobrazenie vyvažovacieho tŕňa na valcových tyčiach	[9]	str. 38
Obr. 6.26 Schéma dynamického vyvažovania brúsneho kotúča	[8]	str. 39

- Obr. 6.27 Zobrazenie schémy merania pomocou laserového interferometra značky Renishaw XL80 str. 43
- Obr. 6.28 Amplitúdový časový diagram z vyhodnocovacieho softwaru pre Renishaw XL80 str. 45
- Obr. 6.29 Graf prvej harmonickej frekvencie nameraný pomocou prístroja Renishaw XL80 str. 45
- Obr. 6.30 Amplitúdový časový diagram softwaru Sigwiev32 verzia 2.4.0 pre hodnoty z prístroja Balantron str. 47
- Obr. 6.31 Graf prvej harmonickej frekvencie nameraný pomocou prístroja Balantron str. 48
- Obr. 6.32 Boxplotové grafy výberových skupín prvej harmonickej frekvencie kotúča KNB typ B107 K100 B-III str. 49
- Obr. 6.33 Graf časovej rady výberových súborov pre kotúč KNB typ B107 K100 B-III str. 52
- Obr. 6.34 Boxplotové grafy výberových skupín prvej harmonickej frekvencie kotúča Diamant typ D100 K100 B-VI str. 56
- Obr. 6.35 Graf časovej rady výberových súborov pre kotúč Diamant typ D100 K100 B-VI str. 58

**ZOZNAM TABULIEK**

Tabuľka 11 Výsledky FFT analýzy z vyhodnocovacieho softwaru pre Renishaw XL80 .....	str. 46
Tabuľka 12 Výsledky FFT analýzy z vyhodnocovacieho softwaru Sigwiev32 verzia 2.4.0 .....	str. 48
Tabuľka 13 Kolmogorov-Smirnov test normality pre výberové súbory KNB typ B107 K100 B-III .....	str. 50
Tabuľka 14 Štatistické charakteristiky výberových súborov KNB typ B107 K10 .....	str. 51
Tabuľka 15 F test a T test pre výberové súbory získané z brúsiaceho kotúča KNB typ B107 K100 B-III .....	str. 53
Tabuľka 16 F test a T test pre výberové súbory získané pomocou laserového Interferometra pre brúsiaci kotúč KNB typ B107 K100 B-III .....	str. 55
Tabuľka 17 Kolmogorov-Smirnov test normality pre výberové súbory pre Diamant typ D100 K100 B-VI .....	str. 57
Tabuľka 18 Štatistické charakteristiky výberových súborov Diamant typ D100 K100 B-VI .....	str. 57
Tabuľka 19 F test a T test pre výberové súbory získané z brúsiaceho kotúča Diamant typ D100 K100 B-VI .....	str. 59
Tabuľka 20 F test a T test pre výberové súbory získané pomocou laserového Interferometra pre brúsiaci kotúč Diamant typ D100 K100 B-VI .....	str. 60

**ZOZNAM POUŽITÝCH VZORCOV**

1.1 Výpočet periodickej vibrácie .....	str. 12
1.2 Výpočet harmonickej vibrácie .....	str. 13
1.3 Výpočet efektívnej hodnoty zrýchlenia vibrácií .....	str. 16
2.1 Výpočet absolútneho senzora výchylky vibrácií .....	str. 20
2.2 Výpočet pre model absolútneho senzora vibrácií .....	str. 20
2.3 Vzorec pre Piezoresistívne snímače zrýchlenia .....	str. 25
3.1 Výpočet Fourierovej rady .....	str. 33
3.2 Výpočet koeficientu Fourierovej rady .....	str. 33
3.3 Výpočet koeficientu Fourierovej rady .....	str. 33
3.4 Výpočet kmitočtu pre Fourierové rady .....	str. 34
3.5 Výpočet kmitočtu pre Fourierové rady .....	str. 34
3.6 Analitický integrál Fourierovej transformácie .....	str. 34
3.7 Výpočet Rýchlej Fourierovej transformácie .....	str. 35
4.1 Výpočet vnútorného nevývažku .....	str. 39

## ZOZNAM PRÍLOH

1. CD ROM