

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

CHYBOVÉ FREKVENCE LOŽISEK

BEARINGS ERROR FREQUENCIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR ŽIVOTSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DANIEL ZUTH

BRNO 2008

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá chybovými frekvencemi ložisek, protože ložiska jsou součástí téměř každého rotačního stroje. Pro daný druh ložisek a způsobené vady porovnává vypočtené teoretické chybové frekvence s frekvencemi získanými pomocí experimentu. Popisuje různé způsoby měření chybových frekvencí, které jsou více nebo méně použitelné v praxi. Dále se zabývá možnými způsoby odhalení chybových frekvencí pro konkrétní vady ložisek.

ABSTRACT

This dissertation deals with error frequencies of bearing because the bearing is part of every rotary machine. Certain type of bearing and caused defect is being compared with error frequencies which are acquired by experiment. Various kinds of measurement which are more or less applicable in use are being described. Further the dissertation deals with other possible ways of detection error frequencies for particular defects of bearing.

KLÍČOVÁ SLOVA

Technická diagnostika
Chybové frekvence
Vada ložiska

KEYWORDS

Technical diagnostics
Error frequencies
Defects of bearing

Obsah

1	<u>Úvod</u>	9
2	<u>Technická diagnostika</u>	11
2.1	Základní pojmy technické diagnostiky	12
2.2	Diagnostické prostředky	12
2.3	Diagnostické modely	13
2.4	Poruchy a jejich příčiny	15
3	<u>Vibrodiagnostika</u>	17
3.1	Základy mechanického kmitání	17
3.2	Typy senzorů vhodné ke snímání vibrací	20
3.2.1	Senzory výchylky, polohy a posuvu	20
3.2.2	Senzory rychlosti	21
3.2.3	Senzory zrychlení – akcelerometry	21
3.3	Způsoby uchycení snímačů	28
3.4	Analýza a zpracování diagnostických signálů	29
3.4.1	Signály a jejich rozdělení	29
3.4.2	Analýza signálu v časové oblasti	30
3.4.3	Alternativní metody zpracování signálu	34
4	<u>Valivá ložiska</u>	39
4.1	Poškození valivých ložisek	40
4.2	Přehled metod k měření stavu valivých ložisek	43

5	<u>Experimentální ověření chybových frekvencí ložisek</u>	50
5.1	Poškození ložisek 6201	50
5.2	Měřicí sestava pro měření chybových frekvencí ložisek	53
5.3	Měření chybových frekvencí pomocí piezo snímače s předzesilovačem	54
5.4	Měření chybových frekvencí pomocí Adash 4900 Vibrio	55
5.5	Měření chybových frekvencí pomocí Helium neonového laseru	56
5.6	Měření chybových frekvencí pomocí Viditech VDT02-AB	60
5.7	Výpočet poruchových frekvencí ložisek	61
5.8	Určení chybových frekvencí pro zadané ložisko 6201	63
6	<u>Srovnání naměřených hodnot s vypočtenými frekvencemi</u>	65
7	<u>Závěr</u>	79
9	<u>Seznam použité literatury</u>	81

1 Úvod

Technická diagnostika je moderním nástrojem údržby, pomocí které je možné bezdemontážními a nedestruktivními metodami předejít haváriím a zabránit tak poškození souvisejících součástí. Použitím technické diagnostiky je možné odhalit poškození, lokalizovat ho, určit jeho velikost, která vypovídá o jeho závažnosti, tudíž o schopnosti stroje plnit požadovanou funkci a to včetně požadovaných kvalit. Dále sledovat vývoj poškození, pomocí kterého je možné určit příčinu poškození a stanovit, jak dále postupovat. Takto je možné vyhnout se neplánovaným odstávkám a uspořít finance.

Vibrodiagnostika je jednou z hlavních metod bezdemontážní nedestruktivní diagnostiky. Vibrodiagnostické měření je z principu prováděno za běžného provozu, bez omezení výroby. Využívá vibrace, jako zdroj informací, pro stanovení technického a provozního stavu strojních zařízení. Hlavním cílem vibrodiagnostiky je odhalit skutečný stav zařízení a tím umožnit operativní plánování údržby, minimalizovat zbytečné preventivní opravy a předcházet havarijním odstávkám.

Hledání závad a jejich příčin vyžaduje u všech strojů, s výjimkou jen těch nejjednodušších, mnoho trpělivé práce. Často vznikne takový problém, jehož řešení není obvyklé nebo jej nelze vyřešit bez analýzy dalších dostupných údajů. Zpracování signálů několika metodami nabízí více způsobů analýzy signálů a více možností zjišťování odchylek od normálního stavu. Stanovení špatné diagnózy může stát mnoho peněz. Cílem této práce je uvést přehled typických metod analýzy a ukázat jak se typické závady stojí projevují ve změřené odezvě vibrací.

Pro diagnostiku závad strojních zařízení je nezbytná znalost charakteristických frekvencí vibrací známých závad a nalezení těch, které se shodují s frekvencemi složek se zvýšenými hladinami. Je velký rozdíl mezi zjištěním závady stroje a analýzou příčiny jejího vzniku. Pouhá výměna ložiska, vykazující příznaky poškození způsobeného silnými vibracemi, není řešením problému. Obvykle na stroji existuje nějaká jiná příčina nadměrné úrovně dynamických sil, která způsobuje poškození ložiska. Musíme tedy zjistit původ vzniku závady - nevyváženost, nesouosost, uvolnění, apod.

Pro reprodukovatelnost naměřených hodnot vibrací na stejném stroji je důležitý způsob upevnění snímače a s tím související využitelná maximální frekvence měření. V mnoha případech se v praxi osvědčily nalepené držáky se závitem pro přišroubování snímače. Aby bylo možné výsledky porovnávat, musí být měření vibrací prováděno vždy ve stejných bodech a při stejných ustálených provozních podmínkách.

Včasná detekce závady je základním předpokladem pro možnost plánování nápravných zásahů. Po odhalení závady je třeba řešit příčiny. Jen takto lze dosáhnout toho, že se problém nebude opakovat

2 Technická diagnostika

Technická diagnostika je samostatný obor zabývající se bezdemontážními a nedestruktivními metodami a prostředky stanovení technického stavu objektu. Spolehlivost, jako jeden ze základních znaků jakosti každého technického zařízení, je podmíněna racionálním sledováním technického stavu objektu a včasným detekováním fyzikálních změn a procesů. Věrohodnost diagnózy je dána nejen optimální volbou moderních integrovaných senzorů, ale také jejich umístěním a hlavně zpracováním změřených signálů. Integrované senzory umožňují podstatné zmenšení rozměrů, minimalizaci parazitních vlivů okolí a šumu, vyhodnocující rychlost zpracování signálů, možnost bezproblémové výměny a snížení výrobních nákladů. Pro diagnostické aplikace se stále častěji používají inteligentní senzory, které obsahují mikroelektrické obvody pro zpracování, analýzu a unifikaci signálu v jediném kompaktním provedení s citlivou částí senzoru. Struktura inteligentních senzorů je odlišná od různých výrobců. Jako inteligentní senzor je označován i senzor, u něhož je z technologických příčin čidlo odděleno od mikroelektronické integrované části, přičemž je vzdálenost čidla od elektroniky provozně minimální a tvoří mechanicky, elektricky a funkčně uzavřený celek. Inteligentní senzor je vybaven inteligentním rozhraním pro komunikaci se sběrníkovým systémem, umožňuje analogově-číslicový převod, autokalibraci, řízené zesílení a filtraci signálu, linearizaci statické charakteristiky a další aritmetické operace, zpracování věrohodnosti naměřených dat, přepínání více vstupních veličin s adresací v řadě nebo ve smyčce.

Správnost a jednoznačnost diagnózy zkoumaného objektu závisí na optimálním návrhu diagnostického systému, a to i z hlediska ekonomického a bezpečnostního a na pečlivé analýze diagnostikovatelnosti vybraných možných závad.

Diagnostický signál je často zahlcen rušením jednak vlivem dalších jevů v daném objektu a jednak vlivem okolního prostředí. Z toho důvodu je nutné změřený diagnostický signál nejen analyzovat z hlediska detekce, lokalizace a rozpoznání typu závady, ale také z hlediska potlačení rušení. V technické diagnostice jsou proto stále častěji aplikovány kromě standardních metod zpracování signálu, tzv. pokročilé metody analýzy signálu, založené na statistických metodách, neuronových sítích, fuzzy logice a expertních systémech. [1]

Technická diagnostika se dělí na několik odvětví podle toho jakým způsobem stanovují technický stav objektu:

- Vibrodiagnostika - sledování vibrací rotujících strojů
- Termodiagnostika - měření teploty povrchu tělesa
- Tribodiagnostika - analýza vzorků olejů a plastických maziv
- Akustickoudiagnostiku
- Tenzometrická diagnostika
- Elektrodiagnostika

2.1 Základní pojmy technické diagnostiky

Diagnóza je vyhodnocení okamžitého technického stavu objektu. Z hlediska terminologie spolehlivosti se jedná o vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných podmínek. Základními úkoly diagnostiky jsou :

a) detekce vady nebo poruchy, tj. identifikace vady nebo identifikace úplné nebo částečné poruchy objektu,

b) lokalizace vady nebo poruchy, tj. určení místa vady nebo poruchy v objektu.

Prognóza je extrapolace vývoje technického stavu do budoucnosti. Cílem prognózy je např. stanovení na základě statistických vyhodnocení pravděpodobnost bezporuchového stavu v následujícím období nebo na základě vad stanovení termínů dílčích a generálních oprav nebo výměn komponentů objektu.

Geneze je analýza možných a pravděpodobných příčin vzniku poruchy nebo vady, a tím předčasného zhoršení technického stavu objektu.[1]

2.2 Diagnostické prostředky

Diagnostické prostředky tvoří soubor technických zařízení a pracovních postupů pro analýzu a vyhodnocení stavu diagnostikovaného objektu. Pracovní postup je diagnostický algoritmus včetně programového vybavení pro vyhodnocování dat, aplikace pokročilých metod zpracování signálů, metod výběrů vhodných diagnostických parametrů, sestavení matematických modelů aj. Diagnostické algoritmy mohou být závislé nebo nezávislé dle toho, jestli v časovém postupu vycházíme z předcházející diagnózy nebo ne. Diagnostické prostředky mohou být realizovány buď jako pevně zabudovaná součást objektu nebo samostatně. Při volbě diagnostického prostředku je nutné respektovat předem požadovanou rozlišovací schopnost signálu v čase i v amplitudě.

Diagnostické prostředky se dělí na ON-LINE a OFF-LINE. ON-LINE prostředky umožňují diagnostikovat objekt při provozu. Pokud je měřicí systém trvale nebo periodicky připojen k diagnostikovanému objektu, hovoříme o monitorování, tj. průběžném nebo pravidelném sledování technického stavu objektu a vyhodnocování trendu vad nebo mezních bezpečnostních stavů, při kterých je nutno objekt z provozu odstavit.[1]

OFF-LINE mají strategii odlišnou u různých firem. Obvykle se pod pojmem OFF-LINE rozumí diagnostikování objektu, který je mimo provoz. Některé firmy pod pojmem OFF-LINE používají tzv. kolektory dat, tj. malé přenosné přístroje. Sběr dat se pak provádí za provozu a kromě okamžitého základního vyhodnocení se podrobná analýza naměřených dat provádí s časovým odstupem na externím pracovišti.[1]

Diagnostický systém se liší podle toho, ve které fázi technického života bude objekt diagnostikován. Rozhodující fáze jsou výroba, provoz, servis a údržba objektu. Údržbu realizujeme třemi způsoby :

- údržbou po poruše
- údržbou dle časového plánu
- údržbou dle skutečného stavu [7]

První způsob údržbou po poruše je nejméně vhodný. Dojde při něm k výpadku technologického procesu a možnosti porušení dalších objektů, bezpečnosti provozu (nejčastěji se používá u elektronických, analogových a číslicových obvodů). Druhý způsob údržbou dle časového plánu je ekonomicky nevýhodný. Opravy se dějí dle časového plánu, vyměňují se i díly nepoškozené nebo dojde k údržbě příliš pozdě. Tento způsob se praktikuje z bezpečnostních důvodů (letectví, jaderná energetika). Ekonomicky nejvýhodnější je varianta údržbou dle skutečného stavu.

- Technický stav diagnostikovaného objektu je jeho schopnost vykonávat požadované funkce za stanovených podmínek užívání.
- Diagnostická veličina je nositelem informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu nebo jeho částí. Největším problémem diagnostiky je nemožnost přímého měření měřících bodů bez nežádoucí demontáže. Proto se musíme spokojit s přístupnými výstupnými prvky systému. Z nich potom více či méně přesně odhadnout vnitřní parametry pomocí diagnostických algoritmů. Musíme si také uvědomit, že jedné příčiny může odpovídat několik následků a naopak.
- Provozeroschopný stav - objekt je schopen vykonávat stanovené funkce podle technických podmínek.
- Poruchou končí provozuschopnost objektu.
- Funkčnost objektu - objekt je schopen vykonávat některou svoji funkci.[7]

2.3 Diagnostické modely

Model, tedy zjednodušené zobrazení originálu se využívá ke sledování chování systému a také k jeho simulaci (tj. řízené sledování vlastností originálu volbou vstupních veličin na modelu). Simulací nahrazujeme nákladný nebo nerealizovatelný experiment na skutečném systému.

Diagnostický model je zobrazení bezporuchových a poruchových stavů prvků originálu nebo bezporuchového a poruchového chování objektu. U složitých systémů provádíme dělení na dílčí subsystémy, které se modelují postupně tzv. víceúrovňové modelování. Základní dělení diagnostických modelů je na :

- fyzikální, tj. hmotný a reálný objekt, sestavený na stejném principu jako originál (zmenšený model strojního zařízení) nebo analogickým principu (např. elektrický model tepelného nebo hydraulického systému)
- abstraktní, tj. matematický model.

Podrobnějším členěním lze modely rozdělit do následujících skupin:

- Matematické modely jsou tvořeny nejčastěji soustavou rovnic a nerovnic a vztahů mezi diagnostikovanými veličinami můžeme dále dělit :
- Analytický model - popisuje systém soustavou algebraických (statický model) nebo diferenciálních a diferenčních rovnic (dynamický model). Další možná dělení jsou na modely procesního chování a modely strukturní, lineární a nelineární, deterministické a stacionární nebo nestacionárně stochastické, spojitě a diskrétní, parametrické a nparametrické.

- Model procesního chování (tj. funkční model) je dán pouze vstupními, stavovými a výstupními veličinami systému. Pokud má pouze vstupy a výstupy modelujeme tzv. černou skříňku.
- U fyzikálně matematického modelu je nutná perfektní znalost fyzikálních a chemických zákonitostí pro daný systém. Pro neznalost těchto předpokladů a značnou složitost se tento model téměř nepoužívá.
- Empirický model vychází z experimentálně naměřených dat na vstupech a výstupech reálného systému.
- Parametrický model má konstanty (koeficienty, parametry) předem odhadnutých rovnic získány identifikačními algoritmy. To provádíme buď statistickým vyhodnocením naměřených dat nebo z dynamických odezev. V praxi nejčastěji používáme kombinovaný způsob.
- Logický model je modelování systému pomocí matematické logiky. U tohoto modelu se nevyskytují fyzikální proměnné, ale pouze vstupní, výstupní a stavové veličiny. Tyto nabývají pouze binárních hodnot log 0 a log 1. Při konstrukci logického modelu využíváme logických funkcí a Booleovské algebry. Pro sestavení modelu je vhodná výchozí tabulka s dvouhodnotovým popisem vlastností každého funkčního bloku. Obvykle bývá provozuschopnost definovaná logická „1“ a neprovozuschopnost (porucha) jako logická „0“. Aplikace matematické logiky je vhodná pro objekty s vyznačenou funkční a blokovou strukturou. Každý blok musí mít definované vstupy a výstupy. Pro modelování vztahů mezi strukturálními parametry je logické modelování nevhodné. Logický model lze zadat ve tvaru grafů, tabulek a matic přechodů.
- Topologický model. Protože uvedené matematické modely jsou u složitějších systémů velmi náročné na matematický popis, používáme s výhodou pro popis vlastností a chování jednotlivých reálných prvků topologický model ve formě orientovaného grafu.

Použití modelů v diagnostice lze obecně rozdělit také do kombinací objektů a podmínek. Nejen samotné diagnostické objekty lze modelovat, v praxi se velmi často modelují zejména podmínky provozu, které umožňují uskutečnit nejrychlejší zrychlené zkoušky nových či inovovaných strojů, přístrojů a zařízení. Diagnostika a modelování se takto dá dělit na:

- Reálný objekt v reálných podmínkách
- Model v reálných podmínkách
- Reálný objekt v modelových podmínkách
- Model v modelových podmínkách [7]

2.4 Poruchy a jejich příčiny

Žádné zařízení nelze konstruovat tak, aby se u něj dříve či později neobjevily vady, závady a poruchy. Vada nám funkční spolehlivost neovlivňuje, to však nelze říct o závadách a poruchách. Každá závada a porucha má svoji příčinu a jejich znalost nám umožňuje navrhovat vhodný diagnostický systém.

Poruchy mohou vznikat z vnějších nebo vnitřních příčin. Vnější příčinám přičítáme poruchy vzniklé nedodržením stanovených provozních podmínek a předpisů pro zatěžování, obsluhu a údržbu. Vnitřní příčiny mají svůj původ v nedostatcích výrobku. Závady a poruchy můžeme třídit z následujících hledisek:

- druh porušení (opotřebení, zadření, únava, přetížení apod.)
- okamžik vzniku (za provozu, při demontáži, při obsluze apod.)
- časová charakteristika (náhlá, postupná, občasná apod.)
- místo vzniku (konstrukce, technologie, provoz, vada materiálu apod.)
- stupeň nebezpečnosti
- rozsah (částečná, úplná apod.)
- následky
- způsob odstranění (za provozu, nutnost odstavení stroje, vyřazení z provozu apod.).

Příčiny poruch mohou mít svůj počátek v projekční přípravě (špatná formulace zadávaného úkolu, neověřené znalosti provozních podmínek, zanedbání skutečných vnějších faktorů působících na objekt), konstrukci (nevhodná volba materiálu, nesprávné dimenzování součástí, neodhadnutí působících sil, nevyváženost rotujících součástí, únava materiálu), výrobě (nedodržení rozměrových tolerancí, nedůsledná kontrola, špatná montáž, zanedbání úchylek tvaru a polohy, zavádění zvýšených namáhání a vnitřních pnutí jednotlivých dílů), provozu, obsluze, údržbě (nedodržení podmínek provozu, přetěžování, nesprávná, nedostatečná nebo zanedbaná údržba, nedovolené zásahy do chodu strojů, nedostatečná a nesprávná oprava), dopravě a zacházení s objektem.

Provozní poruchy mohou být způsobeny nejčastěji:

- mechanickým lomem
- nadměrným opotřebením
- změnami geometrického tvaru (deformace)
- změnou mechanických vlastností materiálu (přehřátí)
- změnou zátěžných sil atd.
- způsobem zatížení součásti –
 - statické: na správně dimenzované součásti nemá podstatný vliv. Při dlouhodobém působení mohou vznikat rozměrové změny tzv. „creep“
 - dynamické: náhlé nebo rázové zatížení. Jejich vlivem vznikají vibrace
 - periodické: příčinou vynucené vibrace a z toho plynoucí únavový lom
 - únavový jev, vyvolaný cyklickým napětím v součásti a je podmíněn růstem trhliny. Výsledkem je zeslabení průřezu součásti, přetížení a následný mechanický lom. Zdrojem vzniku může být stopa po obrábění, koncentrace napětí atd.

- opotřebením povrchu vzájemně se stýkajících a po sobě se pohybujících funkčních ploch součástí. Příčiny vzniku opotřebení jsou abrazivní (následek stírání povrchu tvrdými částicemi), záděr (porušení mazacího filmu), únavové opotřebení, molekulární opotřebení (tj. odtrhávání místních svarových mikrospojů, děje se hlavně v oblasti vysokých tlaků), korozní opotřebení (v přítomnosti agresivního prostředí)
 - koroze, která je v podstatě chemickým (elektrochemickým) jevem, probíhajícím na povrchu kovů v agresivním prostředí. Koroze napadá povrch součásti a postupuje do hloubky materiálu. Vlivem koroze se zhoršuje jakost povrchu, vznikají trhlinky, které se rozšiřují a tím zeslabují nosný průřez. Mnohem závažněji však působí „hloubková“ koroze interkrystalická (na hranicích zrn struktury materiálu).
- [7]

3 Vibrodiagnostika

3.1 Základy mechanického kmitání

Žádný stroj nelze vyrobit, aby za provozu nebyl doprovázen vibracemi. Tyto mechanické kmity jsou pro každý stroj charakteristickou veličinou a odráží jeho vnitřní vazby a stavy a také spojení s okolím. Protože vibrační diagnostika je velice propracovaná metoda zjišťování stavu strojů, jsou vibrace vhodnými diagnostickými signály pro komplexní informace o technických stavech objektů. Mimo informací o vnitřních stavech jednotlivých uzlů a dílů mohou vibrace podat údaje o místě a příčině poruchy s vysokou přesností. [7]

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 budící silou, která může působit jak externě tak interně. Tuhé těleso v technické diagnostice prezentujeme jako celek, který lze nahradit jediným hmotným bodem a pohyb všech částí tělesa je v daném časovém okamžiku totožný. Termín kmitání je ekvivalentní pojmu vibrace. Hodnoty veličin mechanických vibrací jsou dány budící silou, jejím směrem a kmitočtem. Vibrace lze popsat amplitudovou fází v daném časovém okamžiku. Vibrace tělesa jsou dány kombinací šesti pohybů, a to posunem v ortogonální soustavě souřadnic x , y , z a rotací kolem os x , y , z , neboli mechanický systém má šest stupňů volnosti. Většina mechanických systémů nemá nekonečně velkou a kmitočtově nezávislou hodnotu tuhosti a těleso nekmitá jako jeden pevný bod a dochází ke vzniku vln.

Vlna je změna vlastností nebo fyzikálního stavu prostředí šířící se v tomto prostředí a přenášející energii, aniž by současně docházelo k přemísťování prostředí. U těles jednotlivé body prostředí kmitají s různou výchylkou a fázovou rychlostí a jev se šíří postupnými vlnami pružným prostředím. Pokud se v tělese vlivem odrazu superponují dvě totožné vlny a šíří se proti sobě stejnou fázovou rychlostí vzniká *stojatá vlna*.

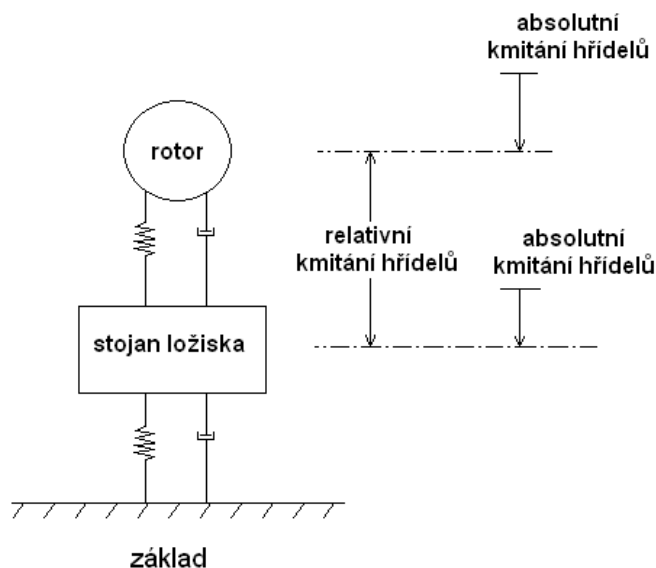
Vibrace jsou spojeny s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem ložisek, hřídelí převodovek, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyvážených rotujících součástí, vůlemi v kluzných ložiscích atd. Technický stav je dán opotřebením, uvolněním spojů, únavovými lomy, korozí atd. Vibrace jsou buzeny jak rotujícími tak přímočaře se pohybujícími tělesy.

Mechanické vibrace jsou také způsobeny rázy, při nichž střetem dvou navzájem se pohybujících těles dochází k náhlé změně gradientu určující veličiny vibrací. Ráz způsobí přechodný kmitavý jev generující v tělese postupnou rázovou vlnu. V technické diagnostice se používá uměle generovaný ráz např. diagnostickým kladívkem se zabudovaným senzorem síly. [1]

Vibryce dělíme na periodické, neperiodické a náhodné. Pokud periodické vibrace obsahují jedinou frekvenci, nazýváme je harmonické. Další rozlišení u strojů a zařízení je na absolutní a relativní vibrace (Obr. 1). U absolutních vibrací tělesa je jeho pohyb vztahován k pevnému bodu (gravitační pole zeměkoule), relativní je vyhodnocováno vůči zvolenému reálnému bodu. Potom můžeme rozlišit senzory vibrací na:

- senzory absolutní
- senzory relativní

[7]



Obr. 1. Absolutní a relativní kmitání hřídele [1]

Absolutní senzor výchylky

Činnost absolutního senzoru výchylky vibrací vyplývá z modelu na (obr. 2). Pružné prvky soustavy jsou charakterizovány tuhostí k (N*m). Tuhost je poměr síly a odpovídající změny deformace pružného prvku. Součinitel lineárního tlumení b (kg*s⁻¹) je parametrem tlumiče u soustavy s jedním stupněm volnosti a je definován silou při jednotkové rychlosti, tj. $F = b \cdot v$. Pro kritické tlumení b_k a pro vlastní úhlový kmitočet ω_0 absolutního senzoru vibrací platí

$$b_k = 2m\omega_0 = 2\sqrt{mk} \quad (1)$$

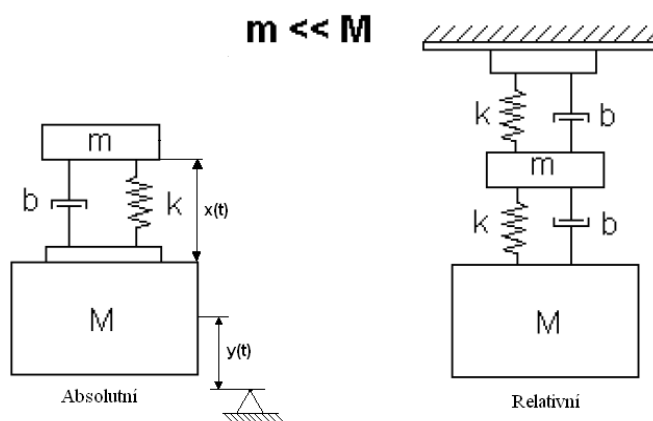
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

kde m je hmotnost soustavy.

Budeme-li předpokládat, že vibrující těleso M vykonává časově proměnný pohyb $y(t)$ vůči fiktivnímu klidovému bodu a že toto vibrující těleso je budičem síly mechanické soustavy, pak pro rovnováhu sil působících na hmotnost m soustavy platí dle (obr. 2) vztahy:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + b \frac{dz}{dt} + kz = 0 \quad (3)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = -m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (4)$$



Obr. 2. Mechanický model absolutního a relativního snímače vibrací [7]

Principiálně může být snímač vibrací řešen jako snímač výchylky kmitů, rychlosti kmitů nebo zrychlení kmitů – akcelerometr, což je dnes také nejčastější případ. Snímání diagnostických signálů se děje při elektronickém zpracování dat senzory, které převádějí mechanickou veličinu na elektrický signál. Elektrické senzory neelektrických veličin dělíme do dvou skupin na aktivní (nepotřebují ke svému provozu zdroj elektrické energie) a pasivní (ke své funkci potřebují napájení z vnějšího zdroje elektrické energie).

Celkové vibrace představují celkovou vibrační energii měřenou v jistém frekvenčním rozsahu. Měřením celkových vibrací stroje nebo jeho částí a porovnáním této hodnoty s její normální úrovní se získají informace o stavu stroje. Měření celkových vibrací používá tato vyjádření: špičková hodnota (peak), špička – špička (peak to peak), průměrná hodnota (average) a efektivní hodnota (RMS) Špičková hodnota (výkmit) určuje vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní. Hodnota špička – špička udává největší rozkmit hodnoceného sinusového kmitu a její použití je výhodné tam, kde pro hodnocení chvění je závazná výchylka chvění. Průměrná hodnota je průměrnou hodnotou amplitudy průběhu vlny. U ideálního sinusového průběhu se průměrná hodnota rovná nule (průběh v kladném i v záporném stavu je shodný). Většina průběhu vln však nemá ideální sinusovou charakteristiku. *RMS* (efektivní hodnota) je odvozena matematickou cestou, porovnávání energií nebo výkonu stejnosměrného a střídavého proudu. Ideální sinusové křivky je efektivní hodnota rovna 0,707 ze špičkové hodnoty.

Měření vibrací je vlastně měřením periodického pohybu. U měření vibrací jsou důležité tři měřitelné veličiny (charakteristiky), a to výchylka, rychlost a zrychlení. K získání správné poruchové charakteristiky se musí k měření vibrací zvolit vhodný způsob měření a typ snímače.

Výchylka určuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze. Ve vibrační diagnostice jsou dnes nejrozšířenější indukčnostní snímače využívající závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které měří relativní vzdálenost mezi dvěma povrchy.

Rychlost se měří v mm.s⁻¹, jako rychlost změny výchylky vibračního signálu. Je to nejběžnější způsob měření vibrací. Nejčastěji se používají poměrně levné akcelerometry, z nichž se hodnota rychlosti získává integrováním hodnot zrychlení.

Vibrace ve formě se měří pomocí akcelerometru. Akcelerometr obvykle obsahuje jeden nebo více piezoelektrických krystalů a hmotné těleso. Je-li piezoelektrický krystal deformován vzniká elektrický signál úměrný zrychlení. Krystal je deformován hmotným tělesem, když těleso kmitá spolu s částí, ke které je akcelerometr uchycen. [7]

3.2 Typy senzorů vhodné ke snímání vibrací

Mechanické vibrace, které se vyskytují, v technické praxi představují pohyby s velmi nízkými amplitudami výchylky u diagnostických signálů a řádově milimetrové pohyby u strojů s vibrační technologií. Ustálená vibrace je charakterizována výchylkou, rychlostí a zrychlením v amplitudě a frekvenci a fází z časového pohledu. Tyto veličiny jsou spolu svázány jednoznačnými matematickými vztahy. Na uvedených skutečnostech jsou založeny i konstrukce snímačů, které snímají časový průběh vibrační veličiny, který je pak zpracováván v měřicím řetězci. Snímače vycházejí z principu měření:

- 1) výchylky vibrací,
- 2) rychlosti vibrací,
- 3) zrychlení vibrací.

Bylo uvedeno, že vibrace je charakterizována amplitudou a frekvencí. Vzhledem k pružnosti a pevnosti konstrukcí splňují amplitudy vibrací určité trendy. Výchylka vibrací se zvyšující se frekvencí výrazně klesá, rychlost vibrací je v obvyklém frekvenčním pásmu zhruba konstantní a amplituda zrychlení stoupá se stoupající frekvencí. Z toho by plynula i efektivní využitelnost jednotlivých typů snímačů. Jako univerzální by se ukazoval snímač rychlosti, pro vysokofrekvenční signály by byl výhodný snímač zrychlení, pro seizmické pohyby a některé stroje s vibrační technologií by byl vhodný snímač výchylky. Nutné je však snímače zkoumat i z hlediska složitosti konstrukce, přesnosti měření a hmotnosti. Nejjednodušší, nejpresnější a nejlehčí se ukazují snímače zrychlení (založený na principu stlačování piezokrystalu), které mají však problémy s přesností u velmi nízkých frekvencí (řádově jednotky Hz). Vzhledem k uvedeným skutečnostem a faktu, že většina budících frekvencí se nachází ve frekvenčním pásmu, kde je zaručena jejich přesnost jsou dnes snímače zrychlení nejrozšířenější.

Snímače rychlosti (většinou založené na indukčním principu) jsou konstrukčně složitější a mají vyšší hmotnost, v praxi se s nimi můžeme setkat především ve spojení s některými analyzátory nebo v případech, kdy uvedené vlastnosti nebrání aplikaci. V principu lze vibrace hodnotit i jinými snímači (např. tenzometry, lasery, atd.), ale jejich aplikace vzhledem ke složitosti nebo vysoké ceně ojedinělá. [9]

3.2.1 Senzory výchylky, polohy a posuvu

Senzory výchylky kmitů, senzory polohy a posunutí lze realizovat na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém, optickém principu. Ve vibrodiagnostice jsou nejrozšířenější indukčnostní senzory, využívající závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu jsou tyto senzory náchylné na parazitní vlivy (např. délka kabelu k měřicím obvodům, vnější elektromagnetické pole). Z těchto důvodů se vyrábějí jako integrované (v kovovém stíněném krytu je kromě cívky zabudována také základní část elektroniky. Tyto senzory mají obvykle kmitočtový rozsah 0 - 10 000 Hz.

Snímače výchylky kmitů zpravidla vynikají vysokou hmotností oproti nízké tuhosti a tlumení. V praxi se vyskytují dosti často, avšak v této skupině snímačů nalezneme i všechny ostatní snímače posunutí, což je velmi důležitý parametr například u délkových teplotních dilatací tepelně energetických strojů apod. [7]

3.2.2 Senzory rychlosti

Pro měření rychlosti kmitání se používají buď senzory zrychlení s tím, že hodnotu rychlosti vibrací získáme následnou integrací a nebo absolutní elektrodynamický senzor. Senzor ve své podstatě měří výchylku vibrací, ale vzhledem k vnitřnímu uspořádání dochází při vzájemném pohybu magnetu a cívky 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. Snímač rychlosti kmitů by měl vynikát vysokým tlumením oproti nízké hmotnosti a tuhosti.

Výhody elektrodynamických senzorů rychlosti:

- nízká cena
- vysoká úroveň výstupního signálu i při nízkých kmitočtech kmitání
- velmi malý vnitřní odpor
- možná aplikace bez zdroje napájení.

Nevýhody:

- omezení horního kmitočtu (max. 3500 Hz)
- citlivost na parazitní magnetická pole.

I přes uvedené výhody se dnes v naprosté většině moderních diagnostických systémů používají piezoelektrické akcelerometry s integrovanou elektronikou. [1]

3.2.3 Senzory zrychlení – akcelerometry [8]

Akcelerometry, senzory pro měření statického nebo dynamického zrychlení, jsou vhodné nejen pro měření odstředivých a setrvačných sil, ale i pro určování pozice tělesa, jeho naklonění nebo vibrací. K tomu se využívá následujících tří principů:

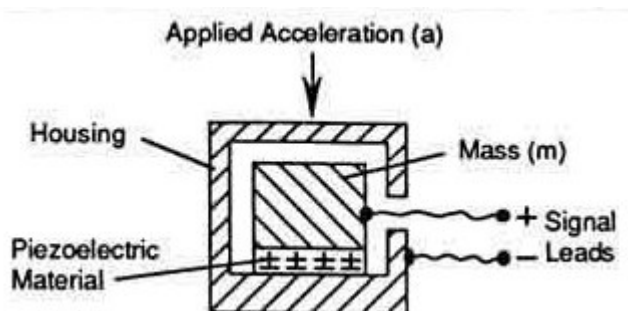
- **piezoelektrické akcelerometry (PE)** - využívají piezoelektrický krystal (přírodní nebo keramiku), který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt
- **piezoresistivní akcelerometry (PR)** - využívá mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu
- **akcelerometry s proměnnou kapacitou (VC)** - využívá mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity

Piezoelektrický akcelerometr

Tyto akcelerometry využívají piezoelektrický materiál, který generuje náboj úměrný mechanickému namáhání vzniklé působící akcelerací. Měření náboje piezokrystalu probíhá buď přímo pomocí externí elektroniky s vysokou vstupní impedancí, nebo častěji vnitřní elektronika senzoru konvertuje náboj na napěťový výstup s nízkou impedancí. Jednoduchá konstrukce umožňuje senzor napojit na jednoduchý vyhodnocovací obvod. Nemohou být použity pro měření frekvencí nižších než 0.1 Hz, tedy měření konstantního zrychlení

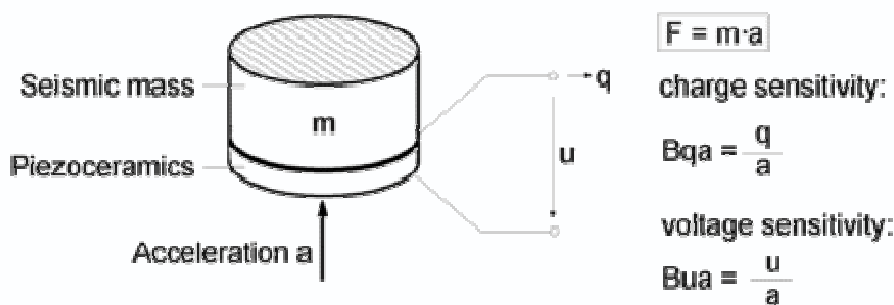
Základ piezoelektrických akcelerometrů tvoří dvě hlavní části:

- **Piezoelektrický materiál (Piezoceramic material)** - snímač měřící zrychlení
- **Seismická hmota (Seismic mass)** - převádí dle Newtonova zákona hodnotu zrychlení na sílu ($F=m \cdot a$)



Obr. 3. Nejjednodušší blokové schéma principu piezoelektrických akcelerometrů

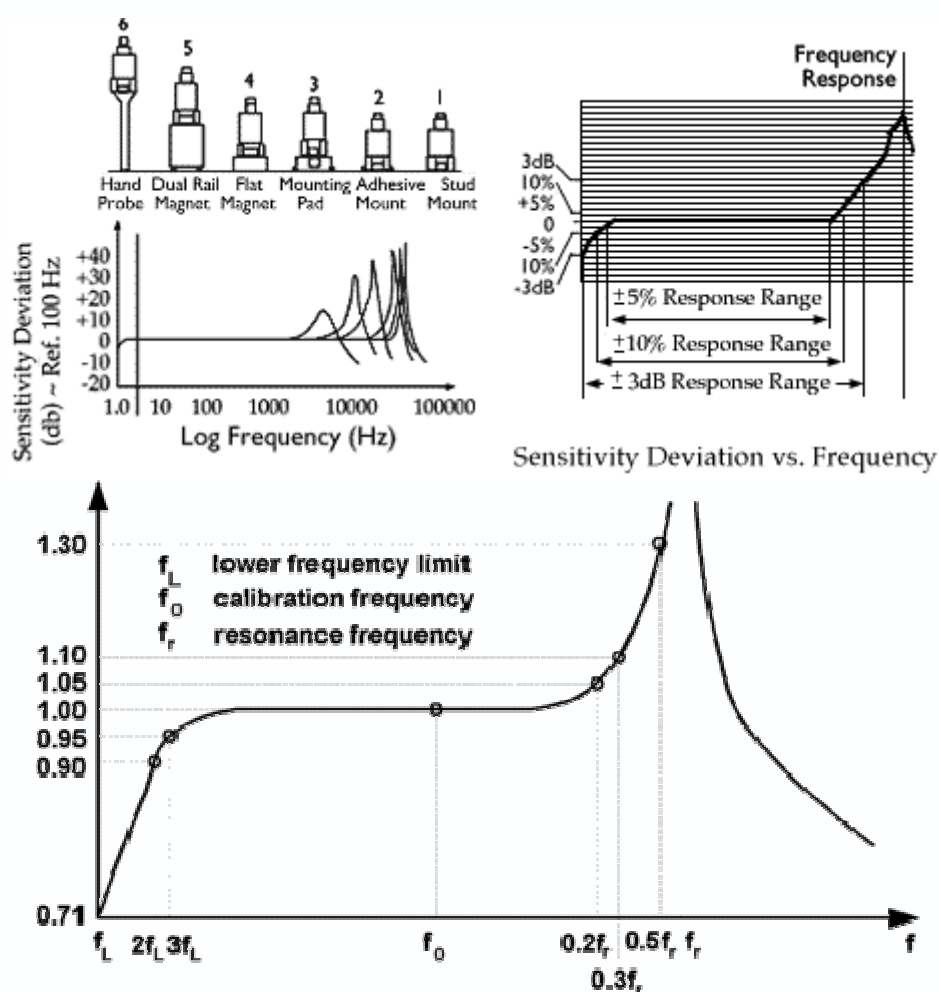
Jedna strana piezoelektrického materiálu (snímač, resp. převodník zrychlení) je upevněna na tuhou podpěru základny senzoru. Část pojmenovaná jako seismická hmota je připevněna na piezosnímač (případně také k druhé straně pouzdra) - viz obrázek 2.3. Jestliže je akcelerometr vystaven zrychlení a (vibracím, akceleraci, otřesům), generovaná síla F , která působí na piezoelektrický element, způsobí vygenerování náboje, resp. napětí na výstupu senzoru. Podle Newtonova zákona je tato síla úměrná zdroji zrychlení a seismické hmotě. Piezoelektrický efekt tak generuje na výstupu náboj q úměrný působící síle. Protože seismická hmota má konstantní hmotnost, výstupní signál v podobě náboje je úměrný akceleraci senzoru. Pokud je akcelerometr pevně upevněn k testovanému objektu, měří i jeho zrychlení (zrychlení celé soustavy). Akcelerometr charakterizuje nábojová citlivost (charge sensitivity) B_{qa} , resp. napěťová citlivost (voltage sensitivity) B_{ua} - viz obrázek 2.4.



Obr. 4. Fyzikální princip piezoelektrického akcelerometru se základními výpočty

Piezoelektrický element je připojen na výstupní elektrické rozhraní přes pár elektrod. Vlastnosti výstupního signálu jsou obvykle dány vnitřními integrovanými elektrickými obvody ICP (Integrated Circuit - Piezoelectric), které přeměňují vysokoimpedanční signál v podobě náboje Q na nízkoimpedanční napěťový signál U .

Z tohoto pohledu může být piezoelektrický akcelerometr považován za mechanickou dolnofrekvenční propust s rezonanční špičkou. Seismická hmota a piezokeramika (včetně dalších pružných komponent) formují pružnou hmotu systému, který se tak chová jako pružina s vlastní rezonancí a tak definuje horní frekvenční limit akcelerometru. Aby bylo dosaženo širšího provozního frekvenčního rozsahu, měla by být rezonanční frekvence pružné hmoty co nejvyšší. Toho se obvykle dosahuje ubráním seismické hmoty. To však naopak snižuje citlivost senzoru. Dle zaměření senzoru se tak vybírá "menší zlo". Například akcelerometr pro měření otřesů a nárazů (shock akcelerometr) potřebuje mít vyšší rezonanční frekvenci na úkor nižší citlivosti, která zde až tak nevadí.

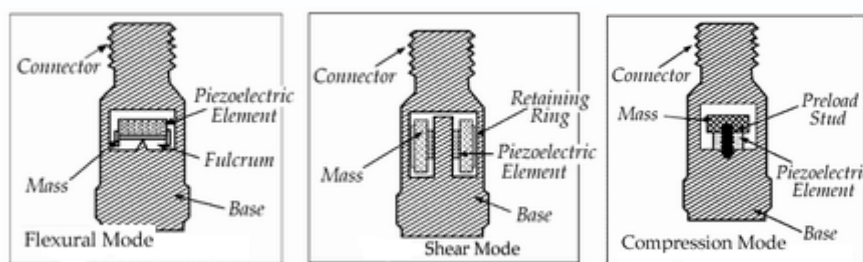


Obr. 5. Typická frekvenční závislost piezoakcelerometrů a závislost citlivosti (sensitivity) na frekvenci (frequency) a provedení senzoru

Typy piezoelektrických akcelerometrů

Akcelerometry pro měření klasického zrychlení, nárazů a vibrací využívají mírně odlišné konstrukce. Ty upřednostňují určité požadované vlastnosti na úkor jiných. Rozdílné je hlavně vzájemné uspořádání komponent: piezoelektrického snímače, seismické hmoty a pouzdra. Nejběžnější jsou následující tři provedení:

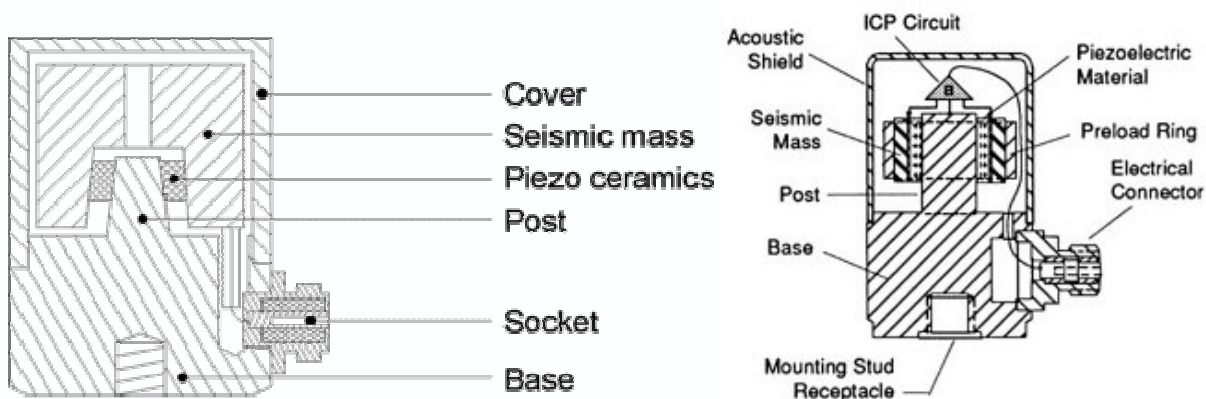
- **Smykový mód (Shear mode)** - pro senzory se zvýšenou odolností na vliv teploty a parazitní vibrace pouzdra
- **Ohybový mód (Flexural mode)** - pro velmi citlivé senzory - seismické akcelerometry
- **Kompresní mód (Compression Mode)** - základní a nejjednodušší provedení - běžné průmyslové akcelerometry



Obr. 6. Všechny obvyklé typy piezoelektrických akcelerometrů

Smykový mód (Shear mode)

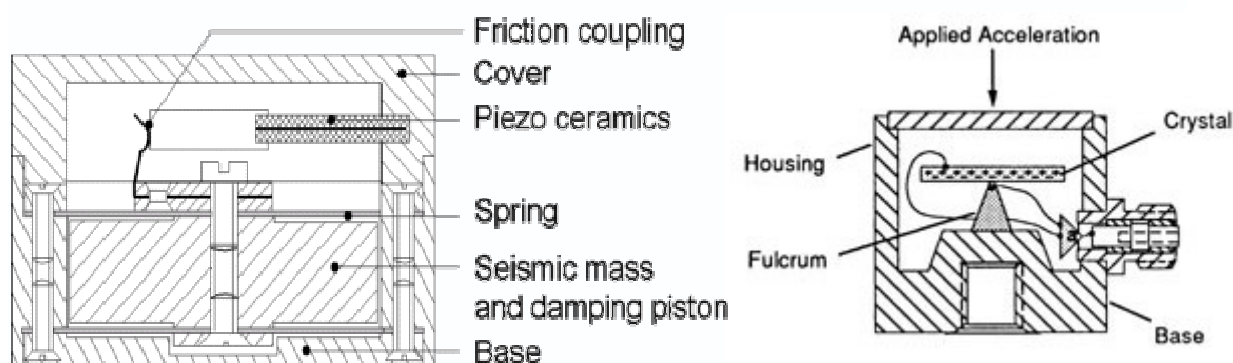
Akcelerometry pracující ve smykovém módu dle (Obr. 7) jsou realizovány spojením nebo jako sendvič snímacího krystalu (piezoelectric material) mezi centrálním nosníkem (post) a seismickou hmotou (seismic mass). Kompresní kruh nebo sloupek (compression ring or stud) působí předpjatou silou vyžadovanou ke vzniku tuhé lineární struktury. Při působení zrychlení hmota způsobuje smykové napětí aplikované na snímací krystal. Izolací krystalu od základny a pouzdra tyto smykové akcelerometry vynikají v eliminaci teplotních přechodů a ohybů základny. Také smyková (shear) geometrie vede na malou strukturu, která minimalizuje zátěžový efekt hmoty na strukturu. To s kombinací se skoro ideálními charakteristikami znamená, že smykové akcelerometry dosahují optimálního výkonu.



Obr. 7. Praktické provedení piezoelektrických smykový akcelerometrů (shear mode)

Ohybový mód (Flexural Mode)

Akcelerometry s ohybovým módem dle (Obr. 8) jsou tvořeny snímacím krystalem ve tvaru nosníku, který podporuje vznik napětí na krystal při působení zrychlení. Krystal může být upevněn k hlavnímu nosníku, který zvyšuje hodnotu napětí. Toto provedení poskytuje nízký profil, malou váhu, výbornou teplotní stabilitu a nízkou cenu. Necitlivost na příčný pohyb je také vlastností této struktury. Obecně se systém s ohybným nosníkem vyznačuje velmi vysokou citlivostí (až 100 V/g), je výborný pro nízké frekvence a nízké přetížení a tedy i nízkofrekvenční aplikace, jako například měření seismické aktivity. Z tohoto důvodu se však moc nehodí na běžné aplikace a je nepoužitelný pro prostředí vystavované velkým nárazům a vibracím.

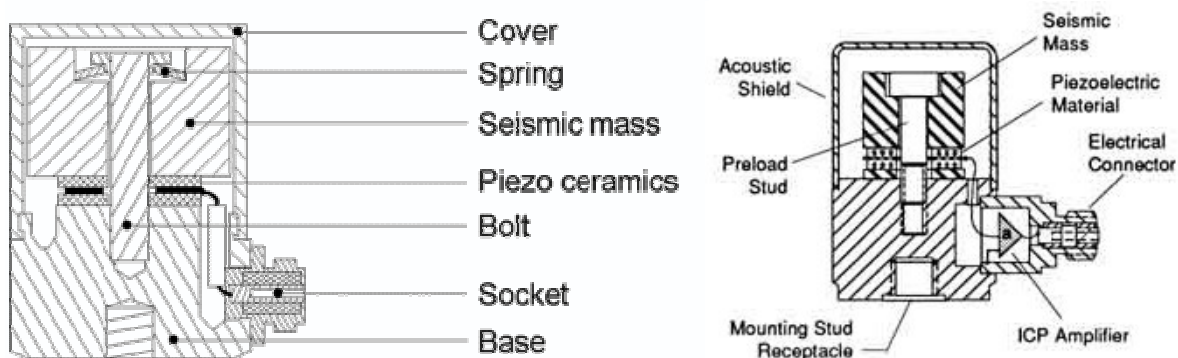


Obr. 8. Praktické provedení piezoelektrických ohybových akcelerometrů (flexural mode)

Kompresní mód (Compression Mode)

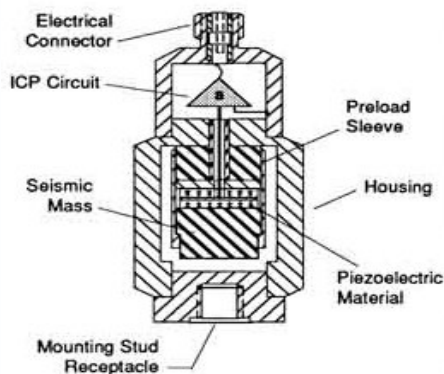
Akcelerometry v kompresním módu patří k základní a nejběžnější struktuře. Nabízejí jednoduchou konstrukci, vysokou tuhost a odolnost a jsou již dlouhou dobu vyráběné a dobře dostupné. Využívají se k běžnému měření v lehkém i těžkém průmyslu a dlouhodobou detekci správné funkce a stavu komponent a zařízení. Akcelerometry s tímto módem se ještě dále dělí na následující tři typy:

- vzpřímená struktura (upright) viz (Obr. 9) - sendvič piezoelektrického krystalu mezi seismickou hmotou a pevnou montážní základnou. Čep nebo šroub zajišťuje upevnění snímače k základně. Když je senzor vystaven zrychlení, seismická hmota zvyšuje nebo snižuje množství síly působící na krystal, jehož elektrický výstup je síle úměrný. Čím větší je seismická hmota, tím je vyšší působící síla a tím i větší signál na výstupu. Z důvodu tuhé struktury se toto provedení vyznačuje vysokou frekvencí, širokopásmovým výstupem a přesnou frekvenční odezvou. Struktura je obecně velmi robustní a vydrží i vysoké krátkodobé přetížení. Samotnou konstrukcí je senzor více citlivý na ohyb pouzdra a na změny teploty.



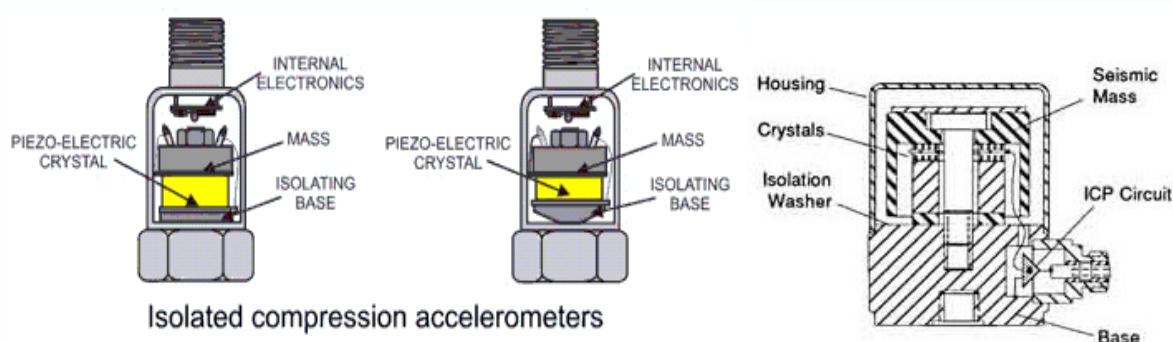
Obr. 9. Praktické provedení piezoelektrických kompresních vzpřímených akcelerometrů (compression upright mode)

- převrácená struktura (inverted) viz (Obr. 10) - izolovaný snímací krystal od montážní základny redukuje vliv ohybu základny a pouzdra a minimalizuje efekty teplotně nestabilní testovací struktury. Často se využívají pro kalibraci jiných akcelerometrů.



Obr. 10. Praktické provedení piezoelektrických kompresních převrácených akcelerometrů (compression inverted mode)

- izolovaná struktura (isolated) viz (Obr. 11) - redukuje velký vliv výstupu na mechanické napětí a změnu tepla základny. Toho je dosaženo mechanickou izolací snímacího krystalu od montážní základny a použitím duté seismické hmoty (seismic mass), která tak funguje jako tepelný izolant. Celá úprava poskytuje stabilní funkci na nízkých frekvencích, kde změny teploty mohou způsobit teplotní drift výstupního signálu.



Obr. 11. Praktické provedení piezoelektrických kompresních akcelerometrů s izolovanou strukturou (compression insulated mode)



Obr. 12. Příklady některých vyráběných piezoelektrických akcelerometrů

3.3 Způsoby uchycení snímačů viz (Obr.5)

Snímač sám o sobě je z dynamického hlediska jednohmotovou soustavou, která má svoji rezonanční frekvenci. Ta se u akcelerometrů pohybuje okolo 60 kHz a tím je dáno využitelné frekvenční pásmo ($1/3 f_{\text{REZ}}$) do 20 kHz. Je-li snímač připevněn k vibrující ploše, vnáší způsob uložení další tuhost, která mění celou soustavu na dvouhmotovou. Dvouhmotová soustava má dvě rezonanční frekvence, původní přísluší snímači, druhá, která je nižší, přísluší způsobu uložení. Tato druhá rezonance pak zužuje použitelné frekvenční pásmo při měření vibrací. V současné době se používají následující způsoby upevnění snímačů vibrací:

- 1) pomocí šroubu,
- 2) pomocí vosku,
- 3) pomocí lepidla,
- 4) pomocí magnetu,
- 5) ruční sondou.

Šroubem se upevňují snímače v případech dlouhodobých aplikací nebo pokud je nutné přesně změřit co nejpřesnější frekvenční pásmo. Rezonance se projeví na cca 30 kHz, tedy užitečný pracovní rozsah končí na frekvenci 10 kHz. U šroubového uchycení je nutno dbát na rovinnost ploch a na dostatečné dotažení snímače a zajištění stálosti upevnění.

Velmi rychle a účinně je možné upevnit snímač voskem. Rezonance se posouvá na cca 30 kHz (užitečný pracovní rozsah na frekvenci 10 kHz). Nevýhodou je aplikace pouze na chladná měřicí místa, mechanická a chemická čistota spojovaných ploch a nutnost minimalizovat vrstvu vosku mezi snímačem a plochou.

Připevnění lepidlem je vhodné pouze pro trvalá umístění a vyžaduje dodržení všech zásad pro vytváření lepených spojů. Rezonance spojení se opět pohybuje kolem 30 kHz.

Velmi často používané je upevnění pomocí magnetu, má výhodu ve snadné aplikaci, rychlosti a jednoduchosti. Předpokladem je ovšem rovinnost ploch a především feromagnetické vlastnosti. Rezonance však klesá na cca 7 kHz (užitečný pracovní rozsah končí na frekvenci 2 kHz).

Nejméně vhodné je použití ruční sondy, což je hrot, který se našroubuje na snímač. Operátor pak drží sondu jako tužku a signál je od zdroje ke snímači přenášen tělesem ruční sondy. Tato skutečnost snižuje rezonační frekvenci na cca 2 kHz (užitečný pracovní rozsah končí na frekvenci 600 kHz).

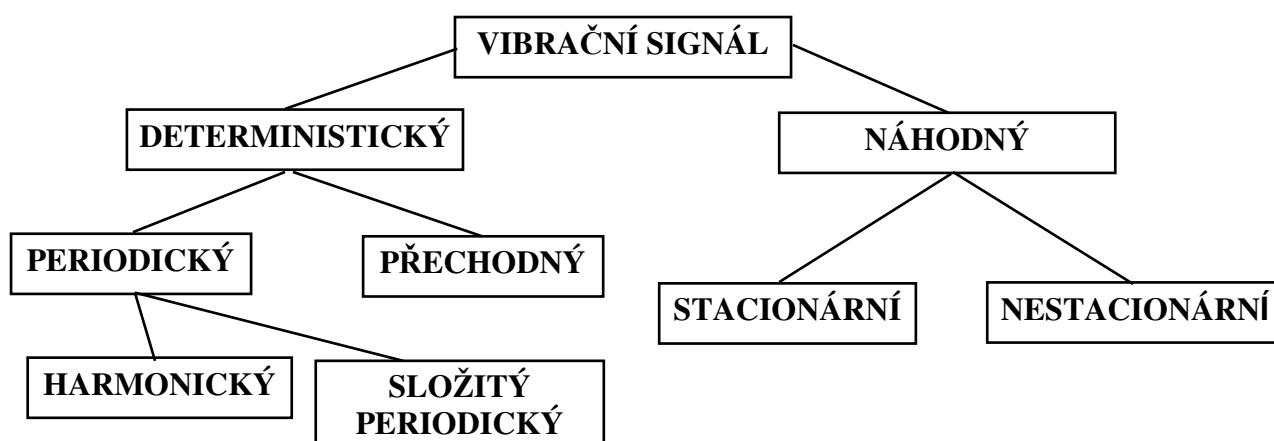
Způsob upevnění je dán především cílem, rozsahem, časovou náročností, opakovatelností a přesností měření. Pro přesné určení užitečného pracovního rozsahu je nutné vycházet z informací výrobce snímače. Především je nutné vycházet z potřebného frekvenčního pásma, přístupnosti měřicího místa a požadavků na rychlost a přesnost měření. [9]

3.4 Analýza a zpracování diagnostických signálů

Tato kapitola se zaměřuje na metody číslicového zpracování a analýzy diagnostických signálů. V dnešní době číslicové zpracování signálu již převážilo díky dostupnosti levných a výkonných signálových procesorů, jednočipových mikropočítačů, specializovaných obvodů (které integrují analogově-číslcové převodníky, mikropočítače a ostatní pomocné obvody) a výkonových osobních počítačů. Dále se uplatňují zásadní přednosti, které zpracování v číslicové formě má: je možné realizovat operace v analogové formě neproveditelné, možnost změny algoritmu zpracování je na rozdíl od analogových provedení jednoduchá, absolutní stálost číslicových parametrů algoritmů, snadný přenos signálů v číslicové podobě. [1]

3.4.1 Signály a jejich rozdělení [9]

Vibrační signály lze na základě jejich časového průběhu a hodnot statistických veličin rozdělit do dvou základních skupin:



- 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
 - přechodné signály – jejich nenulová část je narušena od předchozích kategorií časově omezena; typicky jde o přechodné děje, odezvy na impulzní vybuzení apod.
 - harmonický – ten je popsán funkcí sinus a kosinus
 - složitě periodický – zde se definovaná funkce opakuje po určité periodě

- náhodné signály
 - stacionární signály – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se nemění s časem
 - nestacionární – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se v průběhu času mění

Pro popis náhodných signálů se používají buď číselné charakteristiky jako jsou obecné a centrované statistické momenty 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. Znalost charakteru měřeného signálu je pro diagnostiku důležitá. V měřených signálech se projevují všechny uvedené formy, je tedy důležité je identifikovat a navzájem oddělit.

Periodickým signálům lze přiřadit buzení (příčiny), jsou identifikovatelné ve spektru a průměrováním se jejich hodnoty prakticky nemění. Náhodné signály stacionární (šum) mají spojité spektrum a je nutné je eliminovat (odstranit vliv). Nestacionární signály se dají potlačit průměrováním.

Chybové budič frekvence lze zařadit do kategorie složitých periodických případně harmonických signálů. Je nutné provést analýzu dostatečně dlouhého časového průběhu, aby se průběh realizoval ve velkém množství period, což povede k odstranění náhodných (častěji nestacionárních signálů). [9]

3.4.2 Analýza signálu v časové oblasti

Vyhodnocení signálu v časové oblasti dělíme na vyhodnocení celkového kmitání a časových průběhů signálů. Celkové kmitání souvisí se všemi frekvencemi kmitání v daném měřicím bodě. Porovnává se naměřená hodnota celkového kmitání s předchozím měřením, kdy stroj pracoval bez poruchy. Další srovnání je s nastavenými kritickými hodnotami. Diagnostikování stroje pomocí celkového kmitání je standardní metoda, výhodou je rychlost vyhodnocení a nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je, že signály s malou amplitudou se ztrácejí ve vibračním šumu (z převodovek, ze sousedního stroje) a tato metoda neumožňuje lokalizovat příčinu kmitání stroje.

Pomocí databáze výsledků měření celkového kmitání byly sestaveny doporučení mezních hodnot kmitání, prostřednictvím efektivní rychlosti kmitání v kmitočtovém pásmu 10 - 1000 Hz. Příkladem je vyhodnocení mohutnosti kmitání podle ISO 2372. Mechanické kmitání se měří při jmenovitých otáčkách stroje na ložiskových víkách, případně na ložiskových štítech nebo kostře a to ve třech vzájemně kolmých směrech. [7]

Zobrazení dynamického signálu v časové doméně (hodnota - čas) a frekvenční doméně (amplituda - frekvence) je z energetického hlediska zcela rovnocenné a znamená jen jiný úhel pohledu na tentýž vibrační signál. Většina strojů a strojních zařízení obsahuje rotační součásti nebo součásti a skupiny s periodickým pracovním cyklem, jejichž pohyb lze nahradit (pomocí Fourierovy transformace) jednotlivými sinusovými signály s různou amplitudou a vzájemnou fází. Vzhledem k tomu, že každé takové harmonické funkci přísluší i konkrétní zdroj buzení je frekvenční doména významným nástrojem vibrační diagnostiky. Zatím co v časové doméně nějakému ději odpovídá periodický sled impulsů, ve frekvenční oblasti se tento děj projeví amplitudou na frekvenci těchto impulsů (případně

jejích násobcích), tedy periodický sled impulsů je převeden na jednu jednoduše identifikovatelnou hodnotu.

Transformaci časového signálu do frekvenční domény (na frekvenční spektrum) lze provést obecně dvěma hlavními metodami:

- 1) pomocí pásmové analýzy, kdy je signál filtrován řadou frekvenčních propustí o určité šířce pásma (oktávová analýza u akustického signálu),
- 2) rychlou Fourierovou transformací (FFT) kdy je ze vzorku časového průběhu určitým algoritmem vypočítáno frekvenční spektrum (vibrační signály).

V technické diagnostice strojů pracujících s periodickým cyklem je frekvenční spektrum vibračního signálu základním zdrojem informací o technickém stavu a příčinách poškození jednotlivých strojních součástí, pro které existuje propracovaná metodika stanovení jednotlivých chybových frekvencí. [1]

Pro analýzu periodických signálů se používá Fourierovy transformace. Z matematiky víme, že každou periodickou funkci $f(t)$ s periodou T lze vyjádřit nekonečnou sumou řady funkcí sinus a kosinus. Frekvence každé funkce sinus a kosinus je dána celočíselným násobkem frekvence původní funkce. Jedná se o Fourierovy řady, které lze vyjádřit ve tvaru

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(n2\pi \frac{t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(n2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (5)$$

kde koeficienty jsou dány vztahy

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(n2\pi \frac{t}{T}\right) dt \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(n2\pi \frac{t}{T}\right) dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(n2\pi \frac{t}{T}\right) dt \quad (8)$$

[7]

Ale pro potřeby dnešní výpočetní techniky se vyvinula z Fourierovy transformace metoda o poznání vstřícnější. A to je metoda FFT (Fast Fourier Transformation) rychlá Fourierova transformace, která užívá efektivního algoritmu pro výpočet vztahu pro diskrétní transformaci.

Je k dispozici zpravidla ve všech programech pro PC, využitelných pro technické výpočty. Při použití algoritmu FFT jsme zpravidla omezeni pouze na hodnoty N , které jsou rovny mocnině čísla 2, tj. 256, 512, ... Tato podmínka neplatí obecně pro diskrétní Fourierovu transformaci, ale je to cena, kterou musíme zaplatit za rychlost algoritmu FFT, která je při frekvenční analýze ve většině případů mnohem důležitější. Počet hodnot kmitočtového spektra je poloviční vzhledem k počtu hodnot časového signálu, přičemž $f_{\max}$ je rovna polovině vzorkovací frekvence

$$f_{\max} = 1 / \Delta t \quad (9)$$

To souvisí se Shannonovým vzorkovacím teorémem, podle kterého musí být vzorkovací frekvence alespoň dvakrát větší (Nyquistova frekvence), než je frekvence nejvyšší harmonické složky, obsažené v měřeném signálu (i když nás tak vysoké frekvence nezajímají). V digitální Fourierově transformaci se tato skutečnost projeví tím, že jen $N/2$ hodnot funkce $C(m\Delta f)$. Při reálném měření obsahuje signál z detektoru různé rušivé složky. Některé mívají náhodný charakter, někdy se jedná o harmonické složky vyšších frekvencí, než je maximální frekvence kmitočtových složek daná Shannonovým vzorkovacím teorémem. Náhodný rušivý signál neovlivňuje významně výsledek kmitočtové analýzy. V druhém případě, kdy vzorkovací frekvence je nižší, než by bylo žádoucí vzhledem k nejvyšší frekvenci měřeného signálu (Shannonův teorém), objevuje se v kmitočtovém spektru „nepravé“ výrazné maximum („špička“). Obecně platí, že každá složka s frekvencí $f_s > f_{\max}$ vytvoří v kmitočtovém spektru FFT maximum u frekvence

$$f = |f_{vz} - f_s| \quad (10)$$

Uvedený efekt se nazývá kmitočtové zkreslení (aliasing). [1]

Parametry FFT (Fast Fourier Transform):

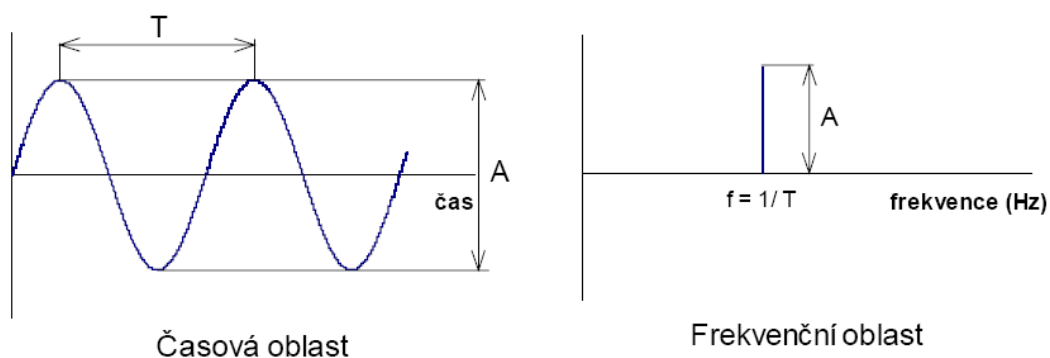
- *Frekvenční rozsah* je základní pásmo od 0 Hz do $f_{vz}/2$, přičemž je toto pásmo nezávislé na počtu vzorků N .
- „Zoom“ faktor M udává při frekvenční lupě kolikrát je frekvenční rozsah menší.
- *Počet spektrálních čar* je obvykle $N/2$, kde N je počet vzorků signálu. Toto neplatí pro tzv. nedestruktivní zoom.
- *Pořadové číslo spektrální čáry* odpovídá číslu časového odměru.
- *Rozlišitelnost frekvenční analýzy* udává interval, tj. rozestup mezi spektrálními čarami.

Je dán vztahy:

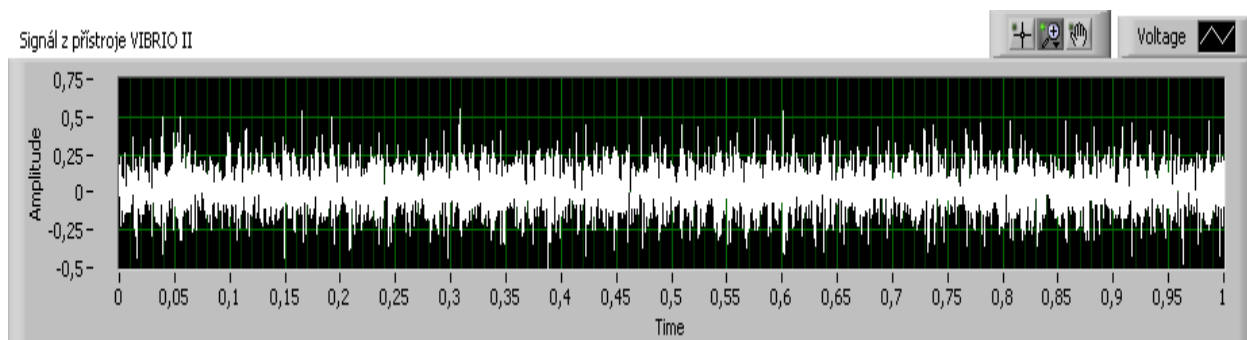
$$r = \frac{1}{T} = \frac{1}{NT_{vz}} = \frac{f_{vz}}{N} \quad (11)$$

- *Šíře pásma* je kromě pravoúhlého okna obecně širší než rozlišitelnost a to dle volby okna. [7]

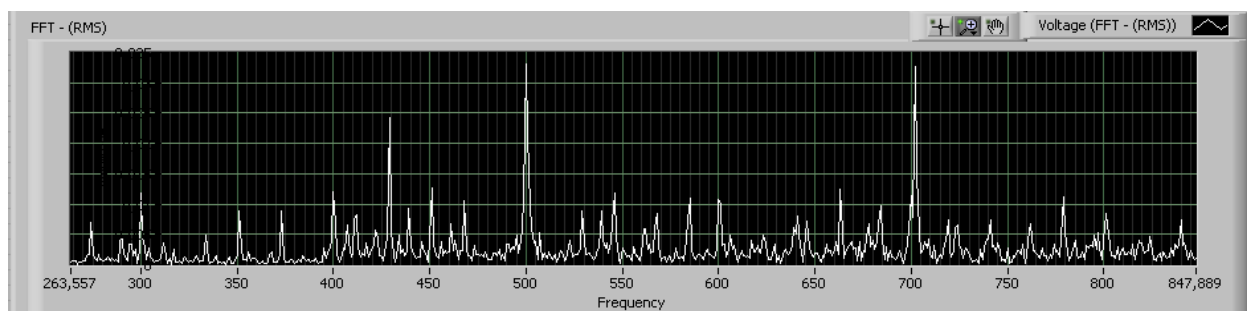
Správná aplikace frekvenční analýzy odstraňuje nevýhody analýzy v časové oblasti viz (Obr. 14). Její pomocí můžeme lokalizovat vznikající poruchy jednotlivých částí objektu. Úplná frekvenční analýza je reprezentována jak amplitudovým tak fázovým spektrem viz (Obr. 15). Fázové spektrum je zvláště důležité pro indikaci typu nevyváženosti a samozřejmě pro metody vyvažování. Frekvenční spektrum tvoří podklad pro rozlišení závad na rotujícím stroji (např. nevyváženosti, ozubená soukolí, ložiska apod.) Průběžné monitorování, zobrazení rozběhů a doběhů strojů a trendy postupného zhoršování technického stavu je možné analyzovat na trojrozměrných diagramech.



Obr. 13. Grafické znázornění převodu z časové do frekvenční oblasti [7]



Obr. 14. Měřený signál v časové oblasti



Obr. 15. měřený signál převedený do frekvenční oblasti

3.4.3 Alternativní metody zpracování signálu

Vedle časových průběhů a FFT spekter jsou vibrační signály zpracovávány jinými metodami, které umožňují lepší analýzu speciálních typů zařízení a podmínek. Zpracování signálů několika metodami zároveň nabízí více způsobů analýzy signálů a více možností zjišťování odchylek od “normy”. [4]

Obálková metoda viz (Obr. 16)

Činnost ložisek a záběr ozubených kol, jež mají opakující se charakter, vytváří vibrační signály s mnohem nižší amplitudou a vyššími frekvencemi, než je tomu u vibračních signálů buzených otáčkami nebo konstrukcí. Odfiltrovány jsou rotační vibrační signály a zesíleny opakující se složky signálů od defektů ložisek.

Cílem obálkování je odfiltrovat vibrační signály nízkých kmitočtů související s otáčkami a zvýraznit signály od závad ložisek, jež se objevují ve frekvenční oblasti přízračné pro poruchy ložisek. Nejběžnější aplikací obálkování jsou závady ložisek s valivými elementy a analýza záběru ozubených kol, kde nízká amplituda opakujícího se vibračního signálu může být skryta ve vibračním šumu stroje pocházejícím od otáček a konstrukce.

Například, pokud se u ložiska s valivými elementy objeví defekt na jeho vnější dráze, pak každý valivý element procházející tímto místem vyvolává malý opakující se signál s frekvencí odpovídající závadě v ložisku. Tento vibrační signál má ovšem tak nízkou energii, že při měření celkových (overall) vibrací je zcela „ztracen“ v šumu, buzeném jinými rotačními a strukturálními jevy.

Aby bylo možné zaměřit se na tyto opakující se složky ve frekvenčním rozsahu, typickém pro defekty ložisek, jsou obálkováním odfiltrovány nízkofrekvenční signály a zvýrazněny periodické rázové signály, které zaměří naši pozornost na opakovací události ve frekvenčním rozsahu, odpovídajícím defektům v ložisku.

V závislosti na použitém monitorovacím zařízení může být výstup obálkování zrychlení buď numerický nebo v podobě spektra (nebo oba typy). [4]

- *Numerická obálková analýza* - Vznikne-li trhlinka, po které se převalují valivé části ložiska, je obálkování efektivní metodou pro zjišťování a monitorování raného stadia poškození ložisek (tzn. dlouho před tím, než dojde k poruše). Ovšem obecně „vyšší než normální“ hodnoty obálky indikují závadu. Pokud není původní průběh signálu k dispozici, použijte jako vodítko pro ohodnocení závažnosti hodnot obálky existující tabulky. [9]
- *Spektrální obálková analýza* - V raném stádiu nemusí být defekt v normálních vibračních spektrech zrychlení a rychlosti detekovatelný, protože se vibrace objevují v takové části frekvenčního pásma ložiska, které nemusí být pomocí FFT zobrazeno, a amplituda vibrací je tak malá, že je skrytá v nízkofrekvenčních vibracích od otáček. [9]



Obr. 16. Princip funkce obávkové metody [10]

SEE metoda

Technologie SEE (Spectral Emitted Energy) poskytuje velmi včasnou detekci závad ložisek a převodů ozubených kol měřením akustické emise generované kovem, je-li poškozen, nebo nastanou-li jisté specifické podmínky. Okolnosti, které mohou vést ke vzniku akustické emise jsou:

- defekty ložisek
- nedostatečné mazání
- mikroprokluzování/tření
- kavitace/proudění
- třískové obrábění kovu
- elektrický oblouk
- elektrický šum
- znečištění mazacího tuku
- dynamické přetížení
- tření ložiska
- elektricky generované signály
- styk rotoru kompresoru (se statorem) tvoření trhlinek (nebo „křupání“ cínu)
- kontakt kov-kov

Technologie SEE používá speciální snímače akustické emise, které „slyší“ ultrazvukovou akustickou emisi vznikající následkem poškození elementů ložisek (tato akustická emise se objevuje ve frekvenční oblasti 150 - 500 kHz). Takový signál není ani tak vibračním signálem, jedná se spíše o zvuk o vysoké frekvenci, přesto název vibrace je běžně užívaným technickým termínem.

Díky schopnosti metody SEE měřit ultrazvukový signál (akustickou emisi) vznikající následkem degradace kovu máme k dispozici nejlepší nástroj ke zjišťování defektů ložisek v jejich raném stádiu, to znamená v době, kdy se defekt nachází buď pod povrchem, nebo je tak mikroskopický, že neemituje žádný měřitelný vibrační signál. Z tohoto důvodu je měření SEE velmi účinnou metodou ke zjišťování závad, jež jsou zdrojem akustické emise, například koroze třením, kavitací, prokluzováním nebo jinými třecími efekty.

Pokud hodnoty SEE stoupají, monitoruje ložisko podrobněji (zkrátte intervaly měření a použijte multiparametrické monitorování). Trendování hodnot získaných metodou SEE, obálkováním, měřením teplot a vibrací vám nejlépe umožní analyzovat problém a určit nejvhodnější dobu pro opravu. Dobrá znalost stroje a logický přístup k řešení problémů významně napomáhá správně určit nápravné kroky. [4]

Z pohledu analýzy nejčastěji mluvíme o:

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

Čísla jsou uvedena ve stupnici SEE:

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

Tato čísla slouží jen pro orientaci. Zkušenost s trendováním měřených hodnot vám pomůže zjistit, které hodnoty platí pro váš monitorovaný stroj. [9]

- *Spektrální analýza SEE* - počínající mikroskopické defekty ložisek nejsou na normálních vibračních spektrech rychlosti a zrychlení vůbec pozorovatelné, ale opakující se akustické signály vznikající působením počínajícího defektu jsou zesilovány, tzn. projeví se jako špičky na poruchové frekvenci. Lze tedy říci, že pokud se na SEE spektrech neobjeví žádné špičky, pak to znamená, že neexistuje žádný akustický signál SEE. [9]

Kepstrální analýza [9]

Frekvenční analýza je zjednodušeně řečeno matematická metoda, která v časovém průběhu vibračního signálu hledá periodické (pravidelně se opakující) děje, které potom v souřadném systému frekvence-amplituda (frekvenční spektrum) zobrazí jako jednotlivé čáry. Energie nesená časovým průběhem vibrace musí být stejná, jako energie obsažená ve spektru vibrací. Kepstrální analýza je metoda, která hledá periodické děje ve frekvenčním spektru, tedy pravidelně se opakující rozdíly mezi sousedními frekvenčními čarami. Metoda je tedy vhodná pro případy, kdy má frekvenční spektrum několik nosných frekvencí, na které jsou namodulována boční pásma. V kepstru je potom vyznačen jednotlivými čarami odstup bočních pásem. Vzhledem k tomu, že kepstrum je frekvenční analýzou frekvenčního spektra, bude na vodorovné ose kepstra (z důvodů ryze matematických) čas. Chceme-li tedy určit s jaká je modulace jednotlivých nosných frekvencí, nebo které frekvence mají ve spektru své vyšší harmonické násobky, stačí časový údaj na vodorovné ose kepstra t převrátit.

Z uvedeného je zřejmé, že kepstrální analýza je metodou, která je pomůckou pro orientaci diagnostika v naměřeném spektru. Je vhodná především pro diagnostiku převodovek, pro identifikaci amplitudové a frekvenční modulace. Nutnou podmínkou je, že frekvenční analyzátor má v sobě kepstrální analýzu obsaženu.

Poněkud neobvyklé pojmenování metody (Cepstrum) vzniklo přehozením písmen ve slově spectrum, podobně na vodorovné ose kepstra je quefrencce (z výchozí frequency), v kepstru lze dále nalézt harmonické frekvence (z výchozí harmonické frekvence).

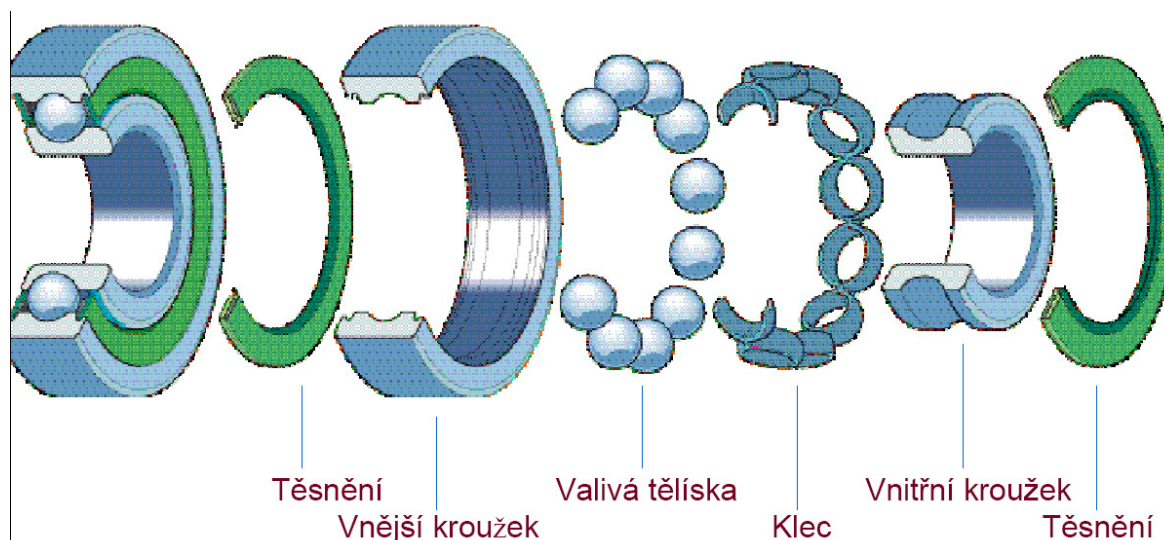
Zkušený diagnostik je schopen údaje o modulaci nebo vyšších harmonických vyčíst přímo ze spektra, musí však vhodně volit nastavení analýzy, využít funkce „zoom“ a orientovat se v kinematickém schématu strojního zařízení. Kepstrální analýza není oddělenou samostatnou metodou, její výsledky musí být hodnoceny současně se spektrem vibračního signálu, bez kterého by metoda neměla smysl.

4 Valivá ložiska

Valivá ložiska viz (Obr. 17,18) patří k významným a velmi přesným strojním součástem, které umožňují přenos zatížení při vzájemném otáčivém nebo posuvném pohybu jeho částí. Síly jsou přenášeny pomocí valivých těles, které jsou umístěny v kleci nejčastěji mezi kroužky, tím je nahrazeno kluzné tření značně menším valivým. Podle směru převažujících přenášených sil dělíme valivá ložiska na radiální (většina sil působí kolmo na osu otáčení) a axiální (většina sil působí ve směru osy otáčení). Neexistuje přesná hranice mezi těmito základními skupinami ložisek, protože většina radiálních ložisek může přenášet také axiální síly a některé druhy axiálních ložisek jsou schopny zachytit i radiální zatížení. Podle tvaru valivých těles se rozlišují v každé skupině ložiska kuličková, válečková, jehlová, soudečková a kuželíková. Základní únosnost je v rozměrových tabulkách uvedena pro to zatížení, které převládá. Zatížení se dělí na statické a dynamické. Při statickém zatížení je ložisko zatíženo v klidu nebo při pomalém pohybu a při dynamickém se zatížené valivé ložisko otáčí.

Z hlediska výpočtů je pro statické zatížení rozhodující trvalá deformace na funkčních plochách ložiska, v případě dynamického zatížení je pro výpočet rozhodující trvanlivost ložiska. Pod pojmem trvanlivost se rozumí počet otáček, které ložisko vykoná nebo dobu chodu, než se objeví první známky kontaktní únavy na materiálu valivých těles nebo oběžných dráhách. Podle doporučení ISO s ohledem na provozní bezpečnost byla stanovena základní trvanlivost L_{10} , tj. trvanlivost, které dosáhne nebo ji překročí 90% většího množství stejných ložisek při stejných provozních podmínkách.

Největší neproměnné zatížení, při jehož působení dosáhne 90% ložisek z větší skupiny stejných ložisek základní trvanlivosti milionu otáček, je nazýváno základní dynamickou únosností C_{10} . Základní dynamická únosnost je u radiálních ložisek určena pro neproměnné čistě radiální zatížení a u axiálních ložisek pro neproměnné čistě axiální zatížení. Vztah mezi základní trvanlivostí, základní dynamickou únosností a zatížením ložiska vyjadřuje rovnice trvanlivosti, která platí pro všechny typy ložisek. Pokud je ložisko zatěžováno v radiálním i axiálním směru, dosazuje se do rovnice ekvivalentní zatížení, které má stejný vliv na vznik poruchy jako působení axiálního a radiálního zatížení zároveň. Modifikovaná rovnice trvanlivosti obsahuje součinitele, které přibližují skutečné provozní podmínky: mazání, typ ložiska, uložení a zatížení. Doba do vyřazení ložiska z provozu kvůli ztrátě požadovaných provozních vlastností i z jiných příčin, než je pitting, je nazývána životností ložiska. [5]



Obr. 17. Popis částí ložiska [10]



Obr. 18. Valivá ložiska [5]

4.1 Poškození valivých ložisek

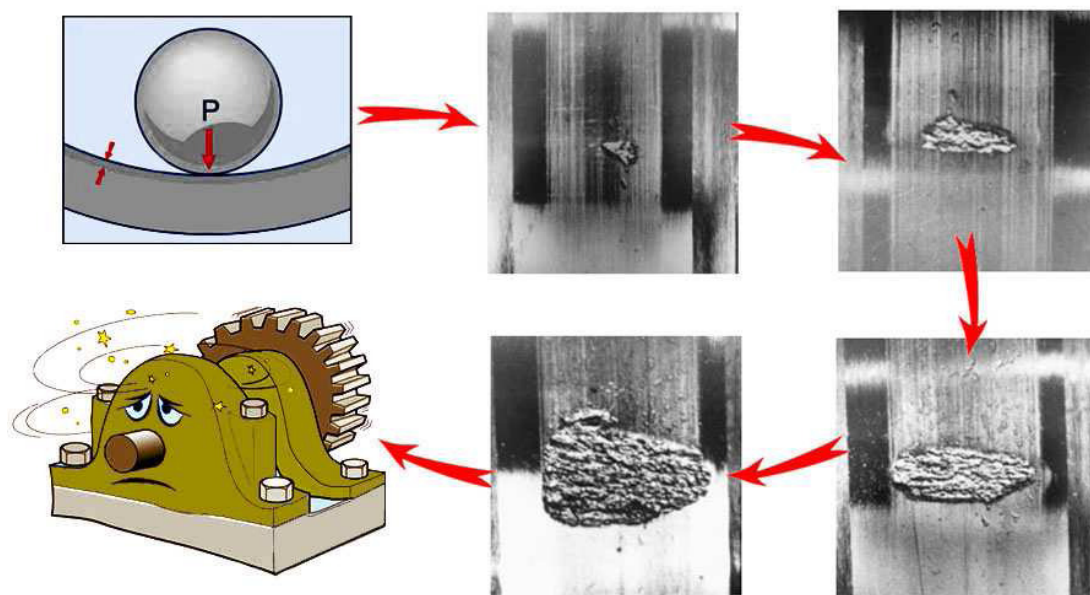
Valivá ložiska, stejně jako jiné strojní součásti, podléhají degradačním procesům opotřebení, které jsou způsobeny interakcí zatížených a vzájemně pohybujících se povrchů nebo vlivem provozního prostředí, a vedou k úbytku materiálu. V extrémních případech může vlivem kumulace poškození nebo velkých rázů dojít k lomům materiálu. Ve většině případů poškození ložisek nebývá prvotní příčinou problému, bývá obvykle následkem jiné závady stroje. Rozlišuje se poškození kroužků, valivých těles, klece a popř. těsnění. Za ideálních provozních podmínek bývá příčinou omezené životnosti ložisek zpravidla pouze vydrolování materiálu provázeno vznikem důlků s charakteristickým lasturovým lomem, tzv. pitting dle (Obr. 19). Jedná se o kontaktní únavu materiálu, která je způsobena opakujícím se místním zatížením na kroužku nebo valivém tělese. [5]



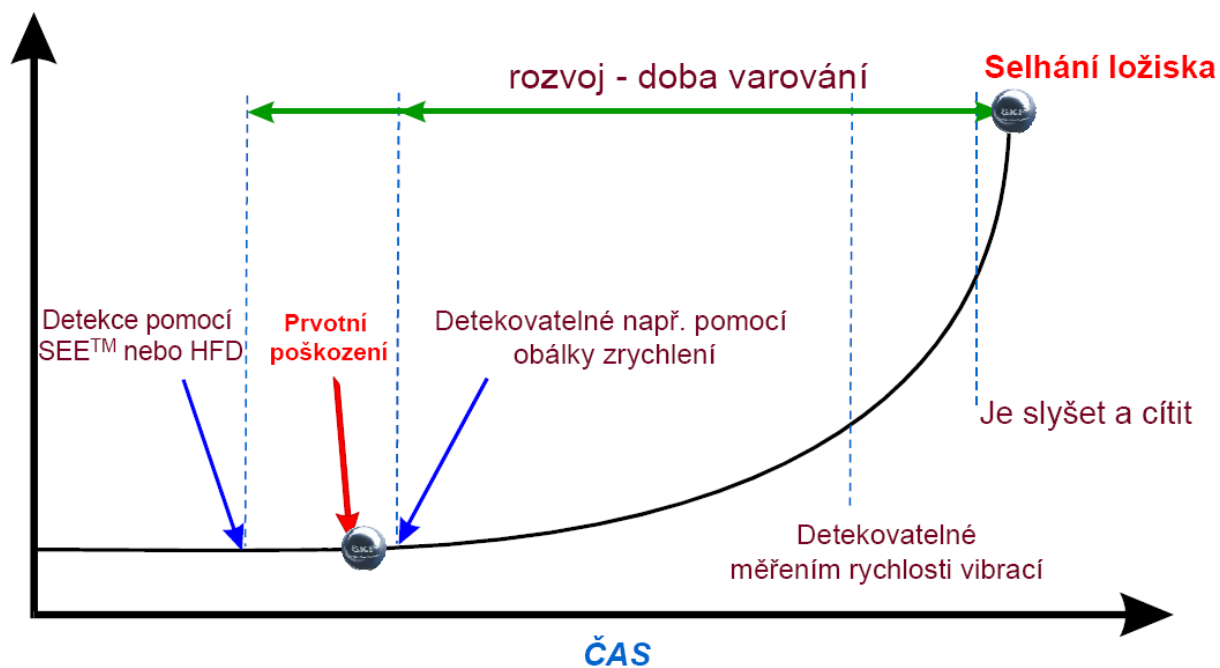
Obr. 19. Pitting na kroužku ložiska a valivém tělese [5]

V běžných provozních podmínkách mohou být poškození valivých ložisek způsobena nesprávnou montáží a uložením (volba nevhodného nářadí nebo postupu, nešetrné zacházení, nadměrné nasunutí, nesouosost, nevyváženost, nesprávný geometrický tvar hřídele, nekvalitní opracování stykových ploch), provozními podmínkami a údržbou (nevhodné mazání, extrémní teploty, vlhkost, znečištění, přetěžování, vibrace, předpětí, průchod elektrického proudu, koroze). K těmto poškozením patří zejména opotřebení způsobené abrazivními částicemi, vibracemi nebo nedostatečným mazáním, při kterém dochází k prudkému zvýšení teploty, vtisky způsobené částicemi nečistot, chybnou montáží nebo přetížením, poškozená čela valivých těles a přírub, oděr valivých těles a oběžných dráh prokluzu, styková nebo hloubková koroze, poškození způsobené průchodem elektrického proudu, odlupování způsobené předpětím, oválnou deformací, axiálním zatížením, nesouosostí, vtisky, oděrem, stykovou korozí, rýhami, jamkami a trhliny způsobené nešetrným zacházením, nadměrným nasunutím, oděrem nebo stykovou korozí. Poškození klece bývá způsobeno vibracemi, nadměrnými otáčkami, opotřebením oděrem, zablokovaním nebo nesouosostí. Klec je vyrobena z měkčího materiálu, proto je jako první ovlivněna nedostatečným mazáním. Pokud se otvory pro valivá tělesa zvětší následkem opotřebení, mohou výsledné síly vést k rozlomení klece. K lomům klece mohou také vést setrvačné síly způsobené vibracemi nebo nadměrnými otáčkami.

Důležitá je velikost a rozsah poškození, které určují, zda ložisko dosahuje požadovaných vlastností. Podstatná je také rychlost vývoje poškození dle (Obr. 20,21), která určuje životnost ložiska. Z hlediska diagnostiky je s ohledem na použití zařízení a metod důležité rozlišovat v jakém stádiu se poškození nachází. Prvotním poškozením je nazýván jev, kdy dojde k prvnímu styku kov-kov, přitom vzniká akustická emise, která se šíří tělesem ložiska. [5]



Obr. 20. Vývoj poškození ložiska [5]



Obr 21. Typický vývoj poškození ložisek [10]

4.2 Přehled metod k měření stavu valivých ložisek

Všechny metody zjišťování stavu valivých ložisek vychází z poznatku, že odvalováním poškozeného prvku ložiska dochází k nárůstům úrovně vibrací. [9]

Obálková - Envelope analýza [13]

Obálková analýza představuje metodu, která nejen indikuje porušení ložiska, ale ve spojení s FFT analýzou také určí, která část ložiska je poškozena. Pro tyto účely rozlišujeme vnější a vnitřní kroužek, valivé elementy a klec ložiska. Protože každá z těchto komponent má různou relativní rychlost vzhledem k hřídeli, dají se určit frekvence, na kterých se projevují tyto poruchy.

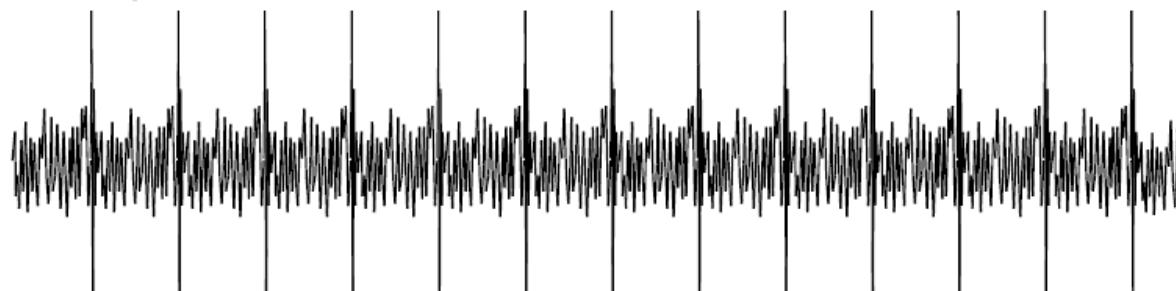
Bezvadné ložisko



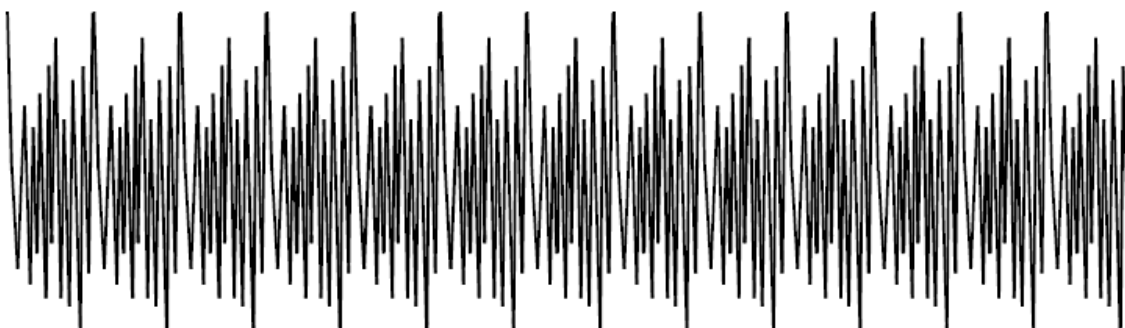
První známky poškození



Vážné poškození



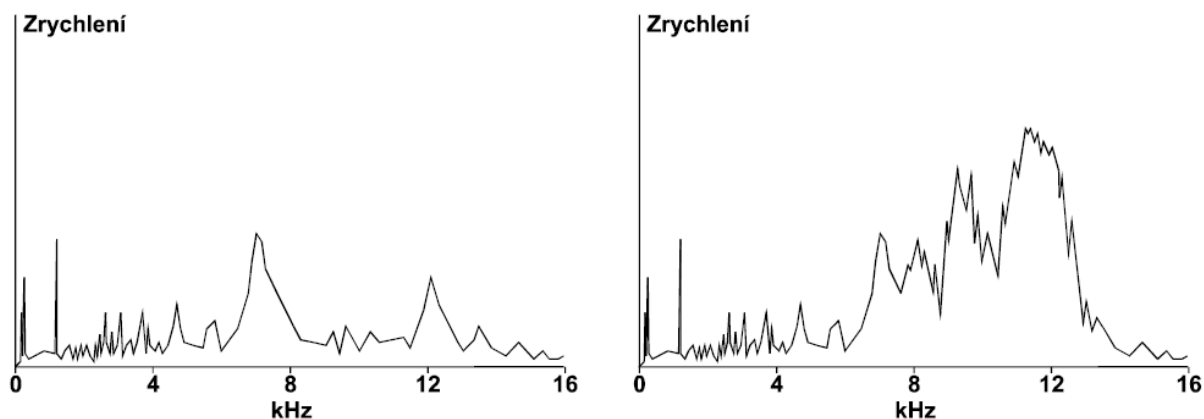
Nepřípustný stav



Obr. 22. Příklad poruchových frekvencí

Princip metody je v měření rázových impulsů, které vznikají při porušení dráhy, po které se odvalují kuličky nebo válečky. Následující obrázky (Obr. 22) ukazují názorně vývoj poruchy ložiska.

Obálková analýza spočívá v úpravě vstupního signálu pomocí vysokofrekvenčního filtru a obálkového detektoru. Tím je signál připraven pro použití FFT analýzy a určení poruchové frekvence. Na následujícím grafu (Obr. 23) je ukázka FFT spekter, které odpovídají bezvadnému stavu a prvním známkám poškození.



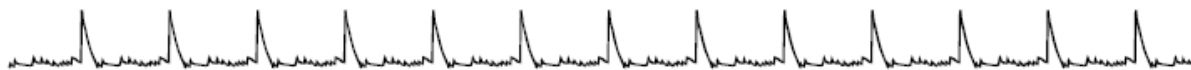
Obr. 23. Ukázka FFT spekter neporušeného a porušeného ložiska

Je zřetelné, že došlo ke zvýšení vyzařování energie na frekvencích od cca 8 do 14 kHz. Signál je nyní zpracován obálkovým modulátorem, který zajistí zvýraznění opakujících se rázových impulsů viz (Obr. 24).

Signál před modulací

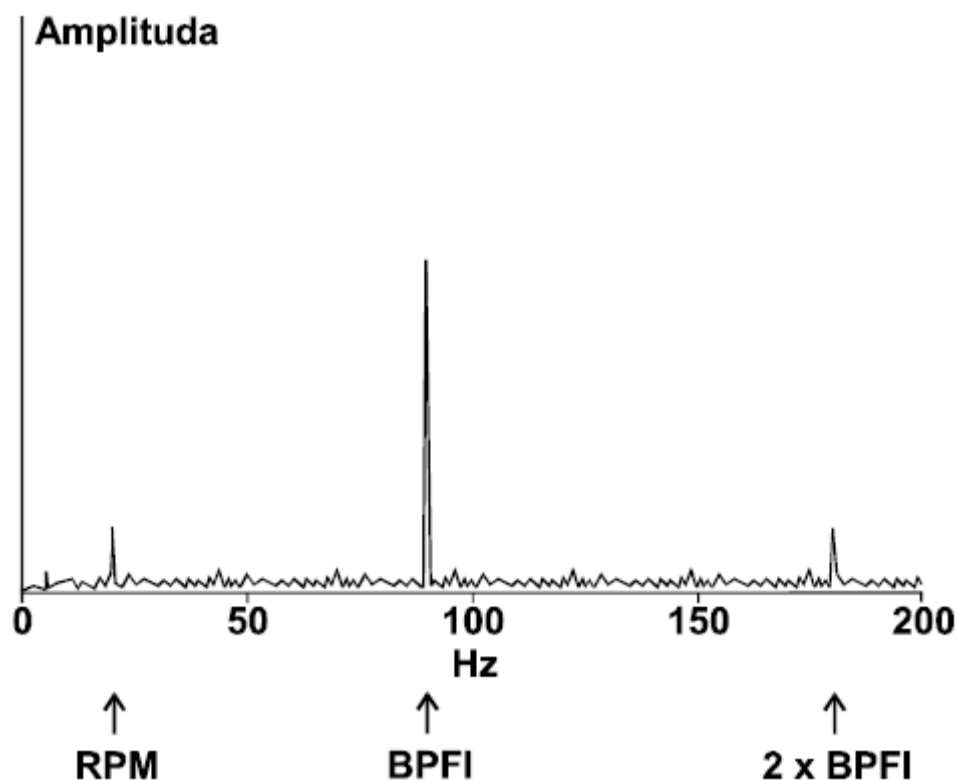


Modulovaný signál



Obr. 24. Signál před a po modulaci

Jestliže modulovaný signál zpracujeme do FFT spektra viz (Obr. 25), objeví se v něm právě opakovací frekvence rázových impulsů. Protože modulované rázy nemají charakter harmonického signálu, objeví se obvykle i řada harmonických složek. Také je běžné, že poruchové frekvence jsou namodulovány na nosné frekvence, obvykle otáčkové.

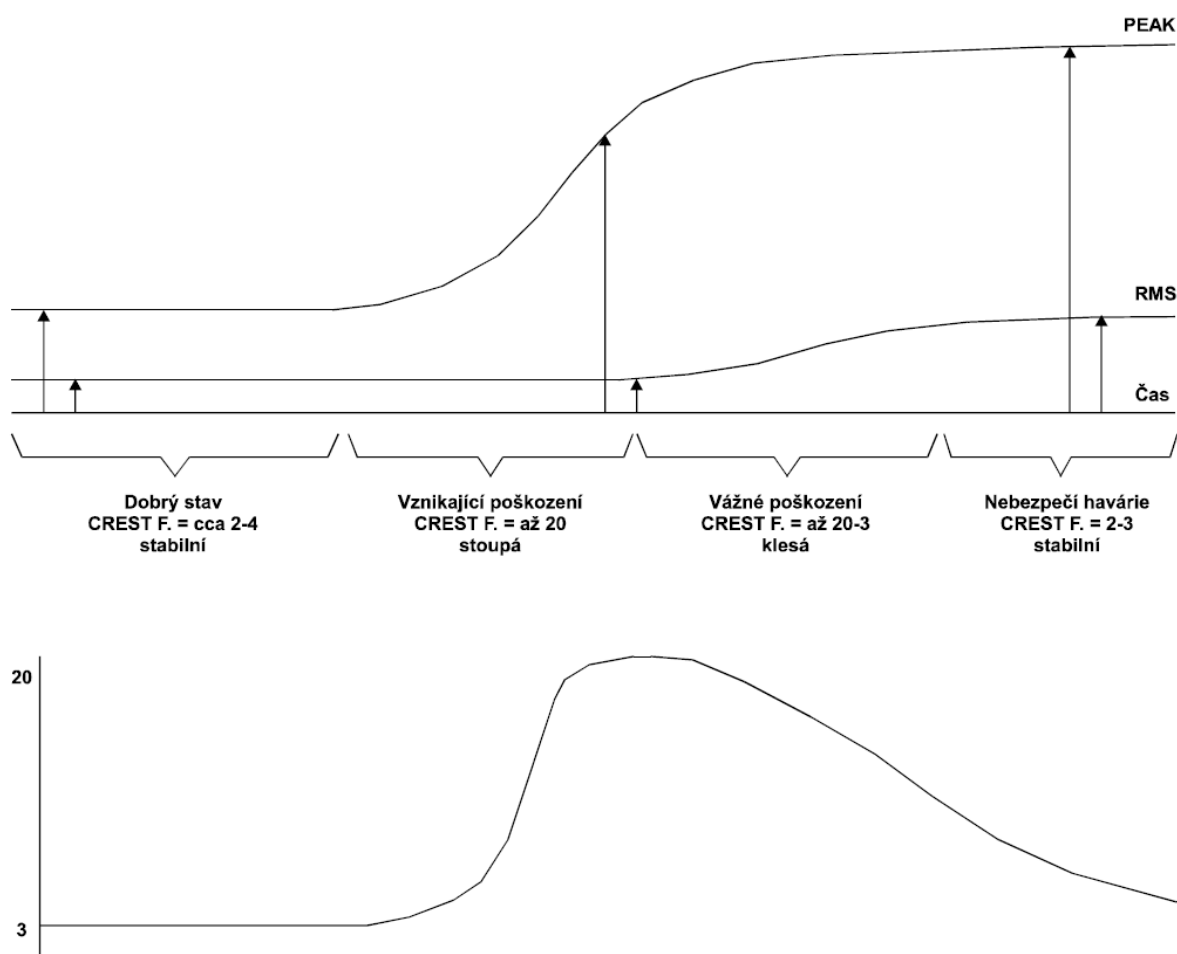


Obr. 25. Modulovaný signál v FFT spektru

Crest factor [13]

Měření hodnoty Crest faktor viz (Obr. 26) patří mezi základní metody diagnostiky valivých ložisek. Princip metody spočívá v měření efektivní a špičkové hodnoty vibrací a ve výpočtu jejich poměru PEAK/RMS. Protože se vyhodnocuje poměr dvou hodnot, je tato metoda zcela nezávislá na typu ložiska i na otáčkách hřídele. Crest faktor je velmi citlivým parametrem při vzniku mechanického poškození ložiska, které rozpozná již ve velmi ranném stádiu. Je také vhodným pomocným indikátorem poruch mazání.

$$K_v = \frac{a_v}{a_{ef}} \quad (12)$$

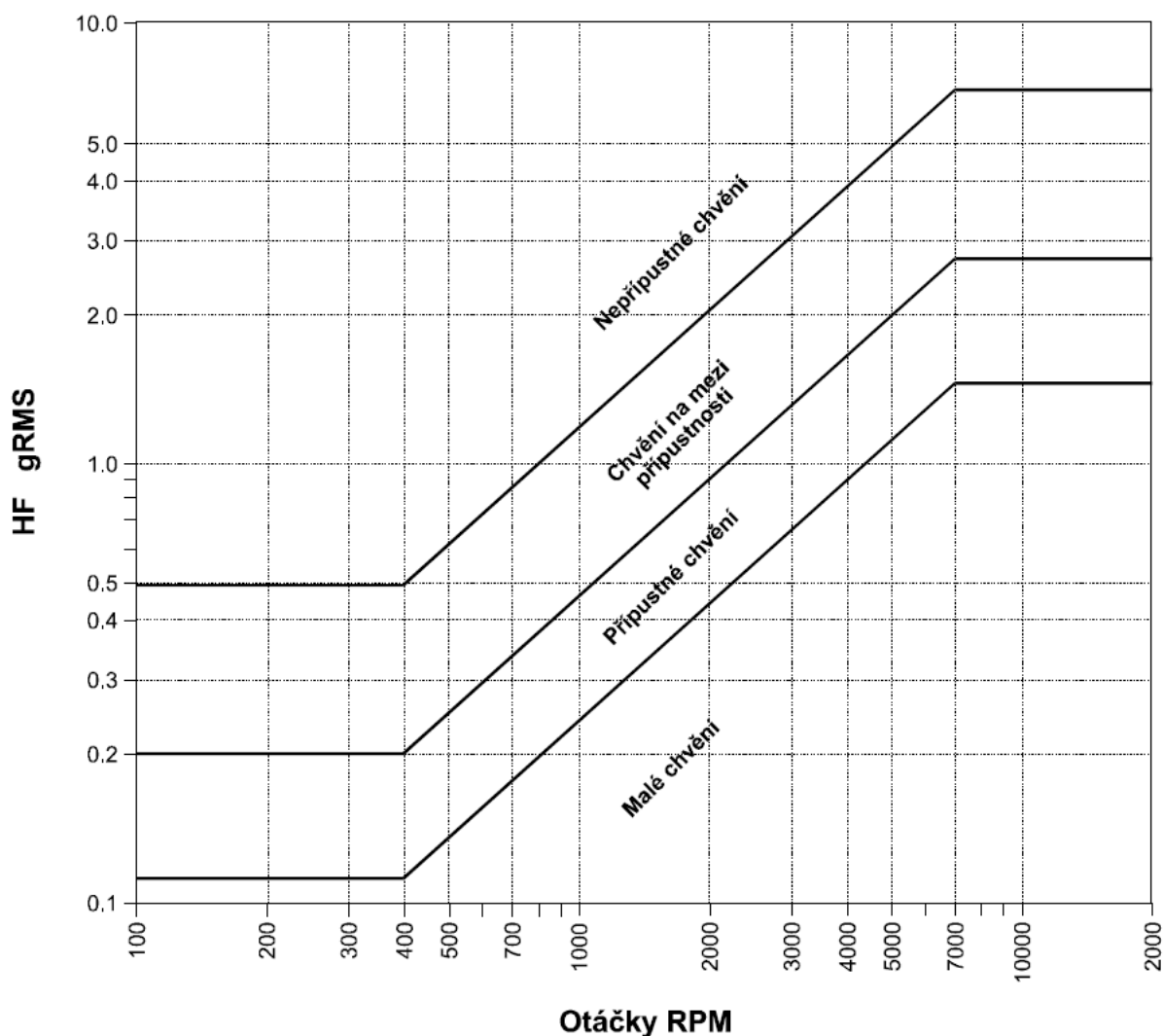


Obr. 26. Časový průběh Crest faktoru

HF - High Frequency Emission [13]

Měření parametru HF je základní metoda pro analýzu valivých ložisek. Vychází z poznatku, že při začínajícím poškození narůstá energie vibrací ve vyšších frekvencích. Parametr HF je vysoce citlivý na poruchy mazání. Indikuje jak nedostatečné mazání, tak také přítomnost mechanického znečištění v mazivu. Metoda HF je výsledkem zkoumání poruch ložisek ve firmě Adash a vlastního vývoje měřicích postupů.

Emitovaná vysokofrekvenční energie je vyhodnocena do efektivní hodnoty a vyjádřena v jednotce g (9.81 m/s^2). Hodnoty gRMS jsou závislé na otáčkách hřídele a pro vyhodnocení závažnosti poruchy se používá následující graf viz (Obr. 27).



Obr. 27. Graf závažnosti poruch ložiska

Kurtosis faktor

Kurtosis parametr reprezentuje oproti ostatním metodám analýzy stavu ložisek statistický přístup. Základem úvahy je skutečnost, že náhodný vibrační signál má Gausovo normální rozdělení, tj. nevyskytují se v něm harmonické ani vysokofrekvenční pravidelné složky. Jestliže potřebujeme určit, zda vibrační signál tuto podmínku splňuje, lze vypočítat dva parametry, podle nichž se dá určit, zda rozdělení je skutečně Gausovo. Jmenují se šikmost a špičatost. Pro účely vibrační diagnostiky se používá především špičatost. Šikmost je ovlivněna symetrií rozdělení signálu a tato vlastnost není pro vyhodnocení stavu tak důležitá. V praxi se tento parametr nazývá Kurtosis parametrem. Tak jej poprvé nazvali v British Steel Company, když tuto metodu začali zkoumat. [13]

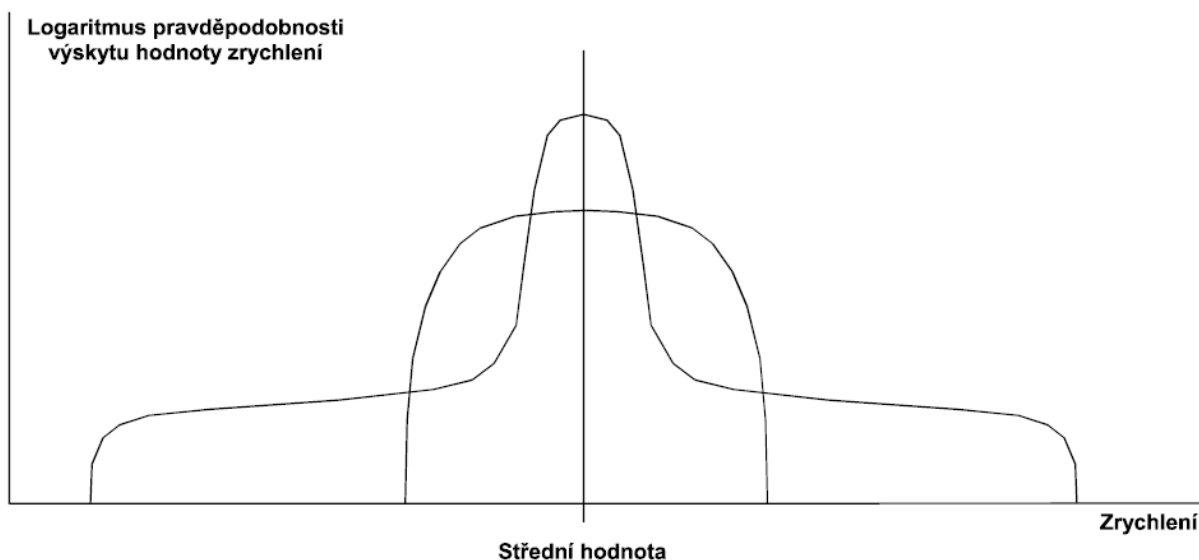
Kurtosis je posouzení statistického rozdělení amplitud chvění se zřetelem na odchylku od normálního rozdělení ve frekvenčním rozsahu 2,5 - 80 kHz při rozdělení do pěti frekvenčních pásem. Hodnotí se podle velikosti tzv. K – faktoru viz (Obr. 29).

$$Ka = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 * P(x) dx}{\sigma^4} \quad (13)$$

x - amplituda signálu, $\bar{x}$ - střední hodnota signálu x , $P(x)$ – hustota pravděpodobnosti rozdělení, σ - směrodatná odchylka nebo efektivní hodnota vůči nulovému střednímu signálu. [9]

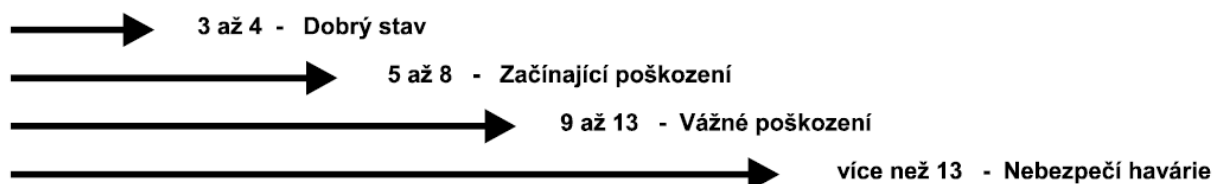
Pásma

- K1 3 – 4 kHz
- K2 5 – 8 kHz
- K3 9 – 13 kHz
- K4 13 – více kHz



Obr. 28. Srovnání rozdělení signálu pro dobré a poškozené ložisko [13]

Hodnoty Kurtosis Faktoru a odpovídající stav ložiska



Obr. 29. Hodnoty K faktoru [13]

SPM (Shock Pulse Method)

Snímání krátkodobých tlakových vln vyvolávaných mechanickými rázy, které vznikají vlivem drsnosti ložiskových drah a valivých těles. Tzv. rázové impulsy snímány v rozmezí 30 - 40 kHz. Snímáme tzv. prahovou úroveň (dBc) a špičkovou úroveň (dBm) a zakreslujeme do grafu. Je nutné znát přesné rozměry a parametry ložisek – instalace měřících míst. [10]

Technologie SEE (Spectral Emitted Energy)

Poskytuje velmi včasnou detekci závad ložisek a převodů ozubených kol měřením akustické emise generované kovem, je-li poškozen nebo nastanou-li jisté specifické podmínky. [10]

BCU (Bearing Condition Unit)

Vybuzení kmitání ve snímači v rezonanční oblasti 36-38 kHz. Podle energie buzení trvá odezva různou dobu. Vyhodnocuje se vnitřní energie a četnost rázů. Z těchto hodnot se vytváří hodnota BCU. Hodnota je velmi závislá na rozměrech ložisek. [10]

K(t) parametr (definovaná prof. A. Sturmem)

Závislost parametru na velikosti ložiska.

Vyhodnocení vztahu

$$K_{(t)} = \frac{a_{ef(0)} * a_{c(0)}}{a_{ef(t)} * a_{v(t)}} \quad (14)$$

$a_{ef(0)}$, $a_{ef(t)}$ – efektivní hodnota zrychlení v čase (0) a (t) (mm/s²)

$a_{v(0)}$, $a_{v(t)}$ – výkmit zrychlení v čase (0) a (t) (mm/s²)

[10]

Q Metoda (ČVUT Praha – 1989)

Vyhodnocuje se poměr mezi střední a špičkovou hodnotou amplitudy emitovaného ultrazvukového signálu na pracovní frekvenci 40 kHz v šířce pásma 10 kHz. [10]

RBP (Related Bearing Product)

Zjišťují se efektivní a špičkové hodnoty zrychlení v rozsahu 2 - 16 kHz.

[10]

5 Experimentální ověření chybových frekvencí ložisek

Pro zjištění chybových frekvencí ložisek se používají různé diagnostické metody, pomocí kterých je možné nejen detekovat, lokalizovat, zjistit velikost a rozsah poškození valivých ložisek, ale také najít příčiny vzniku a šíření poškození.

5.1 Poškození ložisek 6201

Nejprve bylo jedno z ložisek probroušeno na vnějším kroužku pomocí brusných tělísek z ušlechtilého korundu. Pomocí kterého se na jednom místě probrousil vnější kroužek, a nebyly narušeny ostatní části ložiska. Při měření tohoto ložiska je velká pravděpodobnost ovlivnění, způsobené nedostatečným mazáním, pilinami z broušení a zkreslení způsobené zaválcováním probroušené vady v důsledku mnoha měření. Ložisko 6201 probroušené na vnějším kroužku, které bude dále označeno jako Ložisko I



Obr. 32. Ložisko I

Další z ložisek 6201 byly pokusně prostřeleny vodním paprskem ve firmě Awac.



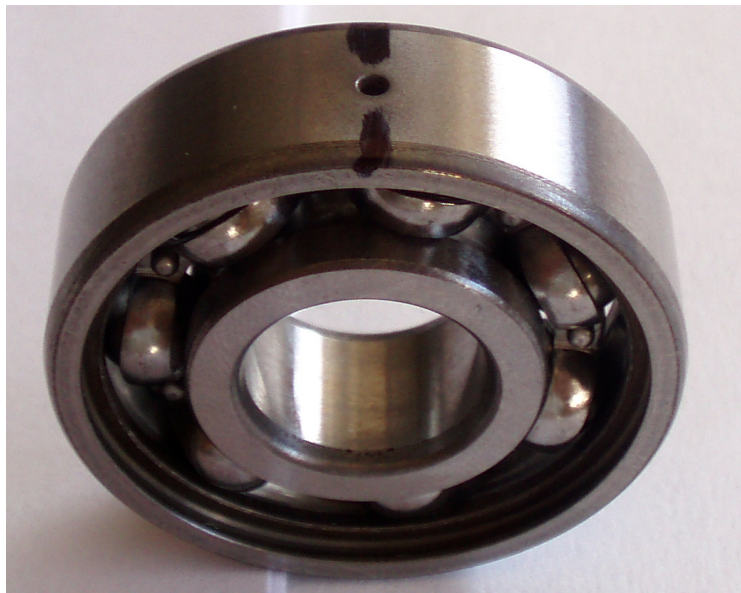
Obr. 33. CNC stůl AQUACUT s řídicím systémem MSNC 500, vysokotlakým čerpadlem KMT a systémem odkalování. [14]

Pracovní tlak vody se pohybuje v rozmezí 500 - 4136 Bar. Tlakovým zdrojem jsou speciální vysokotlaká čerpadla, která se liší příkonem (11 - 75 kW) a průtokem vody (1,2 - 7,6 l/min). Paprsek vzniká v řezací hlavě zakončené tryskou. Při zpracování měkkých materiálů používáme čistý vodní paprsek, pro ostatní případy je třeba použít abrazivní paprsek. Vhodnou příměsí je například granát - abrazivo zvolené dle tvrdosti řezaného materiálu. Pohyb řezací hlavy a tedy celá dráha řezu je řízena počítačem dle předem sestaveného programu. Je možné provádět i tvarově složité řezy během jedné operace. Standardní přesnost výřezu je $\pm 0,2$ mm /m. Dělený materiál není silově namáhán. Řezná hrana není nijak tepelně ovlivněna, vždy se jedná o studený řez. Tato skutečnost je velmi důležitá a také rozhodujícím způsobem odlišuje vodní paprsek od ostatních technologií na dělení materiálů, zvláště laseru a mikroplazmy. Po provedení řezu se směs vody a abraziva zachycuje v lapači (vaně), umístěné pod řezaným materiálem. [14]

Při tomto způsobu poškození se nedá předem určit tlak a síla paprsku tak aby byl narušen pouze vnější kroužek ložiska a nebyly zasaženy kuličky a nebo vnitřní kroužek. Proto obsluha zkusmo nastavila tlak, směs paprsku, čas a provedla první zkušební průstřel ložiska. Po vyndání ložiska ze stroje nebylo možné zjistit přesné porušení ložiska, protože bylo celé naplněno vodou a řezacím abrazivem, které znemožňovalo určení závady. Proto bylo provedeno ještě jiné nastavení stroje a bylo prostřeleno další ložisko.

Při měření těchto ložisek je velká pravděpodobnost ovlivnění, způsobené nedostatečným mazáním, narušením řezacím abrazivem a zkreslení způsobené zaválcováním prostřelené vady v důsledku mnoha měření.

U tohoto ložiska bylo po detailním prozkoumání zjištěno prostřelení vnějšího kroužku a také jedné z kuliček. Dále bude toto ložisko označováno jako Ložisko II viz (Obr. 34)



Obr. 34. Ložisko II

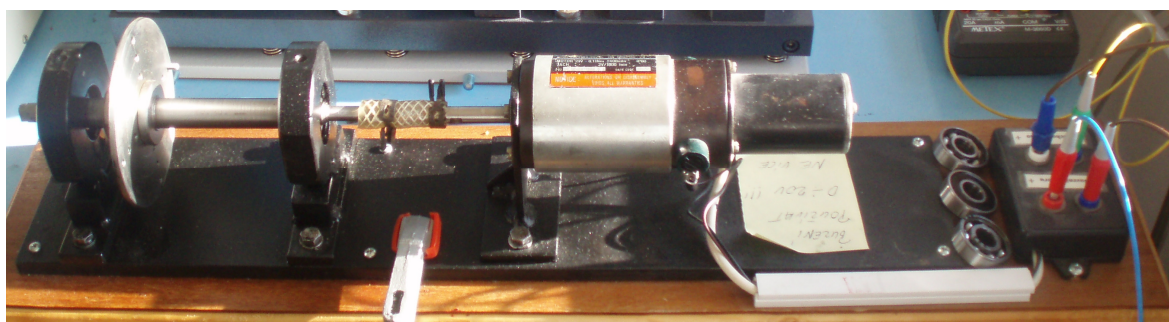
U druhého pokusu o prostřelení ložiska vodním paprskem došlo k prostřelení vnějšího i vnitřního kroužku a je možné že došlo i k dalším nezjištěným vadám, proto je třeba k tomuto ložisku přistupovat jako k neznámému co se týče vad. Toto ložisko bude dále označováno jako Ložisko III viz (Obr. 35).



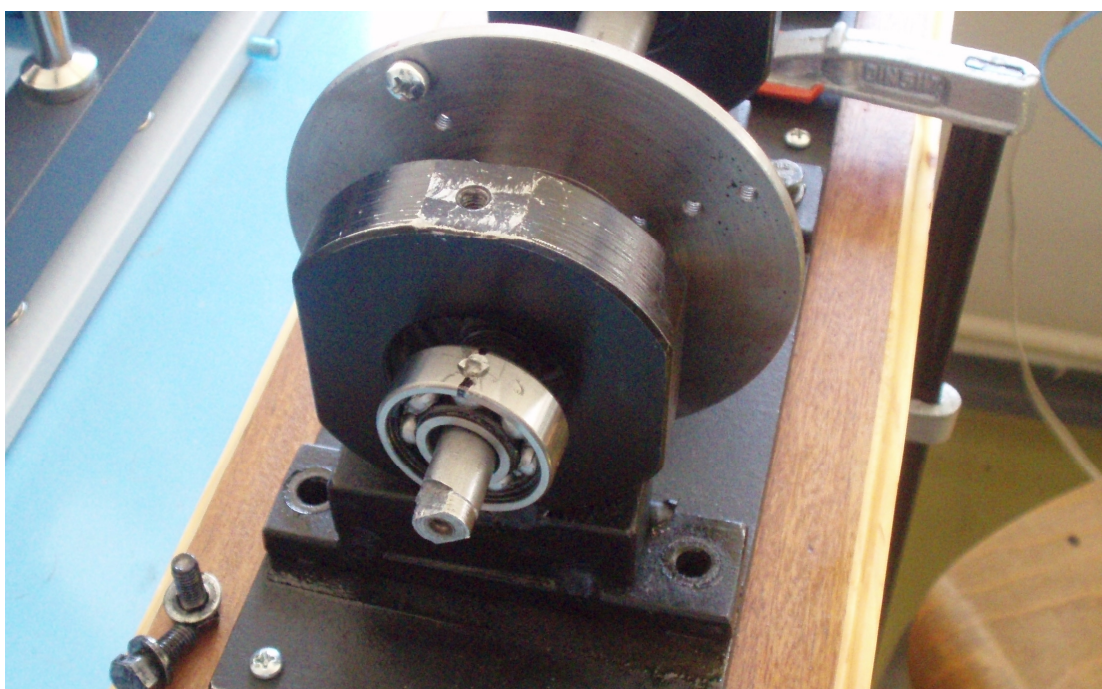
Obr. 35. Ložisko III

5.2 Měřicí sestava pro měření chybových frekvencí ložisek viz (Obr.36)

Tato sestava se skládá z SS motoru, který je napájen 0-20 V. K tomuto motoru bylo připojeno tachodynamo, ze kterého byly vyvedeny svorky viz (Obr. 36), na kterých se pomocí multimetru kontroluje napětí, které je přímo úměrné otáčkám. Tím byly zajištěny požadované otáčky. U všech praktických měření bylo použito 7,5V na tachodynamu což přesně odpovídá 2500 ot/min. Motor dále přes pružnou spojku poháněl hřídel, na které byla rotující část sestavy a za ní bylo v držáku nasazeno měřené ložisko viz (Obr. 37).



Obr. 36. Sestava pro měření chybových frekvencí ložisek



Obr. 37. Způsob výměny ložiska

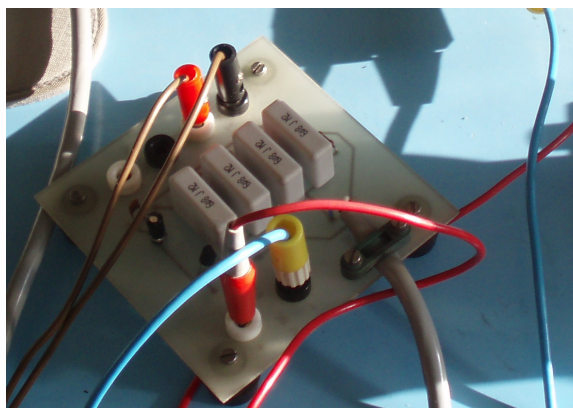
Tento držák byl pevně uchycen k podložce pro přesnější měření. Pokud by nebyl držák uchycen pevně zkreslilo by to měření a to chybou z mechanického uvolnění viz literatura [4]. Ložiska zde byly nasazovány tak, že byl pohyblivý pouze vnitřní kroužek poháněný hřídelí a vnější kroužek byl pevně uložen v držáku. Kde bylo ještě ložisko zajištěno jistícím kroužkem. Tento držák má připraveny dvě měřicí místa, jedno pro vertikální a druhé pro horizontální měření. Při vlastních měřeních byly ložiska nasazena tak že porušení bylo umístěno v horizontální ose.

5.3 Měření chybových frekvencí pomocí piezo snímače s předzesilovačem

Toto měření bylo provedeno pomocí piezoakcelerometru v magnetickém pouzdře, které se magnetem upevňovalo na měřenou část připravené sestavy. Při tomto způsobu měření se signál nejprve zesiloval předzesilovačem viz (Obr. 39) a poté přiváděl k dalšímu zpracování do počítače pomocí měřicí karty od firmy National Instruments PCI 6024E viz (Obr. 38). Je to vstupně/výstupní karta s 16 analogovými vstupy, 2 analogovými výstupy a dvěma frekvenčními výstupy. Obsahuje 16 bipolárních napěťových analogových vstupů 12 bitů, s nastavitelným rozsahem, zapojení diferenciální nebo single-ended, rychlost 200 kS/s. Napěťové analogové výstupy 12 bitů, s pevným rozsahem ± 10 V, refresh 10 kHz. Dva frekvenční kanály jsou dostupné, rozsah 0-5V.

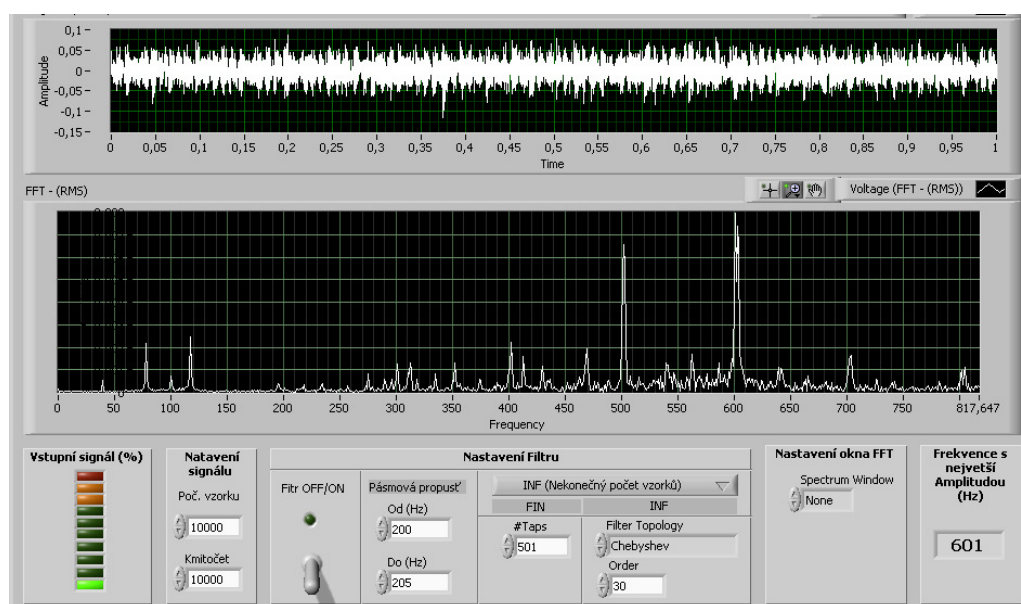


Obr. 38. Měřicí karta PCI 6024E [16]



Obr. 39. Použitý předzesilovač

Tímto způsobem měření jsme dosáhly 10000 sejmutých vzorků v časové oblasti. Pomocí přepočtu rychlou fourierovou transformací viz (kapitola 2.4.2) dostaneme 5000 vzorků ve frekvenční oblasti. Z toho vyplývá dostatečná rozlišitelnost 1 Hz. Na přepočet a zobrazení signálu byl využit program Lab View, který nám signál zobrazí jak v časovém tak ve frekvenčním spektru viz (Obr. 40). V tomto programu bylo také možné použít filtru pro odstranění nežádoucích frekvencí. Tímto snímačem lze měření provést v horizontální i vertikální ose.



Obr. 40. Zpracovaný signál v programu Lab View

5.4 Měření chybových frekvencí pomocí Adash 4900 Vibrio

Toto měření bylo provedeno pomocí měřícího přístroje Adash 4900 Vibrio viz (Obr. 41), který má snímače vibrací pracující na principu akcelerometru s magnetickou příchytkou pro snadnější uchycení.

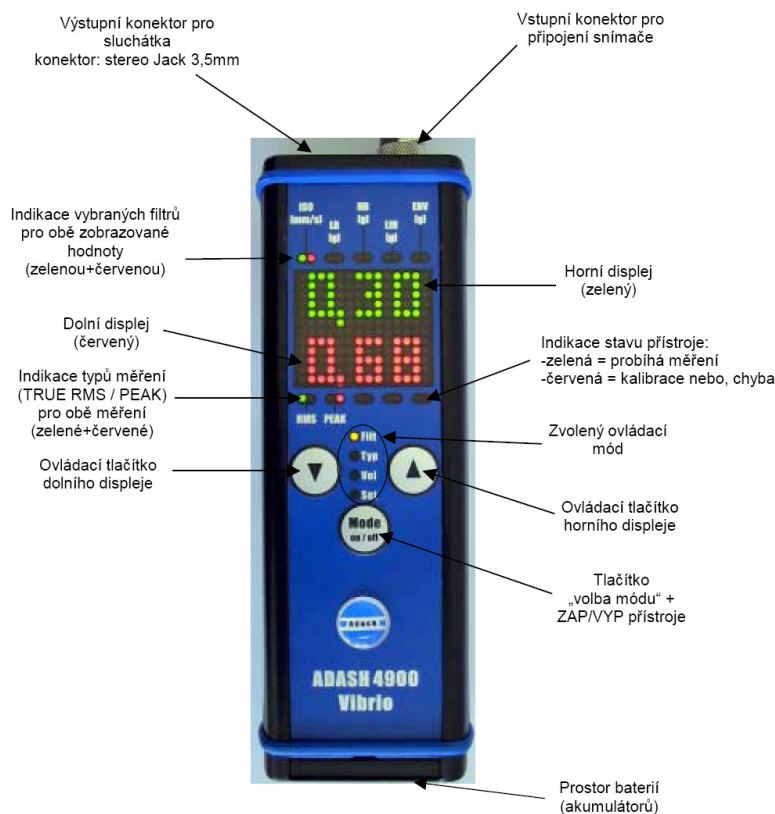
Adash 4900 Vibrio [13]

Aplikace:

- Základní měření vibrací
- Vibrační diagnostika strojů
- Diagnostika ložisek
- Výstupní kontrola výrobků

Vlastnosti:

- Širokopásmová měření RMS nebo PEAK hodnot zrychlení (g) a rychlosti (mm/s) vibrací
- Čtyři metody měření pro snadnou diagnostiku
- Současné zobrazení dvou měřených veličin
- Obálková analýza pro měření ložisek
- Pro měření se používá kvalitní piezo snímač s citlivostí 100 mV/g
- Indikace přebuzení, poruchy snímače a kabelu
- Možnost připojení sluchátek pro "poslech vibrací"



Obr. 41. Popis měřicího přístroje Adash 4900 [13]

Při měření s měřicím přístrojem Adash 4900 jde signál z měřicí sondy do přístroje a z přístroje se rovnou přivádí k dalšímu zpracování do počítače pomocí měřicí karty PCI 6024E. Dále je signál zpracováván stejně jako u předešlé metody měření. I u tohoto způsobu měření lze měřit v obou osách.

5.5 Měření chybových frekvencí pomocí Helium neonového laseru

Měření bylo provedeno pomocí Helium neonového laseru od firmy Renishaw s označením ML10 Gold Standard viz (obr. 42), kterým bylo měřeno posunutí měřené části sestavy.

Renishaw ML10 Gold Standard [15]

Specifikace:

- Rozsah - 40m
- Laserový zdroj – Helium neonový laser třídy II
- Výkon laseru - <1mW
- Vlnová délka ve vakuu – 632,99 nm
- Přesnost kmitočtu - +- 0,05ppm (parts per milion)
- Výstupy – RS485 z pětikolíkoveho konektoru Datalink
- Napájení – Jmenovité napětí 100 až 240V , 50/60Hz, automatická detekce
- Pracovní teplota 0-40°C
- Provozní vlhkost 0-95% nekondenzující



Obr. 42. Helium neonový laser firmy Renishaw

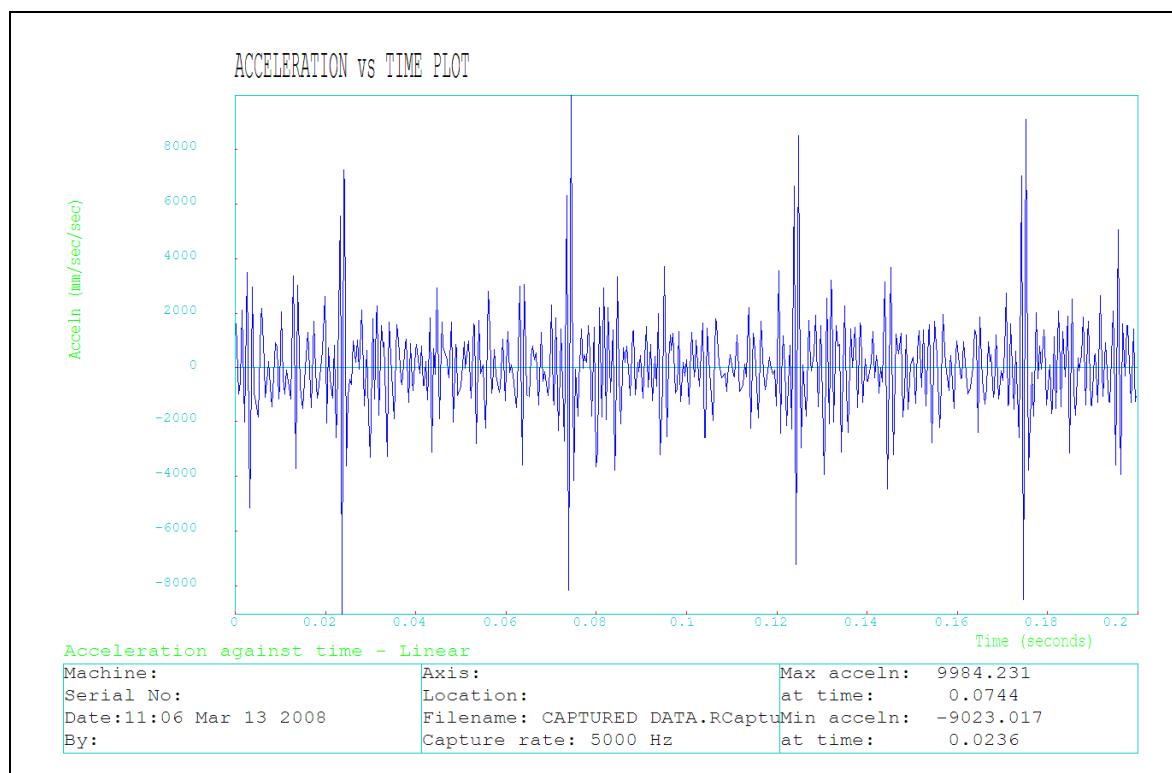
Pro toto měření bylo dále potřeba:

- 1x lineární dělič (interferometrický)
- 2x lineární odražeče – jeden o hmotnosti 100g a druhý miniaturní o hmotnosti 10g
- reduktor paprsku

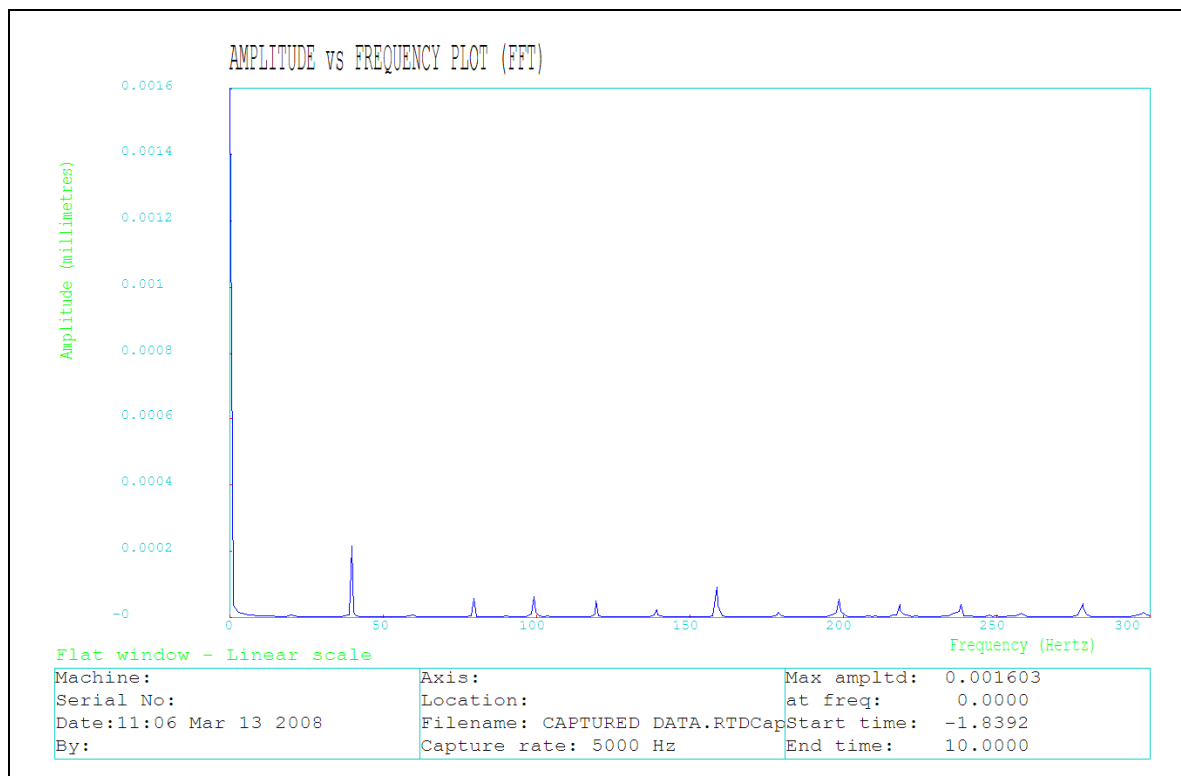


Obr. 43. Lineární dělič, odražeč a reduktor paprsku

Při tomto měření bylo využito principu Michelsonova interferometru, který je popsán v literatuře [2]. Před začátkem měření bylo nutné všechny součásti měřicí soustavy nechat předepsanou dobu teplotně kompenzovat. Dále bylo třeba odborně sestavit celou soustavu odražečů tak aby byly v co možná nejlepší rovině, jaké jde v podmínkách použité laboratoře dosáhnout. Rovina je důležitá pro přesný odraz paprsku z odražeče umístěného na vibrující části. Pro celkové nastavení tohoto měření bylo třeba pomoci doc. Ing. Vladimíra Paty, Dr, který má s tímto nastavením již letitou praxi. Po dosažení ideálního odrazu se naměřené hodnoty viz (Obr. 44, 45) zpracovávaly pomocí softwaru dodaného firmou Renishaw, který není kompatibilní s žádným jiným softwarem a tím neumožňuje další analýzu těchto dat. Z technických důvodů lze provádět toto měření pouze v horizontální ose a ne v obou jako u ostatních měření.



Obr.44. Naměřený signál v časové oblasti zpracovaný softwarem od firmy Renishaw



Obr.45. Naměřený signál v frekvenčním spektru zpracovaný softwarem od firmy Renishaw

Proto bylo nutné naměřené data uložit pouze jako hodnoty v časové oblasti, aby je bylo možné přepočítat pomocí FFT do frekvenčního spektra a dále porovnávat. Tímto způsobem měření jsme dosáhly 50000 sejmutých vzorků v časové oblasti. Pomocí přepočtu rychlou fourierovou transformací viz (kapitola 2.4.2) dostaneme 25000 vzorků ve frekvenční oblasti.

5.6 Měření chybových frekvencí pomocí Viditech VDT02-AB

Toto měření bylo provedeno pomocí měřicího přístroje Viditech VDT02-AB viz (Obr. 46), který má snímače vibrací pracující na principu akcelerometru s pevným přichycením na šroub.

Technická data [12]

- Napájecí napětí 18 až 36V DC
- Odběr proudu cca 175 mA při 24V DC
- Pracovní teplota 0 až 80°C
- Rozměry cca 90 x 115 x 75 (Š x V x H)
- Hmotnost 330g
- Připojení vodičů odpojitelná svorkovnice
- Typ přístroje dvoukanálový, volitelně jednokanálový
- Přesnost 1% v jednom pracovním bodě při 25°C
- Měřicí rozsah 10, 20, 50, 100, 200 mm/s
- Frekvenční pásmo 1Hz až 1kHz, 3Hz až 1kHz, 10Hz až 1kHz nastavitelné
- Strmost filtru dle ISO 40dB / dek.



Obr. 46. Měřicí přístroj Viditech VDT02-AB[12] Obr. 47 senzor zrychlení ASW02[12]

Přístroj VDT02-AB umožňuje připojení dvou snímačů zrychlení vibrací. Přístroj pracuje se snímači s citlivostí v rozsahu od 10 mV/g do 5000 mV/g. Pro běžná měření je vhodným snímačem Viditech ASW02 viz (Obr. 47). [12]

Tímto způsobem měření jsme dosáhly 40 nenulových vzorků rovnou ve frekvenční oblasti. Výrobce rozlišitelnost a způsob přepočtu pomocí FFT neudává, ale z počtu získaných nenulových vzorků lze usuzovat že je velmi malá, a pro hledání přesných frekvencí nedostatečná. Proto bylo toto měření bráno jen jako orientační. Pro zpracování naměřeného signálu bylo použito softwaru dodaného k měřicímu přístroji firmou Viditech. Tento způsob měření také umožní měření horizontální i vertikální ose.

5.7 Výpočet poruchových frekvencí ložisek

Jelikož se defekty ložisek objevují při mnohem vyšších frekvencích a při mnohem menších amplitudách, jsou tabulky ISO pro zjišťování počínajících defektů platné jen málo. Zvláštní pozornost je třeba věnovat poruchovým frekvencím ložisek v FFT spektrech.

Pro snazší zjištění, zda součástí problému stroje je i poškození ložiska, je možné vypočítat poruchové frekvence ložisek a vynést je ve vibračním spektru. [4]

- F_{ord} – frekvence defektu na vnější dráze ložiska
(Frequency Outer Race Defect, **BPFO**)
- F_{ird} – frekvence defektu na vnitřní dráze ložiska
(Frequency Inner Race Defect, **BPIF**)
- F_{bd} – frekvence defektu kuličky
(Frequency Ball Defect, **BPF**)
- F_c – frekvence defektu klece ložiska
(Frequency Cage, **FTF**) [4]

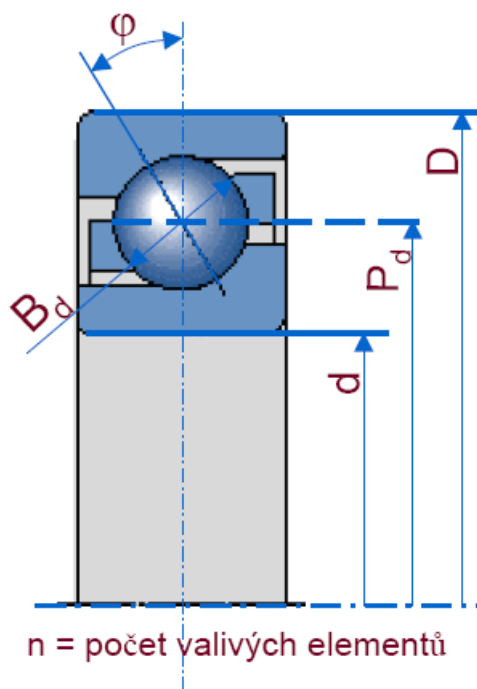
Jestliže máme k dispozici rozměry ložisek viz. (Obr. 30) použijeme pro výpočet chybových frekvencí ložisek vztahy odvozené z těchto rozměrů: [4]

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right) \cdot \frac{RPM}{60} = n \cdot FTF \quad (15)$$

$$BPIF = \frac{n}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad (16)$$

$$BPF = \frac{P_d}{2B_d} \cdot \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right)^2 \right] \cdot \frac{RPM}{60} \quad (17)$$

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad (18)$$



n - počet kuliček

B_d - průměr kuličky

P_d - průměr roztečné kružnice

φ - stykový úhel

Obr. 30. Potřebné rozměry ložiska pro výpočet chybových frekvencí [12]

V případě že neznáme rozměry ložiska, ale známe počet valivých elementů můžeme získat alespoň přibližné hodnoty chybových frekvencí ze vztahů:

$$BPFO = \left(\frac{n}{2} + 1,2 \right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad (19)$$

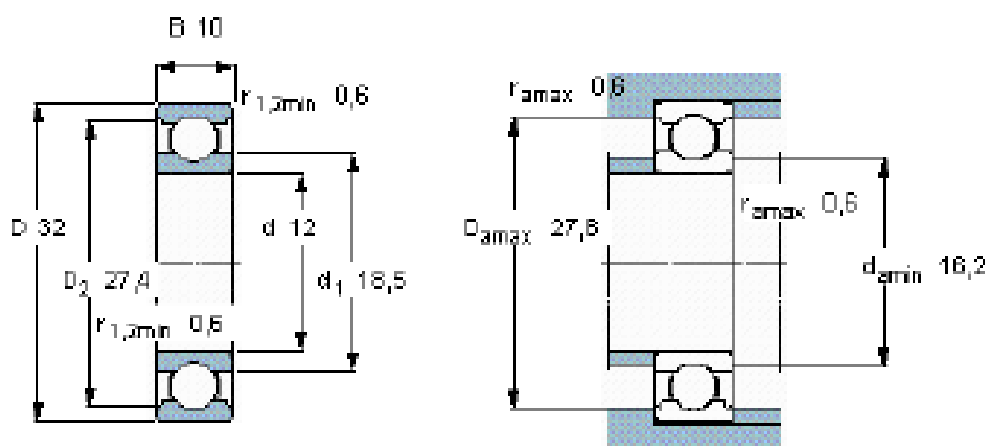
$$BPFI = \left(\frac{n}{2} + 1,2 \right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad (20)$$

$$BPF = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{2} - \frac{1,2}{n} \right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad (21)$$

$$FTF = \left(\frac{1}{2} - \frac{1,2}{n} \right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad (22)$$

Pokud amplitudy špiček ve spektru odpovídají těmto chybovým frekvencím, pak se pravděpodobně jedná o defekt příslušné části ložiska. [4]

5.8 Určení chybových frekvencí pro zadané ložisko 6201



Obr. 31. Rozměry zadaného ložiska 6201 [11]

Výpočet chybových frekvencí ložiska pomocí vzorců odvozených z rozměrů ložiska:

- použité ložisko 6201
 - $B_d = 5,8$
 - $P_d = 22$
 - $\cos \varphi 0^\circ$
 - počet kuliček $n = 7$
- použité otáčky u všech měření byly konstantní 2500 ot/min (což odpovídá použitému napětí 7,50 V na tachodynamu)

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right) \cdot \frac{RPM}{60} = \frac{7}{2} \cdot \left(1 - \frac{5,8}{22} \cos 0 \right) \cdot \frac{2500}{60} = 107,39 Hz \quad (23)$$

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right) \cdot \frac{RPM}{60} = 184,28 Hz \quad (24)$$

$$BPF = \frac{P_d}{2B_d} \cdot \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right)^2 \right] \cdot \frac{RPM}{60} = 73,53 Hz \quad (25)$$

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right) \cdot \frac{RPM}{60} = 15,34 Hz \quad (26)$$

Výpočet chybových frekvencí ložiska pomocí zjednodušených vzorců. Použité ložisko a otáčky byly stejné jako u předchozích výpočtů.

$$BPFO = \left(\frac{n}{2} + 1,2 \right) \cdot \frac{RPM}{60} = \left(\frac{7}{2} + 1,2 \right) \cdot \frac{2500}{60} = 195,83 Hz \quad (27)$$

$$BPFI = \left(\frac{n}{2} + 1,2 \right) \cdot \frac{RPM}{60} = 195,83 Hz \quad (28)$$

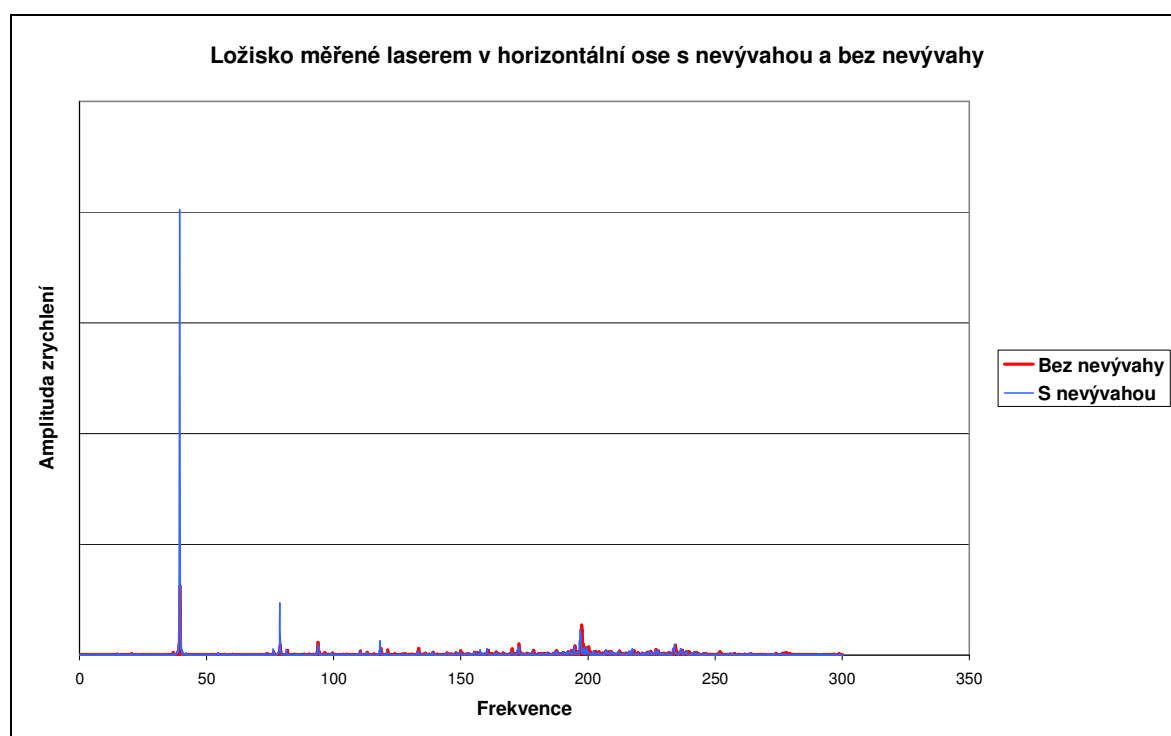
$$BPF = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{2} - \frac{1,2}{n} \right) \cdot \frac{RPM}{60} = 69,34 Hz \quad (29)$$

$$FTF = \left(\frac{1}{2} - \frac{1,2}{n} \right) \cdot \frac{RPM}{60} = 13,69 Hz \quad (30)$$

6 Srovnání naměřených hodnot s vypočtenými frekvencemi

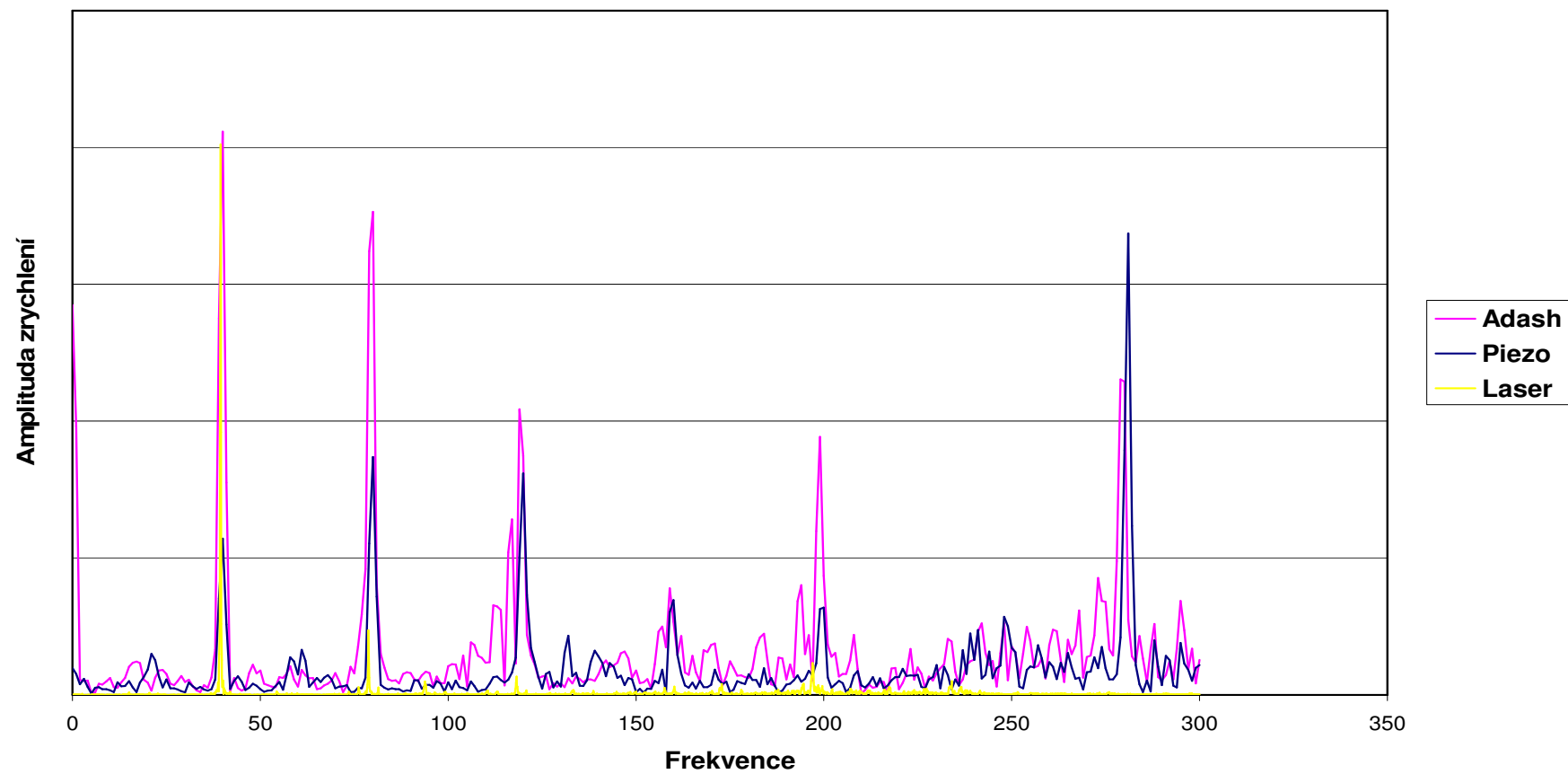
Hledané frekvence:

- BPFO - frekvence defektu na vnější dráze ložiska = 107 Hz
- BPFI - frekvence defektu na vnitřní dráze ložiska = 184 Hz
- BPF - – frekvence defektu kuličky = 73 Hz
- FTF – frekvence defektu klece ložiska = 15 Hz
- Otáčková frekvence = 41 Hz

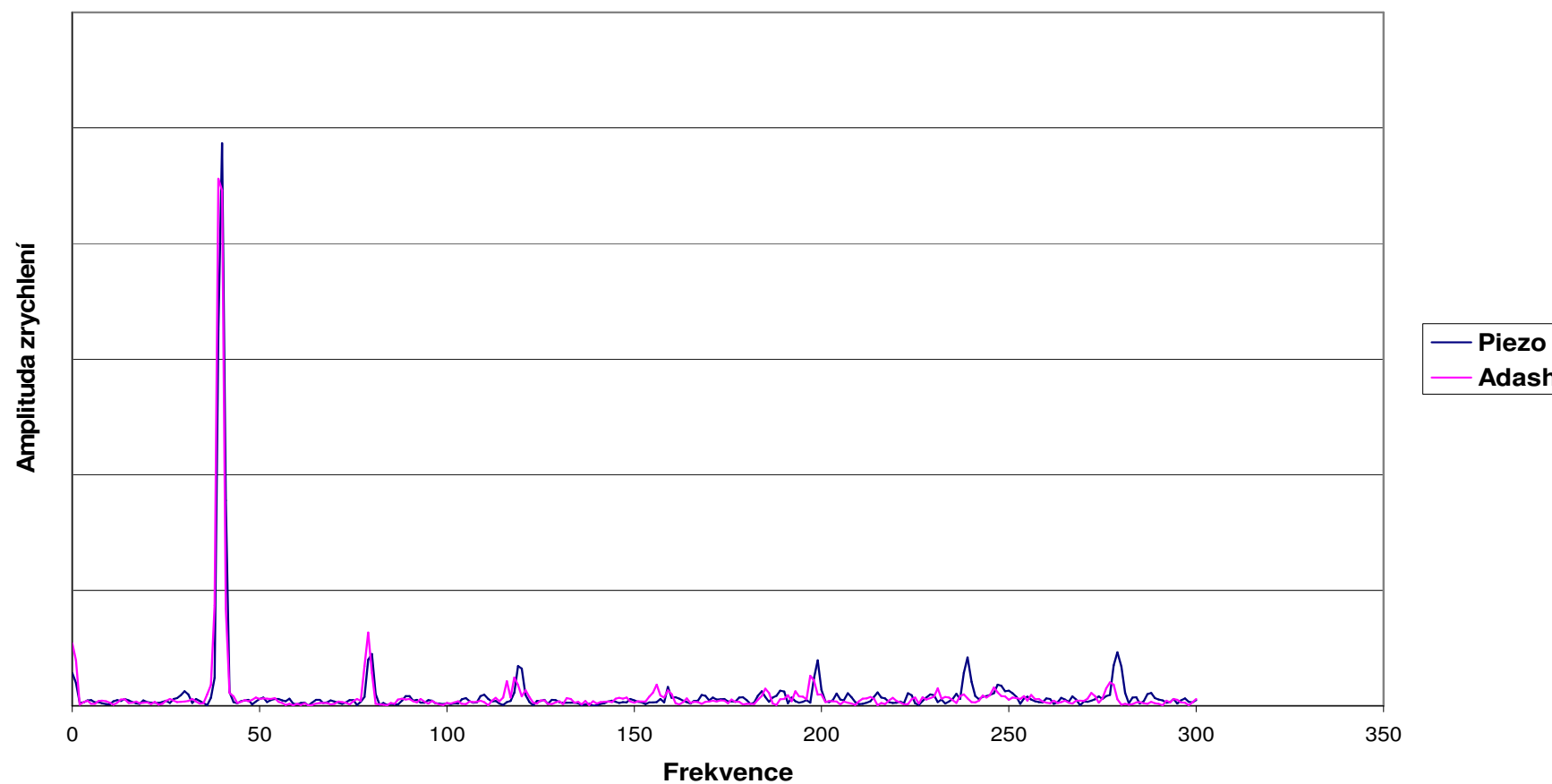


Obr. 48. Naměřené hodnoty v horizontální ose pro ložisko s nevývahou a bez ní

Při měření byla na rotující část sestavy umístěna nevývaha, ta zde měla funkci zátěže stroje, která jak bylo měřením zjištěno několikanásobně zvětší první harmonickou otáčkové frekvence viz (Obr. 48). Nárůstem této harmonické bylo vyhodnocování dalších frekvencí méně přehledné, ale měření bez zátěže by bylo neprůkazné a chybové frekvence ložisek by se při měření nemuseli vůbec projevit. Z těchto důvodů byla nevývaha použita u všech dalších měření.

Nepoškozené ložisko měřené v horizontální ose

Obr. 49. Naměřené hodnoty v horizontální ose pro nepoškozené ložisko

Nepoškozené ložisko měřené ve vertikální ose

Obr. 50. Naměřené hodnoty ve vertikální ose pro nepoškozené ložisko

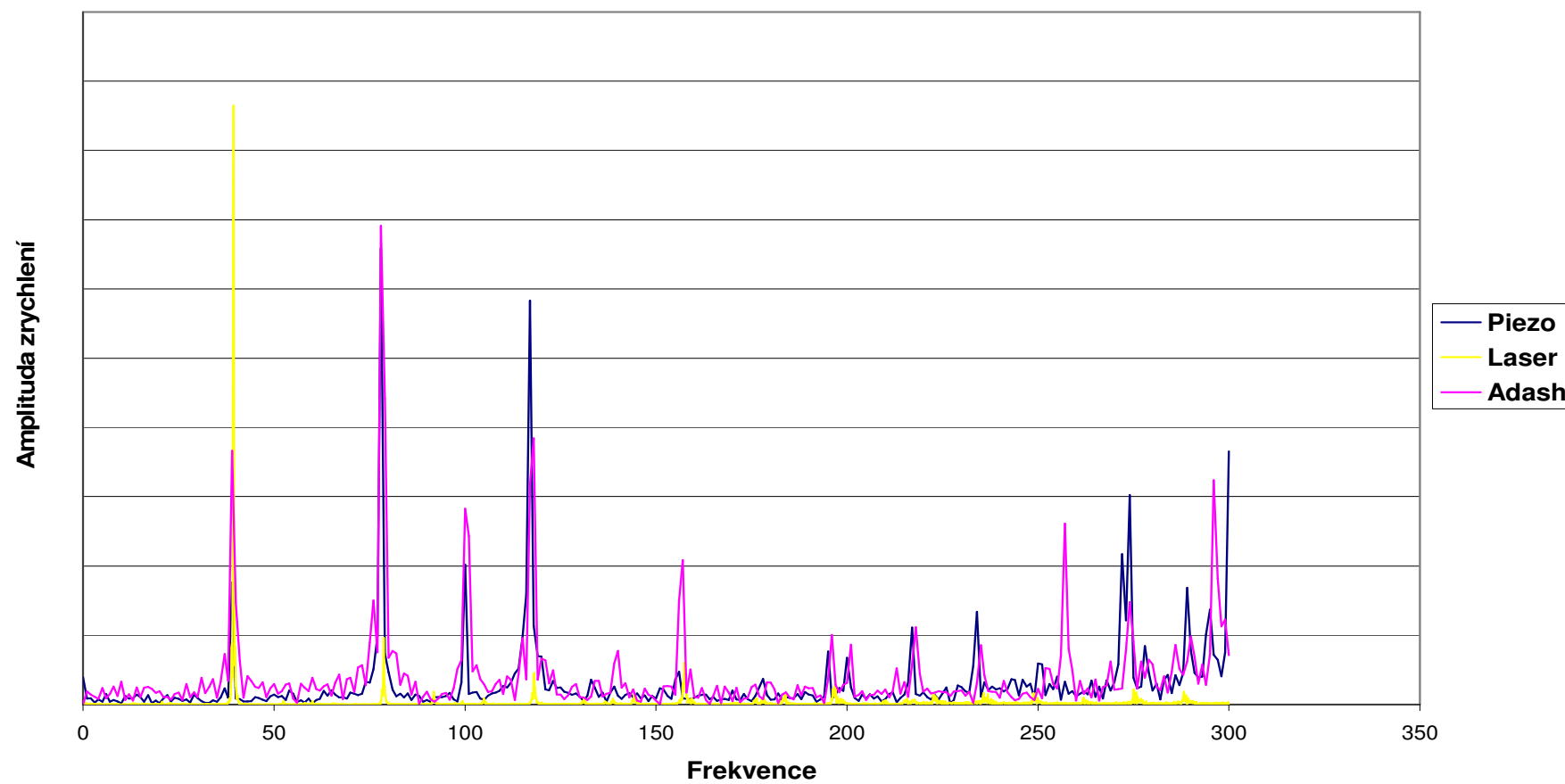
Popis (Obr. 49)

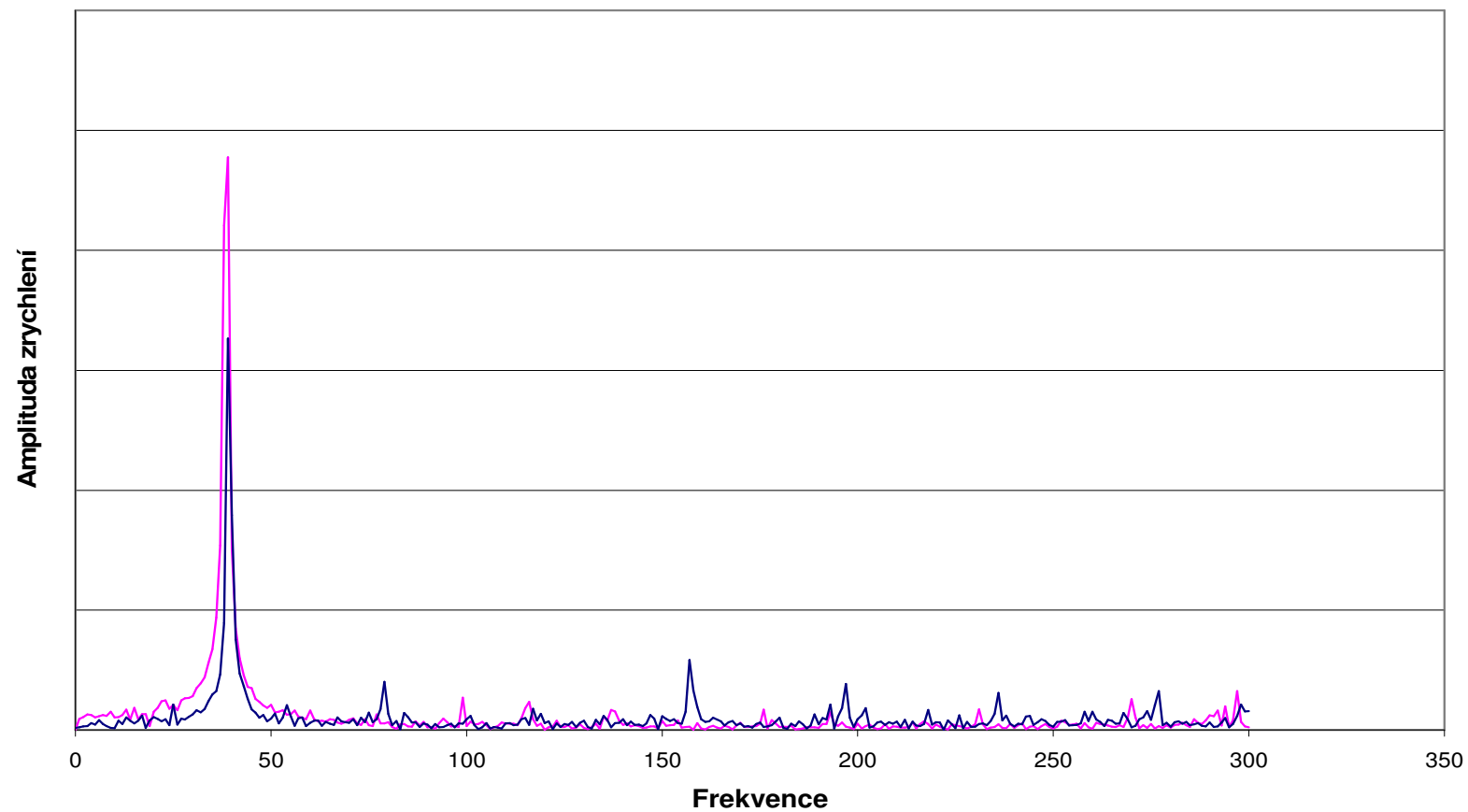
Nepoškozené ložisko měřené v horizontální ose třemi měřicími přístroji Adash, Piezo a laserem. Při porovnávání naměřených hodnot těmito přístroji je patrné, že se zde neobjevuje žádná z vypočtených chybových frekvencí. Tím je jasně dáno, že toto ložisko nebylo v žádné části poškozeno. Je zde vidět pouze velmi zřetelná otáčková frekvence, vypočtená z použitých otáček a její další harmonické. Také je na signálu z přístroje od firmy Adash zvýšená frekvence kolem nuly, která je způsobená rušením. U zbývajících dvou přístrojů toto rušení není jen se zde může projevit vada z nedostatku mazání a nebo ze znečištění ložiska.

Popis (Obr. 50)

Nepoškozené ložisko měřené ve vertikální ose bylo měřeno jen dvěma měřicími přístroji a to Adash, Piezo. Opět zde nejsou viditelné vibrace způsobené některou z vypočtených vad ložiska. Pouze je patrná otáčková frekvence a její harmonické. Při měření ve vertikální ose jsou vibrace řádově vyšší než v ose horizontální obzvláště pak první harmonická., což je způsobené uložením ložiska a již zmíněnou nevývahou.

Ložisko I měřené v horizontální ose

*Obr. 51. Naměřené hodnoty v horizontální ose pro ložisko I*

Ložisko I měřené ve vertikální ose

Obr. 52. Naměřené hodnoty ve vertikální ose pro ložisko I

Popis (Obr. 51)

Ložisko I měřené v horizontální ose měřicími přístroji Adash, Piezo a laserem. Adash přístrojem dostáváme výrazné hodnoty otáčkové frekvence, zvláště pak její druhé harmonické což může být způsobeno nedokonalým uchycením ložiska k podložce. Dále je zde dobře vidět zvýšená hodnota kolem vypočtené chybové frekvence 107 Hz která odpovídá defektu na vnější dráze ložiska.

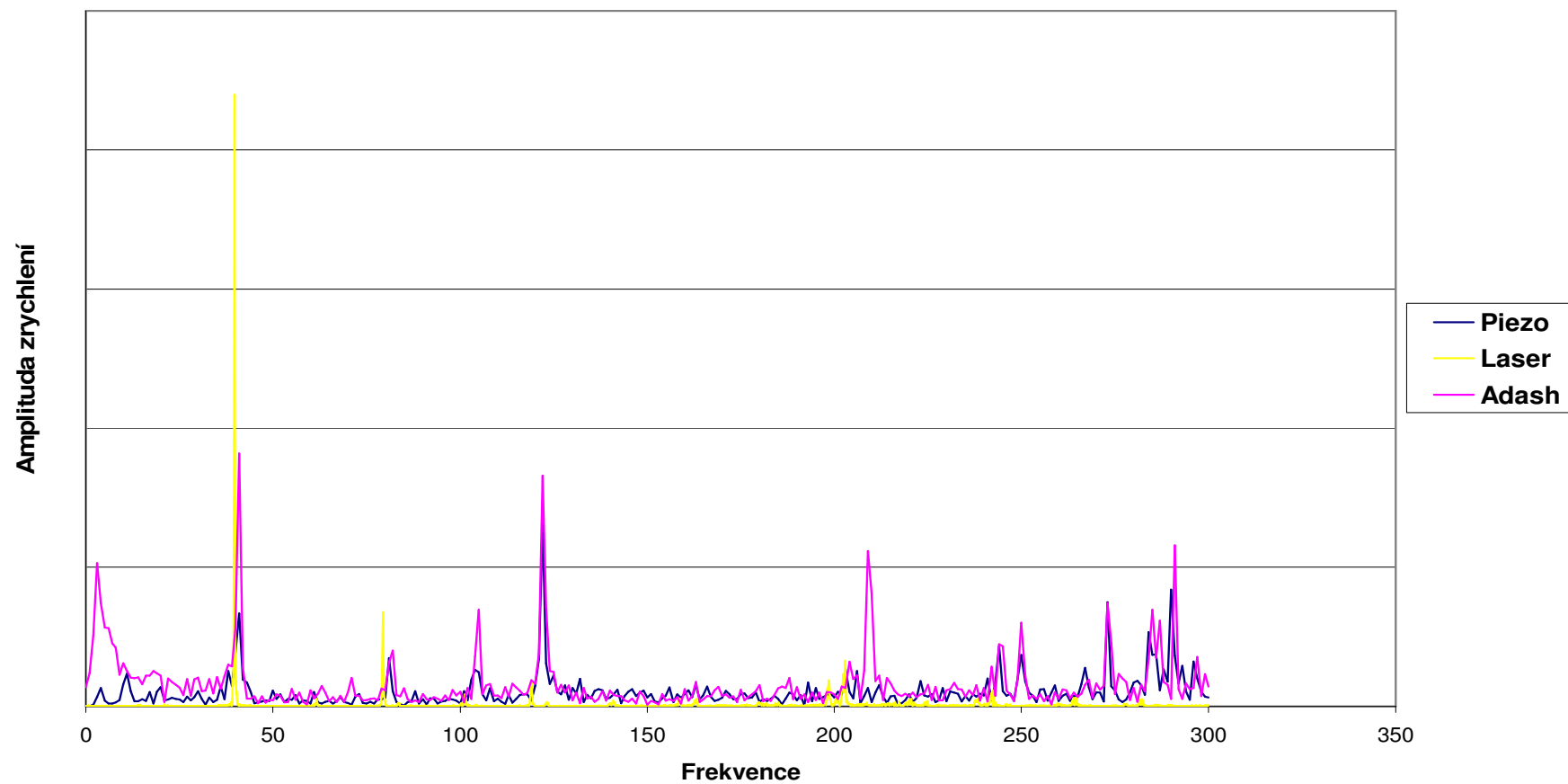
Signál z Piezo snímače má také výraznější druhou harmonickou otáčkové frekvence. Je zde dobře viditelná zvýšená hodnota kolem chybové frekvence 107 Hz. Nejsou zde tak výrazné další frekvence způsobené rušením a dalšími parazitními vlivy působícími na ložisko a měřenou soustavu.

Měření pomocí laseru má nejvýraznější první harmonickou otáčkové frekvence což odpovídá přidané nevývaze a správnému uchycení ložiska. Tímto způsobem měření není již tak výrazná frekvence odpovídající použité vadě. To může být způsobeno zaválcováním vytvořené vady v důsledku mnoha předešlých měření.

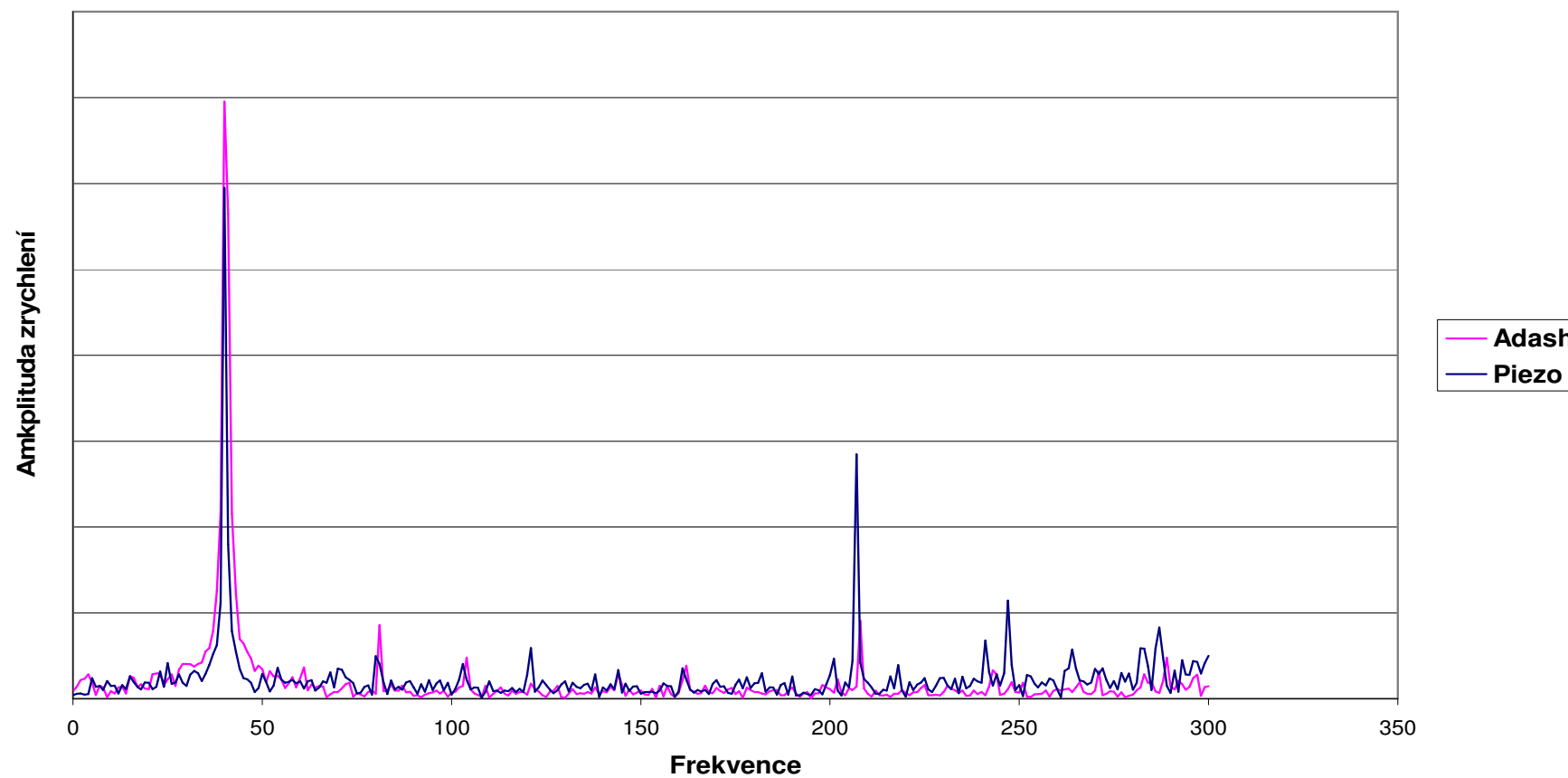
Z těchto měření se dá srovnáním s vypočtenou hodnotou chybové frekvence velmi jednoznačně dokázat, že toto ložisko bylo porušeno pouze na vnější kroužku ložiska a že vypočtená frekvence přibližně odpovídá té naměřené.

Popis (Obr. 52)

Ložisko I měřené ve vertikální ose měřicími přístroji Adash, Piezo. Při srovnávání naměřených hodnot těmito přístroji je opět vidět výraznější vibrace při měření pomocí Adash přístroje. I zde jsou patrné hledané frekvence jako u horizontálního měření jen je zde opět mnoha násobně větší první harmonická otáčkové frekvence hlavně u měření Adash přístrojem kde se zvýší téměř o řád. Tento jev by šel eliminovat odstraněním nevývahy viz (Obr. 48).

Ložisko II měřené v horizontální ose

Obr. 53. Naměřené hodnoty v horizontální ose pro ložisko II

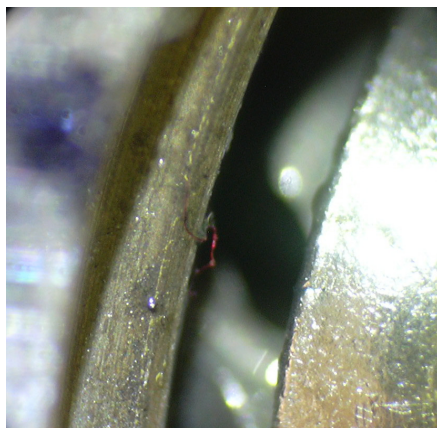
Ložisko II měřené ve vertikální ose

Obr. 54. Naměřené hodnoty ve vertikální ose pro ložisko II

Popis (Obr. 53)

Ložisko II měřené v horizontální ose měřicími přístroji Adash, Piezo a laserem. Při srovnávání naměřených hodnot všemi přístroji se již neprojevuje takový rozdíl naměřených vibrací mezi jednotlivými přístroji.

Adash přístrojem dostáváme velmi výrazné hodnoty otáčkové frekvence, také je dobře vidět zvýšená hodnota kolem vypočtené chybové frekvence 107 Hz což odpovídá defektu na vnější dráze ložiska. Po podrobném prozkoumání zvýšených frekvencí byla nalezena další chybová frekvence na hodnotě ≈ 73 Hz odpovídající defektu kuličky, která také byla po prozkoumání ložiska mikroskopem potvrzena viz (Obr. 55).



Obr. 55. Defekt kuličky pod mikroskopem

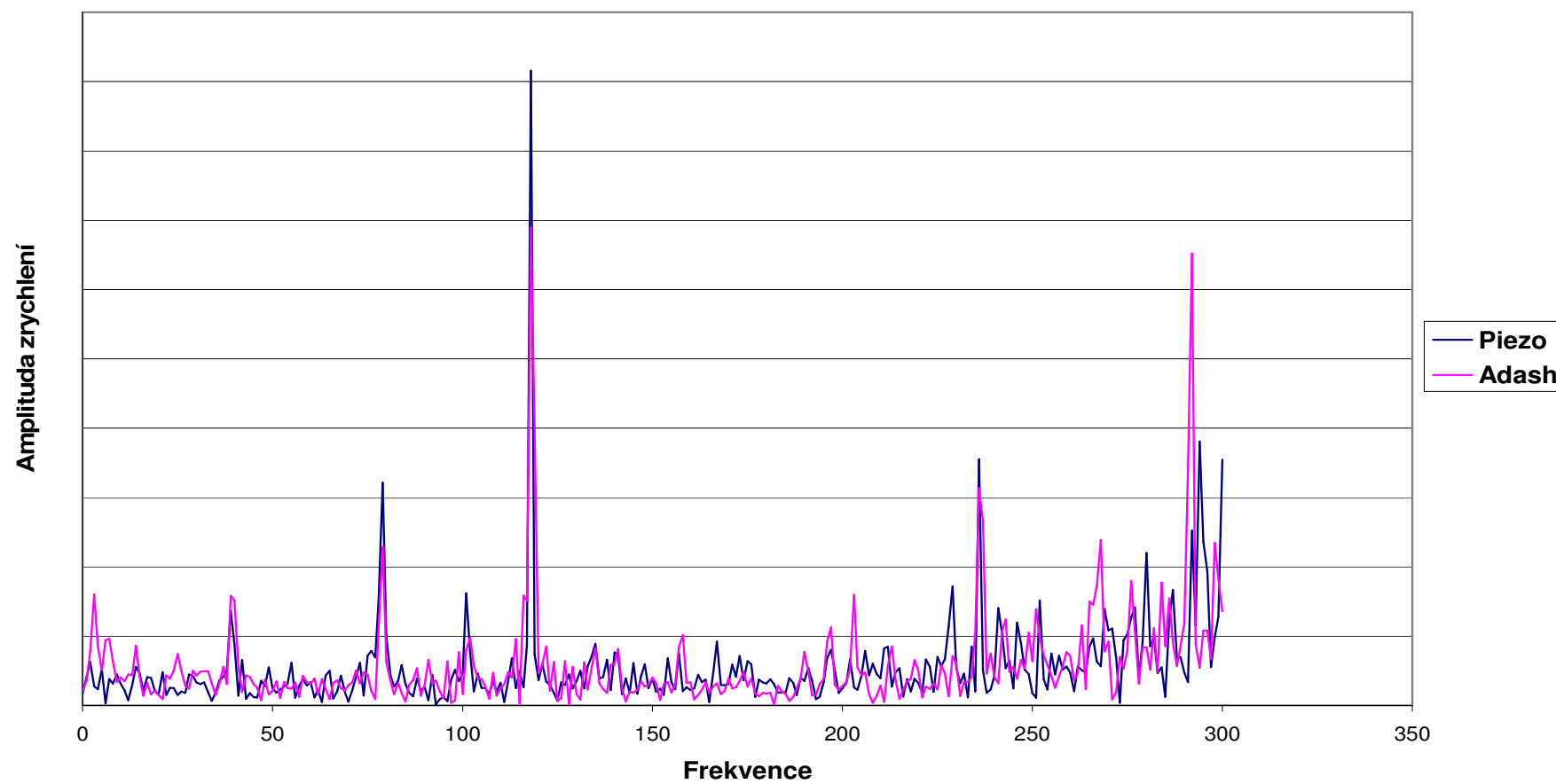
Signál z Piezo snímače také odhaluje zvýšenou frekvenci kolem 107 Hz, ale na hodnotě 73 Hz není tolik výrazný jako Adash. Pokud by se ložisko měřilo, pouze Piezo snímačem tak by se s největší pravděpodobností defekt kuličky nepodařilo odhalit, protože by se toto nepatrné zvýšení frekvence dalo považovat za vliv dalších vad.

Nejméně průkazný signál je opět z měření pomocí laseru, i když tentokrát není tak zanedbatelný, jako u předešlého ložiska zejména otáčková frekvence je zde velká. I chybová frekvence defektu vnějšího kroužku je zde lépe patrná, což odpovídá tomu, že tato vada se u tohoto ložiska tolik nezaválcovala. Výhodou je že signál z laseru není možné tolik zkreslovat vnějšími vlivy jako tomu je u měření pomocí Piezo a Adashe.

U tohoto ložiska se měřením a srovnáním s vypočtenými hodnotami zjistila vada vnějšího kroužku odpovídající 107 Hz a také defekt kuličky odpovídající 73 Hz, který nebyl předem znám. Dále se zde projevuje mnoho dalších méně výrazných frekvencí, které mohou být způsobeny nedostatečným mazáním, řezacím abrazivem, úlomky ložiska z prostřeleného otvoru atd.

Popis (Obr. 54)

Ložisko II měřené ve vertikální ose měřicími přístroji Adash, Piezo. Opět je mnohanásobně zvýšená otáčková frekvence, která celý průběh znepřehledňuje. Při bližším pohledu zde najdeme všechny hledané frekvence jako u průběhu měřeného horizontálně.

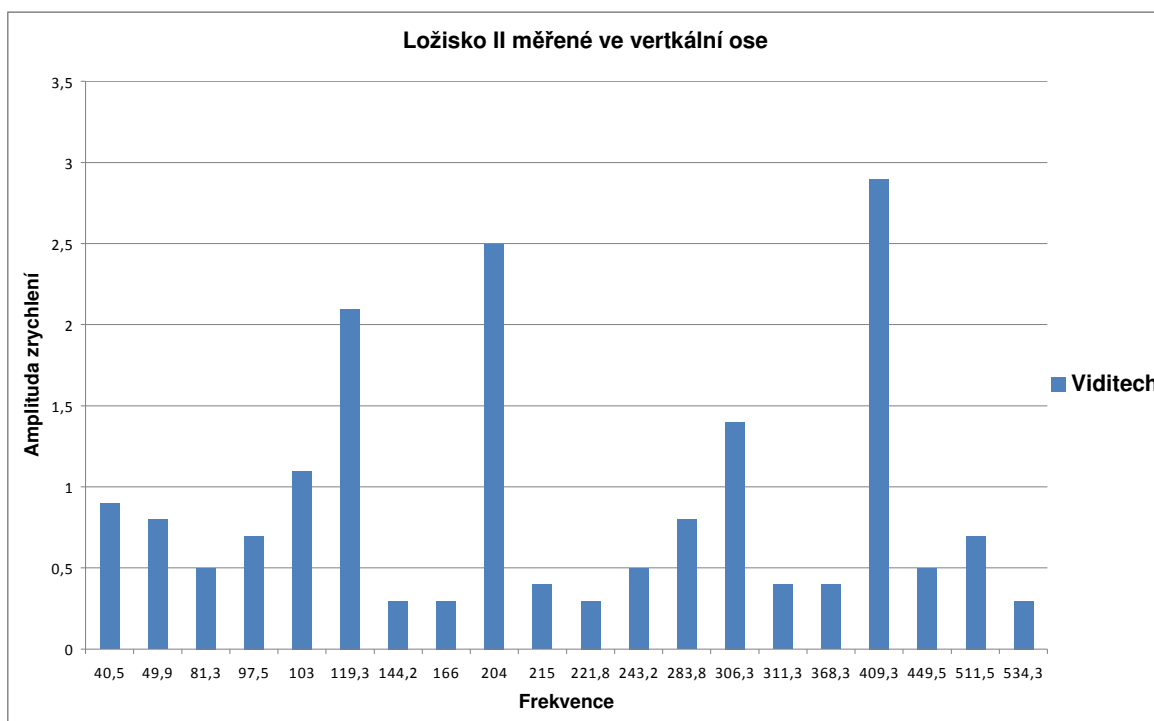
Ložisko III měřené v horizontální ose

Obr. 56. Naměřené hodnoty v horizontální ose pro ložisko III

Popis (Obr. 56)

Ložisko III měřené v horizontální ose měřicími přístroji Adash, Piezo. U ložiska III nejsou předem známé všechny defekty způsobené vodním paprskem. Víme jen že je narušen vnitřní a vnější kroužek ložiska což odpovídá frekvencím kolem 107Hz vnější a 184 Hz vnitřní kroužek. Jestli je narušena některá z kuliček nebo klec ložiska můžeme pouze usuzovat z naměřených hodnot, které jsou dosti zkreslené zvýšenými frekvencemi od ostatních vad, jako jsou nedostatečné mazání, řezací abrazivo, úlomky ložiska z prostřeleného otvoru atd.

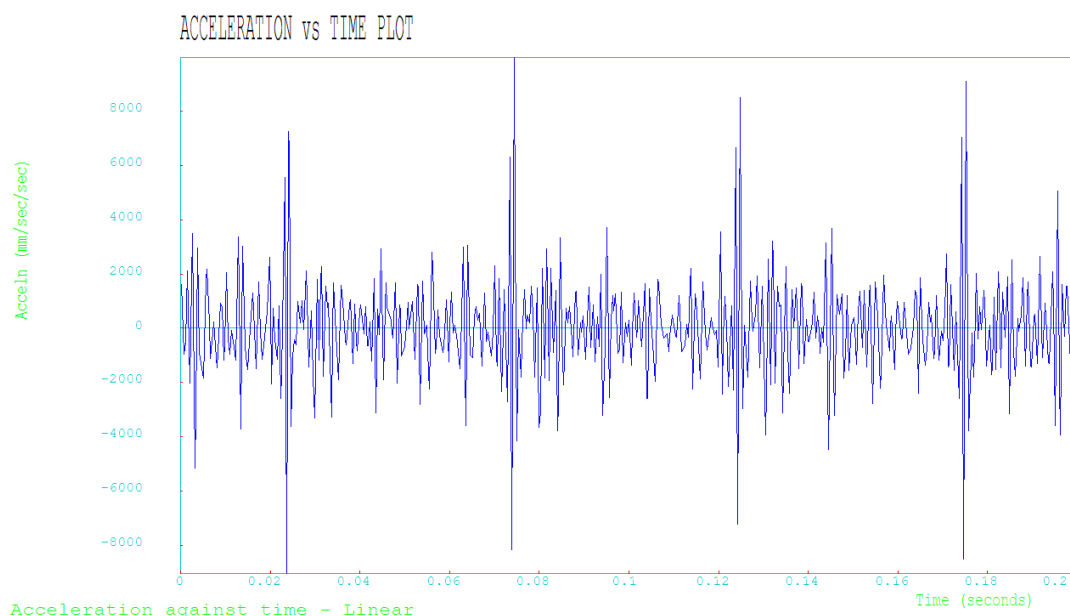
Z těchto průběhů lze jistě prokázat zvýšenou frekvenci kolem 107 Hz což odpovídá defektu vnějšího kroužku, dále je patrné zvýšení kolem 184 Hz které odpovídá poruše na vnitřním kroužku. Dále lze již z těži určit jestli u dalších zvýšených frekvencí jde o vypočtenou vadu a nebo jestli jde o některou z výše uvedených vad.



Obr. 57. Naměřené hodnoty v horizontální ose pro ložisko II

Popis (Obr. 57)

Ložisko II měřené v horizontální ose měřicím přístrojem od firmy Viditech. Takto změřený signál má ven velmi malou rozlišitelnost proto je téměř neprůkazný co se týče hledání přesných frekvencí. Proto jsem měření pomocí Viditechu bral jen jako orientační, i když i zde lze pozorovat zvýšení v oblastech otáčkových a chybových frekvencí. Proto jsem měření pomocí Viditechu neporovnával s mnohem přesnějšími měřeními pomocí Adash, Piezo snímače a laseru.



Obr. 58. Časový průběh naměřený pomocí laseru

Popis (Obr. 58)

Na tomto průběhu je dobře viditelný pravidelný výkmit způsobený opakujícím přejetím kuličky přes vadu na vnějším kroužku. Každé přejetí kuličky přes tuto vadu způsobí vibrace zaznamenané v čase pomocí laseru, které se poté přepočítají do frekvenčního spektra, kde se snadněji vyhodnocují.

7 Závěr

V této práci jsem se zabýval určením chybových frekvencí ložisek a to početně i měřením. Nejprve jsem se musel blíže seznámit s problematikou technické diagnostiky. Poté jsem se již věnoval konkrétnímu oboru vibrodiagnostika, která je již jednou z mnoha částí technické diagnostiky. Nastínil jsem zde co je to vibrace a jaké druhy vibrací známe. Další podstatnou věcí pro nadcházející měření jsou typy senzorů a jejich způsoby uchycení. K snímání vibrací jsem používal akcelerometr, který je z nich nejpoužívanější. A ten jsem upevňoval magnetem nebo pomocí šroubu. Ne méně podstatnou částí této práce bylo seznámení se s analýzou a zpracováním diagnostických signálů, kterou jsem později využíval při přepočtu signálu z časového do frekvenčního spektra pomocí FFT.

V následující kapitole jsem popisoval valivá ložiska, která budou při měření použita. Zpracoval jsem popis jednotlivých částí, jejich možnosti poškození a přehled metod k měření stavu těchto ložisek.

Po získání všech těchto důležitých znalostí jsem mohl přistoupit k vlastnímu ověření chybových frekvencí ložisek. Nejprve bylo nutné vyrobit předem definovanou vadu ložiska, což nebylo tak jednoduché jak jsem si předem představoval. Po mnoha neúspěšných pokusech se podařilo jedno z ložisek probrousit na vnějším kroužku. Další dvě ložiska byla pro jednoduchost prostřelena vodním paprskem, i když nebyl předem znám rozsah poškození.

Poté byla přichystána již existující soustava pro měření ložisek a vybrány 4 druhy měřících přístrojů pro měření vibrací. Metoda měření vibrací pomocí Helium neonového laseru od firmy Renishaw byla realizována za pomoci doc. Ing. Vladimíra Paty, Dr. na ústavu metrologie a zkušebnictví. Měření pomocí Viditech VDT02-AB bylo možné díky zapůjčení tohoto přístroje firmou Viditech. Při všech měřeních byly použity stejné otáčky o hodnotě 2500 ot/min aby bylo možné naměřené signály mezi sebou porovnávat. Při měření byla na rotující části soustavy použita nevývaha která sloužila jako zátěž stroje a způsobovala několikanásobné zvýšení první harmonické otáčkové frekvence.

Pro srovnávání naměřených signálů bylo nutné nejprve vypočítat pro použité ložisko a předpokládané vady chybové frekvence. Tyto frekvence lze vypočítat dvěma způsoby jednak z rozměrů ložiska a také jen z počtu kuliček a z použitých otáček. Po srovnání s naměřenými frekvencemi se ukázalo, že metoda výpočtu odvozená pouze z počtu kuliček a otáček je dosti nepřesná a proto ji lze použít jen jako orientační. A pro hledání chybových frekvencí jsem použil hodnoty vypočtené z rozměrů ložiska.

Při srovnání jednotlivých průběhů byla u měření pomocí přístroje Viditech zjištěna příliš malá rozlišitelnost proto nemá smysl toto měření srovnávat s ostatními. I samostatné srovnání s vypočtenými frekvencemi vad je neprůkazné a lze ho brát jen orientačně, a ne na hledání přesných frekvencí. Takže pro srovnání zbývají zbylé tři způsoby měření. Ze kterých ještě u měření ve vertikální ose z technických důvodů odpadá měření pomocí laseru.

Srovnání zbylých měření. U nepoškozeného ložiska je dobře patrné, že na vypočtených chybových frekvencích není žádná špička odpovídající těmto vadám, z toho lze usuzovat, že ložisko nebylo nijakým způsobem porušeno. U ložiska I je naopak průkazná špička na frekvenci přibližně rovné vypočtené frekvenci vady na vnějším kroužku. U ložiska II se podařilo pomocí vypočtených frekvencí prokázat vadu vnějšího kroužku a dokonce odhalit skrytou vadu kuličky. Na Ložisku III byla pomocí vypočtených frekvencí průkazná vada vnitřního a vnějšího kroužku ložiska a další vady nelze s jistotou prokázat z důvodu zkreslení signálu způsobené vadami vnějších vlivů.

V této práci se mě podařilo prokázat spojitost mezi vypočtenými chybovými frekvencemi a frekvencemi změřenými pro dané druhy vad. Frekvence vypočtené odpovídali s malou odchylkou frekvencím změřeným. Tato spojitost se dokonce podařila prokázat u měření více přístroji a pro více různých druhů vad.

Ze zkušeností získaných při vytváření této práce bych ostatním, kteří budou dělat na podobném projektu doporučil provést deformaci ložiska tak, aby bylo přesně dáno o jakou vadu se jedná a jaká frekvence se má hledat. Také by tato vada měla být taková, aby se minimalizovalo zkreslení zaválcováním při početnějších měření. Dále je důležité si pro každý problém vybrat ten správný měřicí přístroj, kterým získáme ty nejpřesnější výsledky, což se nám v této práci vcelku povedlo.

8 Seznam použité literatury

- [1] KREIDL, M.; Šmíd, R.; Technická diagnostika. : 1. vydání Praha: BEN – technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6
- [2] KREIDL, M. a kol.; Diagnostické systémy. : 1. vydání Praha :Vydavatelství ČVUT, 2001. 352 s. ISBN 80-01-02349-4
- [3] JANOUSEK, I.; Kozák, J.; Taraba, O. a kol.; Technická diagnostika. :1. vydání Praha, SNTL Praha, 1988. 432 s. ISBN 04-236-88.
- [4] SKF *Průvodce vibrační diagnostikou*. Praha: DIF s.r.o., 1995. 66 s. CM5003-CZ
- [5] SUCHÁNEK, D. *Přehled současného stavu a nových trendů při hodnocení poškození valivých ložisek*. Brno, 2007. 39 s, Bakalářská práce na fakultě Strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně na Ústavu konstruování. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [6] *Příručka SKF pro údržbu ložisek*. SKF, 1991. 333 s. Reg 70.3 000.1993-12
- [7] VDOLEČEK, F. *Spolehlivost a technická diagnostika*. Brno 2002.[cit. 2007-11-04] Dostupné na WWW:<<http://autnt.fme.vutbr.cz/Lab/A1-731a/FSD.pdf>>
- [8] VOJÁČEK, A. *Principy akcelerometrů*. [cit. 2008-02-02] Dostupné na WWW: <http://www.automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART303-principy-akcelerometru--1-dil--piezoelektricke.html>
- [9] HELEBRANT, F. a kol.; *Studijní podklady pro certifikaci odborné způsobylosti pracovníků v oblasti vibrodiagnostiky*. Zlín 2000. ISSN 1210-311X
- [10] [cit. 2008-04-02] Dostupné na WWW:http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/VIBDI_6.pdf
- [11] [cit. 2008-03-12] Dostupné na WWW:< http://www.skf.com/portal/skf_cz/home>
- [12] [cit. 2008-04-06] Dostupné na WWW:<www.Viditech.cz>
- [13] [cit. 2008-02-23] Dostupné na WWW:<www.Adash.cz>
- [14] [cit. 2008-04-26] Dostupné na WWW:<www.awac.cz>
- [15] [cit. 2008-02-23] Dostupné na WWW:<www.renishaw.cz>
- [16] [cit. 2008-05-01] Dostupné na WWW:<<http://digital.ni.com/worldwide/czech.nsf/main?readform>>