

Měření a vyhodnocení vibrací on-line bezkontaktním způsobem pomocí laserinterferometru Renishaw

Bc. Monika Široká

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Monika ŠIROKÁ**
Osobní číslo: **T090579**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Měření a vyhodnocení vibrací on-line bezkontaktním způsobem pomocí laserinterferometru Renishaw**

Zásady pro vypracování:

1. Teoreticky rozpracujte problematiku snímání a vyhodnocení vibrací kontaktním a bezkontaktním způsobem
2. Popište matematický postup pro využití FF a FFT pro oblast vibrodiagnostiky
3. Proveďte praktické nasnímání vibrací přístroje pro hodnocení chung-chang efektu
4. Výsledná data zpracujte pomocí FFT se zaměřením na tzv. první harmonickou
5. Data statisticky vyhodnoďte a uveďte patřičné závěry

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] HERRMANN, Leopold. *Fourierovy řady : komentované přednášky*. Praha 6 : ČVUT, 2002. 84 s. ISBN 80-01-02603-5.
- [2] MARTAN, František; SROVNAL, Antonín. *Fourierovy řady*. Praha 1 : Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 84 s. ISBN 05-084-65.
- [3] PÍRKO, Zdeněk. *Fourierova transformace*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 84 s. ISBN 05-093-66.
- [4] ČÍŽEK, Václav. *Diskrétní Fourierova transformace a její použití*. 1981 : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981. 160 s. 04-019-81.
- [5] ŠEBESTA, Vladimír. *Systémy, procesy a signály I*. Brno : VUTIUM, nakladatelství Vysokého učení technického, 1997. 79 s. ISBN 80-214-0942-8.
- [6] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II : Vibrodiagnostika*. Ostrava : VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [7] SMETANA, Ctirad, et al. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. Praha 1 : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Vladimír Pata
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

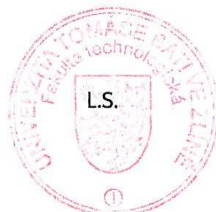
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 5. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- 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 ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byla jsem seznámena s tím, že na moji 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 12. 5. 2011



²⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 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 výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

²⁾ *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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

³⁾ *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.*

(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

Bc. Monika Šíroká

Měření a vyhodnocení vibrací on-line bezkontaktním způsobem pomocí laserinterferometru Renishaw

DP, ÚVI, 2011, 87 str., 61 obr., 7 tab., přílohy PI, PII, PIII

Tématem této diplomové práce je měření a následné statistické vyhodnocení vibrací bezkontaktním způsobem pomocí laseru. Teoretická část popisuje problematiku snímání a vyhodnocení vibrací kontaktním a bezkontaktním způsobem a jejich matematické vyjádření. V praktické části je provedeno a vyhodnoceno vlastní měření vibrací přístroje na opotřebení pryžových dílů.

Klíčová slova: Fourierovy řady, Fourierova transformace, vibrace, laser, laserinterferometr

ABSTRACT

Bc. Monika Šíroká

Vibration measurement on-line by the non-contact way by laserinterferometer Renishaw and data evaluation

DT, DPE, 2011, 87 pp., 61 fig., 7 tab., insertion PI, PII, PIII

The theme of this thesis is measurement and following statistic evaluation vibrations with non-contact method using a laser. The theoretical part describes the problems of vibration sensing and evaluation of contact and non-contact method and their mathematical expression. The practical part describes evaluation of vibration measurement device for measuring wear of rubber components.

Keywords: Fourier series, Fourier transforms, vibration, laser, laserinterferometer

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěla poděkovat mému vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za ochotu a cenné rady při vedení v průběhu realizace této diplomové práce.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uvedena jako spoluautorka.

Ve Zlíně

.....
Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 ÚVOD DO VIBRODIAGNOSTIKY	12
1.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY MECHANICKÉHO KMITÁNÍ.....	16
1.1.1 Výchylka	17
1.1.2 Rychlost	19
1.1.3 Zrychlení	19
2 SNÍMAČE VIBRACÍ	21
2.1 ROZDĚLENÍ SNÍMAČŮ	21
2.1.1 Absolutní snímače vibrací.....	21
2.1.2 Relativní snímače vibrací.....	22
2.2 ABSOLUTNÍ SNÍMAČE ZRYCHLENÍ.....	22
2.2.1 Piezoelektrické snímače.....	22
2.2.2 Kapacitní snímače.....	24
2.2.3 Piezorezistivní snímače.....	25
2.3 ABSOLUTNÍ SNÍMAČE RYCHLOSTI.....	26
2.3.1 Elektrodynamické snímače	26
2.4 ABSOLUTNÍ SNÍMAČE VÝCHYLKY.....	27
2.5 LASEROVÉ INTERFEROMETRICKÉ VIBROMETRY	28
3 METODY VYHODNOCENÍ VIBRACÍ	32
3.1 ANALÝZA SIGNÁLU V ČASOVÉ OBLASTI	32
3.1.1 Veličiny popisující časový signál.....	33
3.2 FREKVENČNÍ ANALÝZA SIGNÁLU.....	33
4 ANALÝZA A ZPRACOVÁNÍ DIAGNOSTICKÝCH SIGNÁLŮ	37
4.1 SIGNÁLY A JEJICH ROZDĚLENÍ	37
4.2 DIGITALIZACE SIGNÁLŮ.....	38
4.2.1 Aliasing.....	38
4.3 AMPLITUDOVÉ POPISY SIGNÁLŮ	42
4.4 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA POMOCÍ FOURIEROVY TRANSFORMACE	45
5 GRAFICKÉ VYJÁDŘENÍ STATISTICKÝCH DAT – BOXPLOT	47
5.1 INTERPRETACE BOXPLOTU	48
5.2 POSTUP SESTROJENÍ BOXPLOTU.....	48
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	50
6 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VIBRACÍ.....	51

6.1	POPIS A NASTAVENÍ LASERINTERFEROMETRU RENISHAW XL.....	51
6.2	NASTAVENÍ PARAMETRŮ SNÍMÁNÍ VIBRACÍ.....	56
6.3	MĚŘENÍ VIBRACÍ VZORKŮ A PŘI OPOTŘEBENÍ ZA 0-90s	56
6.4	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ – ODRAŽEČE 10G A 100G	62
6.4.1	Určení odlehlých hodnot.....	62
6.4.2	Histogramy v porovnání s Boxploty	65
6.4.3	Statistické charakteristiky	66
6.5	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ - VZORKY A (0 – 90s)	67
6.5.1	Určení odlehlých hodnot.....	67
6.5.2	Histogramy v porovnání s Boxplotovými diagramy pro první harmonické.....	70
6.5.3	Statistické charakteristiky	73
6.5.4	Rozdíl mezi odhadem aritmetického průměru a odhadem mediánu střední hodnoty první harmonické	75
	ZÁVĚR.....	77
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	78
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	83
	SEZNAM TABULEK	86
	SEZNAM PŘÍLOH	87

ÚVOD

Technická diagnostika je v dnešní době velmi významným oborem nejen v technických aplikacích. V posledních desetiletích je velká pozornost upřena především ke kvalitě výroby a služeb, ale také k razantnímu snižování nákladů v důsledku velké konkurence. Jednou z nejvýznamnějších částí technické diagnostiky je vibrodiagnostika. Nachází totiž uplatnění na nejrůznějších rotačních i jiných pohybujiících se uzlech strojů vyznačující se mechanickým chvěním.

Vibrodiagnostika se zabývá zjišťováním technického stavu strojů, zařízení, přístrojů a jiných technických systémů, převážně bezdemontážními a nedestruktivními postupy. Dokáže odhalit skutečný stav zařízení a tím umožnit operativní plánování údržby, minimalizovat zbytečné preventivní opravy a předcházet havarijním odstávkám a to vše při plném provozu bez omezení výroby. Dobrý technický stav zařízení je totiž důležitý pro správné vykonávání funkce a plnění stanovených podmínek, pro které je určeno.

Cílem diplomové práce je seznámení s pojmy týkajícími se měření vibrací a to jak z pohledu teoretického, tak i praktického měření v laboratoři. V teoretické části jsou popsány metody měření vibrací kontaktním a bezkontaktním způsobem a také je popsán matematický postup využití Fourierovy transformace a rychlé Fourierovy transformace pro oblast vibrodiagnostiky. V praktické části je provedeno měření vibrací, měřícího přístroje na opotřebení pryžových dílů, pomocí laserinterferometru s následným zpracováním a statistickým vyhodnocením výsledků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

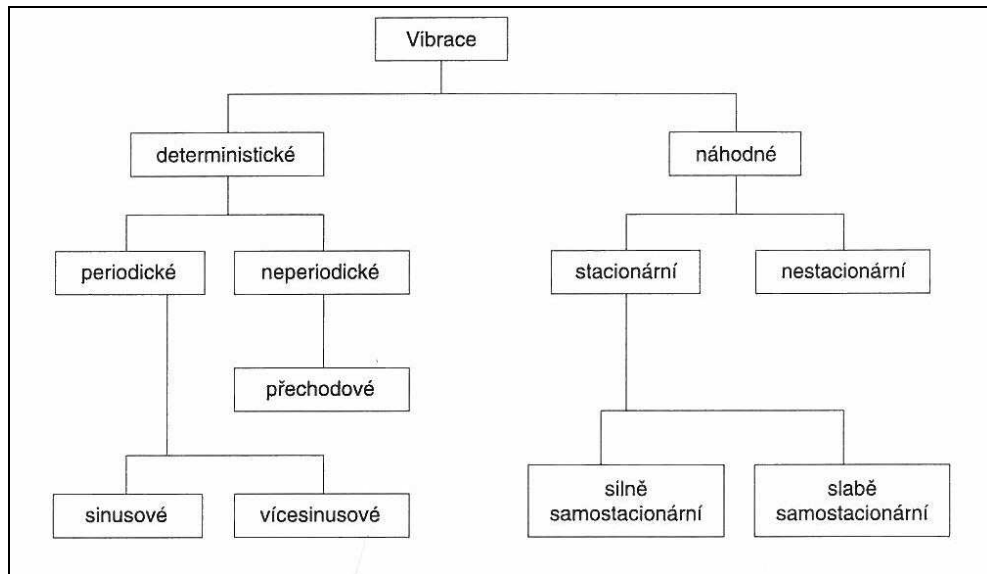
1 ÚVOD DO VIBRODIAGNOSTIKY

Každé strojní zařízení v technické praxi je tvořeno soustavou těles, která jsou charakterizována fyzikálními vlastnostmi. Jednou z takových vlastností je pružnost. Působení zdrojů energie na pružná tělesa v nich může vyvolat kmitání.

Mechanické kmitání je dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy. Rovnovážná poloha tělesa je podmíněna nulovou hodnotou působících sil a naopak kmitání tělesa je vždy způsobeno budicí silou, která může působit jak externě tak interně. Termín kmitání je ekvivalentní pojmu vibrace (dle ČSN ISO 2041 „Vibrace a rázy – Slovník“) [1].

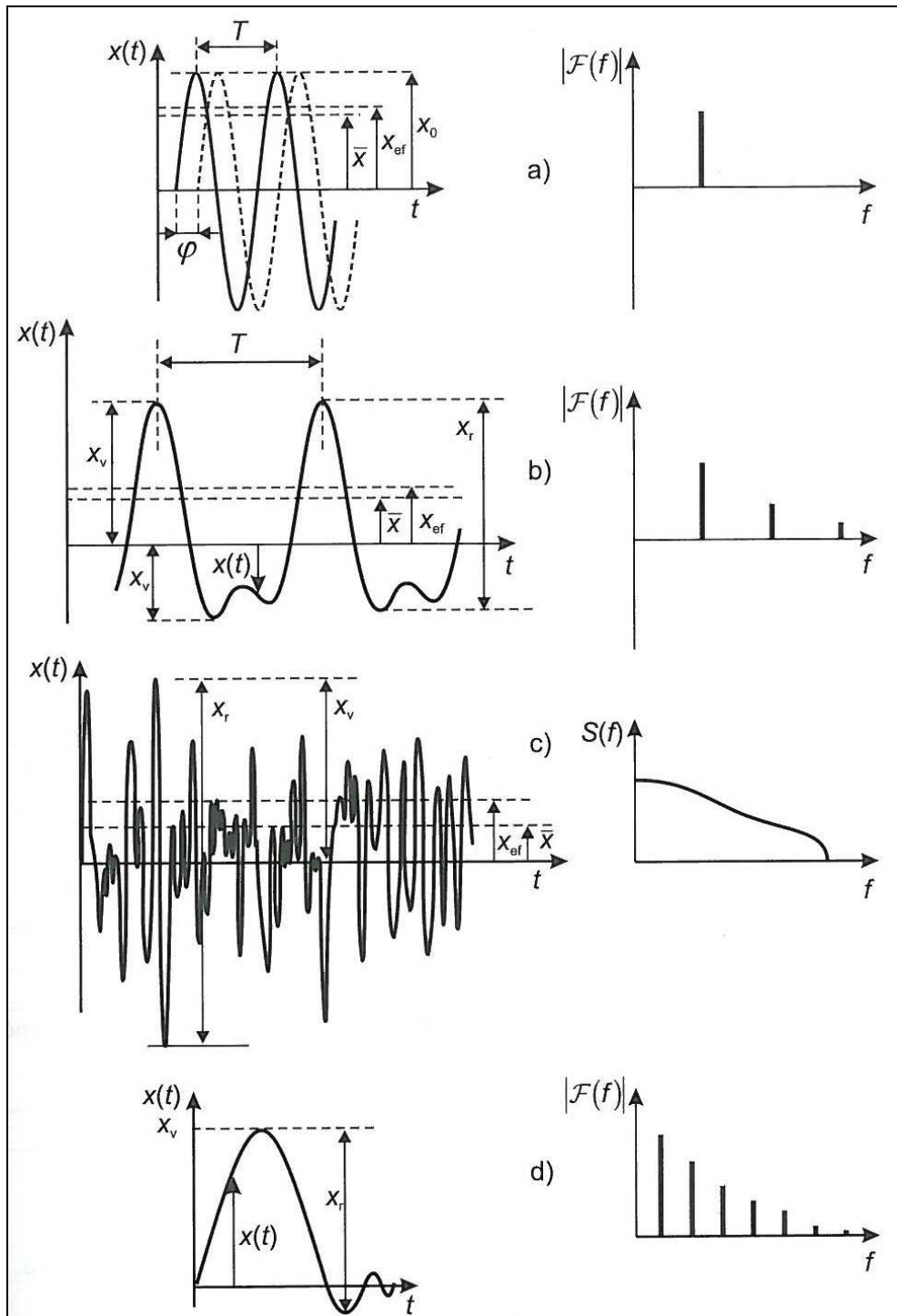
Vibrace stroje jsou úzce vázány s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem hřídelů, ložisek, převodovek, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyváženosti rotujících dílů, vůlemi v kluzných ložiscích, opotřebením, únavou materiálů, vznikajícími trhlinami, korozi a jiné. Vibrace jsou buzeny jak rotujícími tak přímočaře se pohybujícími tělesy (včetně pohybu kapalin a plynů). Mechanické vibrace jsou také způsobeny rázy, při nichž střetem dvou navzájem se pohybujících těles (například pohybem poškozené strojní části, kuličkou v ložisku apod.) dochází k náhlé změně gradientu určující veličiny vibrací. Ráz působí přechodový kmitavý jev generující v tělese postupnou rázovou vlnu. V technické diagnostice se používá uměle generovaný ráz například diagnostickým kladívkem se zabudovaným senzorem síly [1].

Dle časových změn veličin mají vibrace charakter jevu periodického, neperiodického nebo náhodného a rozdělují se do dvou hlavních kategorií, znázorněných (Obr. 1).



Obr. 1. Rozdělení vibrací dle kategorií [2]

Některé kategorie vibrací jsou znázorněny (Obr. 2). Vlevo se nacházejí časové průběhy veličin vibrací a vpravo k nim odpovídající spektrální veličiny.



Obr. 2. Časové průběhy vibrací a odpovídající spektrální veličiny [1]

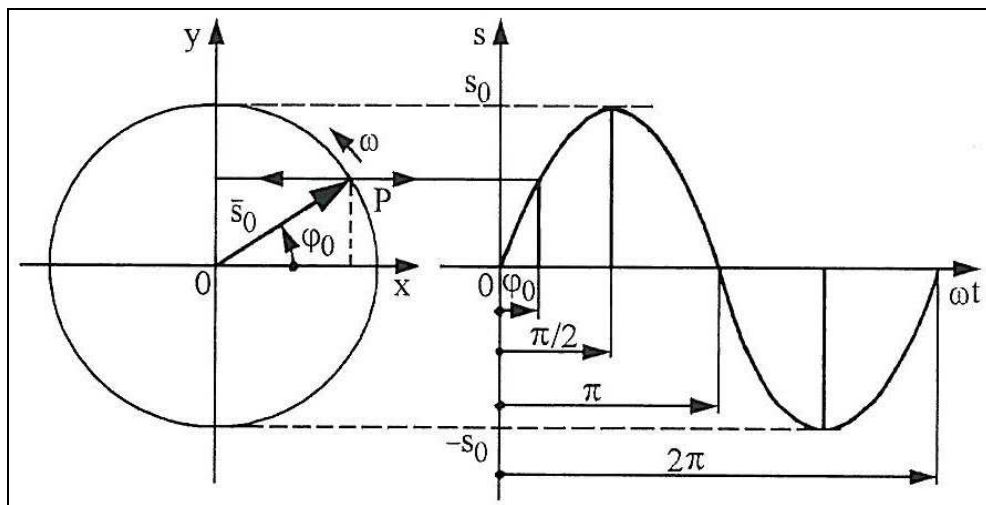
(a) harmonický, b) složený periodický, c) náhodný, d) přechodový)

Deterministické vibrace jsou takové vibrace, u kterých je okamžitá hodnota vibrací v daném čase určena přesně jejich časovým průběhem zaznamenaným dříve, než je daný časový okamžik. Náhodné vibrace jsou takové vibrace, pro které nemůže být okamžitá hodnota vibrací v daném čase určena z jejich časového průběhu [2].

U periodických vibrací se časový průběh vibrodiagnostických veličin opakuje [1]. Pokud obsahuje jedinou frekvenci, nazýváme ho harmonické kmitání, které je dáno vztahem

$$s = s_0 \sin \omega t \quad (1)$$

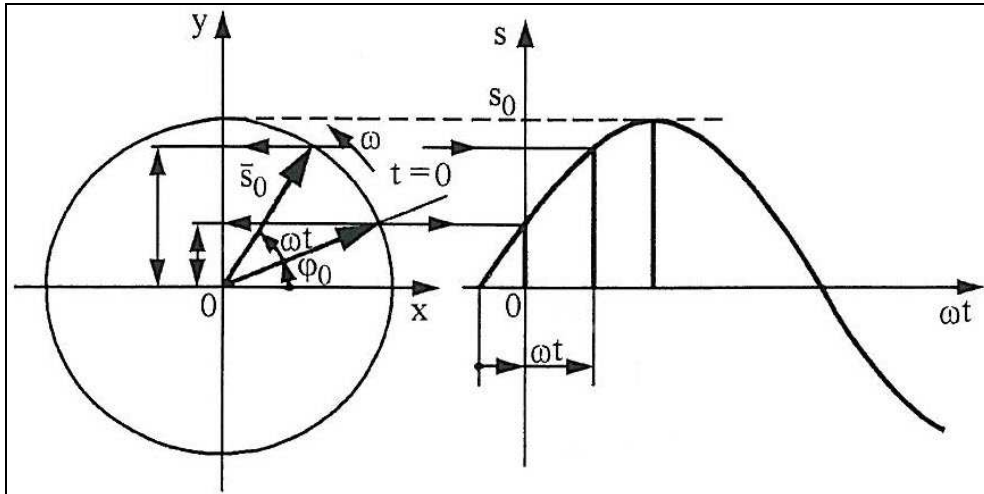
Harmonické kmitání můžeme modelovat např. kolmým průmětem rovnoměrného pohybu bodu (P) po kružnici o průměru $r = s_0$, do libovolného průmětu kružnice, např. do osy y (Obr. 3).



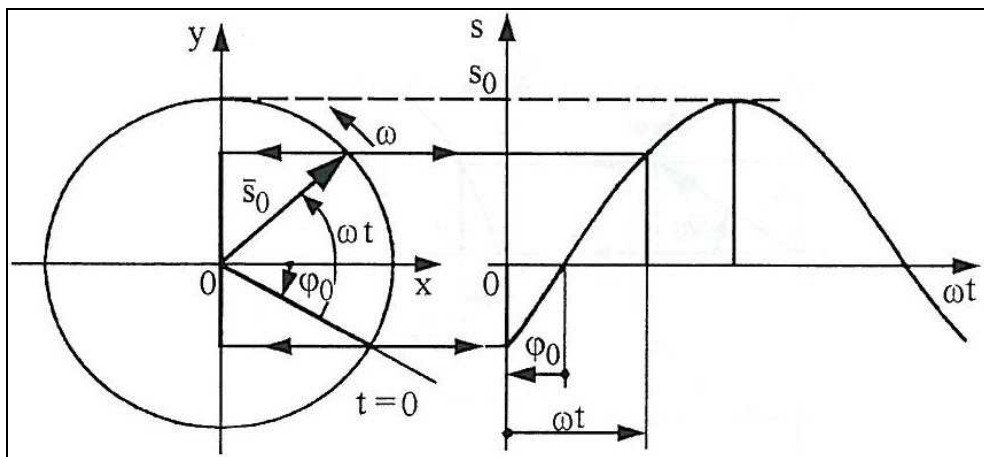
Obr. 3. Harmonické kmitání jako průmět rovnoměrného kruhového pohybu bodu P [3]

Počáteční fázi φ_0 harmonické změny můžeme vyjádřit takovou (počáteční) polohou rotujícího vektoru s_0 v okamžiku $t = 0$, v níž svírá s kladným směrem osy x úhel φ_0 (Obr. 4) nebo úhel $-\varphi_0$ (Obr. 5) [3].

$$s = s_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$



Obr. 4. Rotující vektor s_0 s kladnou počáteční fází φ_0 [3]



Obr. 5. Rotující vektor s_0 se zápornou počáteční fází φ_0 [3]

1.1 Základní veličiny mechanického kmitání

Určujícími veličinami při měření vibrací jsou výchylka, rychlost a zrychlení hmotného bodu v čase. Ucelený přehled vybraných veličin a vztahů mechanických vibrací je znázorněn (Tab. 1).

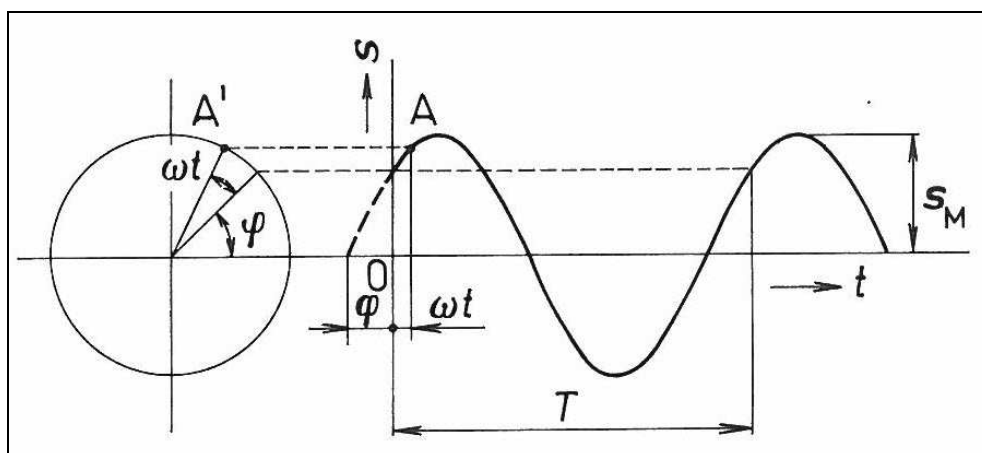
Tab. 1. Přehled vybraných veličin a vztahů ve vibrodiagnostice [5]

Značka	Jednotka	Název a vysvětlení
S	m	okamžitá výchylka kmitů, tj. vzdálenost kmitajícího bodu (tělesa) od zvoleného bodu (displacement)
x_0	m	amplituda kmitání, tj. maximální hodnota určující veličiny harmonického kmitání (amplitude)
x_f	m	rozkmit, tj. maximální rozdíl výkmitů v daném časovém intervalu (peak to peak)
φ	rad	fáze harmonické veličiny v čase $t = 0$; (phase angle)
ω	rad.s ⁻¹	úhlový kmitočet, úhlová frekvence (angular frequency), (phase angle), $\omega = 2\pi f$
T	s	perioda, tj. nejkratší doba, po níž se kmitavý děj a tedy také každá hodnota určující veličiny pravidelně opakuje (period); (pozn.: základní perioda kmitání je z hlediska spektrální analýzy nejdelší perioda kmitání) (period of vibration)
F	Hz	frekvence, kmitočet, platí: $f = 1/T$ (frequency)
V	m.s ⁻¹	rychlost kmitání $v = ds/dt$ (velocity); pro harmonické kmitání platí $v_m = s_m$; složené periodické kmitání lze po rozkladu na jednotlivé harmonické složky definovat efektivní hodnotou rychlosti dle vztahu: $v_{ef} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_{0i}^2$
U	m.s ⁻¹	mohutnost kmitání, tj. maximální efektivní hodnota rychlosti kmitání v daném časovém intervalu na vybraných místech (severity)
A	m.s ⁻²	zrychlení kmitání $a = dv/dt$ (acceleration); pro harmonické kmitání měřeného objektu platí: $a_0 = \omega \cdot v_0 = \omega^2 \cdot s_0$ $a_{ef} = \omega \cdot v_{ef}$
B	m.s ⁻³	ryv, tj. veličina udávající časovou změnu zrychlení $b = da/dt$ (jerk)
\bar{x}		střední hodnota určující veličiny (mean value) $\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad \bar{x} \doteq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) $ $x(t)$ je určující veličina mechanického kmitání; $x_i(t)$ jsou diskrétní hodnoty veličiny; T je daný časový interval pro $x(t)$; (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné kmitání)
x_{ef}		Efektivní hodnota určující veličiny (RMS...root-means-square) $x_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad \bar{x}_{ef}^2 \doteq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2(t)$ $x(t)$ je určující veličina mechanického kmitání (většinou rychlost nebo zrychlení); $x_i(t)$ jsou diskrétní hodnoty veličiny; T je daný časový interval pro $x(t)$; (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné kmitání)
L	dB	hladina určující veličiny kmitání $L = 20 \log \frac{A}{A_0}$, kde A_0 je referenční hodnota určující veličiny
Poznámka: Některé referenční (vztažné) hodnoty vibrací. Odpovídají hladině $L = 0$ dB.		
- rychlost kmitavého pohybu		$v = 1,00 \cdot 10^{-9} [m/s]$
- zrychlení kmitavého pohybu		$a = 1,00 \cdot 10^{-6} [m/s^2]$
- síla		$F = 1,00 \cdot 10^{-6} [N]$

1.1.1 Výchylka

Výchylka je vzdálenost objektu vůči referenční poloze (např. rotujícího hřídele neboli rotoru vůči skříní) [4]. Pravidelným, periodickým vychýlením částice z klidové polohy je vyvo-

láno harmonické kmitání, kde okamžité hodnoty výchylky odpovídají v časovém rozložení průběhu sinusové funkce (Obr. 6) [2].



Obr. 6. Časové rozvinutí harmonického kmitání [2]

Kde

s_M je amplituda výchylky,

ω_t je úhlový kmitočet,

φ je fázový posuv.

Výchylka s [m] z nulové (klidové) polohy dosáhne až své maximální hodnoty s_{\max} a vrací se přes klidovou polohu až do své záporné maximální výchylky $-s_{\max}$ a dále osciluje kolem své rovnovážné polohy. Výchylka je dána nejen velikostí, ale je určena i směrem. Doba kmitu (perioda) T [s], která je určena časem mezi dvěma sousedícími kladnými maximálními výchylkami, určuje i úhlový kmitočet ω [s^{-1}] a tím i samotný kmitočet f [Hz] harmonického děje. Pokud v náhodně zvoleném časovém okamžiku počátku sledovaného děje není uvažovaná částice prostředí klidové poloze, říkáme, že periodický děj má počáteční fázový úhel φ [rad].

Značíme-li běžící čas t [s], jsou tyto veličiny vzájemně vázány vztahy

$$s = s_{\max} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

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

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (5)$$

1.1.2 Rychlost

Rychlost vibrací je nejvýhodnějším parametrem chvění pro diagnostické účely. Matematicky je rychlost vibrací první derivací výchylky. Je to rychlost, se kterou se mění výchylka [4]. Nejčastěji se používají poměrně levné akcelerometry, z nichž se hodnota rychlosti získává integrováním hodnot zrychlení [5].

Pro okamžitou rychlost platí vztahy [2]

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega s_{\max} \cos(\omega t + \varphi) = v_{\max} \cos(\omega t + \varphi) = v_{\max} \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

ze kterých vyplývá, že fáze rychlosti kmitání je proti fázi výchylky posunuta o

$$\frac{\pi}{2} [\text{rad}] = 90^\circ.$$

Pro jednoduchý harmonický signál dále platí

$$v = j\omega s = j2\pi f \cdot s \quad (7)$$

1.1.3 Zrychlení

Je to rychlost změny rychlosti. Zrychlení se měří pomocí akcelerometru, který obvykle obsahuje jeden nebo více piezoelektrických krystalů a hmotné těleso [4]. Je-li piezoelektrický krystal deformován, vzniká elektrický signál úměrný zrychlení. Rychlost i zrychlení je udáno velikostí a směrem.

Podle Newtonova zákona je zrychlení měřítkem síly ($F = m \cdot a$), která na částici působí.

Okamžité zrychlení je dáno časovou změnou rychlosti a odvozeně druhou derivací okamžité výchylky podle času, tedy [2]

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -\omega v_{\max} \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 s_{\max} \sin(\omega t + \varphi) = a_{\max} \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

Fáze zrychlení je tedy proti fázi rychlosti posunuta o dalších 90° a proti výchylce o 180° ,

tzn. že je s ní v protifázi. Pro jednoduchý harmonický signál pak lze stanovit zrychlení

$$a = j\omega v = -\omega^2 s \quad (9)$$

kde

a je zrychlení,

j je imaginární jednotka,

ω je úhlový kmitočet,

v je rychlost,

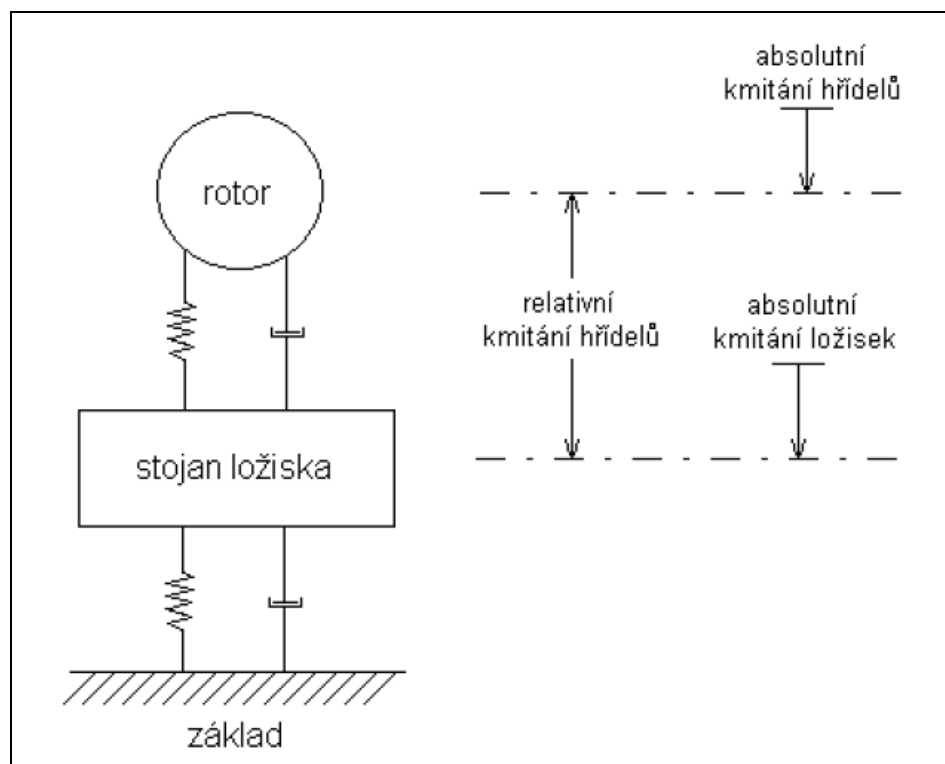
s je výchylka.

2 SNÍMAČE VIBRACÍ

Pro měření vibrací a jejich charakteristických veličin (x = výchylka, v = rychlost, a = zrychlení) se používají snímače vibrací. Dle měřené veličiny lze snímače rozdělit na snímače výchylky, snímače rychlosti a snímače zrychlení (akcelerometry). Nejčastěji používané jsou snímače zrychlení, protože zpětnou integrací naměřeného signálu lze vypočítat okamžitou rychlost a dvojnásobnou integrací okamžitou výchylku, to znamená že jedním snímačem lze získat všechny 3 měřené veličiny vztahující se k vibracím.

2.1 Rozdělení snímačů

Snímače rozdělujeme podle konstrukce na absolutní a relativní, což je jedno ze základních dělení (Obr. 7). Podle principu dělíme snímače na elektrické, mechanické a optické [3]. A dále pak dle dotyku s měřeným objektem na kontaktní a bezkontaktní.



Obr. 7. Schéma relativního a absolutního kmitání [3]

2.1.1 Absolutní snímače vibrací

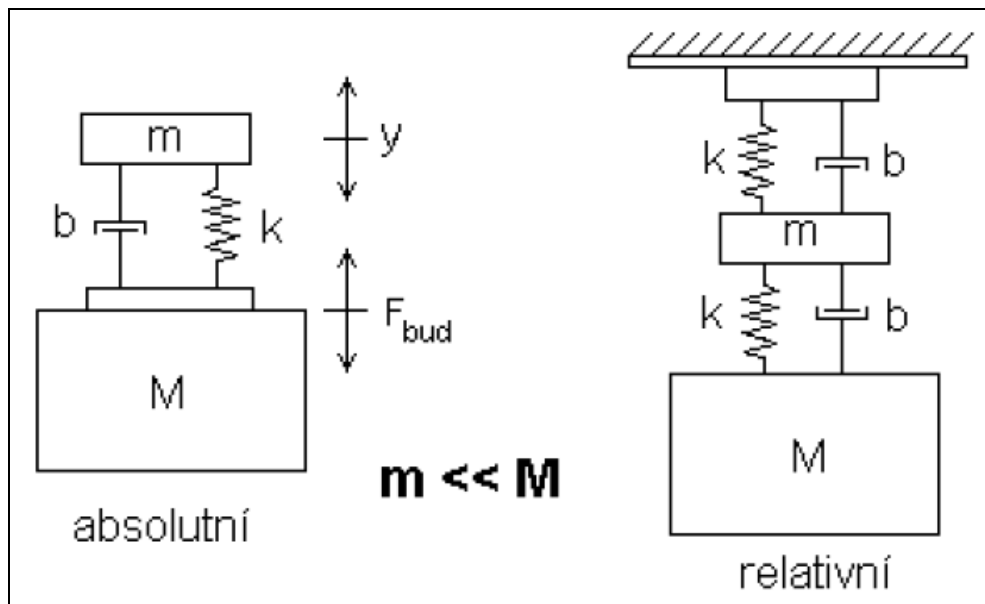
U absolutního kmitání je pohyb tělesa vztahován ke gravitačnímu poli země, tzv. pevný fixní bod. Absolutní snímače využívají pro měření setrvačnou hmotu snímače (jako rela-

tivně klidné těleso), který je spojen s kmitajícím objektem prostřednictvím článku s malou tuhostí a tlumením. Snímače amplitudy vibrací pracují obvykle vysoko nad rezonancí a s malým poměrným tlumením, u snímačů zrychlení je tomu naopak [3].

2.1.2 Relativní snímače vibrací

Relativní vibrace tělesa jsou vyhodnocovány vůči zvolenému reálnému bodu (např. jiná část stroje, základová deska stroje, náprava vozidla apod.), tj. bodu, který může být také v pohybu [1].

Model absolutního a relativního snímače schématicky znázorňuje (Obr. 8).



Obr. 8. Mechanický model absolutního a relativního snímače vibrací [5]

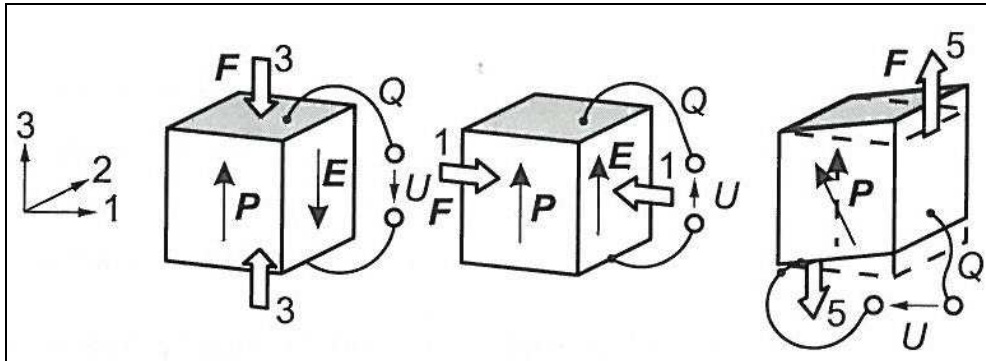
2.2 Absolutní snímače zrychlení

2.2.1 Piezoelektrické snímače

Nejvíce rozšířené pro snímání mechanických kmitů jsou piezoelektrické snímače zrychlení (akcelerometry). Mají obvykle velkou tuhost, proto pracují podrezonanční oblastí, měří zrychlení a pro získání amplitud a rychlosti používají integraci měřeného signálu [3].

Podstatou piezoelektrických snímačů je přímý piezoelektrický jev, při němž deformací vybraných krystalických nebo polykrystalických látek vzniká dipólový elektrický moment objemového elementu a ve výsledném efektu způsobí elektrickou polarizaci čidla. Piezoe-

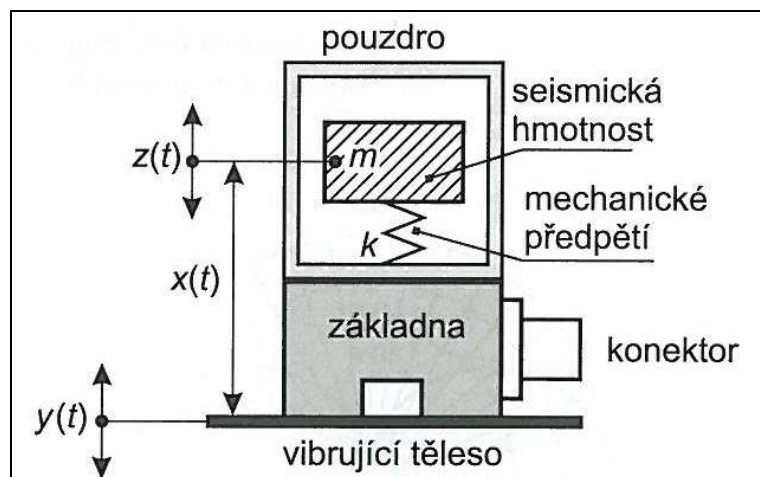
lektrický jev závisí na směru deformace vzhledem k osám krystalové mřížky. Při využití piezoelektrického jevu rozlišujeme dle směru působení vůči ose anizotropie podélný, příčný a stříhový jev (Obr. 9).



Obr. 9. Podélný, příčný a stříhový (smykový) piezoelektrický jev [1]

(*F je síla, E je intenzita elektrického pole, P je vektor polarizace, Q je elektrický náboj*)

Při zanedbání lineárního tlumení a předpětí a za předpokladu, že spojení akcelerometru s povrchem měřeného tělesa má nekonečnou hodnotu tuhosti, lze použít zjednodušený model akcelerometru (Obr. 10).

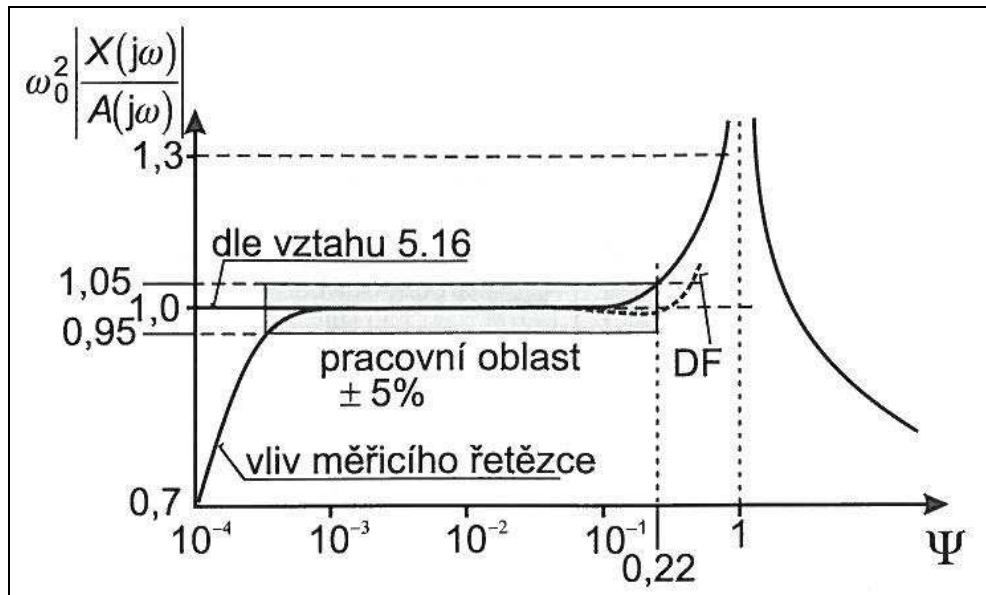


Obr. 10. Model piezoelektrického akcelerometru [1]

Pro tento model platí rovnice

$$\frac{\omega_0^2 |X(j\omega)|}{|A(j\omega)|} = \frac{1}{1 - \Psi^2} \tag{10}$$

a její odpovídající amplitudová charakteristika dle (Obr. 11) [1].



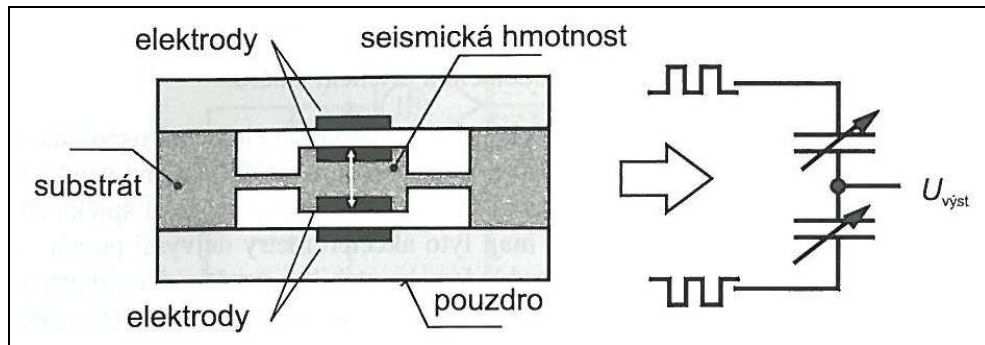
Obr. 11. Typická amplitudová frekvenční charakteristika piezoelektrického akcelerometru [1]

Základní parametry piezoelektrických akcelerometrů

- dynamický rozsah $\pm a_v$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) výkmitu zrychlení nebo násobku normálního gravitačního zrychlení $g_n = 9,80665 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- frekvenční rozsah: dolní a horní mez pracovní oblasti (Obr. 11)
- nábojová citlivost K_Q ($\text{pC}\cdot\text{g}_n^{-1}$) nebo napěťová citlivost K_U ($\text{mV}\cdot\text{g}_n^{-1}$)
- teplotní rozsah
- vliv okolního prostředí (elektromagnetické pole, vlhkost, akustický tlak) [1]

2.2.2 Kapacitní snímače

Kapacitní snímače pracují na principu změny kapacity desek kondenzátoru. Jsou přesné a velmi citlivé, ale vhodné pro nízké dynamické rozsahy zrychlení. Při pohybu seismické hmotnosti se jedna kapacita zvětšuje a druhá zmenšuje. Vyhodnocuje se diference hodnot kapacit (Obr. 12) [1].



Obr. 12. Uspořádání kapacitního akcelerometru [1]

Parametry kapacitních akcelerometrů: frekvenční rozsah od 0 Hz až do 6 kHz, dynamický rozsah od 250 g_n (při velmi krátkém rázu v desítkách ms až 10000 g_n), teplotní rozsah (-55 až +250) °C, citlivost od 20 mV/ g_n do 1000 mV/ g_n [1].

2.2.3 Piezorezistivní snímače

Piezorezistivní snímače slouží k měření amplitudy zrychlení, pracují v podrezonanční oblasti. Frekvenční a dynamický rozsah je poměrně široký. Bývají vybaveny viskózním tlumením pro zvýšení odolnosti proti rázům [3].

Jsou založeny na piezorezistivním jevu, který je charakterizován vlivem krystalografické orientace hmoty na rezistivitu materiálu. Používá se obohacený polovodič $Si - p^+$. Po změnu odporu R platí

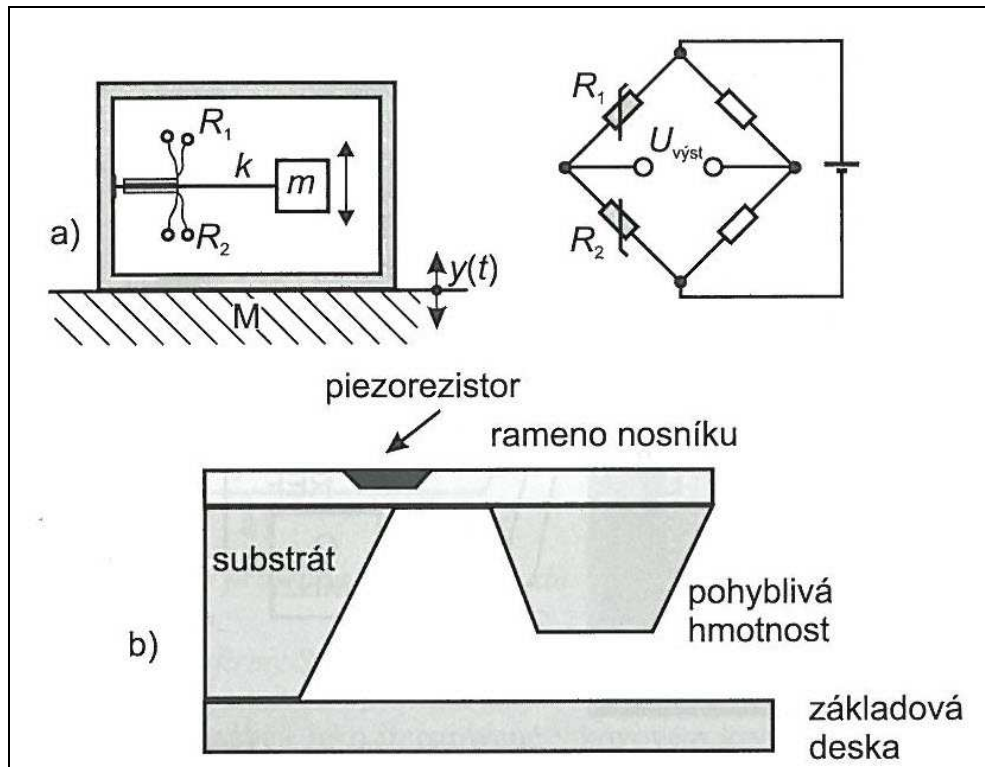
$$\frac{\partial R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (11)$$

kde

π_l, π_t jsou piezorezistivní součinitelé

σ_l, σ_t jsou složky napětí v podélném a příčném směru

Při namáhání ohybem se mění rezistivita piezorezistivním elementů uspořádaných obvykle do Wheatstoneova můstku. Rezonanční kmitočet je do 30 kHz, frekvenční rozsah od 0 Hz do 7 kHz, dynamický rozsah od 1,5 g_n do 2000 g_n (rázová špička až do 5000 g_n). Ze všech typů akcelerometrů mají tyto nejvyšší poměr citlivosti (do 25 mV/ g_n) vůči hmotnosti a vzhledem ke stabilitě napěťové citlivosti jsou vhodné k dlouhodobým testům, ale jsou teplotně závislé. Příklady uspořádání jsou na (Obr. 13) [1].



Obr. 13. Uspořádání piezorezistivních akcelerometrů

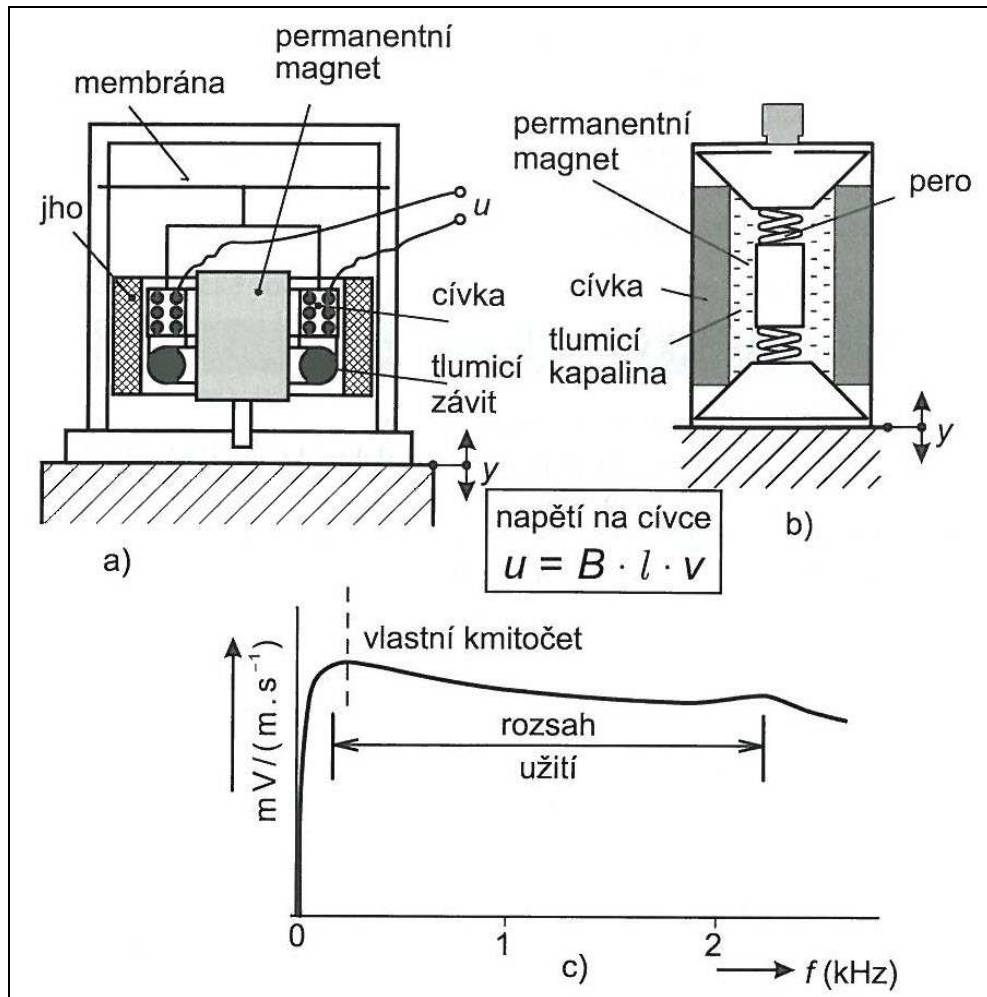
(a) polovodičové tenzometry na vetknutém nosníku, b) princip MEMS technologie) [1]

2.3 Absolutní snímače rychlosti

2.3.1 Elektrodynamické snímače

Snímač ve své podstatě měří výchylku vibrací, ale vzhledem k vnitřnímu uspořádání dochází při vzájemném pohybu magnetu (magnetická indukce B ve vzduchové mezeře) a cívky (délka vodiče l) k indukci napětí u na cívce. Magnetický tok se mění v závislosti na výchylce vibrací a výstupní napětí na cívce je úměrné derivaci proměnného magnetického toku a tedy rychlosti vibrací.

Seismickou hmotu m v provedení s pohyblivou cívkou tvoří cívka a v provedení s pohyblivým magnetem permanentní magnet. Tuhost je dána membránou resp. pružinou. Pro získání pracovní oblasti kolem rezonanční frekvence je optimální hodnota poměrného útlumu B od 0,5 do 0,7 a nastavuje se u provedení dle (Obr. 14a) tlumícím závitem a u provedení dle (Obr. 14b) tlumící kapalinou. Rezananční kmitočty jsou v rozmezí od 1 Hz do 100 Hz.



Obr. 14. Absolutní elektrodynamický snímač rychlosti

(a) pohyblivou cívku, b) s pohyblivým magnetem, c) charakteristika) [1]

Výhodou absolutních elektrodynamických snímačů rychlosti je vysoká úroveň výstupního signálu a malý vnitřní odpor. Snímač je možno používat bez zdroje napájení a napětí lze měřit libovolným číslicovým multimetrem bez speciálních zesilovačů.

Nevýhodou těchto snímačů je omezený horní kmitočet (2000 Hz až 3500 Hz), větší rozměry a citlivost na parazitní magnetické pole. V současné době se elektrodynamické snímače stále vyrábějí, ale vzhledem k cenově dostupné integrované elektronice piezoelektrických akcelerometrů je jejich podíl na trhu stále nižší [1].

2.4 Absolutní snímače výchylky

Snímače výchylky kmitů, snímače polohy a posunutí lze realizovat na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém, optickém principu. Ve vibrodiagnostice jsou nejrozší-

řetnější indukčnostní snímače, využívající závislost indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů [1]. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které měří relativní vzdálenost mezi dvěma povrchy. Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu jsou tyto snímače náchylné na parazitní vlivy (např. délka kabelu k měřicím obvodům, vnější elektromagnetické pole) [5]. Z těchto důvodů se vyrábějí jako integrované v kovovém krytu, ve kterém je kromě vyčnívající cívky i základní část elektronických obvodů. Tyto snímače mají obvykle kmitočtový rozsah od 0 Hz do 10000 Hz.

Snímače výchylky kmitů zpravidla vynikají vysokou hmotností oproti nízké tuhosti a tlumení [5].

2.5 Laserové interferometrické vibrometry

Laserové vibrometry založené na Dopplerově jevu se používají v bezdotykových měřeních, kde standardní akcelerometry nedosahují požadovaných parametrů nebo kde je nelze z provozních a rozměrových důvodů použít. Mohou měřit vibrace do 30 MHz s velmi malou nejistotou měření a lineární fázovou odezvou. Dopplerův jev známý v akustice se projevuje tím, že frekvence vlnění zjištěná pozorovatelem P je jiná než frekvence vlnění f zdroje Z , jestliže se vzdálenost zdroje od pozorovatele mění v čase. Při vzájemném přibližování je frekvence f přijímaného vlnění vyšší a při oddalování je frekvence f nižší. Dopplerův princip popisuje rovnice (12), kde c je rychlost šíření vln, při čemž platí $c = \lambda \cdot f$, kde λ je vlnová délka.

$$f_1 = f \frac{c}{c+v}; f_2 = f \frac{c}{c-v}; f_3 = f \frac{c+v}{c}; f_4 = f \frac{c-v}{c} \quad (12)$$

Pro šíření světla platí stejný Dopplerův princip přičemž pro rychlost světla c a rychlost vibrací v platí nerovnost $v \ll c$. Jestliže se optická vlna odráží od vzdalujícího se objektu a její frekvence f_D je detekována měřicím přístrojem, platí za předpokladu $c \gg v$

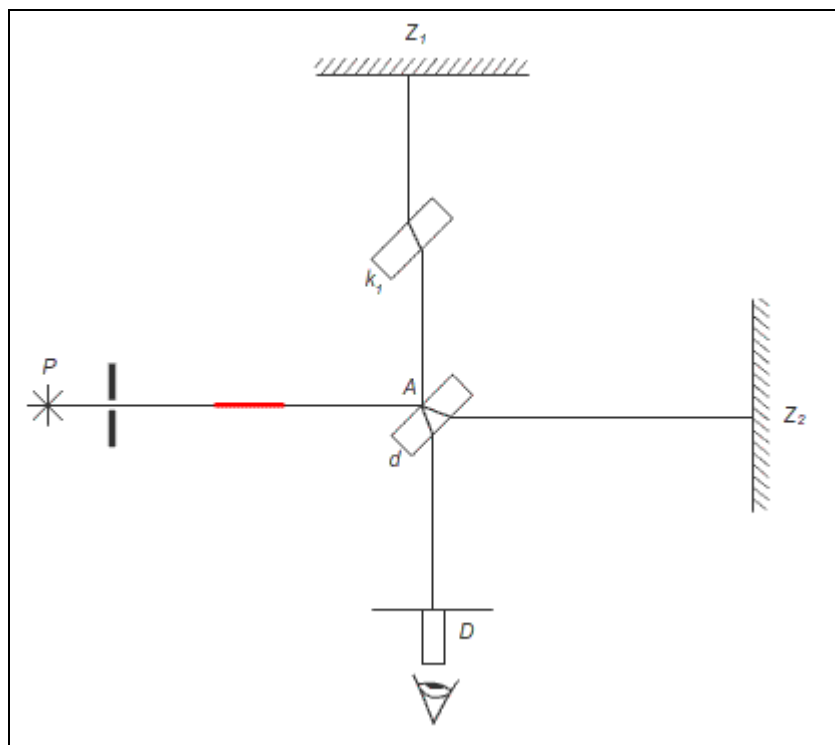
$$f_D = f_4 \cdot \left(\frac{c}{c+v} \right) = f \left(\frac{c}{c+v} \cdot \frac{c-v}{c} \right) \approx f - \frac{2v}{\lambda} \quad (13)$$

Pro přibližující se objekt bude v rovnici (13) opačné znaménko.

Princip laserových vibrometrů je založen na interferenci dvou koherentních, lineárně polarizovaných světelných paprsků. Jako zdroj záření se používají nízkovýkonové lasery (Ga-Al-As, He-Ne). Pomocí laserových interferometrů lze bezdotykově přímo měřit

amplitudu kmitů (např. Michelsonův interferometr) čítáním interferenčních proužků. Tyto přístroje se však ve vibrodiagnostice využívají jen pro velmi nízké rychlosti vibrací a pro metrologii akcelerometrů [1].

Konstrukce Michelsonova interferometru sestává ze zdroje světelných paprsků P , polopropustné skleněné destičky d , kompenzační destičky k_1 , zrcadel Z_1, Z_2 a dalekohledu D (Obr. 15).



Obr. 15 Michelsonův interferometr [6]

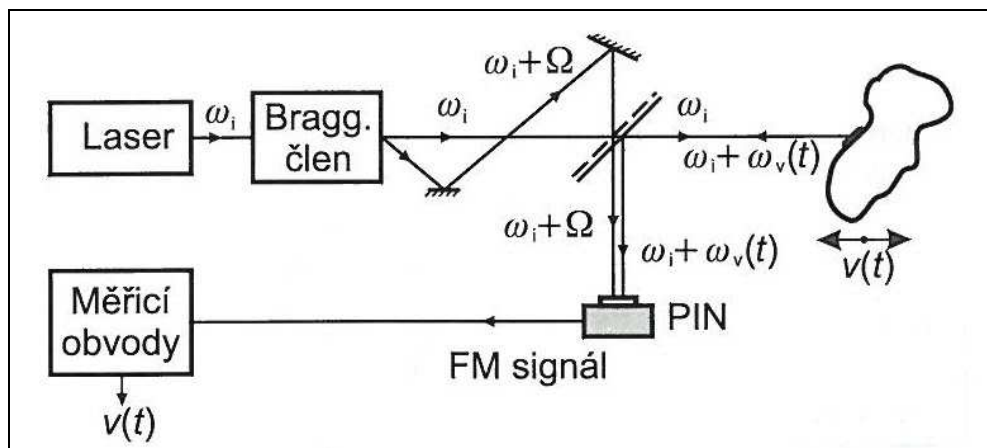
Paprsek ze zdroje P dopadá pod úhlem 45° na polopropustnou skleněnou destičku d , kde se v bodě A štěpí na dva paprsky.

Paprsek č. 1 se odrazí od polopropustné destičky a dopadá kolmo na zrcadlo Z_1 , zde se odrazí zpátky do bodu A , po průchodu polopropustnou destičkou dopadá do dalekohledu D . Paprsek č. 2 projde polopropustnou destičkou, dopadne kolmo na zrcadlo Z_2 , zde se odrazí zpátky do bodu A , v bodě A se odrazí do dalekohledu D .

Oba paprsky se tedy sejdou v dalekohledu, kde spolu interferují. Protože paprsek č. 2 projde polopropustnou destičkou celkem třikrát, vkládá se do cesty paprsku č. 1 destička k_1 (kompenzační) rovnoběžná s destičkou d . Pokud jsou vzdálenosti zrcadel Z_1 a Z_2 od bodu A stejné, budou stejné i dráhy paprsků a v ohnisku objektivu se oba paprsky zesílí.

V případě, že posuneme zrcadlo Z_2 o vzdálenost l , dráhový rozdíl paprsků bude $\Delta l = 2l$. V závislosti na velikosti dráhového rozdílu vznikají interferenční maxima pro $\Delta l = k \lambda$ (kde k je celé číslo, λ vlnová délka paprsku) a interferenční minima pro $\Delta l = (2k + 1)\lambda/2$ [6].

Provozní laserové vibrometry pracují na principu heterodynní detekce frekvenčně modulovaného signálu (Obr. 16).



Obr. 16. Laserový interferometrický vibrometr [1]

Monochromatický referenční optický paprsek z laseru prochází Braggovým deflektorem, tj. akustooptickým nebo mechanickooptickým modulem sloužícím k vychýlení optického svazku a posunu frekvence, optickým polárním polopropustným zrcadlem a dopadá na reflektivní terčík upevněný na kmitajícím objektu. Zpětný odražený paprsek, který je na základě Dopplerova jevu frekvenčně modulovaný se na polopropustném zrcadle odráží směrem k detektoru. Referenční svazek difraktovaný Braggovým modulem spolu s odraženým frekvenčně modulovaným svazkem spolu interferují na detekční diodě PIN. Při heterodynní interferenci dvou vln o různých kmitočtech vzniká vlna s rozdílovým kmitočtem a řada vln součtového charakteru, které jsou na kmitočtech světla, tj. na kmitočtech, které dioda není schopna sledovat. Frekvenčně modulovaný optický svazek má okamžitou hodnotu úhlového kmitočtu

$$\varpi(t) = \varpi_i + \Delta\varpi_m \cdot g(t) \quad (14)$$

Kde

ϖ_i je kmitočet nosného referenčního optického signálu,

$\Delta\varpi_m$ je největší změna úhlového kmitočtu odpovídající maximální hodnotě modulačního optického signálu,

$g(t)$ je časová závislost modulačního optického signálu.

Pro harmonický pohyb vibrujícího objektu platí pro rychlost $v(t)$ a signál $g(t)$ vztahy

$$v(t) = v_0 \cos \varpi_v t; g(t) = \frac{v(t)}{v_0} = \cos \varpi_v t \quad (15)$$

Z Dopplerova vztahu (13) pak vyplývá

$$\Delta\varpi_m = 2\pi\Delta f_m = 2\pi(f - f_D) = 4\pi \frac{v_0}{\lambda} \quad (16)$$

A pro okamžitou hodnotu ω_i platí

$$\varpi(t) = \omega_i + \frac{4\pi}{\lambda} v_0 \cos \varpi_v t \quad (17)$$

Vstupním signálem po frekvenční demodulaci v elektronické části přístroje je modulační signál $v(t)$, který může mít zcela obecný periodický průběh. Pro difraktovanou vlnu z Braggova deflektoru platí $\omega_d = \omega_i + \Omega$. Konstantní posun kmitočtu Ω tvoří základní kmitočet signálu při nulové rychlosti objektu a je nutný pro rozlišení směru vibrací. Uvedený laserový vibrometr lze použít i pro rotující hřídel.

Pro provozní účel se vyrábějí vibrometry, u nichž se světlo laseru přivádí vláknovým ohebným světlovodem do optické hlavičky, kde se objektivem koncentruje do zvoleného bodu na povrchu objektu. Speciální typy vibrometrů používají dvě samostatné hlavičky. Vícehlavicové systémy pak umožňují měření vibrací v 3D rozměrech nebo skenování vibrací ve větší ploše povrchu [1].

3 METODY VYHODNOCENÍ VIBRACÍ

Kmitání (vibrace, chvění) stroje je velmi citlivým ukazatelem namáhání, technického stavu stroje a jeho funkce. Týká se to zejména ložisek, hřídelů, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyvážených rotačních součástí, vůlí rotačních součástí a jiné. Tato skutečnost je masivně využívána pro monitorování stavu strojů a jejich diagnostiku. Nejjednodušší formou je realizace širokopásmových měření celkových úrovní vibrací. Většinou v definovaném rozsahu podle platných norem, či doporučení výrobců a uživatelů pro dané konkrétní zařízení. Více informací můžeme získat na základě tzv. kmitočtové analýzy. Zde se využívají složitější metodiky a přístrojové vybavení pro získání charakteristického kmitočtového spektra vibrací stroje. Měření se provádí systematicky, cíleně, obvykle nejprve na stroji v bezvadném technickém stavu s dalšími opakováními s časovou periodou danou konkrétním typem stroje a druhem jeho provozu. Jak se postupně mění (zhoršuje) technický stav stroje, mění se i charakteristické kmitočtové spektrum, resp. především jeho jednotlivé složky mající vztah k jeho jednotlivým částem (ozubená kola, soukolí, hřídele, ložiska, rotory, setrvačníky, klouby a jiné). Na základě sledování a analýzy těchto změn spekter lze bezdemontážním způsobem velmi účinně diagnostikovat, detekovat, identifikovat, lokalizovat a popř. prognózovat vznikající poruchu [3].

3.1 Analýza signálu v časové oblasti

Je založena na vyhodnocení parametrů časových průběhů signálů určujících veličin (výchylky, rychlosti, zrychlení). Někdy se také označuje časová analýza jako „časová historie“. V časové oblasti lze snadno vyhodnotit okamžité střední a efektivní hodnoty signálu nebo obálky signálu. V případě převládající náhodné složky signálu (tzv. náhodné vibrace) lze pro analýzu aplikovat vybrané statistické výpočty deskriptorů jako je směrodatná odchylka, koeficient špičatosti, koeficient šikmosti, činitel výkmitu a řada dalších. Analýza signálu v časové oblasti je dále vhodná pro přechodové jevy jako jsou např. rozběhy a doběhy motorů, rázové odezvy, nestacionární signály s proměnnou frekvencí, při nelineárních parametrech systému, při proměnné tuhosti kmitajícího objektu nebo proměnném tlumení systému během časové periody signálu. Pokročilé metody časové analýzy využívající číslicovou filtraci, integrální nebo vlnkovou transformaci umožňují lokalizovat místo závady nebo animovat módy kmitů.

Analýza v čase je vhodná tehdy, existuje-li jediný nebo alespoň dominantní zdroj vibrací, neboť jinak dochází ke ztrátě diagnostické informace v šumu signálu způsobeném přenosem vibrací z různých oblastí strojního komplexu a možnost lokalizace příčiny vibrací stroje je pak velmi omezena [1].

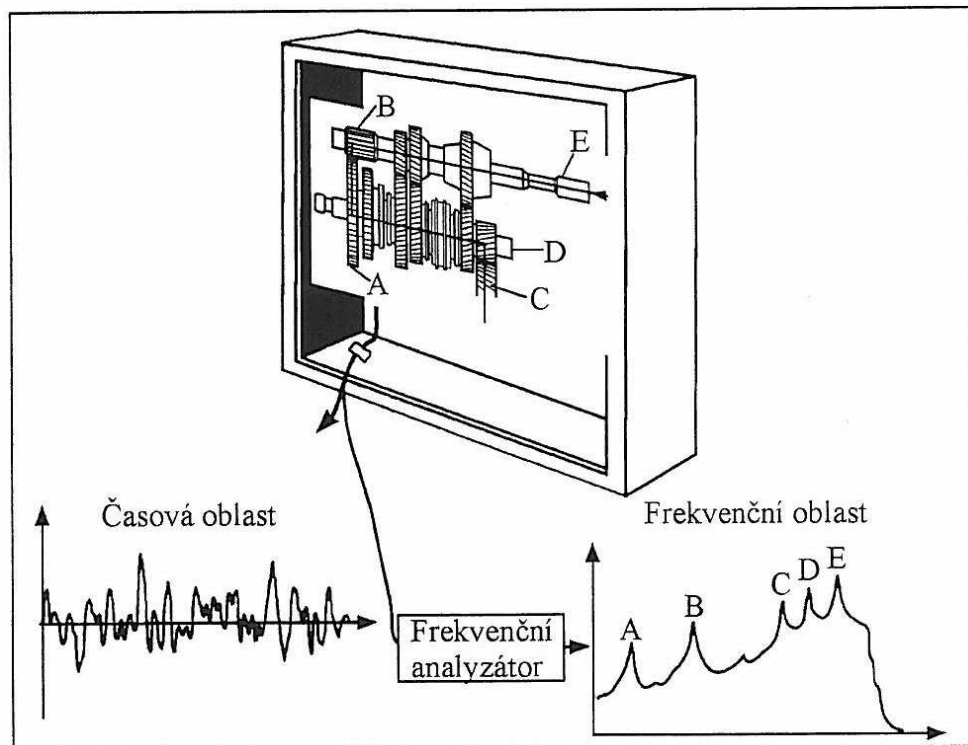
3.1.1 Veličiny popisující časový signál

- Vrcholová hodnota (Peak Level – X_{peak} , popř. S_{peak}) udává maximální amplitudu a obvykle se využívá pro popis mechanických rázů, resp. dalších relativně krátkodobých jevů. X_{peak} však pouze indikuje přítomnost špičky, ale nenes informace o časovém průběhu ani o kmitočtovém složení hodnocených vibrací.
- Maximální rozkmit (peak to peak – $X_{\text{peak-to-peak}}$ popř. $S_{\text{peak-to-peak}}$), tzv. i dvojitá amplituda, která se využívá pro posouzení maximálně přípustného mechanického namáhání a vůlí dané konstrukce.
- Střední hodnota (Average Level – $X_{\text{rectified average}}$ popř. $S_{\text{rectified average}}$), která popisuje časový průběh sledovaných vibrací – tato hodnota má omezený význam, protože nepopisuje žádné důležité fyzikální procesy.
- Efektivní hodnota (Root Mean Square – X_{RMS} popř. S_{RMS}) je často užívanou hodnotou, protože nese informace o časovém průběhu vibrací a je v přímém vztahu k energetickému obsahu měřených vibrací.
- Crest Factor, který definuje poměr mezi vrcholovou a efektivní hodnotou. Pro harmonické kmitání (sinusový průběh) je Crest Factor roven odmocnině z 2. Pro náhodné signály Crest Factor roste v souvislosti s opotřebením, pittingem, lomy, trhlinami aj. což se v diagnostice s výhodou využívá [3].

3.2 Frekvenční analýza signálu

Časový průběh kmitání je vhodné transformovat do frekvenční oblasti, tj. vibrace nahradit posloupností jeho kmitočtových složek. Vhodnou představu o účelnosti frekvenční analýzy získáme, když si uvědomíme rozdíl mezi informací obsaženou v časovém signálu a kmitočtovém spektru. Lze konstatovat, že časový signál obsahuje informaci o tom, kdy se daný jev stal, ale kmitočtové spektrum obsahuje informaci o tom, jak často se tentýž jev objevu-

je ve sledovaném signálu. Obecný zjednodušený princip časové a frekvenční analýzy je na (Obr. 17).



Obr. 17. Princip časové a frekvenční analýzy [3]

Operace, která komplexní signály rozkládá na jejich kmitočtové složky se nazývá frekvenční analýzou, která využívá buď selektivních pásmových propustí (analogově nebo digitálně) nebo častěji rychlou Fourierovu transformaci (FFT).

Periodický signál má diskrétní kmitočtové spektrum obsahující základní kmitočet a jeho celistvé násobky (n – vyšších harmonických), na něž lze průběh rozložit

$$x(t) = x_0 + x_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + x_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + x_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + x_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (18)$$

Kde

x_0 stejnosměrná složka,

x_1 první harmonická,

x_2 až x_n druhá až n -tá harmonická.

resp.

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (19)$$

kde

a_0 statistická složka amplitudy signálu $y(t)$,

c_n koeficienty Fourierovy řady.

Náhodné signály mají časový průběh takový, že okamžitou hodnotu v čase t lze stanovit jen s jistou pravděpodobností. Frekvenční spektrum mají tyto signály spojité. Náhodný signál je popsán svými statistickými charakteristikami, např. střední kvadratickou hodnotou, informující o intenzitě děje, definovanou vztahem

$$\Psi_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (20)$$

hustotou pravděpodobnosti, informující o amplitudovém rozložení signálu, definovanou vztahem

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x + \Delta x) - P(x)}{\Delta x} \quad (21)$$

autokorelační funkcí $R(\tau)$, která popisuje souvislost mezi okamžitými hodnotami náhodné proměnné, která leží v odstupu τ na časové ose. Autokorelační funkce umožňuje rozlišit náhodné procesy a periodické procesy a zjistit periodickou složku ve směsi s náhodnou složkou. Pro stacionární ergodické stochastické procesy platí

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t - \tau) dt \quad (22)$$

a spektrální hustotou informující o kmitočtovém rozložení danou vztahem

$$S_x(f) = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (23)$$

Pro praktické využití náhodných signálů v diagnostice přibývá k požadavku stacionarity ještě požadavek ergodičnosti. Za ergodický považujeme signál, u něhož lze pravděpodobnostní charakteristiky, např. autokorelační funkci, stanovit z jednoho měření dostatečné délky. Většinou podmínky ergodičnosti diagnostického signálu odpovídají stabilnímu režimu práce objektu diagnostiky. U nestacionárních signálů se setkáváme převážně se signá-

ly transientními. Často se zpracování tohoto signálu převádí na zpracování signálu periodického s periodou T tak, že signál pro zpracování neustále opakuje s opakovací dobou T [3].

4 ANALÝZA A ZPRACOVÁNÍ DIAGNOSTICKÝCH SIGNÁLŮ

4.1 Signály a jejich rozdělení

Signály lze podle různých hledisek orientačně dělit do skupin. Podle náhodnosti jejich průběhů je lze rozdělit do několika následujících kategorií na:

- signály deterministické, jejichž časový vývoj odpovídá určitému funkčnímu předpisu a které lze dále rozdělit na
 - periodické signály – jsou složeny z harmonických signálů o frekvencích, které jsou celistvým násobkem jedné základní frekvence,
 - kvaziperiodické signály – jsou složeny z harmonických signálů o frekvencích, které jsou násobky nejméně dvou základních frekvencí a současně jsou v poměru určeném iracionálním číslem,
 - přechodné signály – jejich nenulová část je na rozdíl od předchozích kategorií časově omezena; typicky jde o přechodné děje, odezvy na impulsní vybuzení apod.,
 - pseudonáhodné – periodické signály, které jsou vytvářeny tak, aby se svými statistickými vlastnostmi podobaly signálům náhodným; perioda musí být tak velká, aby se z pohledu konkrétní délky signálu jevíly jako stochastické,
- náhodné (stochastické) signály
 - stacionární signály – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se nemění s časem. Velkou podskupinou, jsou signály stacionární v širším smyslu nebo také slabě stacionární (*wide-sense stationary*), u kterých nezávisí na čase střední hodnota a disperze a u kterých autokorelační funkce nezávisí na počátku záznamu signálu. Druhou podskupinou jsou signály stacionární v užším smyslu nebo také silně stacionární, u kterých kromě předchozích podmínek nezávisí na čase také hustoty pravděpodobnosti všech řádů. Jinou skupinou jsou signály ergodické, u kterých se statistické parametry vypočtené z jednoho úseku signálu rovnají parametrům vypočteným ze souboru mnoha úseků,
 - nestacionární – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se průběhu času mění. Hranice mezi nestacionárními a stacionárními signály je nutno určovat s při-

hlédnutím ke zkoumané délce signálu, při čemž původně nestacionární signál může být z pohledu několikanásobně delší doby stacionární,

- cyklostacionární – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se v průběhu času cyklicky mění (např. náhodné signály vibrací motorů).

Pro popis náhodných signálů se používají buď číselné charakteristiky jako jsou obecné a centrované statistické momenty (např. střední hodnota a rozptyl) nebo funkční závislosti jako je hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce z pohledu rozdělení amplitud, korelační a kovariační funkce z pohledu časového průběhu nebo výkonová spektrální hustota z pohledu frekvenčního.

Z pohledu energie signálu lze odlišit dvě skupiny:

- signály energetické, které mají konečnou energii a
- signály výkonové, nemají konečnou energii (např. trvají nekonečně dlouho v čase).

Metody zpracování číslicových signálů lze podle způsobu získávání výsledku v čase rozdělit na

- metody pracující v reálném čase (on-line), kdy je další vzorek výsledku znám po obdržení vzorku zpracovávaného signálu a
- metody, kdy je před vlastním provedením operace k dispozici ucelená část vzorků signálu, tzv. záznam (metody off-line); protože bývá k dispozici časová historie i budoucnost signálu, lze realizovat i nekauzální zpracování [1].

4.2 Digitalizace signálů

Diskrétní signály, které jsou na počátku řetězce zpracování získány digitalizací, tj. analogově-číslcovým převodem (pomocí analogově-číslcového převodníku, *Analog-to-Digital Converter*, ADC). Takto získaný signál představuje z matematického hlediska posloupnost. Přejchod od analogových signálů k těmto posloupnostem se provádí operacemi nazvanými vzorkování v čase a kvantování v amplitudě [1].

4.2.1 Aliasing

První operací při přechodu od spojitého signálu (např. výstupní napětí senzoru vibrací) k signálu číslicovému je vzorkování. Při vzorkování signálů v čase může dojít k nežádou-

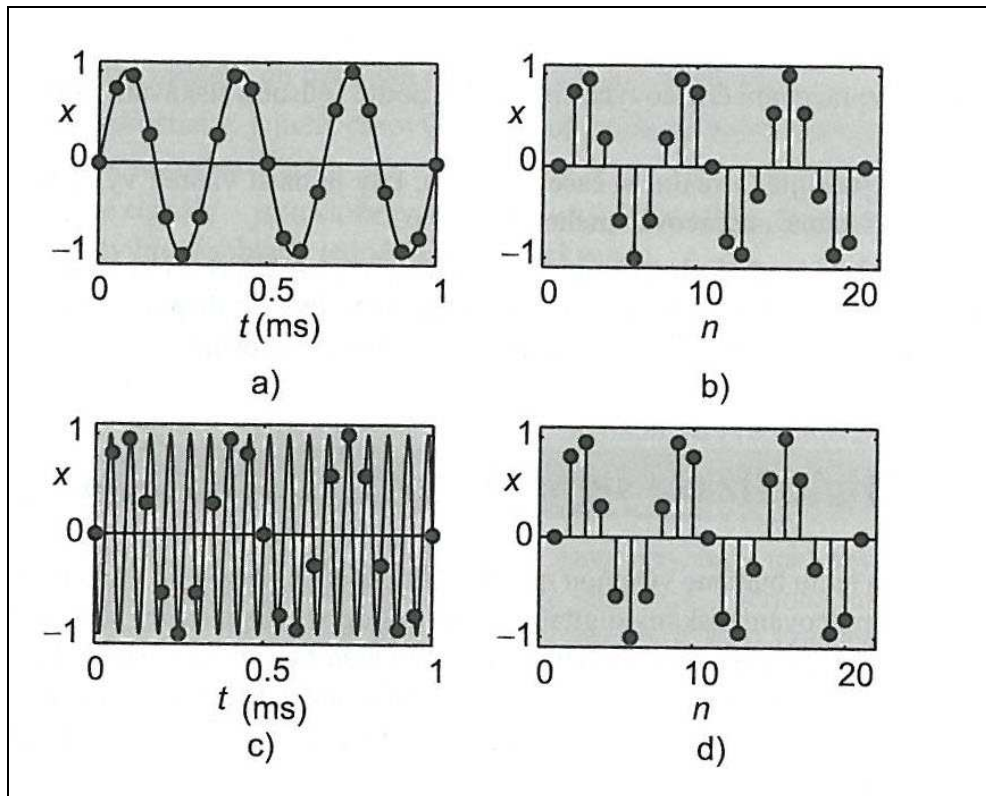
címu jevu zvanému aliasing, který vzniká v případě, kdy frekvence odebrání vzorků není dostatečně velká v porovnání s maximální frekvencí signálu. V praxi je nejčastější vzorkování s pevnou vzorkovací frekvencí nazývané také periodické nebo sekvenční. Ostatní typy jako např. vzorkování adaptivní nebo náhodné se užívají zřídka.

Podmínka, která určuje, kdy se při vzorkování signálu neztratí informace, bývá nazývána jako Shannon-Kotělnikovova vzorkovací věta. Tato věta říká, že spojitý signál obsahující pouze frekvenční složky s frekvencemi menšími než f_{max} může být ze vzorků jednoznačně rekonstruován jen tehdy, pokud je vzorkovací frekvence větší než dvojnásobek f_{max} , neboli

$$f_{VZ} > 2f_{max} \quad (24)$$

Hraniční frekvence $f_{VZ}/2$ se nazývá Nyquistova frekvence. Podmínka (24) je teoretickou hranicí, v praxi je nutné pro vzorkování použít čtyř nebo vícenásobek maximální frekvence signálu.

Ilustrace vzniku aliasingu je uvedena na (Obr. 18), který ukazuje, že při nesplnění podmínky lze obdržet vzorky identické se vzorky signálu s úplně jinou frekvencí.

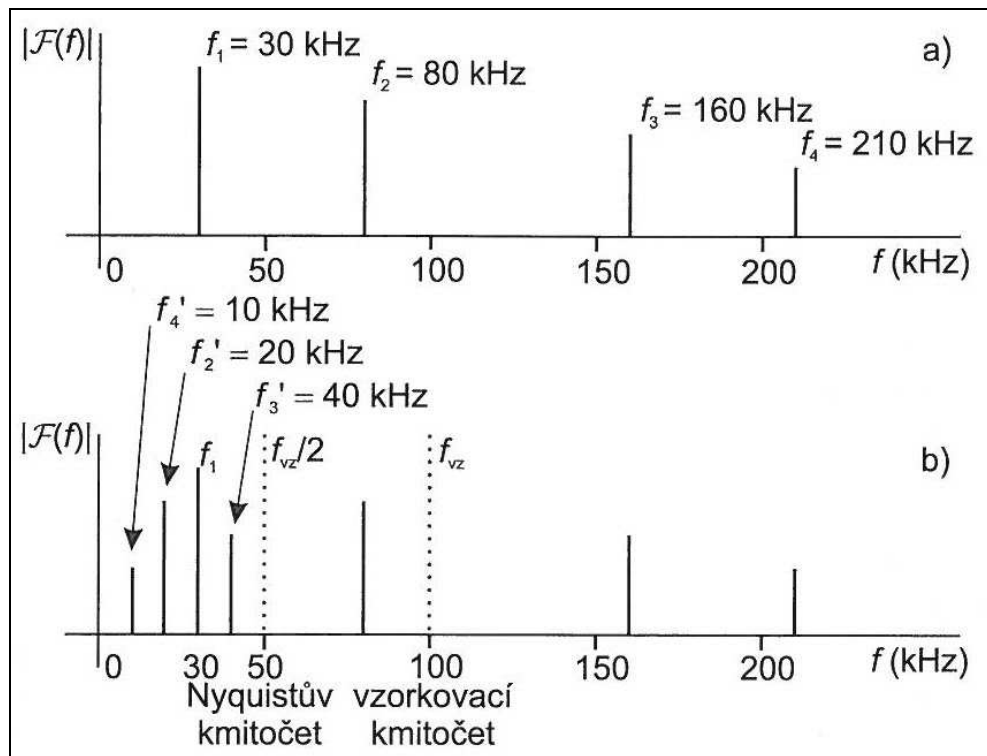


Obr. 18. Vznik aliasingu při vzorkování

(a) sinusový signál s frekvencí 3 kHz vzorkovaný kmitočtem 20 kHz, b) odebrané vzorky pro signál a), c) sinusový signál s frekvencí 17 kHz vzorkovaný kmitočtem 20 kHz, d) odebrané vzorky pro signál c)) [1]

Problém aliasingu lze zkoumat i z frekvenčního pohledu, který je důležitý zejména při spektrální analýze vzorkovaných signálů. Na (Obr. 19) je uveden příklad signálu, který obsahuje několik sinusových složek a je chybně vzorkován frekvencí, která dovoluje korektní vzorkování pouze složky f_1 . U ostatních složek dojde díky efektu, který je patrný z (Obr. 19), k tzv. překládání frekvencí, například frekvence složky f_2 se překlopí kolem poloviny vzorkovací frekvence (Nyquistovy frekvence), složky f_3 a f_4 adekvátně projdou překlopením kolem všech odpovídajících celistvých násobcích Nyquistovy frekvence.

Splněním podmínky (24) je možné zajistit několika způsoby, buď je maximální frekvence signálu přirozeně zajištěna například dynamickým chováním senzoru a stačí použít dostatečně vysokou vzorkovací frekvenci AD převodníku, nebo můžeme omezit maximální frekvenci signálu pomocí vhodného analogového filtru dolní propust předřazeného AD převodníku, tzv. antialiasingový filtr.



Obr. 19. Projev aliasingu

(a) původní signál obsahující čtyři harmonické složky, b) fiktivní spektrální složky f' vzniklé při vzorkování s nedostatečně vysokým kmitočtem) [1]

Jako antialiasingové filtry bývají používány analogové eliptické filtry z důvodu velké strmosti v přechodovém pásmu. Kromě použití jednoho antialiasingového filtru v analogové podobě před AD převodníkem, který musí být pro více vzorkovacích frekvencí nastavitelný, se může použít kombinace filtru analogového s číslicovým. Nejprve je signál filtrován pevně nastaveným analogovým filtrem (např. se strmostí 6dB na oktávu), vzorkován a digitalizován dostatečně vysokou vzorkovací frekvencí. Pak se číslicový signál s respektováním Nyquistovy frekvence zdecimuje (při tzv. decimaci se z původní posloupnosti vybere každý M -tý vzorek, často každý druhý – decimace dvěma) za pomoci číslicového filtru na nižší vzorkovací frekvenci potřebnou pro další zpracování. Toto uspořádání má výhodu ve snadné změně frekvence filtru, která se děje číslicově a ve využití filtrů s mnohem větší strmostí, než lze realizovat v analogové podobě.

Při návrhu antialiasingového filtru je nutné kromě příslušných frekvencí vhodně zajistit minimální amplitudové i fázové ovlivnění signálu v propustném pásmu filtru a dostatečný útlum v pásmu nepropustném. Požadovaný útlum lze odvodit z rozlišovací schopnosti následného AD převodníku.

Se vzorkovanými signály se často provádějí operace, které mění signál vypouštěním nebo přidáváním vzorků. Při vypouštění vzorků může dojít k porušení vzorkovací věty, neboť dochází k roztažení spektra původního signálu. Před blok decimace je tedy někdy nutné zařadit číslicový filtr typu dolní propust, který zabrání možnému aliasingu [1].

4.3 Amplitudové popisy signálů

Pro popis vlastností signálů z hlediska amplitudy existuje celá řada přístupů. Dále je uveden přehled vybraných metod s přihlédnutím k aplikacím v diagnostice. Protože jsou některé metody používány pro popis jak deterministických tak náhodných signálů, nebudeme jejich výklad dělit.

Mezi základní energetické veličiny řadíme výkon a energii signálu. Zjednodušeně můžeme výkon P diskrétního signálu $x(n)$ konečné délky N definovat vztahem

$$P = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (25)$$

Obdobně energie diskrétního signálu $x(n)$ konečné délky N je definován vztahem

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (26)$$

Stejně jako u spojitých signálů je výkon energie za určitý čas. Tímto časem je u periodických signálů doba periody, u signálů konečné délky je to délka signálu. Tato délka je u konečného diskrétního signálu rovna NT_{VZ} , kde T_{VZ} je vzorkovací interval.

Šumy bývají obvykle popisovány dle několika hledisek:

1. Rozložení amplitud; z tohoto pohledu bývá šum charakterizován například jako šum s normálním rozložením – tzv. Gaussovský nebo šum rovnoměrně rozložený.
2. Průběh spektrální hustoty; z tohoto pohledu bývá šum charakterizován například jako šum bílý, tj. s rovnoměrně rozloženou spektrální hustotou, šum růžový, jehož spektrální hustota je nepřímo úměrná frekvenci (tedy se stoupající frekvencí klesá velikost spektrální hustoty) nebo obecně šum barevný, tj. s nerovnoměrnou spektrální hustotou.
3. Vztah k dalšímu signálu významnému v dané úloze, např. šum korelovaný / nekorelovaný.
4. Vybrané statistické vlastnosti signálu, např. šum stacionární / nestacionární.

Efektivní hodnota šumu s nulovou střední hodnotou je rovna druhé odmocnině rozptylu, tedy směrodatné odchylce (standardní odchylce) šumu. V případě šumu s nenulovou střední hodnotou je efektivní hodnota rovna geometrickému součtu střední hodnoty a směrodatné odchylky.

Často bývá rozložení hodnot (i náhodného) signálu charakterizováno pomocí několika hodnot, tzv. momentů prvního řádu. Obecný k -tý moment prvního řádu pro náhodnou diskrétní veličinu x je dán:

$$\mu_k = \sum_{i=1}^N x_i^k P_i \quad (27)$$

a centrální k -tý moment prvního řádu

$$\mu_k^c = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^k P_i \quad (28)$$

kde P_i je pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnot x_i^k pro obecný moment a hodnoty $(x_i - \mu_x)^k$ pro centrální moment.

První obecný moment μ_1 je tzv. střední hodnota označována jako \bar{x} , kterou můžeme také odhadnout pomocí výpočtu

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N x(n) \quad (29)$$

Druhý obecný moment představuje střední hodnotu kvadrátu a jeho odmocnina je rovna efektivní hodnotě signálu. Druhý centrální moment je tzv. rozptyl (variace nebo disperze). Jeho druhá odmocnina představuje střední kvadratickou odchylku (nebo též směrodatnou odchylku nebo standardní odchylku).

Mezi parametry, které popisují tvar rozdělení a jsou určeny z momentových popisů patří šikmost rozdělení (*skewness*) definovaná jako míra asymetrie rozdělení vůči průměru:

$$s = \frac{\mu_3}{\sigma_3} \quad (30)$$

kde σ je směrodatná odchylka. Když je šikmost záporná, data jsou rozložena více doleva od průměru a naopak.

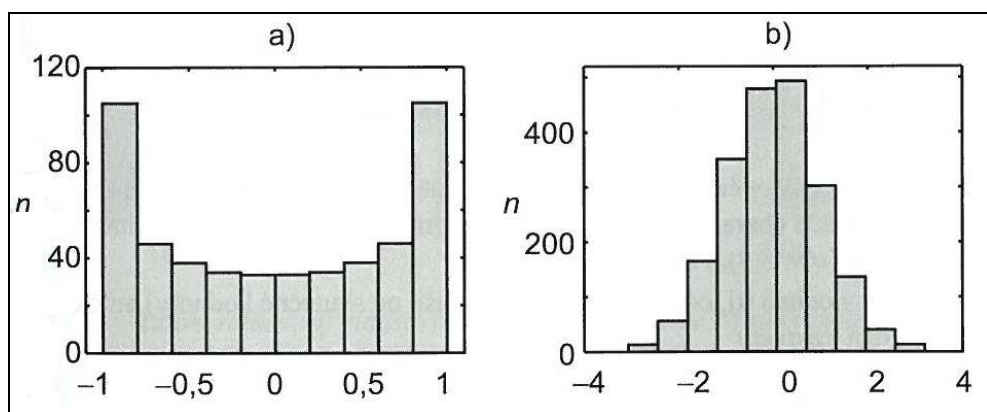
Šikmost (*kurtosis*) popisuje „šířku“ rozdělení vůči normálnímu rozdělení. Definována bývá jako

$$k = \frac{\mu_4}{\sigma_4} - 3 \quad (31)$$

Je-li špičatost větší než nula, je hustota na koncích větší než hustota normálního rozdělení se stejnou střední hodnotou a stejným rozptylem. Pro normální rozdělení je špičatost nulová. Někdy bývá použita alternativní definice bez odečtení 3, pro normální rozdělení je pak $k=3$.

Mezi momenty druhého řádu patří korelační a kovariační funkce, které jsou popsány dále.

Mezi další veličiny charakterizující signál z amplitudového pohledu patří efektivní hodnota (RMS, *Root Mean Square*), absolutní špičková hodnota, kladná (příp. záporná) špičková hodnota, rozkmit signálu (*peak-to-peak value*), činitel tvaru (*form factor*) jako poměr efektivní ku střední hodnotě a činitel výkyvu nebo výkmitu (*crest factor*) jako poměr špičkové ku efektivní hodnotě. Vizualní posouzení rozložení amplitud signálu dovoluje histogram, který udává průběh četnosti výskytu amplitud v jednotlivých amplitudových pásmech (Obr. 20).



Obr. 20. Histogram

(a) sinusový signál, b) šum s normálním rozložením [1]

SNR (*Signal-to-Noise-Ratio*) je veličina charakterizující odstup signálu od šumu. Vyjadřuje, kolikrát je výkon užitečného signálu (P_s) větší než výkon šumu (P_n), kterým je signál zkreslen. Často se vyjadřuje v decibelech (dB). Činný výkon se v teorii signálů obvykle vyjadřuje jako výkon na odporu 1Ω , proto je možné ho vyjádřit jako kvadrát efektivní hodnoty signálu, pak

$$SNR = 10 \log \frac{P_s}{P_n} = 20 \log \frac{U_{efs}}{U_{efn}} \quad (32)$$

kde U_{efs} , resp. U_{efn} jsou efektivní hodnoty signálu resp. šumu [1].

4.4 Spektrální analýza pomocí Fourierovy transformace

Cílem spektrální analýzy je popsat rozložení složek signálu ve frekvenční oblasti, tedy vyjádřit analyzovaný signál pomocí ortogonální (navzájem kolmých) bázevých funkcí. V případě Fourierovy transformace je bázevou funkcí komplexní exponenciála ve tvaru $e^{j2\pi ft}$. Kromě Fourierovy transformace lze pro vyjádření signálu pomocí ortogonálních bázevých funkcí použít například vlnkovou (wavelet), kosinovou nebo Walsh-Hadamardovu transformaci.

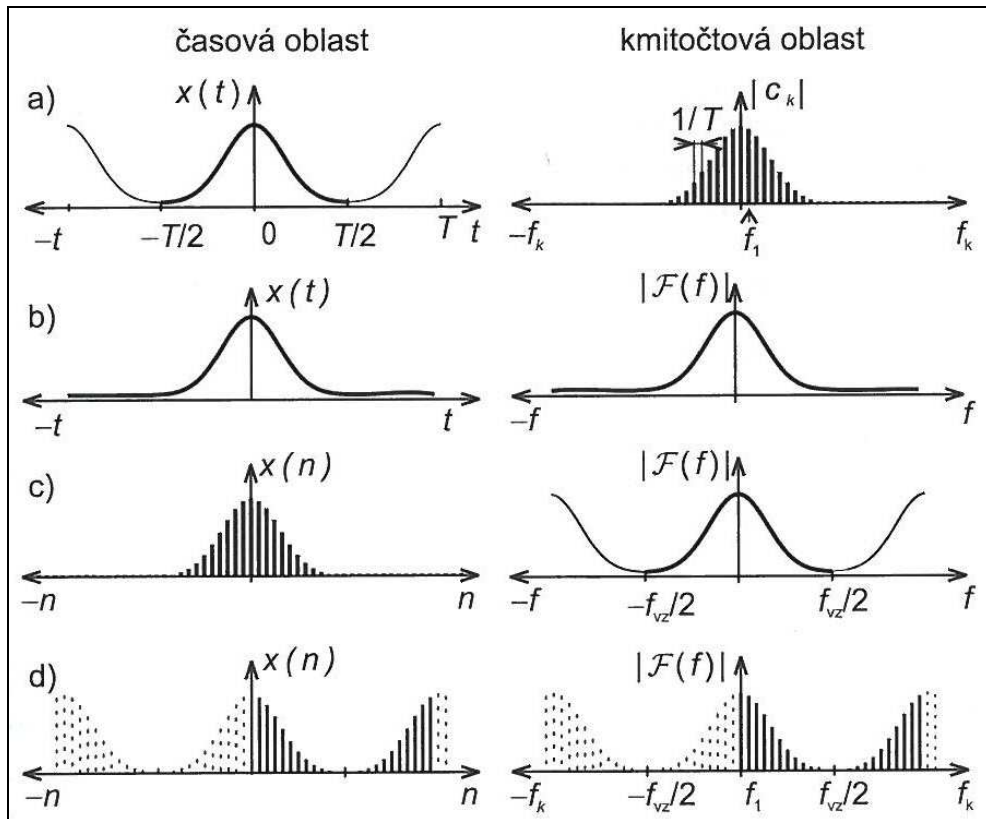
Fourierovy transformace spojitého signálu $x(t)$ je definována jako:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (33)$$

zpětná transformace pak jako

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{j2\pi ft} df \quad (34)$$

kde f odpovídá frekvenci, j je imaginární jednotka. Vzorce bývají také uváděny s úhlovou frekvencí $\omega = 2\pi f$ místo f . Tato transformace je vhodná pro neperiodické spojitě signály a poskytuje spojitě neperiodické spektrum $F(f)$ (Obr. 21), které bývá obvykle komplexní [1].



Obr. 21. Vztahy mezi časovou a kmitočtovou oblastí

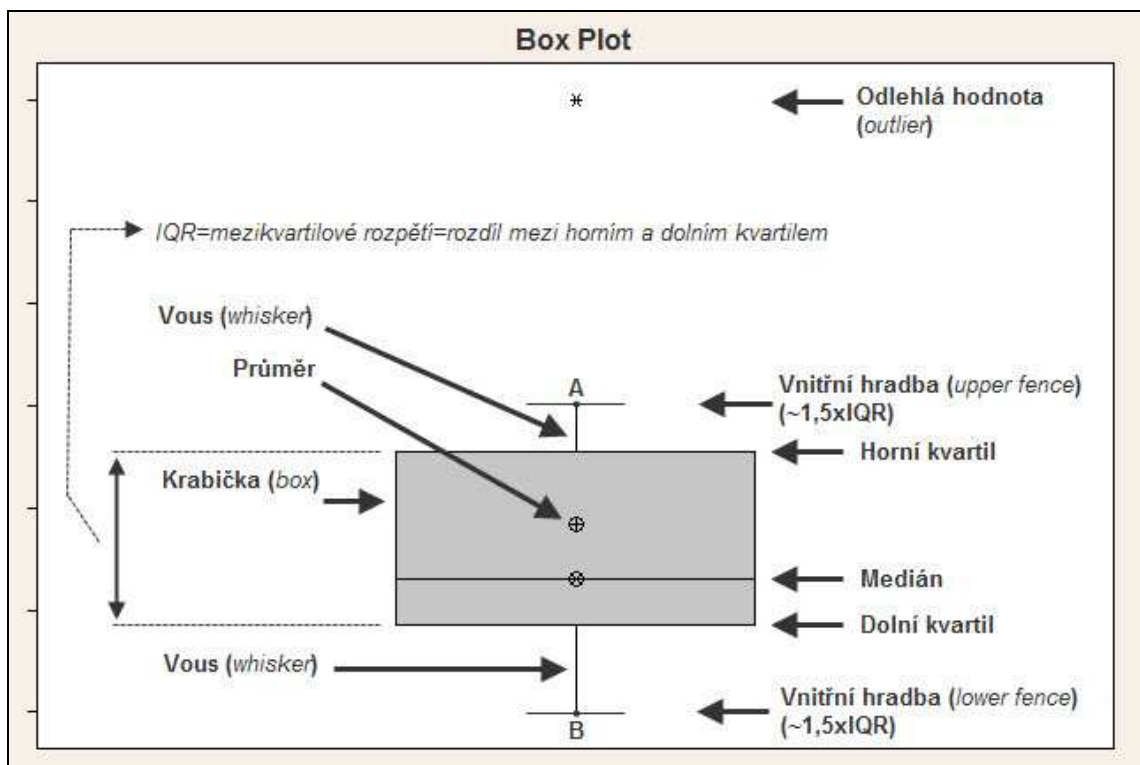
(a) Fourierovy řada periodického signálu, b) Fourierova transformace spojitého signálu (FT), c) Fourierovy transformace diskrétního signálu (DTFT), d) Diskrétní Fourierova transformace (DFT) [1]

5 GRAFICKÉ VYJÁDRĚNÍ STATISTICKÝCH DAT – BOXPLOT

Boxplot (Box-and-Whisker Plot) (Obr. 22) je nástroj pro grafické zobrazení ukazatelů polohy.

Zároveň nám umožňuje posoudit symetrii a variabilitu námi zvolených dat a slouží k odhalení hodnot v souboru, které lze považovat za odlehlé (extrémní hodnoty). Může se jednat o chybná měření, chyby v přepisu dat (např. špatně zapsaná desetinná čárka), neobvyklé extrémní atd.

Odlehlé hodnoty jsou takové, které v Boxplotu leží vně vnitřních hradeb. Takových hodnot může být více. Pak se v grafu označují všechny. Pokud se takové hodnoty vyskytují, je to signál, že není vhodné používat např. prostý aritmetický průměr.



Obr. 22. Boxplotový diagram

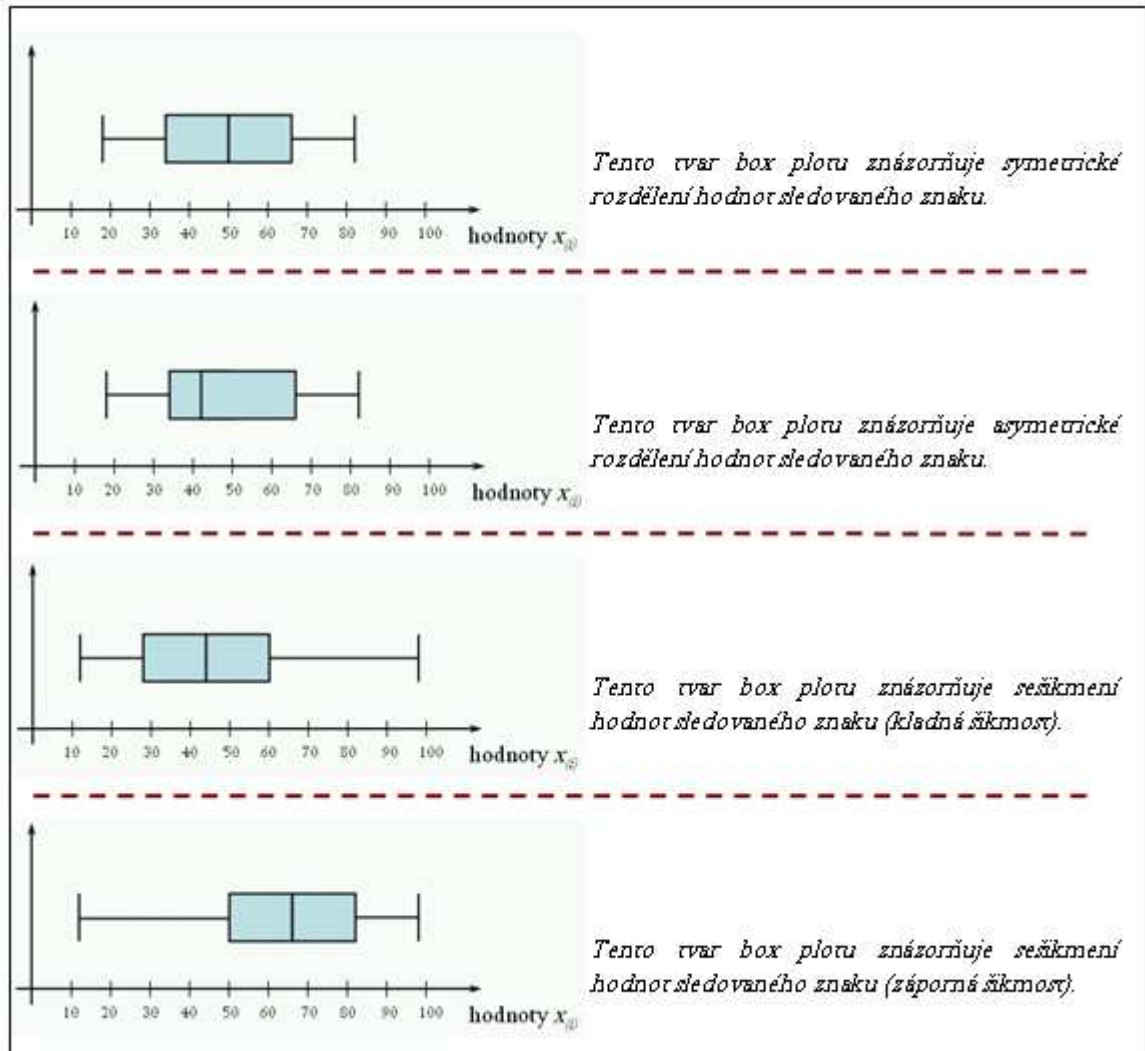
Dolní kvartil $x_{0,25}$ = 25%-ní kvantil (rozděluje datový soubor tak, že 25% hodnot je menší než tento kvartil a zbytek tj. 75% větších (nebo rovných))

Medián $x_{0,50}$ = 50%-ní kvantil (rozděluje datový soubor tak, že polovina (50%) hodnota je menších než medián a polovina (50%) hodnot větších (nebo rovných))

Horní kvartil $x_{0,75}$ = 75%-ní kvantil (rozděluje datový soubor tak, že 75% hodnot je menších než tento kvartil a zbytek, tj. 25% větších (nebo rovných))

Kvartily dělí výběrový soubor na 4 stejné četné části.

5.1 Interpretace Boxplotu



Obr. 23. Interpretace Boxplotu

5.2 Postup sestavení boxplotu

- Výpočet kvantilů x_{25} , x_{50} a x_{75}

$$z_p = \frac{n \cdot p}{100} + 0,5 \quad (35)$$

Kde

z_p ... pořadí kvantilu x_p

n ... rozsah souboru

- Výpočet délky obdélníku R (kvantilové rozpětí)

$$IQR = x_{75} - x_{25} \quad (36)$$

- Určení konců vodorovných paprsků

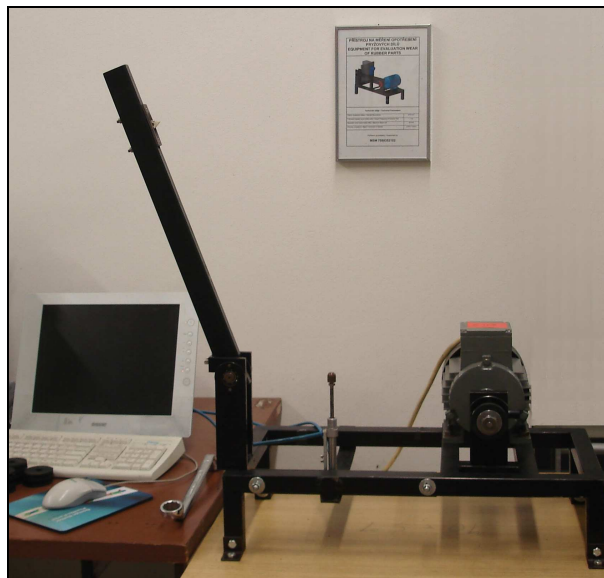
$$A = x_{25} - 1,5IQR \quad (37)$$

$$B = x_{75} - 1,5IQR \quad (38)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VIBRACÍ

Úkolem této diplomové práce je metodicky ověřit schopnost stroje na měření opotřebení pryžových dílů (Obr. 24) podávat nezkrácené výsledky vlivem vibrací vznikajících točivým pohybem elektromotoru a jejich přenosem do měřené soustavy, kterou tvoří rotující vzorek pryže, na něj je pomocí páky s tlumením položen břit, který se při dotyku se vzorkem odráží a zpět dopadá na měřený pryžový díl, tzv. Chip – chung efekt. Vlivem nerovnoměrného dopadu břitu na rotující pryžový vzorek vznikají síly, které pryž opotřebovávají. Jestliže by byl samotný točivý stroj zdrojem vibrací o velké amplitudě, mohlo by to nepříznivě ovlivnit opotřebení pryže, kde cílem je opotřebení pouze vlivem dopadajícího břitu. K samotnému měření vibrací stroje byla zvolena bezkontaktní metoda měření pomocí laserinterferometru Renishaw XL-80.



Obr. 24. Přístroj na měření opotřebení pryžových vzorků

6.1 Popis a nastavení laserinterferometru Renishaw XL

Měřicí řetězec laserinterferometru se skládá z několika částí a to z laseru, měřicí optiky a počítače se softwarem pro online zobrazení, zaznamenání a analýzu měřených hodnot. Jednotlivé části měřicí aparatury byly uspořádány do soustavy tak, že mimo stroj na pevnou základnu (podlahu laboratoře) byl postaven stativ s deskou pro přichycení a polohování laserové jednotky. Laserinterferometr Renishaw XL-80 (Obr. 25) byl ustaven do roviny

pomocí dvou vzájemně kolmých vodovah tak, aby vycházející paprsek byl rovnoběžný se zemí.



Obr. 25. Laserinterferometr Renishaw XL-80

Další část soustavy, dělič paprsku (Obr. 26), byla umístěna na magnetickém stojanu (Obr.27) na stůl zatížený betonovou deskou a dále ocelovou deskou, pro zajištění tuhosti. Pod betonovou desku pak byly umístěny pryžové prvky pro zamezení přenosu vibrací.



Obr. 26. Dělič paprsku



Obr. 27. Dělič paprsku na magnetickém stojanu

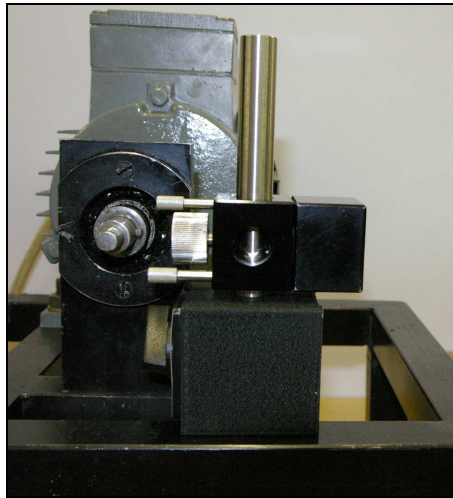
Nohy stolu, na kterém je umístěn přístroj na zkoušení opotřebení pryžových dílů byl od podlahy oddělen pryžovými díly a zatížen betonovou deskou pro zvýšení tuhosti soustavy (Obr. 28).



Obr. 28. Zatížení a odpružení stolu

Dále bylo nutné ověřit, jaký typ odražeče paprsku bude vhodný zvolit pro vlastní měření, a proto byl nejprve na rám přístroje na měření opotřebení pryžových dílů umístěn optický odražeč 100g (Obr. 29) na magnetickém stojanu. Dále byla optická soustava seřizena tak, aby se vyslaný laserový paprsek o průměru 6mm při průchodu optickou soustavou vrátil zpět do přijímací části v co nejvyšší kvalitě. To bylo možné kontrolovat na ukazateli úrovně signálu ve spuštěném počítačovém programu Renishaw Laser XL Capture ©, verze 20.2.1., dynamic measurement. Po zapnutí laserinterferometru a spuštění elektromotoru

byly naměřeny hodnoty vibrací. To bylo také provedeno pro odražeč 10g (Obr. 30), který má menší rozměry a bylo možno jej umístit přímo na držák ložiska přístroje na opotřebených pryžových dílech. Pro toto měření byla provedena redukce průměru paprsku na 3mm. Bylo provedeno 50 měření vibrací 10g odražeče a 30 měření 100g odražeče, což je dostatečný počet měření za účelem možnosti korektního statistického vyhodnocení. Naměřená data byla dále statisticky vyhodnocena, kapitola (6.4), a pro další měření byl zvolen odražeč 10g, který pro danou úlohu vykazoval větší citlivost. Tabulka naměřených hodnot vibrací odražečů je uvedena v příloze PI.

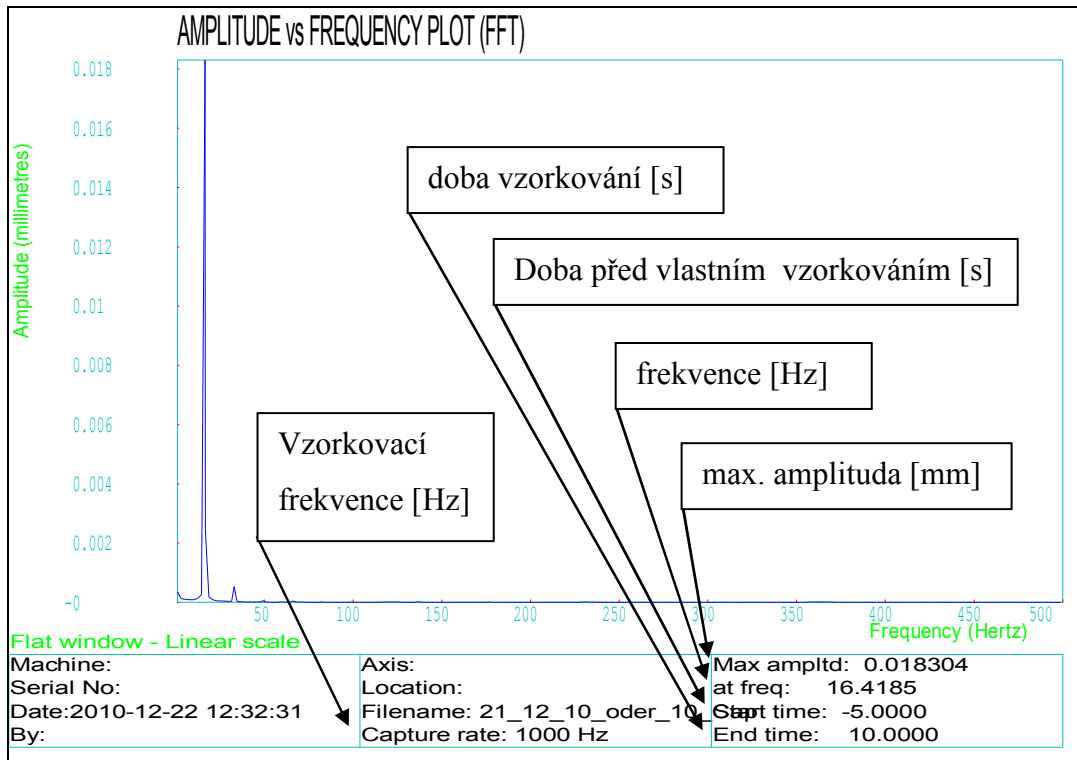


Obr. 29. Odražeč 100g

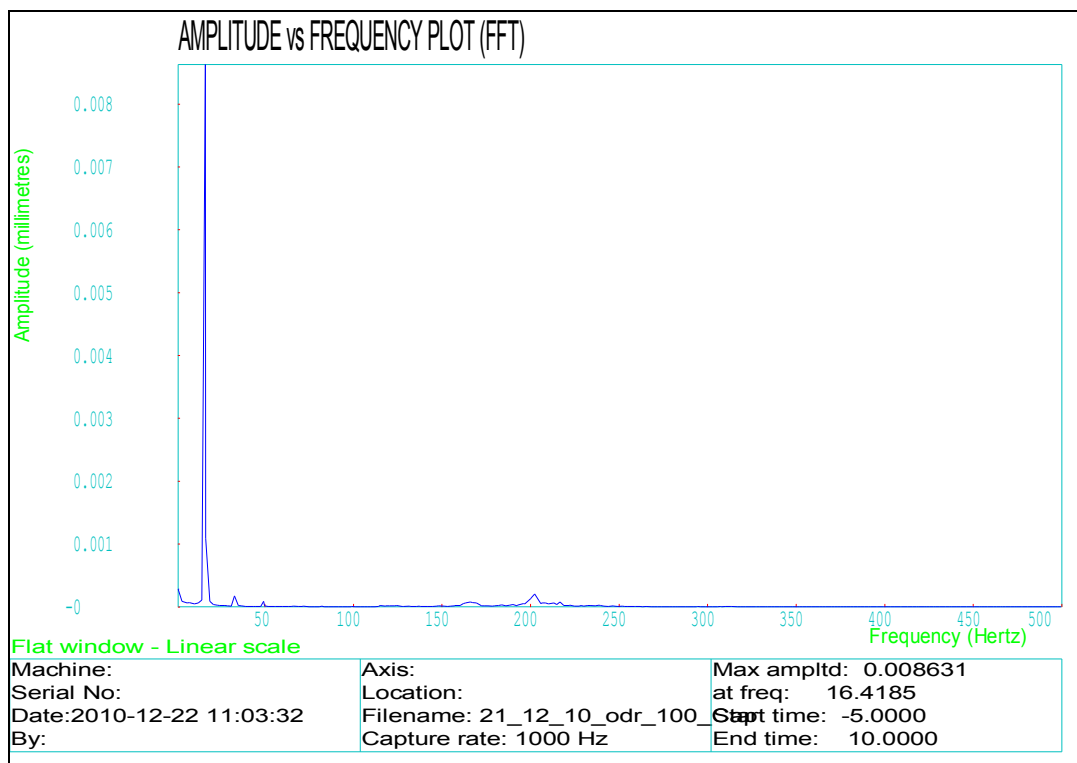


Obr. 30. Odražeč 10g

FFT analýzy signálů pro odražeče 100g a 10g jsou uvedeny na (Obr. 31) a (Obr. 32).



Obr. 31 FFT signálu s odražečem 10g, 1. měření



Obr. 32 FFT signálu s odražečem 100g, 1. měření

6.2 Nastavení parametrů snímání vibrací

Nastavení parametrů pro snímání vibrací v programu Renishaw Laser XL Capture ©, verze 20.2.1., dynamic measurement je znázorněno v (Tab. 2).

Tab. 2 Nastavení parametrů programu pro snímání

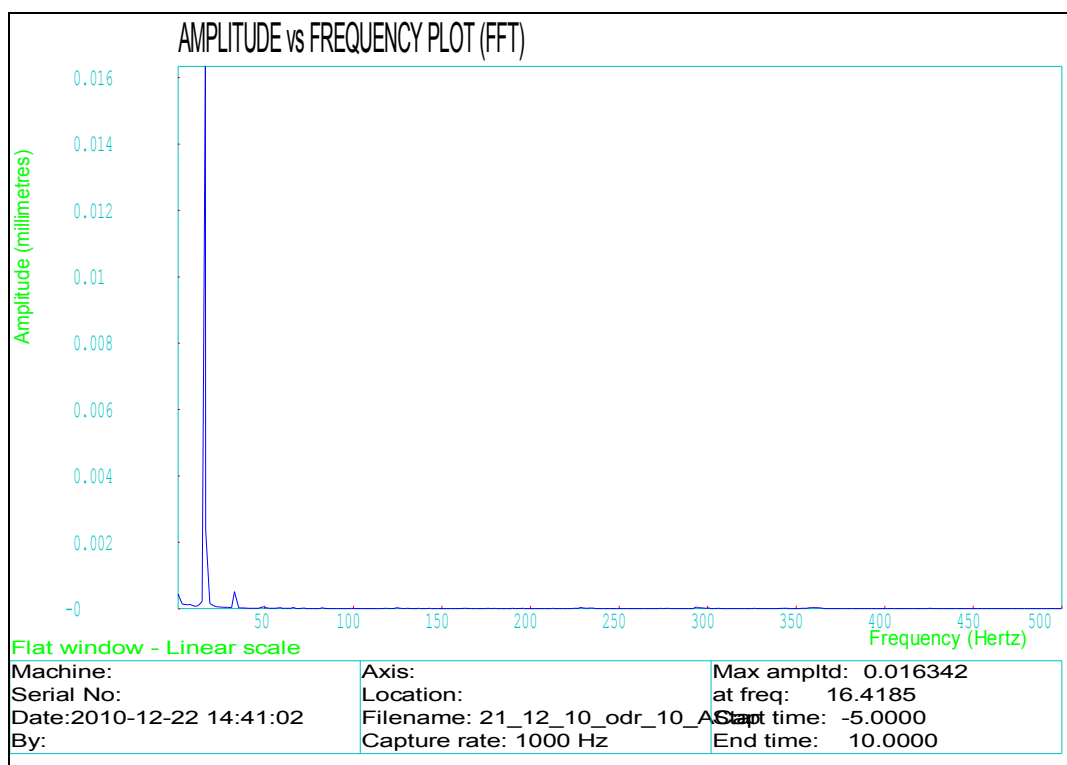
Nastavení parametrů pro snímání			
Proměnná	Popis	Hodnota	Jednotka
Vzorkovací frekvence	Počet hodnot za 1s	1000	Hz
Pre-trigger	Čas před vlastním vzorkováním	5	s
Post-trigger	Čas vzorkování	10	s

Vzorkovací frekvence byla zvolena 1 kHz. Podle Shannon-Kotělnikovovy vzorkovací věty musí být vzorkovací frekvence minimálně dvakrát větší než maximální frekvence obsažené v signálu, což bylo při vzorkovací frekvenci 1000 Hz a frekvenci otáčení elektromotoru 16,418 Hz splněno. Frekvence 16,418 Hz odpovídá otáčkám 985 min^{-1} . Štítkové údaje elektromotoru uvádí otáčky 910 min^{-1} . Vyšší skutečné otáčky lze vysvětlit tím, že se asynchronní elektromotor přístroje na opotřebení pryžových dílů točí prakticky bez zatížení a nedochází zde k výraznému skluzu, který se zvyšuje se zatížením motoru. Synchronní otáčky (teoretické) u 6 - pólového motoru jsou potom 1000 min^{-1} . Po provedení FFT analýzy naměřeného signálu byla automaticky nastavena maximální hodnota zobrazené frekvence 500 Hz, což je Nyquistova hraniční frekvence. Po provedení FFT analýzy prvních signálů bylo potvrzeno, že jediná frekvence o vyšší amplitudě je právě 16,418 Hz. Vyšší harmonické složky signál neobsahoval, kdyby však ano, při snímání se vzorkovací frekvencí 1000 Hz by toto bylo odhaleno.

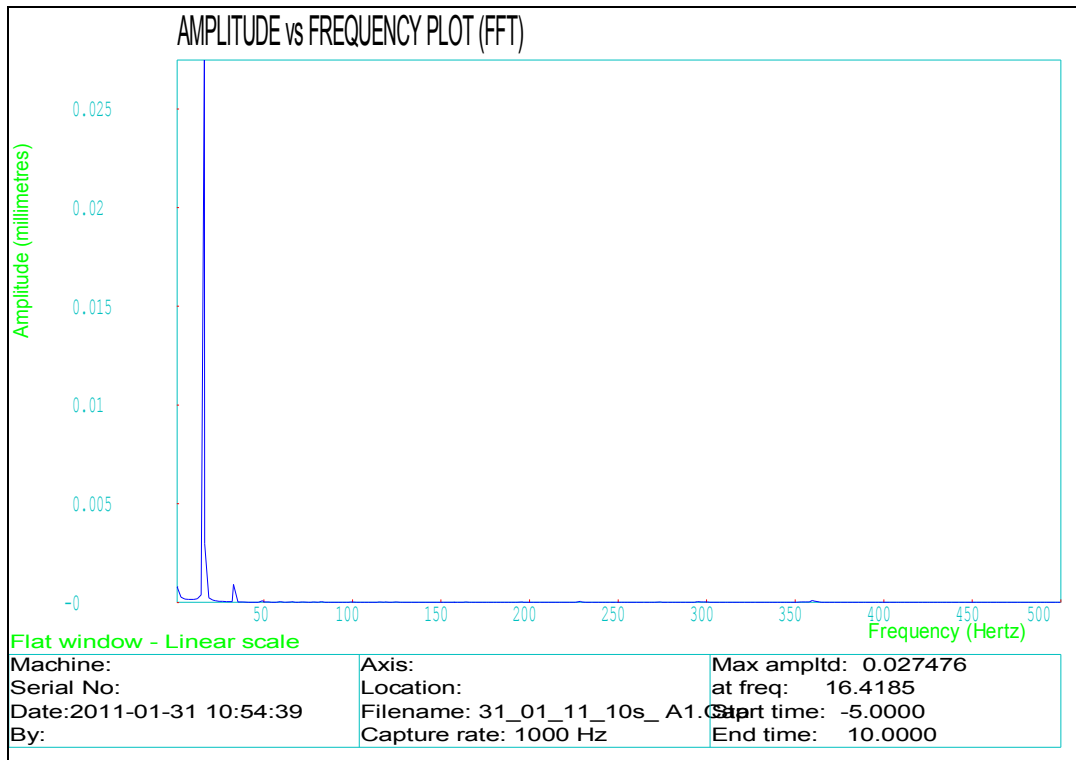
6.3 Měření vibrací vzorků A při opotřebení za 0-90s

Všechna měření byla provedena s odražečem laserového paprsku o hmotnosti 10g. Postupně byly naměřeny hodnoty vibrací přístroje s pryžovým vzorkem o různém opotřebení. Nejprve byl na hřídel upevněn vzorek bez opotřebení a byly naměřeny hodnoty vibrací. Měření bylo opakováno 30-krát. Dále byl vzorek opotřeben působením bříty po dobu 10s a provedeno dalších 30 měření. Takto bylo postupováno až do času opotřebení vzorku 90s. Časový přírůstek opotřebení byl vždy 10s. To znamená, že bylo provedeno celkem 300 měření se vzorky. Byly použity vzorky A s označením směsi 110, což je interní značení dané směsi technologickou fakultou Univerzity Tomáše Bati. Tabulky naměřených hodnot

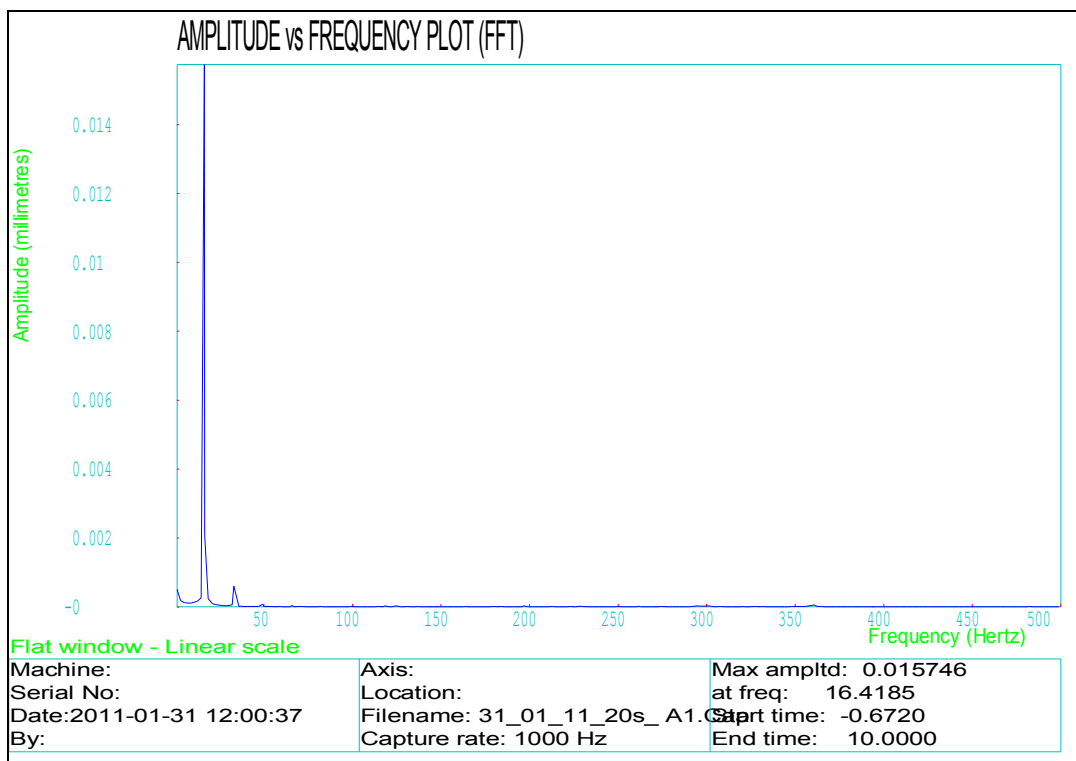
vibrací jsou uvedeny v příloze PII. Fotografie vzorku s opotřebením 0-90s jsou uvedeny v příloze PIII. FFT analýzy naměřených signálů jsou uvedeny na (Obr. 33) až (Obr. 42).



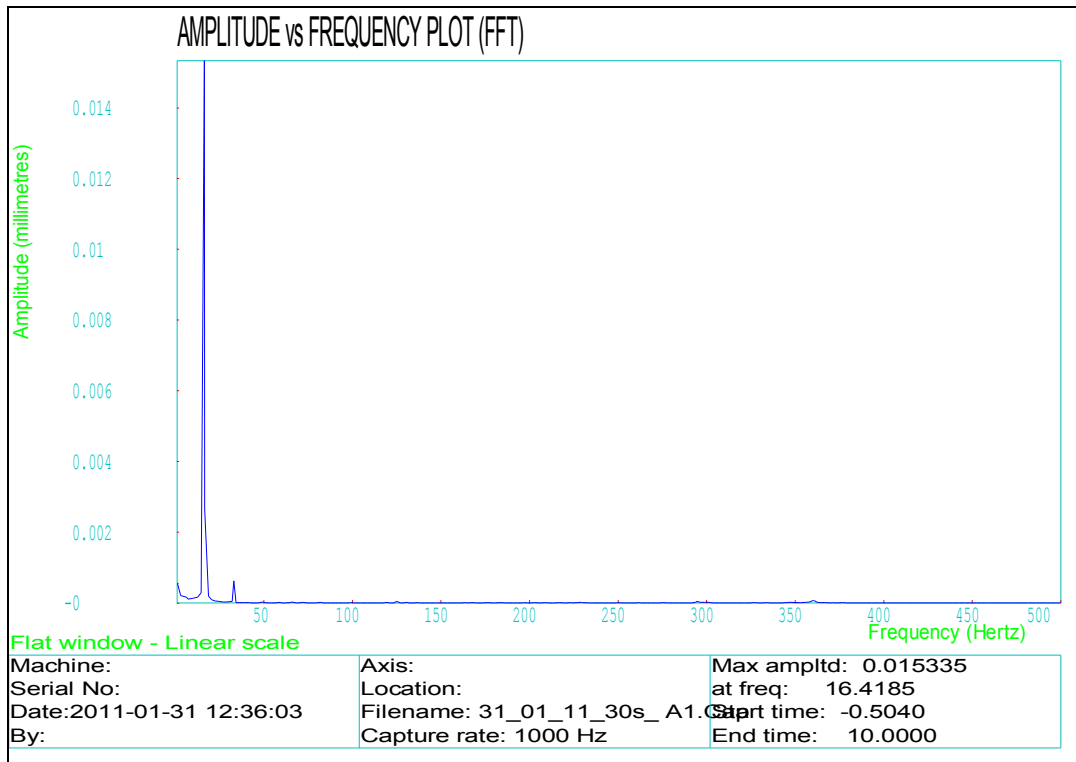
Obr . 33 FFT analýza, vzorek bez opotřebení 1.měření



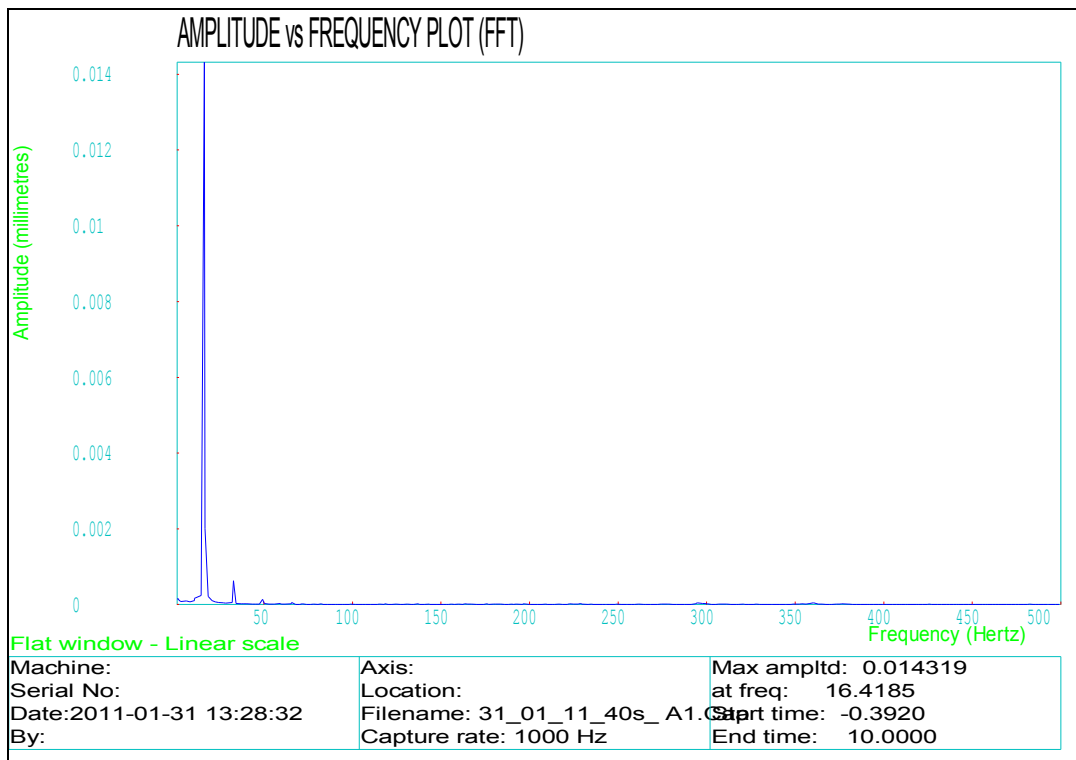
Obr. 34 FFT analýza, vzorek 10s opotřebení, 1. měření



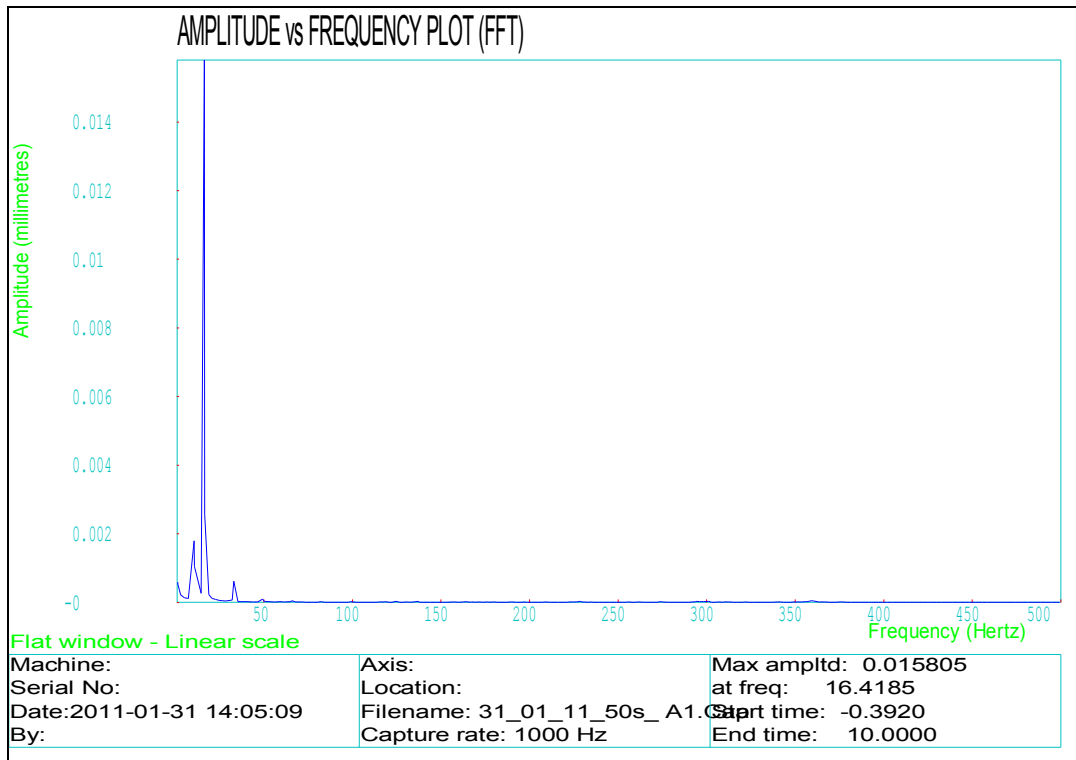
Obr. 35 FFT analýza, vzorek 20s opotřebení, 1. měření



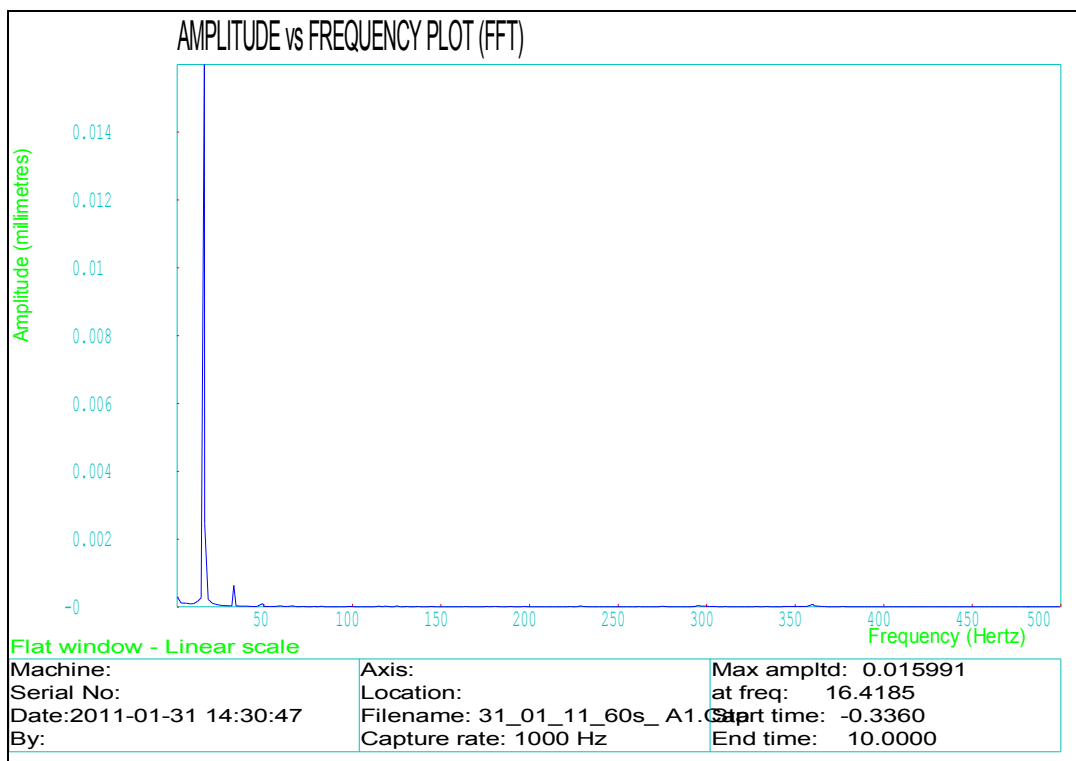
Obr. 36 FFT analýza, vzorek 30s opotřebení, 1. měření



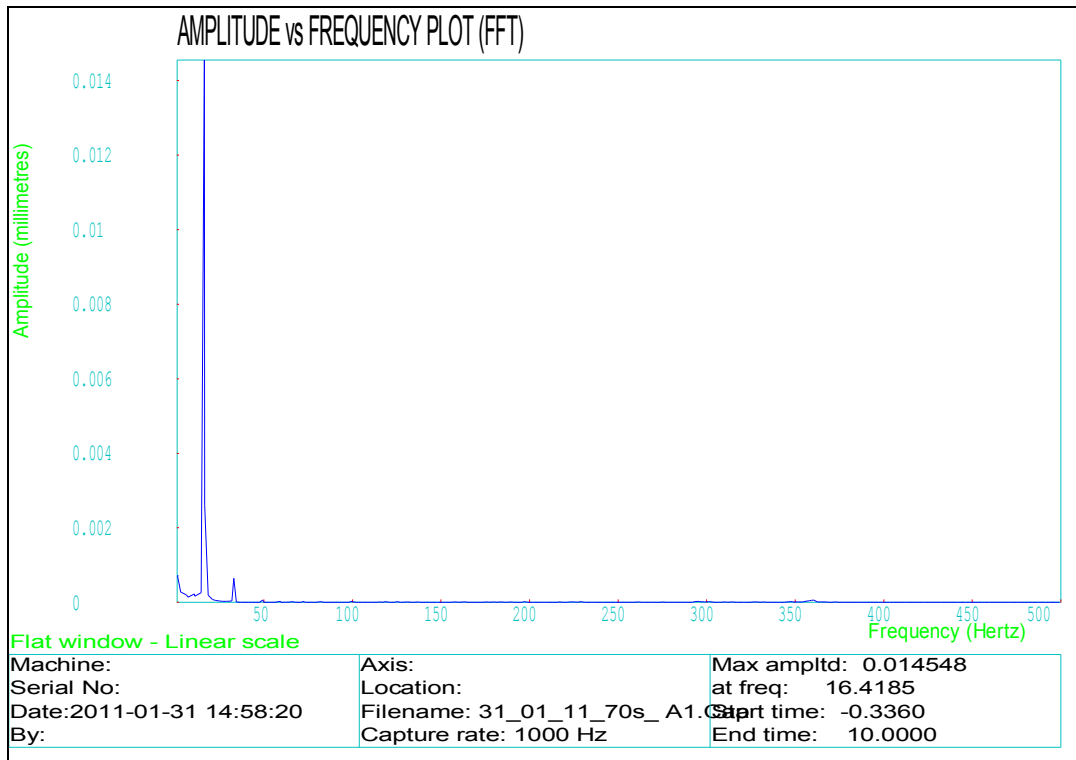
Obr. 37 FFT analýza, vzorek 40s opotřebení, 1. měření



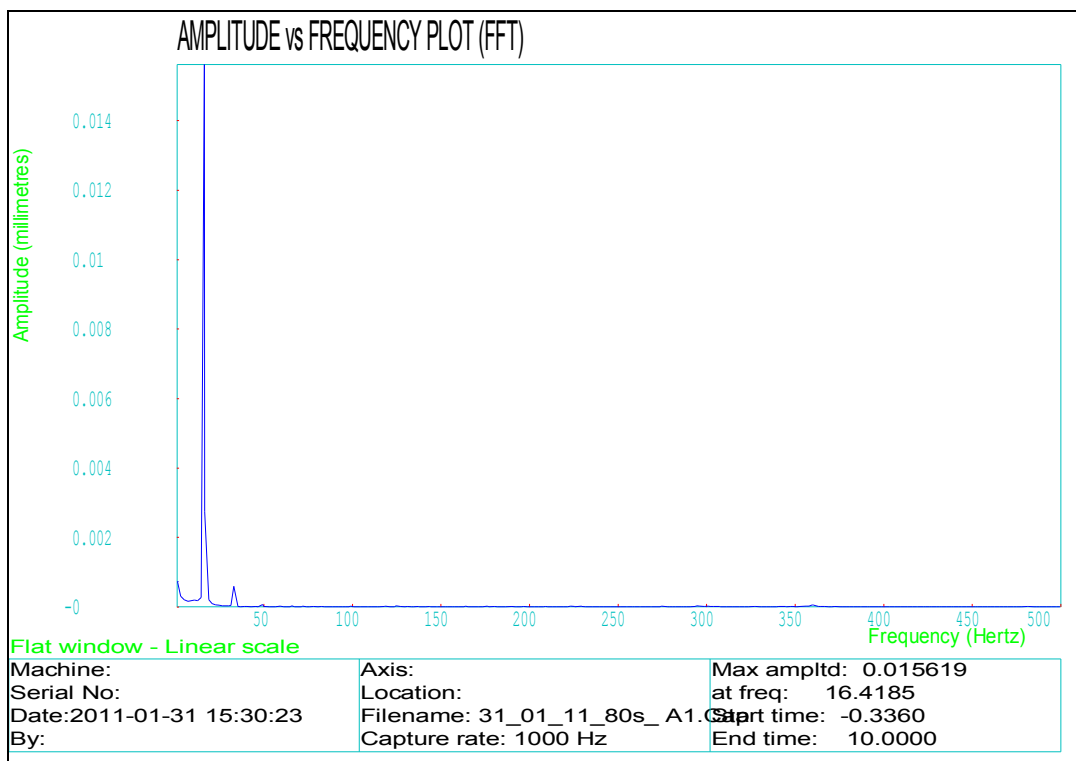
Obr. 38 FFT analýza, vzorek 50s opotřebení, 1. měření



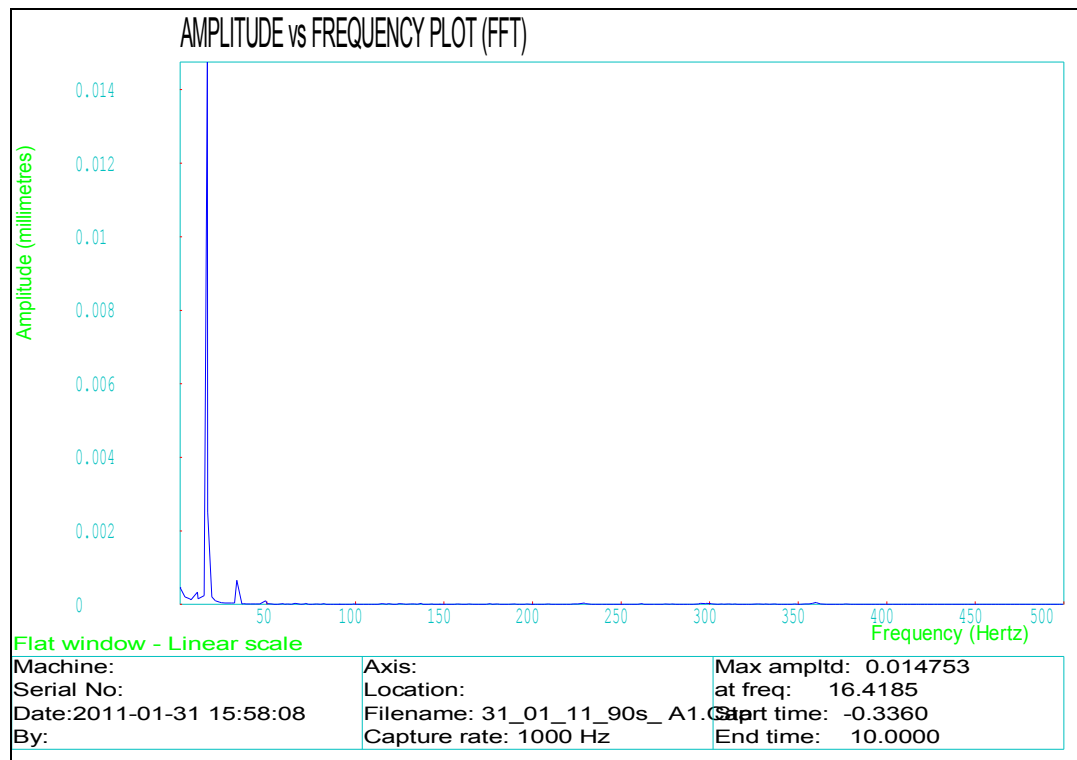
Obr. 39 FFT analýza, vzorek 60s opotřebení, 1. měření



Obr. 40 FFT analýza, vzorek 70s opotřebení, 1. měření



Obr. 41 FFT analýza, vzorek 80s opotřebení, 1. měření

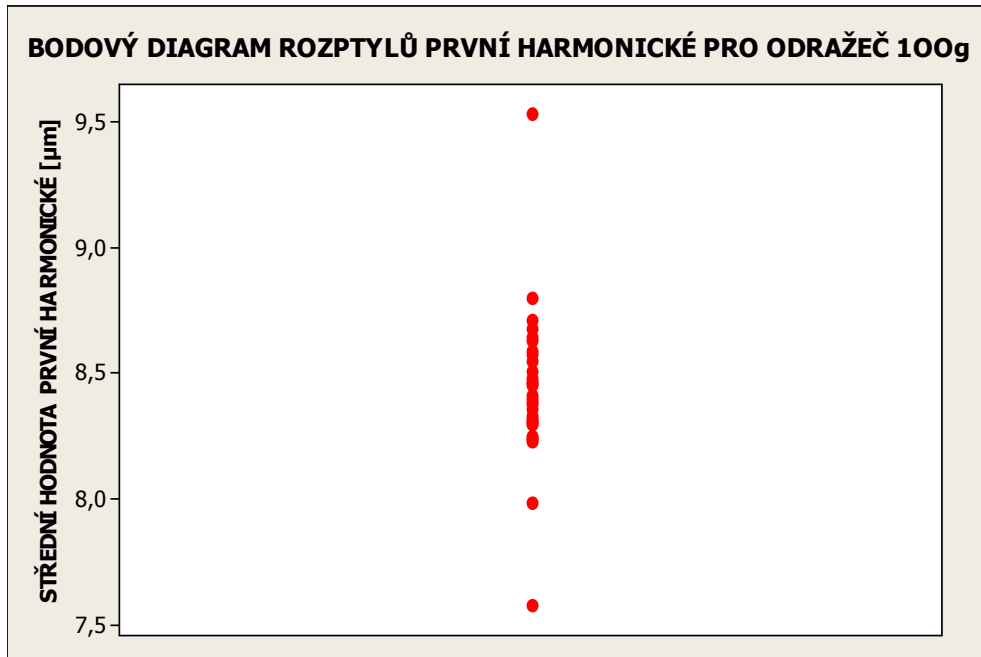


Obr. 42 FFT analýza, vzorek 90s opotřebení, 1. měření

6.4 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ – ODRAŽEČE 10g a 100g

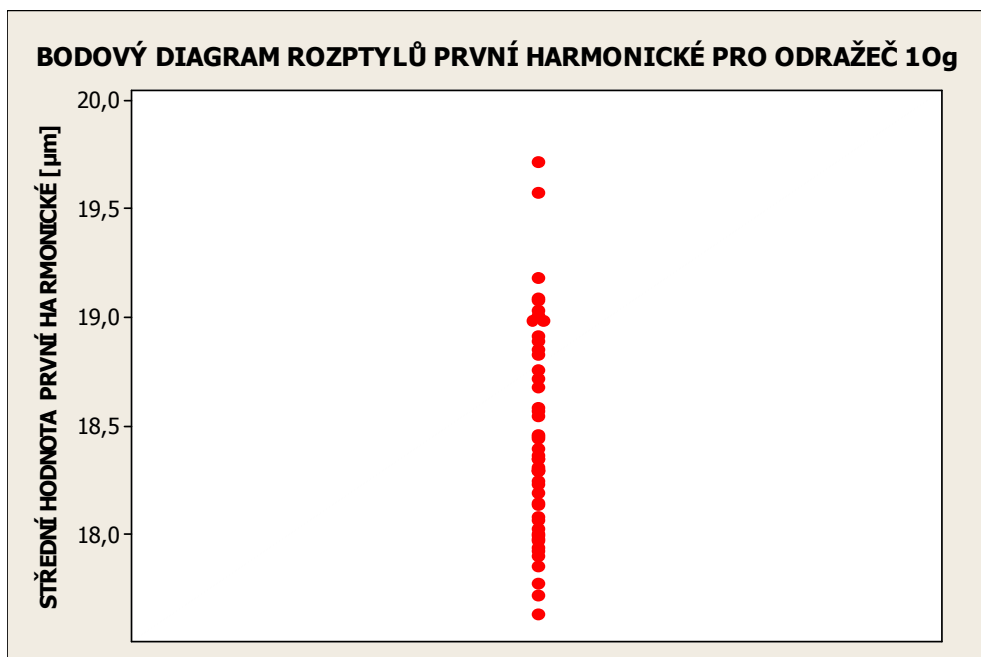
6.4.1 Určení odlehlých hodnot

a) Bodový graf rozptylů první harmonické odražeče 100g je znázorněn na (Obr. 43).



Obr. 43. Bodový graf odražeče 100g

b) Bodový graf rozptylů první harmonické odražeče 10g je znázorněn na (Obr. 44).



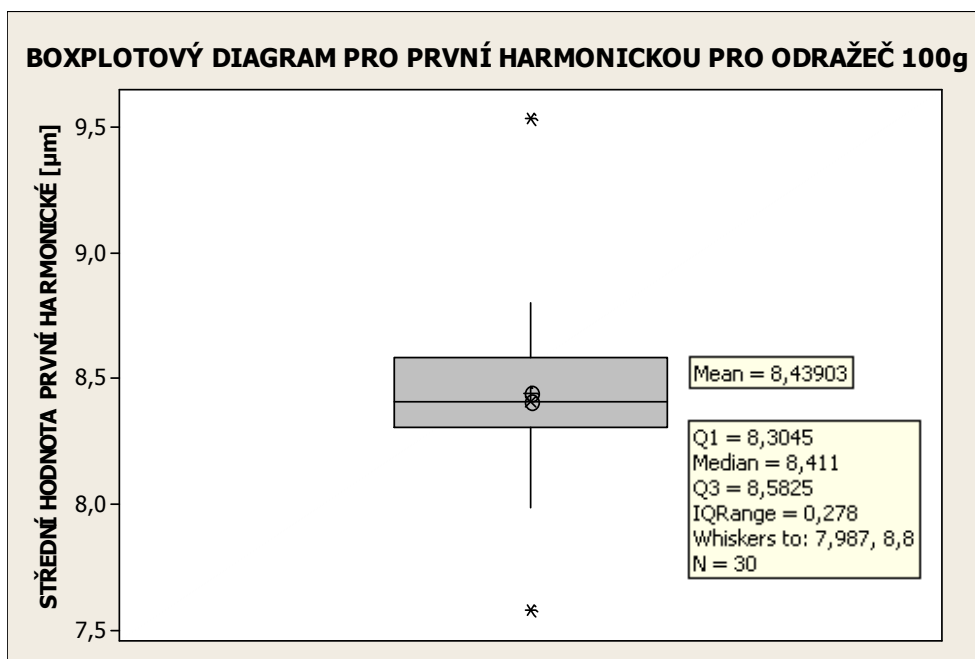
Obr. 44. Bodový graf odražeče 10g

Odražeč o hmotnosti 10g je citlivější než odražeč 100g díky menší hmotnosti zařízení (hmotnost magnetického stojánku, upínacího zařízení). Naopak hmotnost odražeče 100g způsobí větší tuhost sestavy a tím i ztlumení vibrací. V některých případech nám ztlumí nežádoucí vibrace vzniklé z okolního prostředí, které mohou mít za následek vzniku odlehklých hodnot.

Odražeč o hmotnosti 100g není příliš vhodný pro měření první harmonické, i když odhady průměru hodnot (aritmetického průměru, směrodatné odchylky) jsou nižší než u odražeče 10g.

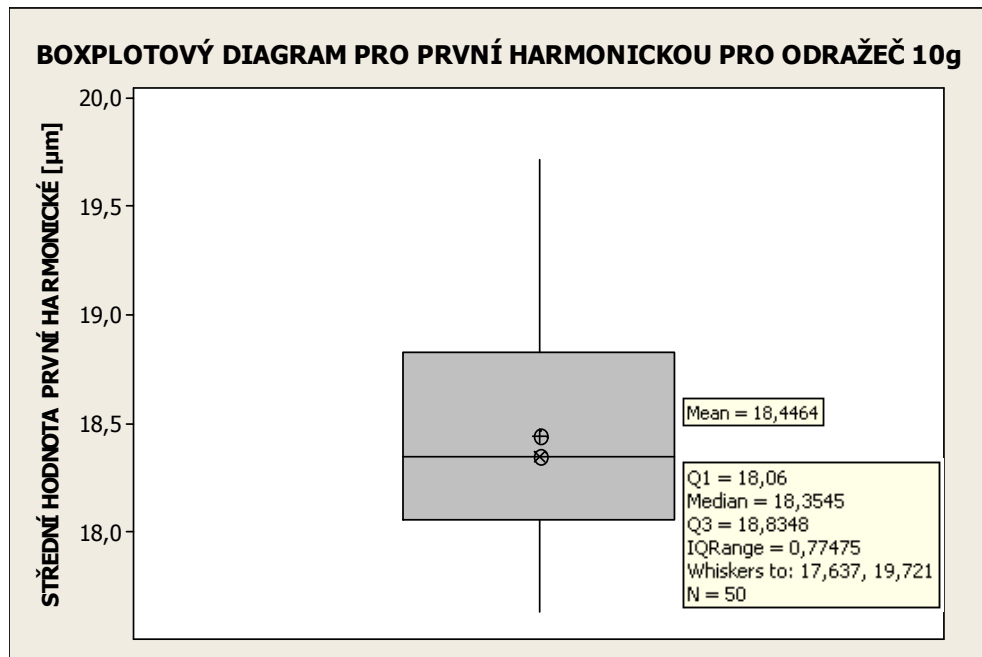
Ani v jednom případě nedošlo k vychýlení hodnoty první harmonické.

c) Boxplotový diagram pro první harmonickou odražeče 100g je znázorněn na (Obr. 45).



Obr. 45. Boxplotový diagram pro první harmonickou pro odražeč 100g

d) Boxplotový diagram pro první harmonickou odražeče 10g je znázorněn na (Obr. 46).

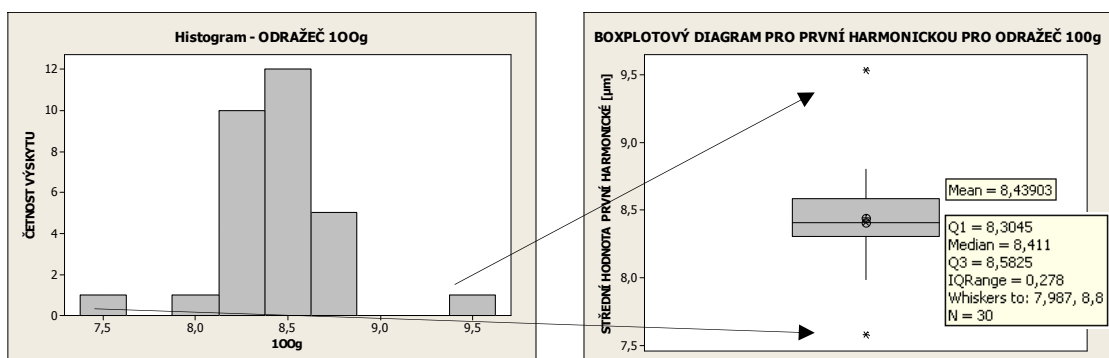


Obr. 46. Boxplotový diagram pro první harmonickou pro odražeč 10g

Opticky vidíme rozdíly mezi odhady aritmetických průměrů a mediánů. Jsou značné rozdíly mezi 1. a 3. Q, což značí vyšší rozptyl (ovšem v oblasti μm).

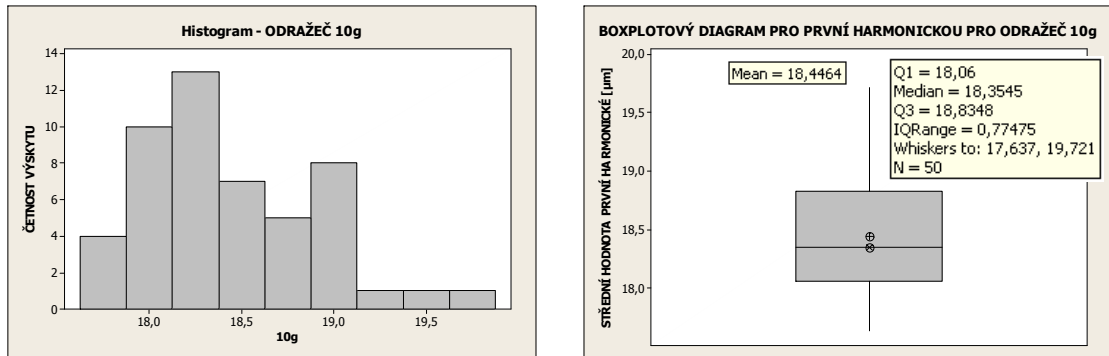
6.4.2 Histogramy v porovnání s Boxploty

a) Porovnání histogramu a boxplotového diagramu odražeče 100g je na (Obr.47).



Obr. 47. Porovnání histogramu a boxplotového diagramu odražeče 100g

b) Porovnání histogramu a boxplotového diagramu odražeče 10g je na (Obr. 48).



Obr. 48. Porovnání histogramu a boxplotového diagramu odražeče 10g

Naměřené hodnoty pro odražeč 100g a 10g mají stejný typ zešikmení.

6.4.3 Statistické charakteristiky

Tabulka statistických hodnot vypočtených pomocí programu MiniTab ©, verze 15.1., z naměřených dat pro odražeč 100g a 10g. Kvůli počtu statistických hodnot byly vytvořeny tabulky dvě (Tab. 3) (Tab. 4).

Tab. 3. statistické hodnoty odražeč 100g a 10g

Odražeč	Odhad arit. průměru (\bar{x})	Nejistota měření typu A (chyba arit. průměru) (u_A)	odhad směrodatné odchylky (s)	Odhad variačního koeficientu (V_x)	Minimální hodnota výběrového souboru (x_{\min})	Maximální hodnota výběrového souboru (x_{\max})
(anglicky)	mean	SE of mean	standard deviation	coefficient of variant	minimum	maximum
100g	8,439	0,057	0,309	3,670	7,585	9,530
10g	18,446	0,067	0,475	2,570	17,637	19,721

Tab. 4. statistické hodnoty odražeč 100g a 10g – další hodnoty

Odražeč	Odhad variačního rozpětí (R)	Velikost výběrového souboru (n)	První kvartil výběrového souboru (Q1)	Odhad mediánu (\tilde{x})	Třetí kvartil výběrového souboru (Q3)	Interkvartilové rozpětí výběrového souboru (IQR)	Odhad šikmosti (a)
	range	N total	first quartil	median	third quartil	interquartile-range	skewness
100g	1,945	30	8,305	8,411	8,583	0,278	0,810
10g	2,084	50	18,060	18,355	18,835	0,775	0,610

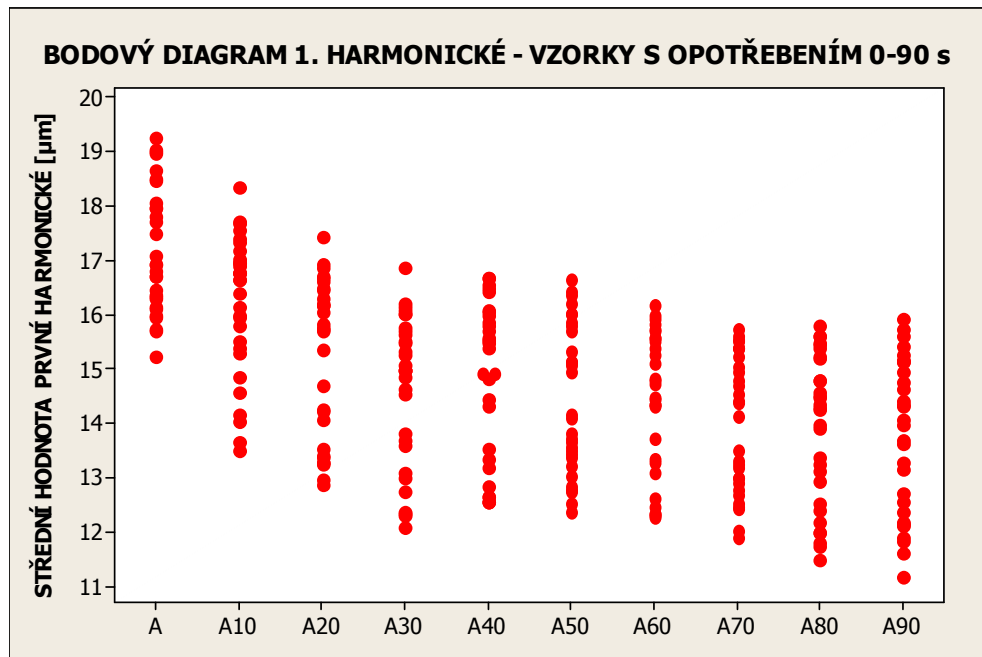
Kontrola variačního koeficientu: Neměl překročit 10%, můžeme tedy říct, že relativní variabilita souboru je do 5% a tím pádem odhad aritmetického průměru je velmi spolehlivý. Kontrolní výpočet variačního koeficientu je uveden ve vztahu (39)

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (39)$$

6.5 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ - VZORKY A (0 – 90s)

6.5.1 Určení odlehlých hodnot

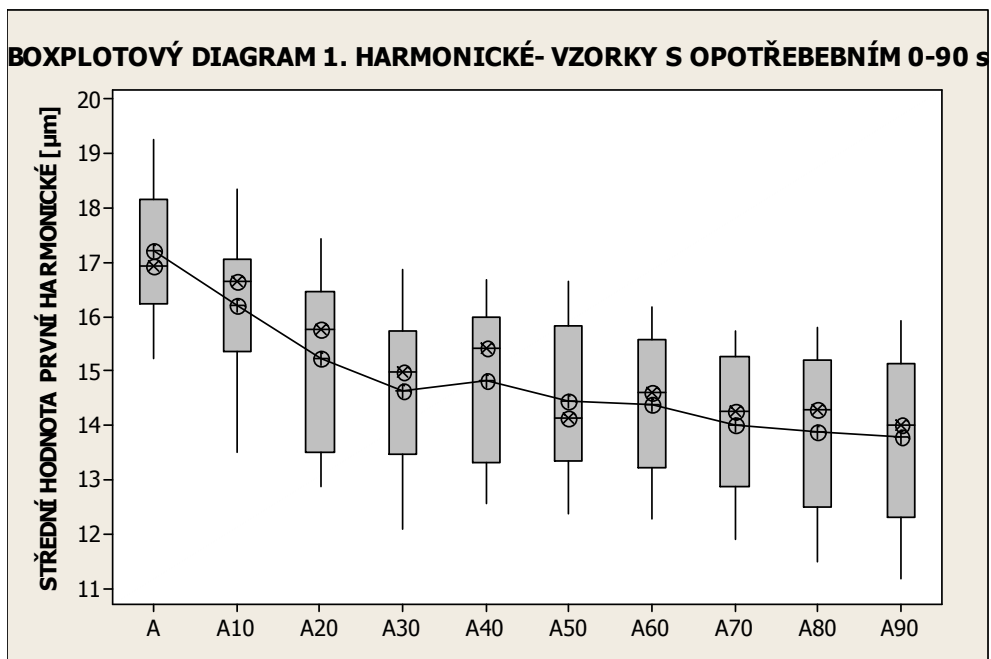
a) Bodový diagram první harmonické ze vzorků s opotřebením 0 sekund až 90 sekund je znázorněn na (Obr. 49)



Obr. 49. Bodový diagram 1. harmonické – vzorky s opotřebením 0-90s

Ani v jednom případě nedošlo k vychýlení hodnoty první harmonické.

b) Boxplotový diagram první harmonické ze vzorků s opotřebením 0 sekund až 90 sekund je znázorněn na (Obr. 50)



Obr. 50. Boxplotový diagram první harmonické – vzorky s opotřebením 0-90s

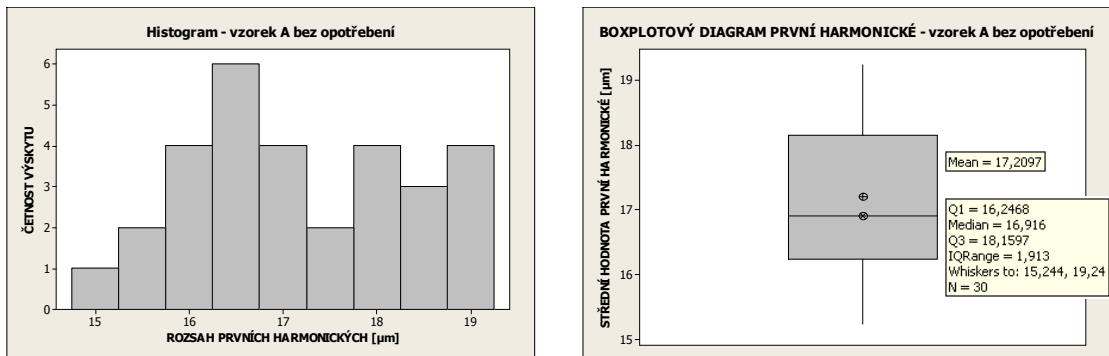
Naměřené hodnoty pro vzorek s opotřebením 10-90s nemají v jednom případě normální rozdělení (testování bylo provedeno metodikou Anderson-Darlingova testu pro konfidenční úroveň $1-\alpha = 0,95$, viz software MiniTab ©, verze 15.1.), což můžeme opticky vysledovat z výše uvedených grafů (Obr. 50).

Tab. 5. Odhady aritmetických průměrů a mediánů

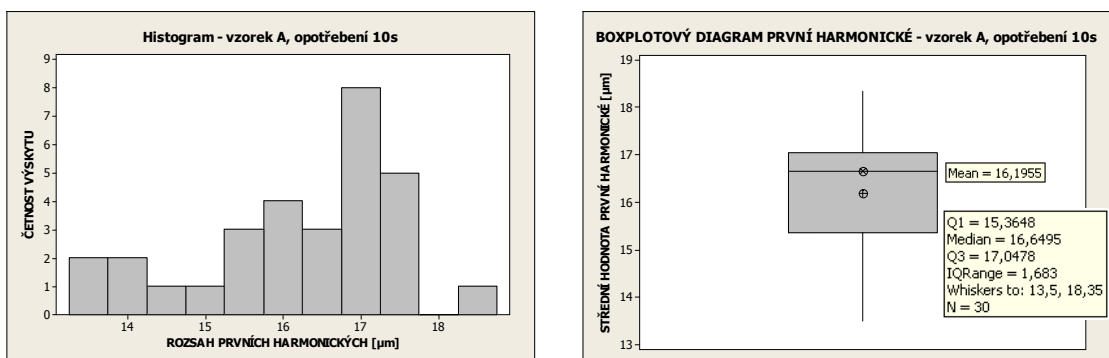
Vzorek (opotřebení)	A (0s)	A (10s)	A (20s)	A (30s)	A (40s)	A (50s)	A (60s)	A (70s)	A (80s)	A (90s)
Q_1 (dolní kvartil)	16,247	15,365	13,505	13,474	13,307	13,345	13,233	12,867	12,502	12,321
\bar{x} (odhad aritmetického průměru)	17,210	16,196	15,220	14,640	14,836	14,454	14,395	13,992	13,888	13,777
Medián	16,916	16,650	15,759	14,991	15,436	14,139	14,598	14,250	14,277	14,019
Q_3 (horní kvartil)	18,160	17,048	16,458	15,730	15,990	15,822	15,570	15,265	15,205	15,130

Ani v jednom případě nedošlo k vychýlení hodnot. A vidíme, že ve shodě s tabulkou (Tab. 5) i boxploty diagramů odhadu aritmetického průměru a odhadu mediánu první harmonické (Obr. 50) mají tendenci klesat. To si vysvětlujeme tak, že při testování vzorku břítem technikou Chip-chung dochází k mírnému opotřebení vzorku, což způsobí zlepšení vyvážení.

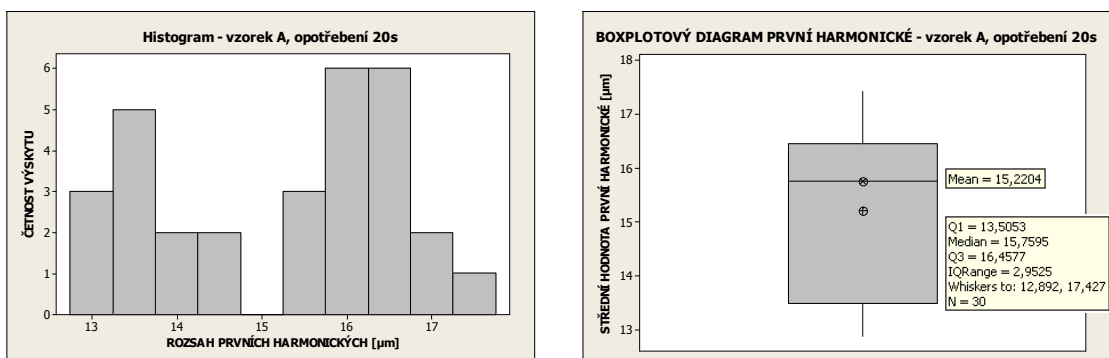
6.5.2 Histogramy v porovnání s Boxplotovými diagramy pro první harmonické



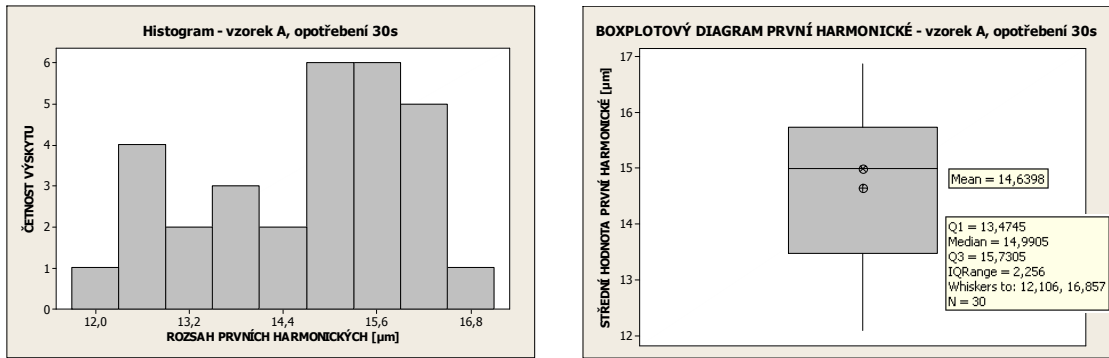
Obr. 51. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A bez opotřebení



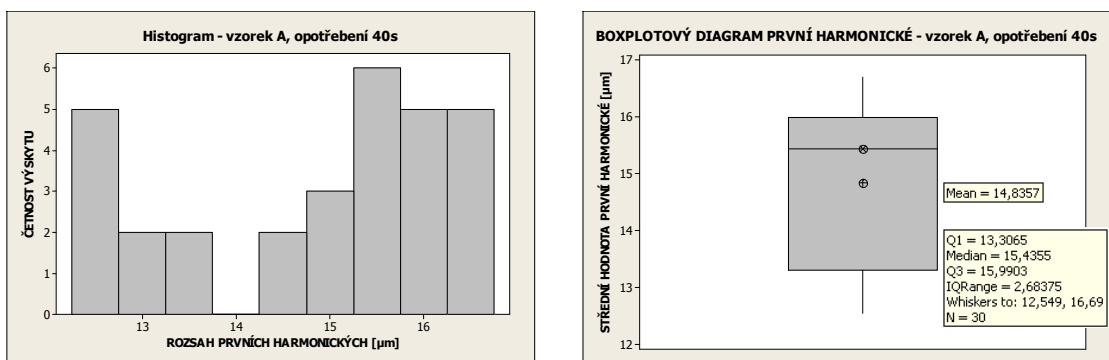
Obr. 52. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 10s



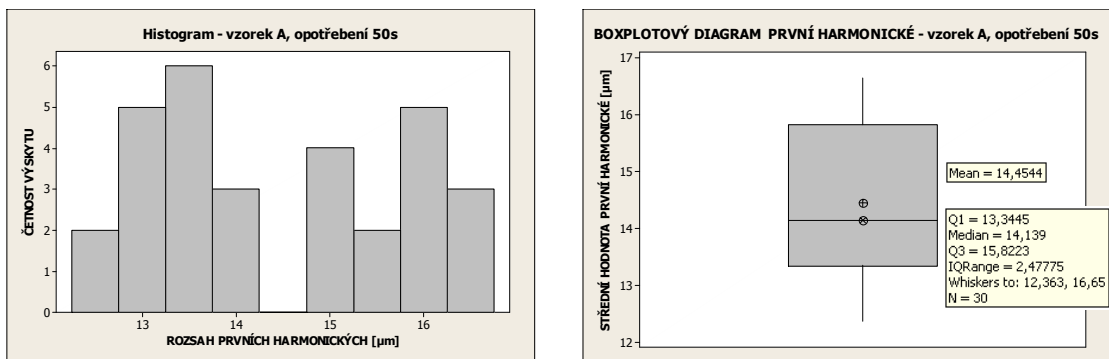
Obr. 53. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 20s



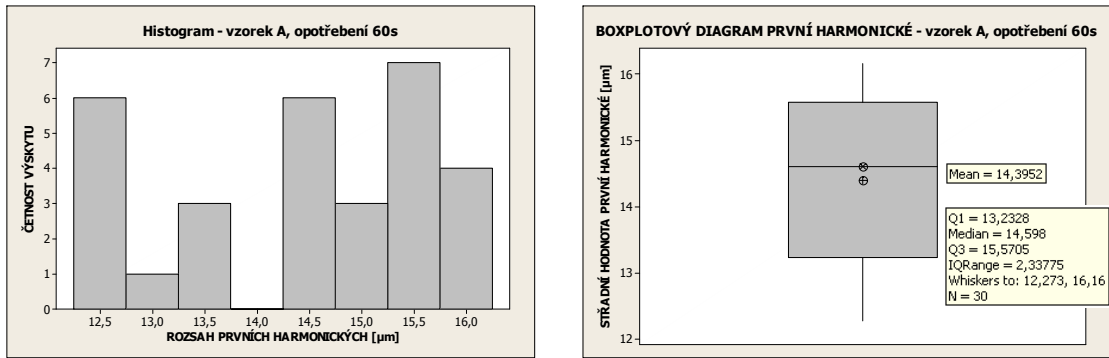
Obr. 54. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 30s



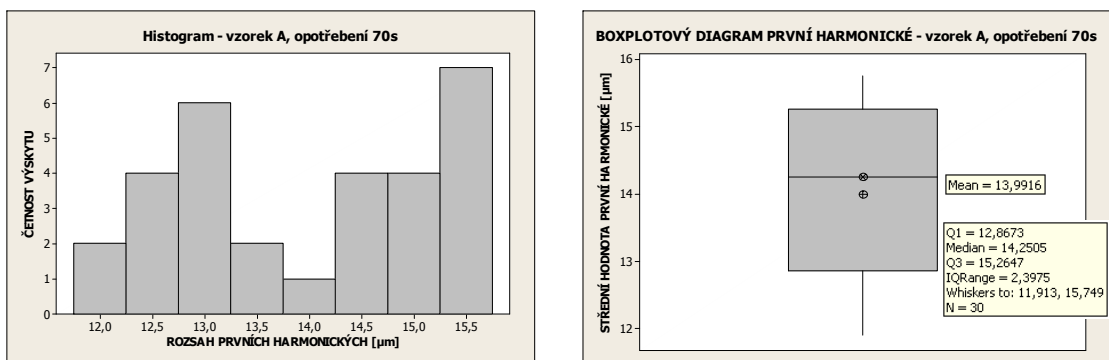
Obr. 55. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 40s



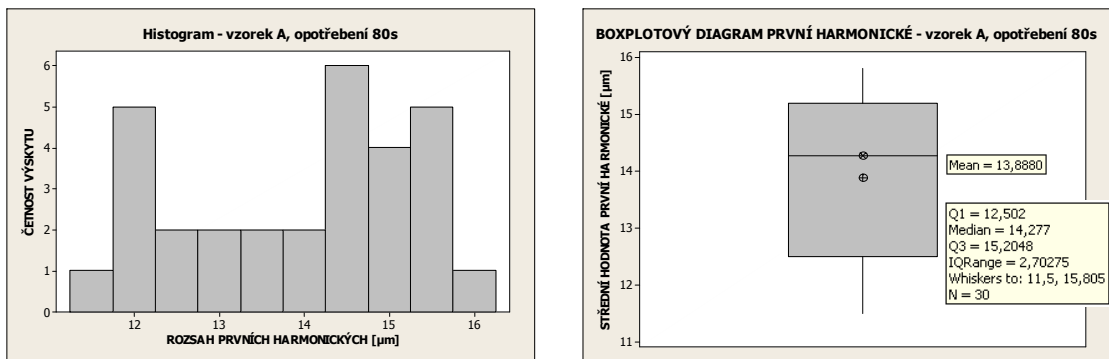
Obr. 56. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 50s



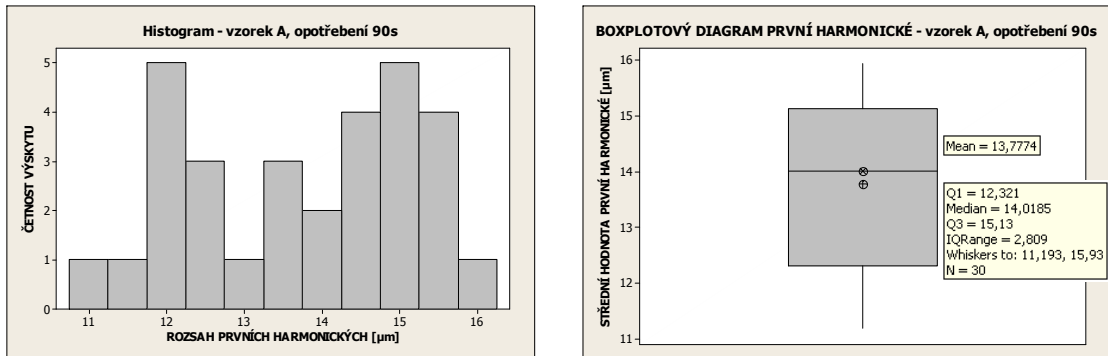
Obr. 57. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 60s



Obr. 58. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 70s



Obr. 59. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 80s



Obr. 60. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 90s

Z jednotlivých histogramů a boxplotových diagramů odhadu aritmetického průměru a odhadu mediánu první harmonické (Obr. 51) až (Obr. 60) vyplývá tendence klesání s přibývajícím opotřebením vzorku.

6.5.3 Statistické charakteristiky

Tabulka statistických hodnot vypočtených pomocí programu MiniTab z naměřených dat vzorků A s opotřebením 0 – 90s. Kvůli počtu statistických hodnot byly vytvořeny tabulky dvě (Tab. 6) (Tab. 7).

Tab. 6. Statistické hodnoty vzorků A s opotřebením 0 – 90s

Vzorek	cOdhad arit. průměru (\bar{x})	Nejistota měření typu A (chyba arit. průměru) (u_A)	odhad směrodatné odchylky (s)	Odhad variačního koeficientu (V_x)	Minimální hodnota výběrového souboru (x_{\min})	Maximální hodnota výběrového souboru (x_{\max})
	mean	SE of mean	standard deviation	coefficient of variant	minimum	maximum
A	17,210	0,212	1,160	6,74	15,244	19,240
A10	16,196	0,234	1,279	7,90	13,500	18,350
A20	15,220	0,264	1,446	9,50	12,892	17,427
A30	14,640	0,252	1,381	9,44	12,106	16,857
A40	14,836	0,263	1,442	9,72	12,549	16,690
A50	14,454	0,247	1,355	9,38	12,363	16,650
A60	14,395	0,237	1,298	9,02	12,273	16,160
A70	13,992	0,227	1,244	8,89	11,913	15,749
A80	13,888	0,251	1,373	9,88	11,500	15,805
A90	13,777	0,259	1,417	10,28	11,193	15,930

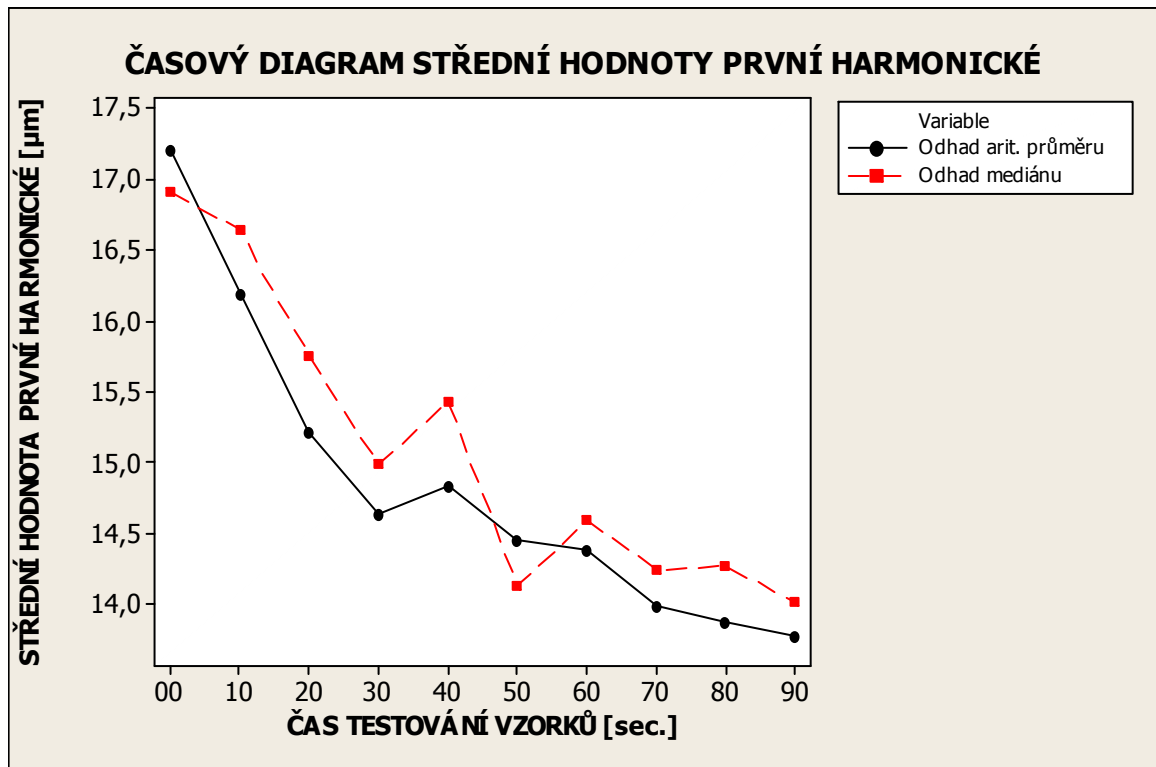
Tab. 7. statistické hodnoty vzorků A s opotřebením 0 – 90s – další hodnoty

Vzorek	Odhad vari- ačního rozpětí (R)	Velikost výběro- vého souboru (n)	První kvartil výběro- vého souboru (Q1)	Odhad mediánu (\tilde{x})	Třetí kvartil výběro- vého souboru (Q3)	Interkvartilové rozpětí výbě- rového souboru (IQR)	Odhad šik- mosti (a)
	range	N total	first quartil	median	third quartil	interquarile- range	skewness
A	3,996	30	16,247	16,916	18,160	1,913	0,260
A10	4,850	30	15,365	16,650	17,048	1,683	-0,650
A20	4,535	30	13,505	15,759	16,458	2,952	-0,350
A30	4,751	30	13,474	14,991	15,730	2,256	-0,530
A40	4,141	30	13,307	15,436	15,990	2,684	-0,480
A50	4,287	30	13,345	14,139	15,822	2,478	0,110
A60	3,887	30	13,233	14,598	15,570	2,338	-0,440
A70	3,836	30	12,867	14,250	15,265	2,397	-0,110
A80	4,305	30	12,502	14,277	15,205	2,703	-0,320
A90	4,737	30	12,321	14,019	15,130	2,809	-0,220

Kontrola variačního koeficientu: Neměl překročit 10%, můžeme tedy říct, že relativní variabilita souboru je do 10% a tím pádem odhad aritmetického průměru je relativně spolehlivý. Kontrolní výpočet variačního koeficientu je uveden ve vztahu (39).

6.5.4 Rozdíl mezi odhadem aritmetického průměru a odhadem mediánu střední hodnoty první harmonické

Na diagramu je velice dobře vidět, že odhad aritmetického průměru střední hodnoty první harmonické sleduje odhad mediánu střední hodnoty první harmonické.



Obr. 61. Časová řada střední hodnoty první harmonické – Odhad aritmetického průměru; Odhad mediánu

ZÁVĚR

Účelem celé diplomové práce bylo hodnocení vibrační konstrukce přístroje na měření opotřebených pryžových dílů, způsobující Chip-chung efekt. Pro měření vibrací byla použita bezkontaktní metoda pomocí laserinterferometru Renishaw XL-80. Nejprve bylo provedeno nastavení laserinterferometru a nalezení vhodného typu odražeče laserového paprsku. K dispozici byly 2 typy odražečů s odlišnou hmotností, 100g a 10g. Z naměřených vibrací s oběma typy odražečů byl pro vlastní měření vibrací pryžových vzorků s různým opotřebením zvolen odražeč 10g, protože vykazoval větší citlivost a méně tlumil kmity měřeného přístroje. Poté byla, již s jediným odražečem o hmotnosti 10g, provedena série měření vibrací. První měření proběhlo s pryžovým vzorkem bez opotřebením a bylo provedeno 30 nezávislých měření. Takto byla provedena i měření s postupně opotřebovanými vzorky, přičemž přírůstek doby opotřebením vzorku činil 10s. Maximální doba opotřebením pryžového vzorku činila 90s, to znamená, že celkově bylo provedeno 300 měření vibrací, kde se pomocí laserinterferometru měřily vibrace v oblasti ložiska přístroje v závislosti na čase. Jednotlivá měření byla pomocí algoritmu FFT – rychlá Fourierova transformace (přesně DFT – diskretní Fourierova transformace) zpracována a tím převedena na spektrum (závislost amplitudy na frekvenci). Ze zpracovaných dat pomocí FFT byly následně odečteny maximální amplitudy a hodnoty byly zaznamenány do tabulek spolu s odečtenou frekvencí. Data z tabulek byla následně statisticky vyhodnocena pomocí software (Minitab ©, verze 15.1.). Očekávalo se, že s přibývajícím opotřebením pryžového vzorku budou růst hodnoty vibrací. To se ale nepotvrdilo a z uvedených výsledků jednoznačně vyplývá, že během testu nedochází ke zvyšování vibrací, naopak dochází k jejich snížení a to o cca 3 μ m v rámci první harmonické složky během plného opotřebením vzorku po čase 90s. Tento jev ukazují statistické diagramy dat, kde je jasně patrná klesající tendence vibrací. Lze tedy konstatovat, že na přesnost vyhodnocení u zařízení chip-chung nemají vibrace, způsobené nevyvážením rotujícího hřídele elektromotoru, respektive nevyvážením způsobeným drážkou pro pero, významný vliv.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika : senzory - metody - analýza signálu*. 1. vydání. Praha 10 : BEN - technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [2] SMETANA, Ctirad, et al. *Hluk a vibrace : Měření a hodnocení*. 1. vydání. Praha 1 : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [3] STODOLA, Jiří. *Vibrace a jejich využití v technické diagnostice strojů*. Brno : VA Brno, 2003. 43 s. ISBN 80-85960-64-8.
- [4] PEJŠA, Ladislav, et al. *Technická diagnostika*. první. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, 1995. 195 s. ISBN 80-213-0249-6.
- [5] VDOLEČEK, František. *Spolehlivost a technická diagnostika*. Brno : FSI VUT, 2002. 49 s.
- [6] ŠTOLL I., *Elektrina a magnetismus*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2003

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Okamžité zrychlení
a_0	Statistická složka amplitudy signálu $y(t)$
AD	Analogově – digitální převodník
a_{\max}	Maximální zrychlení
b	Tlumení
B	Magnetická indukce
c	Rychlost šíření vln
c_n	Koeficienty Fourierovu řady
<i>DFT</i>	Diskrétní Fourierovu transformace
<i>DTFT</i>	Fourierova transformace diskrétního signálu
E	Intenzita el. pole
f	Frekvence
F	Síla
$F(f)$	Fourierova transformace spojitého signálu
F_{bud}	Budicí síla
f_{\max}	Maximální frekvence
<i>FT</i>	Fourierova transformace spojitého signálu
f_{VZ}	Vzorkovací frekvence
$g(t)$	Časová závislost modulačního optického signálu
g_n	Normální gravitační zrychlení
k	Tuhost pružiny
k	Šikmost (kurtosis)
K_Q	Nábojová citlivost
K_U	Napěťová citlivost

l	Délka vodiče
m	Hmotnost
M	Hmotnost měřeného tělesa
$MEMS$	Technologie piezorezistivního snímače
P	Vektor polarizace
$p(x)$	Hustota pravděpodobnosti
P_i	Pravděpodobnost
P_n	Výkon šumu
P_s	Výkon užitečného signálu
Q	El. náboj
r	Poloměr
R	Elektrický odpor
$R(\tau)$	Autokorelační funkce
S	Okamžitá výchylka
s	Šikmost rozdělení (Skewness)
S_0	Amplituda kmitání
S_M	Amplituda výchylky
s_{max}	Maximální výchylka
SNR	Odstup signálu od šumu (<i>Signal-to-Noise-Ratio</i>)
$S_x(f)$	Spektrální hustota
t	Čas
T	Perioda
T_{VZ}	Vzorkovací interval
u	Indukce napětí na cívce
U_{efs}	efektivní hodnoty signálu resp. šumu

U_{efn}	
$U_{výst}$	Výstupní napětí
v	Okamžitá rychlost
v_{max}	Maximální rychlost
x	Výchylka
x_0	Stejnoseměrná složka
x_1	První harmonická
x_2 až x_n	Druhá až n-tá harmonická
X_{peak}	Maximální amplituda
$X_{peak-to-peak}$	Maximální rozkmit
$X_{rectified\ average}$	Střední hodnota naměřených vibrací
X_{RMS}	Efektivní hodnota naměřených vibrací
$\Delta \omega_m$	Největší změna úhlového kmitočtu
λ	Vlnová délka
π_l	Piezorezistivní součinitel
π_t	Piezorezistivní součinitel
σ	Směrodatná odchylka
σ_l	Složka napětí
σ_t	Složka napětí
φ	Fázový posuv
φ_0	Počáteční fáze
ω	Úhlová rychlost
Ω	Konstantní posuv kmitočtu
ω_d	Kmitočet difraktované vlny

ω_i	Kmitočet nosného referenčního signálu
ω_t	Úhlový kmitočet
\bar{S}_0	Rotující vektor
Ψ_x^2	Statistická charakteristika, střední kvadratická hodnota
μ_k	K-tý moment prvního řádu
μ_k^c	Centrální k-tý moment prvního řádu
\bar{x}	Střední hodnota
a	Odhad šikmosti
IQR	Interkvartilové rozpětí výběrového souboru
Q1	První kvartil výběrového souboru
Q3	Třetí kvartil výběrového souboru
\tilde{x}	Odhad mediánu
n	Velikost výběrového souboru
R	Odhad variačního rozpětí
x_{\min}	Minimální hodnota výběrového souboru
x_{\max}	Maximální hodnota výběrového souboru
V_x	Odhad variačního koeficientu
s	Odhad směrodatné odchylky
u_A	Nejistota měření typu A (chyba aritmetického průměru)
\bar{x}	Odhad aritmetického průměru

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělení vibrací dle kategorií [2]</i>	13
<i>Obr. 2. Časové průběhy vibrací a odpovídající spektrální veličiny [1]</i>	14
<i>Obr. 3. Harmonické kmitání jako průmět rovnoměrného kruhového pohybu bodu P [3]</i>	15
<i>Obr. 4. Rotující vektor s_0 s kladnou počáteční fází φ_0 [3]</i>	16
<i>Obr. 5. Rotující vektor s_0 se zápornou počáteční fází φ_0 [3]</i>	16
<i>Obr. 6. Časové rozvinutí harmonického kmitání [2]</i>	18
<i>Obr. 7. Schéma relativního a absolutního kmitání [3]</i>	21
<i>Obr. 8. Mechanický model absolutního a relativního snímače vibrací [5]</i>	22
<i>Obr. 9. Podélný, příčný a stříhový (smykový) piezoelektrický jev [1]</i>	23
<i>Obr. 10. Model piezoelektrického akcelerometru [1]</i>	23
<i>Obr. 11. Typická amplitudová frekvenční charakteristika piezoelektrického akcelerometru [1]</i>	24
<i>Obr. 12. Uspořádání kapacitního akcelerometru [1]</i>	25
<i>Obr. 13. Uspořádání piezorezistivních akcelerometrů</i>	26
<i>Obr. 14. Absolutní elektrodynamický snímač rychlosti</i>	27
<i>Obr. 15. Michelsonův interferometr [6]</i>	29
<i>Obr. 16. Laserový interferometrický vibrometr [1]</i>	30
<i>Obr. 17. Princip časové a frekvenční analýzy [3]</i>	34
<i>Obr. 18. Vznik aliasingu při vzorkování</i>	40
<i>Obr. 19. Projev aliasingu</i>	41
<i>Obr. 20. Histogram</i>	44
<i>Obr. 21. Vztahy mezi časovou a kmitočtovou oblastí</i>	46
<i>Obr. 22. Boxplotový diagram</i>	47
<i>Obr. 23. Interpretace Boxplotu</i>	48
<i>Obr. 24. Přístroj na měření opotřebení pryžových vzorků</i>	51
<i>Obr. 25. Laserinterferometr Renishaw XL-80</i>	52
<i>Obr. 26. Dělič paprsku</i>	52
<i>Obr. 27. Dělič paprsku na magnetickém stojanu</i>	53
<i>Obr. 28. Zatížení a odpružení stolu</i>	53
<i>Obr. 29. Odražeč 100g</i>	54

<i>Obr. 30. Odražeč 10g</i>	54
<i>Obr. 31 FFT signálu s odražečem 10g, 1. měření</i>	55
<i>Obr. 32 FFT signálu s odražečem 100g, 1. měření</i>	55
<i>Obr. 33 FFT analýza, vzorek bez opotřebení 1. měření</i>	57
<i>Obr. 34 FFT analýza, vzorek 10s opotřebení, 1. měření</i>	58
<i>Obr. 35 FFT analýza, vzorek 20s opotřebení, 1. měření</i>	58
<i>Obr. 36 FFT analýza, vzorek 30s opotřebení, 1. měření</i>	59
<i>Obr. 37 FFT analýza, vzorek 40s opotřebení, 1. měření</i>	59
<i>Obr. 38 FFT analýza, vzorek 50s opotřebení, 1. měření</i>	60
<i>Obr. 39 FFT analýza, vzorek 60s opotřebení, 1. měření</i>	60
<i>Obr. 40 FFT analýza, vzorek 70s opotřebení, 1. měření</i>	61
<i>Obr. 41 FFT analýza, vzorek 80s opotřebení, 1. měření</i>	61
<i>Obr. 42 FFT analýza, vzorek 90s opotřebení, 1. měření</i>	62
<i>Obr. 43. Bodový graf odražeče 100g</i>	63
<i>Obr. 44. Bodový graf odražeče 10g</i>	63
<i>Obr. 45. Boxplotový diagram pro první harmonickou pro odražeč 100g</i>	64
<i>Obr. 46. Boxplotový diagram pro první harmonickou pro odražeč 10g</i>	65
<i>Obr. 47. Porovnání histogramu a boxplotového diagramu odražeče 100g</i>	65
<i>Obr. 48. Porovnání histogramu a boxplotového diagramu odražeče 10g</i>	66
<i>Obr. 49. Bodový diagram 1. harmonické – vzorky s opotřebením 0-90s</i>	68
<i>Obr. 50. Boxplotový diagram první harmonické – vzorky s opotřebením 0-90s</i>	69
<i>Obr. 51. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A bez opotřebení</i>	70
<i>Obr. 52. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 10s</i>	70
<i>Obr. 53. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 20s</i>	70
<i>Obr. 54. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 30s</i>	71
<i>Obr. 55. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 40s</i>	71
<i>Obr. 56. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 50s</i>	71

<i>Obr. 57. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 60s</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 58. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 70s</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 59. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 80s</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 60. Histogram v porovnání s boxplotovým diagramem první harmonické – vzorek A, opotřebení 90s</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 61. Časová řada střední hodnoty první harmonické – Odhad aritmetického průměru; Odhad mediánu.....</i>	<i>76</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Přehled vybraných veličin a vztahů ve vibrodiagnostice [5]</i>	17
<i>Tab. 2 Nastavení parametrů programu pro snímání</i>	56
<i>Tab. 3. statistické hodnoty odražeč 100g a 10g</i>	66
<i>Tab. 4. statistické hodnoty odražeč 100g a 10g – další hodnoty</i>	67
<i>Tab. 5. Odhady aritmetických průměrů a mediánů</i>	69
<i>Tab. 6. Statistické hodnoty vzorků A s opotřebením 0 – 90s</i>	74
<i>Tab. 7. statistické hodnoty vzorků A s opotřebením 0 – 90s – další hodnoty</i>	75

SEZNAM PŘÍLOH

- PI Tabulka naměřených amplitud vibrací přístroje na měření opotřebení pryžových dílů při použití odražečů 100g a 10g
- PII Tabulka naměřených amplitud vibrací přístroje na měření opotřebení pryžových dílů při použití odražeče 10g a pryžových dílů s opotřebením 0 – 90s
- PIII Fotografie pryžových vzorků s opotřebením 0 – 90s

Příloha PI: Tabulka naměřených amplitud vibrací přístroje na měření opotřebení pryžových dílů při použití odražečů 100g a 10g

měření č.	odražeč 100g		odražeč 10g	
	amplituda [μm]	frekvence [Hz]	frekvence [Hz]	amplituda [μm]
1	8,631	16,418	16,418	18,304
2	8,711	16,418	16,418	18,891
3	8,8	16,418	16,418	19,582
4	7,987	16,418	16,418	19,721
5	7,585	16,418	16,418	19,081
6	8,482	16,418	16,418	19,089
7	8,59	16,418	16,418	19,037
8	8,51	16,418	16,418	18,683
9	8,679	16,418	16,418	19,183
10	8,472	16,418	16,418	18,992
11	8,387	16,418	16,418	18,444
12	8,465	16,418	16,418	18,457
13	8,58	16,418	16,418	18,569
14	8,456	16,418	16,418	18,828
15	9,53	16,418	16,418	18,855
16	8,337	16,418	16,418	18,396
17	8,255	16,418	16,418	17,903
18	8,306	16,418	16,418	18,368
19	8,405	16,418	16,418	18,762
20	8,382	16,418	16,418	18,353
21	8,551	16,418	16,418	18,588
22	8,3	16,418	16,418	19,011
23	8,244	16,418	16,418	18,084
24	8,314	16,418	16,418	18,149
25	8,358	16,418	16,418	18,461
26	8,417	16,418	16,418	18,547
27	8,646	16,418	16,418	18,237
28	8,232	16,418	16,418	17,724
29	8,32	16,418	16,418	17,782
30	8,239	16,418	16,418	18,317
31	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18
32	Neměřeno	Neměřeno	16,418	17,987
33	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,922
34	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,301
35	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,254
36	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,722
37	Neměřeno	Neměřeno	16,418	17,945
38	Neměřeno	Neměřeno	16,418	17,859
39	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,356
40	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,992
41	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,008
42	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,142
43	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,027
44	Neměřeno	Neměřeno	16,418	17,977
45	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,297
46	Neměřeno	Neměřeno	16,418	17,927
47	Neměřeno	Neměřeno	16,418	17,637

48	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,071
49	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,3
50	Neměřeno	Neměřeno	16,418	18,198

Příloha PII: Tabulka naměřených amplitud vibrací přístroje na měření opotřebení pryžových dílů při použití odražeče 10g a pryžových dílů s opotřebením 0 – 90s

Měření č.	Vzorek A (bez opotřebení)		Vzorek A, 10s opotřebení	
	frekvence [Hz]	amplituda [μm]	frekvence [Hz]	amplituda [μm]
1	16,418	16,342	16,418	16,378
2	16,418	18,509	16,418	13,664
3	16,418	18,972	16,418	15,507
4	16,418	19,021	16,418	17,548
5	16,418	18,988	16,418	13,5
6	16,418	15,708	16,418	16,894
7	16,418	16,349	16,418	18,35
8	16,418	16,912	16,418	17,007
9	16,418	16,7	16,418	17,404
10	16,418	15,988	16,418	17,333
11	16,418	16,116	16,418	15,794
12	16,418	17,952	16,418	14,857
13	16,418	17,71	16,418	17,666
14	16,418	19,24	16,418	15,298
15	16,418	18,456	16,418	16,151
16	16,418	16,809	16,418	17,703
17	16,418	17,806	16,418	14,587
18	16,418	18,061	16,418	16,95
19	16,418	16,286	16,418	14,151
20	16,418	17,07	16,418	16,642
21	16,418	16,129	16,418	16,657
22	16,418	15,244	16,418	15,944
23	16,418	15,746	16,418	16,772
24	16,418	16,707	16,418	17,17
25	16,418	16,443	16,418	14,038
26	16,418	17,978	16,418	16,78
27	16,418	16,92	16,418	16,957
28	16,418	15,969	16,418	15,995
29	16,418	17,5	16,418	15,387
30	16,418	18,659	16,418	16,781

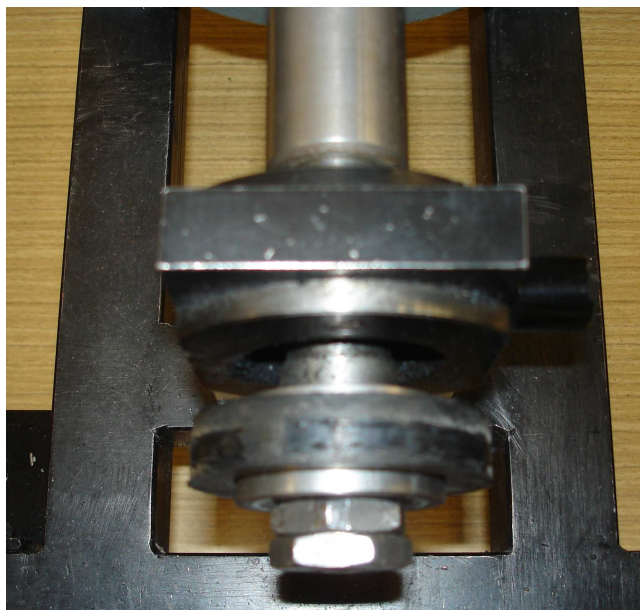
Měření č.	Vzorek A, 20s opotřebení		Vzorek A, 30s opotřebení	
	frekvence [Hz]	amplituda [mm]	frekvence [Hz]	amplituda [μm]
1	16,418	15,746	16,418	15,335
2	16,418	14,254	16,418	13,086
3	16,418	17,427	16,418	16,205
4	16,418	16,163	16,418	14,635
5	16,418	16,038	16,418	13,678
6	16,418	13,272	16,418	16,152
7	16,418	16,692	16,418	14,528
8	16,418	16,19	16,418	16,01
9	16,418	14,218	16,418	15,075
10	16,418	16,915	16,418	13,813
11	16,418	13,366	16,418	16,091
12	16,418	15,839	16,418	13,007
13	16,418	16,49	16,418	14,99
14	16,418	13,286	16,418	16,857
15	16,418	15,349	16,418	13,604
16	16,418	16,311	16,418	14,848
17	16,418	12,973	16,418	15,716
18	16,418	15,773	16,418	12,757
19	16,418	16,619	16,418	15,269
20	16,418	13,244	16,418	16,004
21	16,418	16,689	16,418	12,322
22	16,418	14,055	16,418	15,471
23	16,418	13,536	16,418	14,981
24	16,418	16,447	16,418	12,106
25	16,418	14,686	16,418	15,774
26	16,418	16,857	16,418	15,507
27	16,418	13,413	16,418	12,384
28	16,418	15,696	16,418	15,65
29	16,418	16,176	16,418	14,991
30	16,418	12,892	16,418	12,347

Měření č.	Vzorek A, 40s opotřebení		Vzorek A, 50s opotřebení	
	frekvence [Hz]	amplituda [μm]	frekvence [Hz]	amplituda [μm]
1	16,418	14,319	16,418	15,805
2	16,418	16,071	16,418	14,95
3	16,418	14,826	16,418	16,199
4	16,418	16,69	16,418	12,856
5	16,418	12,565	16,418	13,51
6	16,418	15,518	16,418	16,019
7	16,418	16,49	16,418	14,176
8	16,418	12,833	16,418	12,765
9	16,418	15,858	16,418	15,125
10	16,418	15,577	16,418	13,223
11	16,418	13,191	16,418	13,026
12	16,418	15,971	16,418	15,705
13	16,418	14,904	16,418	12,777
14	16,418	15,789	16,418	15,874
15	16,418	14,904	16,418	13,449
16	16,418	15,692	16,418	13,672
17	16,418	12,549	16,418	16,65
18	16,418	15,38	16,418	12,363
19	16,418	16,544	16,418	15,083
20	16,418	12,573	16,418	15,136
21	16,418	16,048	16,418	14,102
22	16,418	15,554	16,418	16,411
23	16,418	12,644	16,418	13,833
24	16,418	15,491	16,418	13,581
25	16,418	12,67	16,418	16,356
26	16,418	16,683	16,418	15,322
27	16,418	13,527	16,418	12,543
28	16,418	14,445	16,418	16,017
29	16,418	16,419	16,418	13,385
30	16,418	13,345	16,418	13,718

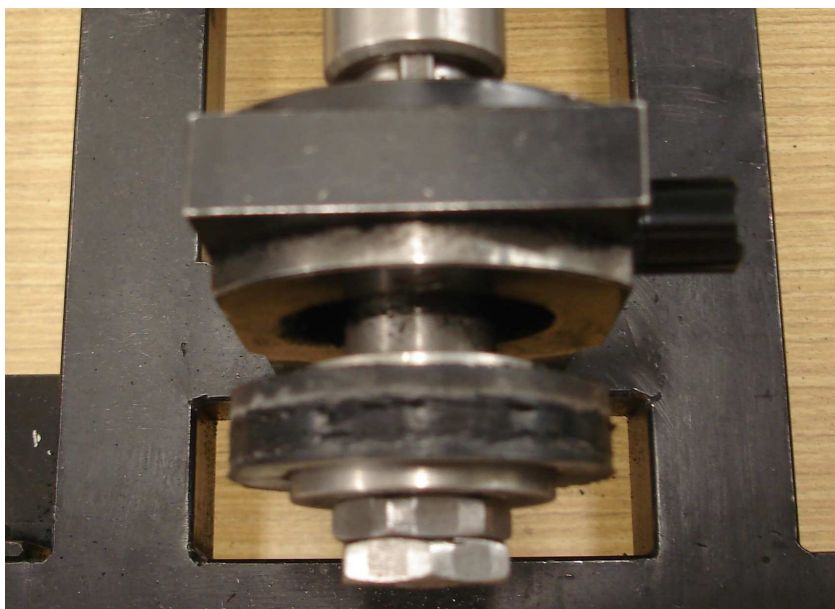
Měření č.	Vzorek A, 60s opotřebení		Vzorek A, 70s opotřebení	
	frekvence [Hz]	amplituda [μm]	frekvence [Hz]	amplituda [μm]
1	16,418	15,991	16,418	14,548
2	16,418	12,476	16,418	12,03
3	16,418	15,567	16,418	14,712
4	16,418	15,402	16,418	15,047
5	16,418	12,336	16,418	12,524
6	16,418	14,433	16,418	14,428
7	16,418	15,71	16,418	15,539
8	16,418	15,726	16,418	12,79
9	16,418	13,106	16,418	12,993
10	16,418	15,936	16,418	15,382
11	16,418	14,34	16,418	14,369
12	16,418	12,358	16,418	12,99
13	16,418	15,262	16,418	15,749
14	16,418	15,1	16,418	12,46
15	16,418	12,612	16,418	12,688
16	16,418	14,828	16,418	15,523
17	16,418	14,464	16,418	14,799
18	16,418	13,275	16,418	11,913
19	16,418	15,834	16,418	13,518
20	16,418	14,732	16,418	15,378
21	16,418	13,349	16,418	13,241
22	16,418	15,581	16,418	12,444
23	16,418	15,499	16,418	15,227
24	16,418	12,273	16,418	15,379
25	16,418	14,342	16,418	14,132
26	16,418	14,797	16,418	12,893
27	16,418	12,32	16,418	14,934
28	16,418	14,329	16,418	15,613
29	16,418	16,16	16,418	13,314
30	16,418	13,718	16,418	13,191

Měření č.	Vzorek A, 80s opotřebení		Vzorek A, 90s opotřebení	
	frekvence [Hz]	amplituda [μm]	frekvence [Hz]	amplituda [μm]
1	16,418	15,619	16,418	14,753
2	16,418	12,534	16,418	12,186
3	16,418	15,448	16,418	15,43
4	16,418	14,348	16,418	14,639
5	16,418	11,5	16,418	12,728
6	16,418	15,194	16,418	14,962
7	16,418	15,237	16,418	13,274
8	16,418	11,987	16,418	15,164
9	16,418	13,921	16,418	13,975
10	16,418	14,804	16,418	11,843
11	16,418	12,406	16,418	14,418
12	16,418	12,939	16,418	15,724
13	16,418	14,268	16,418	11,898
14	16,418	15,483	16,418	13,704
15	16,418	12,187	16,418	15,133
16	16,418	13,981	16,418	11,633
17	16,418	15,616	16,418	13,616
18	16,418	13,25	16,418	15,609
19	16,418	13,391	16,418	12,112
20	16,418	15,401	16,418	13,167
21	16,418	14,506	16,418	15,129
22	16,418	11,804	16,418	12,567
23	16,418	13,121	16,418	14,062
24	16,418	14,562	16,418	15,255
25	16,418	14,793	16,418	12,366
26	16,418	11,757	16,418	12,166
27	16,418	14,488	16,418	15,93
28	16,418	15,805	16,418	14,331
29	16,418	12,003	16,418	11,193
30	16,418	14,286	16,418	14,356

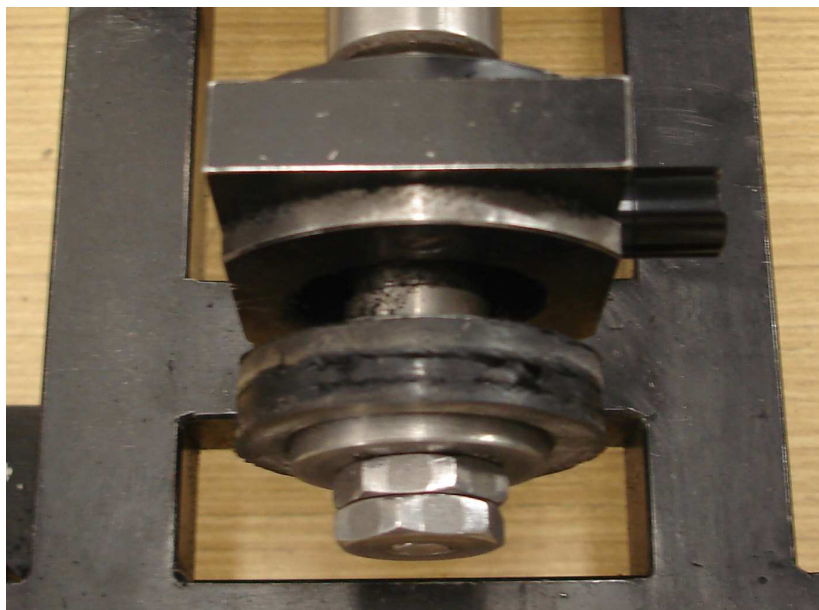
Příloha PIII: Fotografie pryžových vzorků s opotřebením 0 – 90s



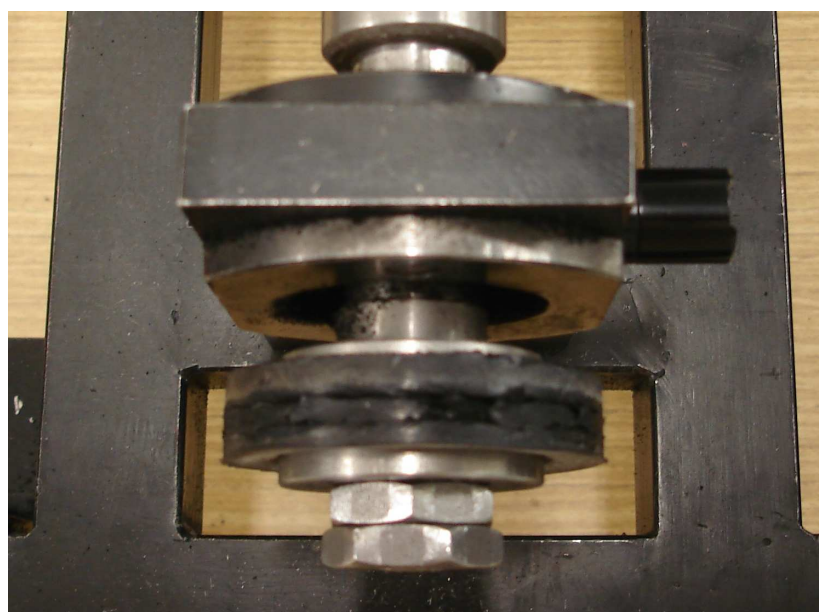
Vzorek A, opotřebení 10s



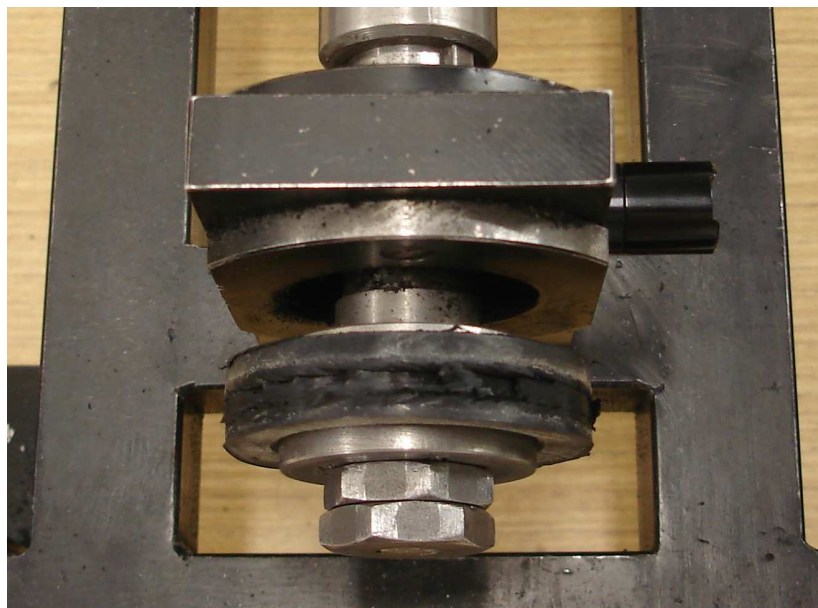
Vzorek A, opotřebení 20s



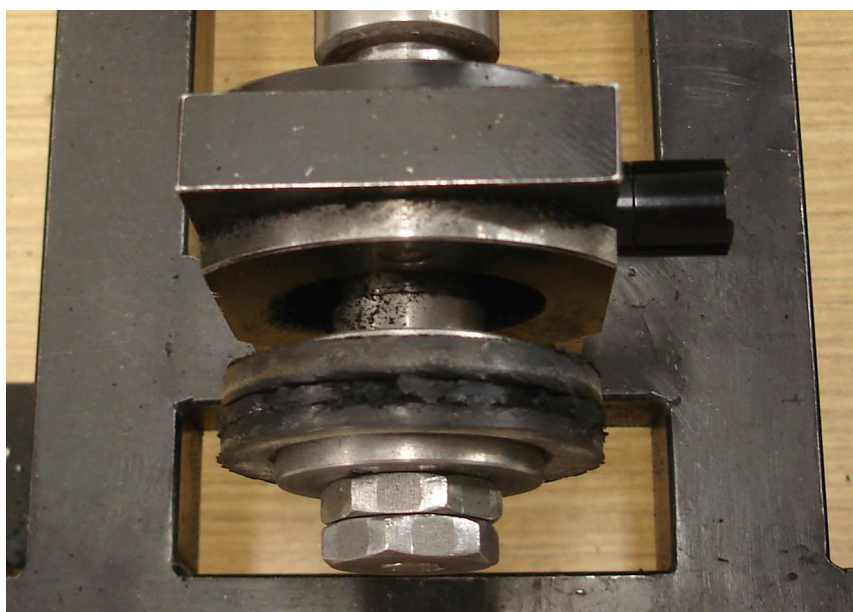
Vzorek A, opotřebení 30s



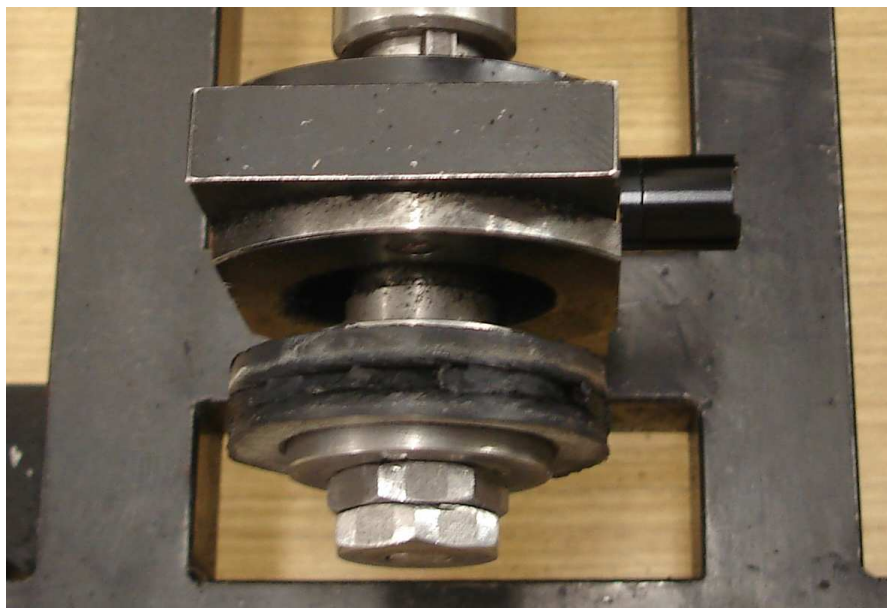
Vzorek A, opotřebení 40s



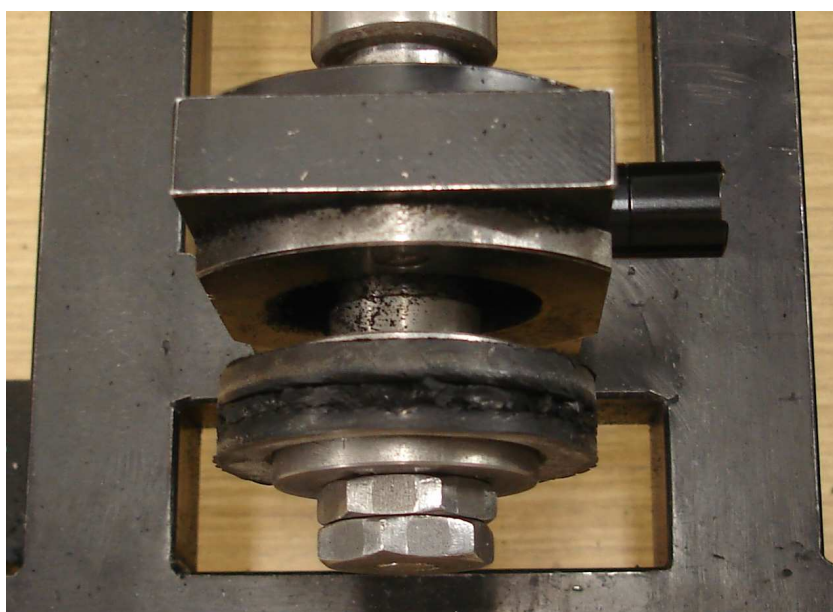
Vzorek A, opotřebení 50s



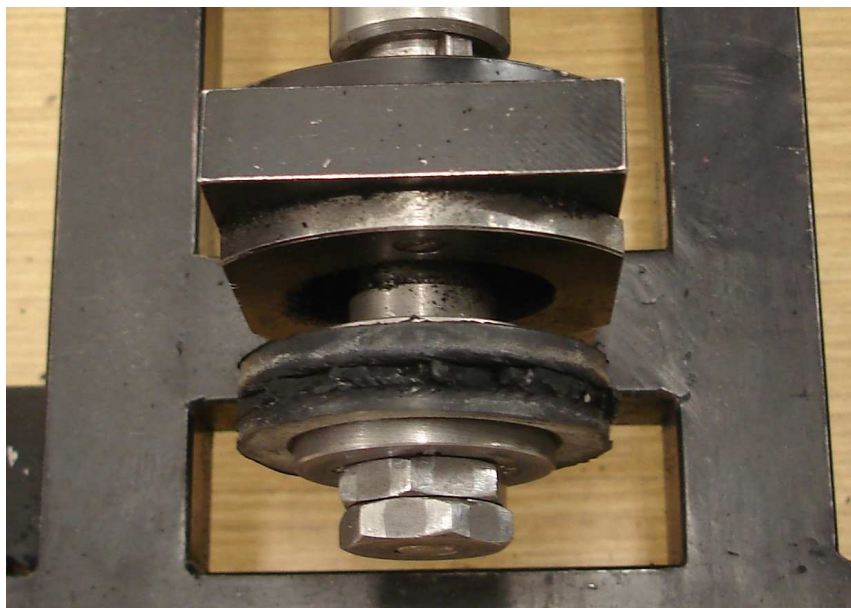
Vzorek A, opotřebení 60s



Vzorek A, opotřebení 70s



Vzorek A, opotřebení 80s



Vzorek A, opotřebení 90s