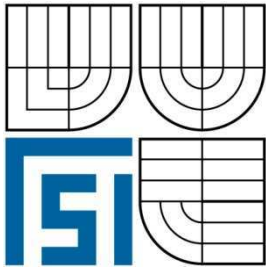


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VIBRODIAGNOSTIKA LOŽISEK

VIBRATION DIAGNOSTICS OF BEARINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL NAVRÁTIL

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILAN KLAPKA

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Navrátil

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Vibrodiagnostika ložisek

v anglickém jazyce:

Vibration diagnostics of bearings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti vibrodiagnostiky kluzných a valivých ložisek doplněný vymezením trendů budoucího vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

1. Definicí základních pojmů.
2. Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti.
3. Analýzu a zhodnocení získaných poznatků.
4. Vymezení trendů budoucího vývoje.
5. Souhrnnou bibliografii.

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva.

Účel zadání: pro VaV a tvůrčí činnost ÚK

Typ BP: řešeršní

Seznam odborné literatury:

Kreidl, M.-Šmíd, R. Technická diagnostika, Ben - technická literatura, Praha 2006

Braun, S.-Ewins, D.-Rao, S. S. Encyclopedia of vibration, Academic Press, London 2002

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Klapka

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 21.10.2008

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce uvádí podstatu metod vibrodiagnostiky valivých ložisek, jejich zhodnocení a jejich význam v jednotlivých fázích poškození ložiska, které jsou zde také blíže popsány. Zaměřili jsme se na tyto metody: akustická emise, SPM (shock pulse method), SEE (spectral emission energy), obálková (envelope) metoda, High frequency emission, Crest faktor, Kurtosis faktor a speciální metoda pro pomaloběžné stroje Adash Compressed Time.

ABSTRACT

This bachelor's thesis introduces the basic principles of vibrodiagnostic methods and their importance for individual fase of bearing's damage. The selected methods studied are: acoustic emission, SPM (shock pulse method), SEE (spectral emission energy), envelope method, High frequency emission, Crest factor, Kurtosis factor and special method for slow-motion machines Adash Compressed Time.

KLÍČOVÁ SLOVA

vibrodiagnostika, vibrace, valení, ložisko, poškození, fáze, metoda, diagnostika, technický stav

KEYWORDS

vibrodiagnostic, vibration, rolling, bearing, damage, phase, method, diagnostic, condition

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NAVRÁTIL, P. *Vibrodiagnostika ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Klapka

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Vibrodiagnostika ložisek* napsal samostatně pod vedením Ing. Milana Klapky a uvedl v seznamu všechny literární i jiné zdroje.

V Brně dne 5.května 2009

.....
Pavel Navrátil

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Milanu Klapkovi za ochotu, cenné rady a věcné připomínky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a mým přátelům za podporu při tvorbě této práce.

OBSAH	11
ÚVOD	12
1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ	13
2 PŘEHLED A ROZBOR LITERATURY V DANÉ OBLASTI	14
3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ	15
3.1 Vibrace	15
3.1.1 Určující veličiny vibrací	16
3.2 Valivá ložiska	17
3.2.1 Poškození valivých ložisek	18
3.3 Vibrodiagnostika	20
3.3.1 Obecná metodika vibrodiagnostiky	20
3.3.2 Měřicí řetězec	21
3.4 Jednotlivé metody vibrodiagnostiky	22
3.4.1 Akustická emise	22
3.4.2 Spectral emission energy	23
3.4.3 Shock Pulse Method	24
3.4.4 Crest Faktor	26
3.4.5 Kurtosis Faktor	27
3.4.6 Obálková (envelope) metoda	28
3.4.7 High frequency emission	29
3.4.8 Adash compressed time	30
4 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE	32
5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	33
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	34
6.1 Seznam použitých zkratk	34
6.2 Seznam použitých symbolů a veličin	34
7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	35

ÚVOD

V minulosti bylo považováno za jedinou úlohu údržby připravenost provozu a schopnost vyrábět při minimálních nákladech. Dnes už si stále více firem uvědomuje, že údržba má vliv na všechny oblasti obchodních rizik a efektivnosti. Z velké části ovlivňuje bezpečnost, efektivní využívání energií, kvalitu výrobků a uspokojování potřeb zákazníků, což znamená, že údržba hraje jednu z důležitých úloh v životě celé organizace. Zabezpečuje schopnost zařízení plnit svoji funkci, spolehlivost a v neposlední řadě i jeho bezpečnost.

Zabezpečit spolehlivost strojního zařízení metodami jako je „provozování až do poruchy“ nebo údržba v pevně stanovených intervalech je příliš problematické. Nedostatkem metody „provozování až do poruchy“ je ta skutečnost, že lze jen obtížně, pokud vůbec, odhadnout kdy a jaká porucha nastane, proto se údržba nedá plánovat. K řešení problému je zpravidla nutná delší odstávka porouchaného stroje, nutnost diagnostikovat vadu a poté provést opravu, což je velmi neekonomické a časově náročné. Při údržbě v pevně stanovených intervalech je těžké určit hranici, kdy je třeba vykonat údržbu. Čas výměny součástí je obvykle stanovený výrobcem, který však nezohlední konkrétní podmínky daného provozu. Tento problém můžeme vyřešit, jestliže máme dostatek informací o skutečném stavu zařízení při provozu. Pak lze odhalit skryté vady, ze kterých by se brzy vyvinuly vážné poruchy. Takto je možné předcházet dlouhým odstávkám strojů, které by znamenaly velké finanční ztráty. Výhodou je také prodloužení životnosti jednotlivých elementů stroje a možnost zásahu až v okamžiku, kdy je to skutečně potřebné. Nebo například lze optimalizovat provozní podmínky pro zvýšení efektivity stroje. To vede ke zvýšení jeho spolehlivosti, která je známkou jakosti.

Informace o stavu zařízení získáme měřením. Pro různá strojní zařízení používáme různé metody měření, společným jménem technickou diagnostiku. Ta se dále dělí na vibrodiagnostiku, termodiagnostiku, měření ultrazvukem, analýzu olejů, motormonitor, endoskopii, defektoskopii a jiné diagnostické metody. V této práci se však s ohledem na zadání budeme zabývat pouze vibrodiagnostikou ložisek.

1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Technická diagnostika – vědní obor, který se zabývá bezdemontážními a nedestruktivními způsoby zjišťování technického stavu objektu.

Diagnostické prostředky – soubor technických zařízení a pracovních postupů, které umožňují analýzu a vyhodnocení stavu diagnostikovaného objektu. Dále se dělí na ON-LINE a OFF-LINE prostředky. Pomocí ON-LINE prostředků (na rozdíl od OFF-LINE) lze diagnostikovat technický objekt za plného provozu.

Stav technického objektu – soubor vlastností jednotlivých prvků objektu, které vyjadřují schopnost tohoto objektu vykonávat požadovanou funkci dle technické specifikace pro jeho užívání.

Porucha – jev, který ukončí provozuschopnost zařízení.

Vada – stav, při němž dochází k náhlé skokové změně měřeného parametru bez příčinné souvislosti při konstantních technických podmínkách.

Údržba objektu – proces zajišťující provozuschopnost objektu. Dále se dělí na údržbu po poruše objektu, údržbu v časových intervalech a údržbu podle skutečného stavu objektu.

Vibrodiagnostika – způsob diagnostikování technického stavu objektu při použití vibrace jako zdroje informací pro analýzu.

Vibrace – dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy.

Diagnostický signál – vyjadřuje průběh vhodného ukazatele (např. vibrace), který je přímo závislý na technickém stavu diagnostikovaného zařízení a je „snadno“ měřitelný.

Spektrální analýza – Popisuje rozložení jednotlivých složek signálu ve frekvenční oblasti. Vyjadřuje analyzovaný signál pomocí na sebe kolmých tzv. ortogonálních bázeových funkcí.

2 PŘEHLED A ROZBOR LITERATURY V DANÉ OBLASTI

Při psaní této práce jsem vycházel z doporučených publikací, vědeckých článků, odborných článků a materiálů firem, které se vibrodiagnostikou zabývají. Pro získání obecného přehledu v této problematice je vhodný vědecký článek autorů V.A. Karaseva a A.B. Roitmana [2] a publikace Marcela Kreidla a Radislava Šmída [12]. Zde je zdůrazněna většina výhod technické diagnostiky, její podstata a jsou zde uvedeny i nejběžnější metody zpracování signálu vibrací jako např. FFT. Na tuto publikaci lze navázat studiem konkrétních metod vibrodiagnostiky a analýzy vibrodiagnostického signálu. Informace o průmyslových metodách lze nalézt v odborné literatuře. Většinou se jedná o zpracování těchto metod podrobným popisem jejich principu, postupu měření i možnosti využití. Co se týče statistických metod, jakými jsou například Crest Faktor nebo Kurtosis faktor, je možno nalézt i některé rozpory mezi literaturou dnešní a minulé doby. Podrobněji jsou tyto rozpory popsány u jednotlivých metod. Dalším odvětvím literatury, ze které lze čerpat jsou vědecké články, které většinou pojednávají o nových krocích ve vývoji konkrétních metod. Jedná se především o poznatky z oblasti akustické emise nebo vlnkové transformace. Na webových stránkách některých firem, které se zabývají vibrodiagnostikou, lze také najít zmínky o metodách, které sami vyvíjejí. Jedná se však většinou jen o drobná vylepšení stávajících metod. Dobrým příkladem je metoda Adash compressed time vyvinuta firmou ADASH spol. s.r.o. Ostrava. Z dostupné literatury však není patrné, zda tato metoda opravdu přináší slibované výsledky a jestli je v praxi používána.

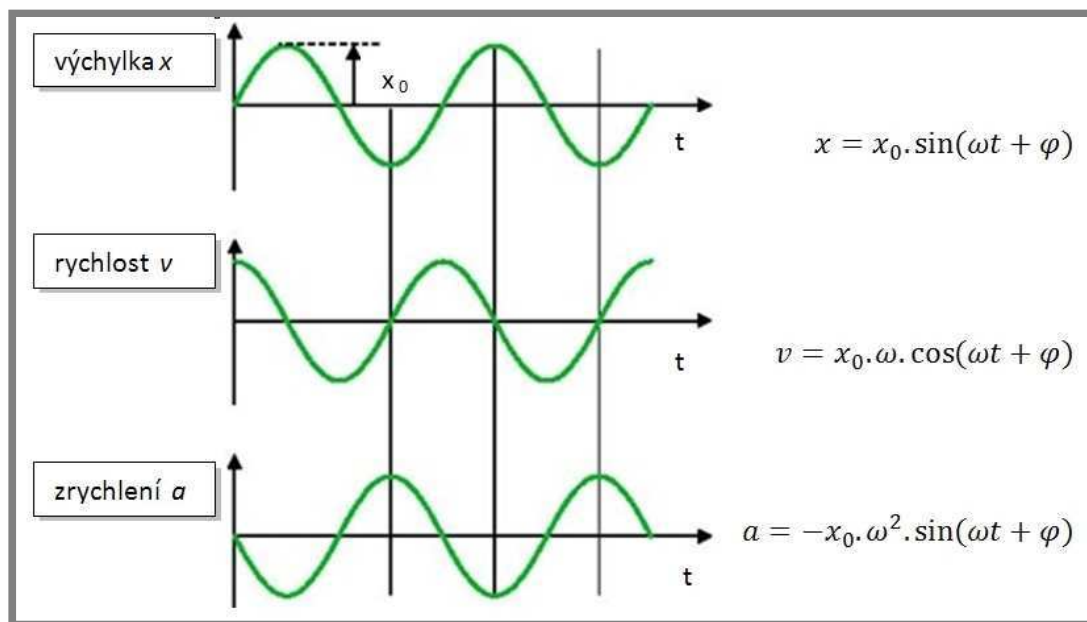
3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

3

3.1 Vibrace

3.1

Vibrace jsou způsobovány rotačními, ale i přímočaře se pohybujícími tělesy. Vliv na průběh vibrací má hlavně technický stav jednotlivých komponent stroje jako jsou hřídele, převodovky, kliková ústrojí, vačkové mechanismy, nevyváženosti rotujících dílů, vůle v kluzných ložiscích, opotřebení, únava materiálu, vznikající trhliny, koroze a jiné. Samotná vibrace je pak definována jako dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy. Jsou dány kombinací šesti pohybů, a to posunem v ortogonální soustavě souřadnic x , y , z a rotací kolem těchto os. Můžeme je popsat amplitudou a fází v daném časovém okamžiku. Mechanické systémy nemají nekonečně velkou a kmitočtově nezávislou tuhost. Proto těleso nekmitá jako jeden pevný bod, ale dochází ke vzniku vln. Vlna je změna vlastností nebo fyzikálního stavu prostředí. V tomto prostředí se šíří a přenáší energii, zatímco poloha prostředí zůstává neměnná. Podle časových změn veličin mají vibrace charakter buď periodický, neperiodický nebo náhodný. U periodických vibrací se časový průběh vibrodignostických veličin opakuje. Z těchto vibrací vychází definice harmonické vibrace, která má sinusový průběh. Pro harmonické vibrace proto stačí stanovit jedinou určující veličinu a zbývající lze dopočítat. Určujícími veličinami jsou výchylka, rychlost a zrychlení (viz. Obr. 3-1).



Obr. 3-1 Průběh určujících veličin vibrace [10]

3.1.1 Určující veličiny vibrací

Nezákladnějším způsobem jak popsat kmity je stanovení jejich výchylky, rychlosti nebo zrychlení. Vyhodnocení výchylky je vhodné pro nízkofrekvenční děje (v řádech hertzů) jako měření vůlí apod. Efektivní rychlost je z hlediska vibrodiagnostiky vhodná zejména pro stanovení energie vibrací, protože je jejím přímým měřítkem (1). Hodnotu zrychlení použijeme tehdy, chceme-li zvýraznit vysokofrekvenční složky vibrací. Zrychlení je ve vibrodiagnostice valivých ložisek nejpoužívanější veličinou.

$$E = m \cdot v_{ef}^2 \quad (1)$$

3.2 Valivá ložiska

Ložisko je nedílnou součástí prakticky všech strojních zařízení, protože umožňuje přenos zatížení při vzájemném otáčivém nebo posuvném pohybu jeho částí. U valivých ložisek je zatížení přenášeno pomocí valivých elementů, které jsou nejčastěji umístěny mezi dvěma kroužky a jejich další vzájemný pohyb je omezován klecí. Podle tvaru valivých elementů se ložiska rozlišují na kuličkové, kuželíkové, válečkové, jehlové a soudečkové. Důležitým faktorem při výběru ložiska je směr zatěžující síly. Podle toho se ložiska dělí na radiální a axiální. U radiálních ložisek většina sil působí kolmo na osu ložiska, u axiálních jsou tyto síly s osou rovnoběžné. Přesná hranice mezi těmito základními druhy ložisek neexistuje, protože většina radiálních ložisek přeneše i malé axiální síly a některé druhy axiálních ložisek jsou schopny zachytit i radiální zatížení. Každý výrobce vydává katalogy, ve kterých je možno nalézt všechny potřebné údaje o ložisku. K nejdůležitějším z nich patří jeho únosnost. Únosnost se dělí na statickou a dynamickou. Při statickém zatěžování je ložisko zatíženo v klidu nebo při velmi pomalém pohybu a zkoumají se trvalé deformace na funkčních plochách. Naopak při dynamickém zatěžování se zatížené ložisko otáčí a vyhodnocuje se jeho trvanlivost. Pod pojmem trvanlivost se rozumí počet otáček, které ložisko vykoná nebo doba provozu, než se objeví první známky opotřebení na valivých elementech nebo na drahách kroužků. Podle doporučení ISO s ohledem na provozní bezpečnost byla stanovena základní trvanlivost L_{10} , to je trvanlivost, které dosáhne (nebo ji překročí) 90% ložisek při stejných provozních podmínkách. Základní dynamickou únosností C_{10} je nazýváno největší neproměnné zatížení, při němž dosáhne 90% stejných ložisek základní trvanlivosti 1 000 000 otáček. Vztah mezi základní trvanlivostí L_{10} , základní dynamickou únosností C_{10} a zatížením vyjadřuje rovnice trvanlivosti (2), která platí pro všechny typy ložisek. Obvykle se k této rovnici přidává ještě několik součinitelů, které zohledňují vliv mazání, uložení, typu ložiska aj. Jestliže není zatížení ložiska čistě radiální nebo čistě axiální dosazujeme do rovnice trvanlivosti tzv. ekvivalentní zatížení, které má stejný vliv na vznik poruchy jako působení axiálního a radiálního zatížení zároveň.



Obr. 3-2 Valivá ložiska [11]

$$L = L_{10} \cdot \left(\frac{C_{10}}{F} \right)^a \quad (2)$$

3.2.1 Poškození valivých ložisek

Opotřebení valivých ložisek způsobují vzájemné interakce mezi zatíženými a vůči sobě se pohybujícími částmi nebo vlivem prostředí. Rozlišujeme poškození valivých elementů, klece, kroužků a v některých případech i těsnění. Při ideálních provozních podmínkách je důvodem ukončení životnosti ložiska pouze oddrolování materiálu doprovázené tvorbou důlků tzv. pitting. Jedná se o projev kontaktní únavy způsobené opakovaným stykem valivého elementu a kroužku ložiska.



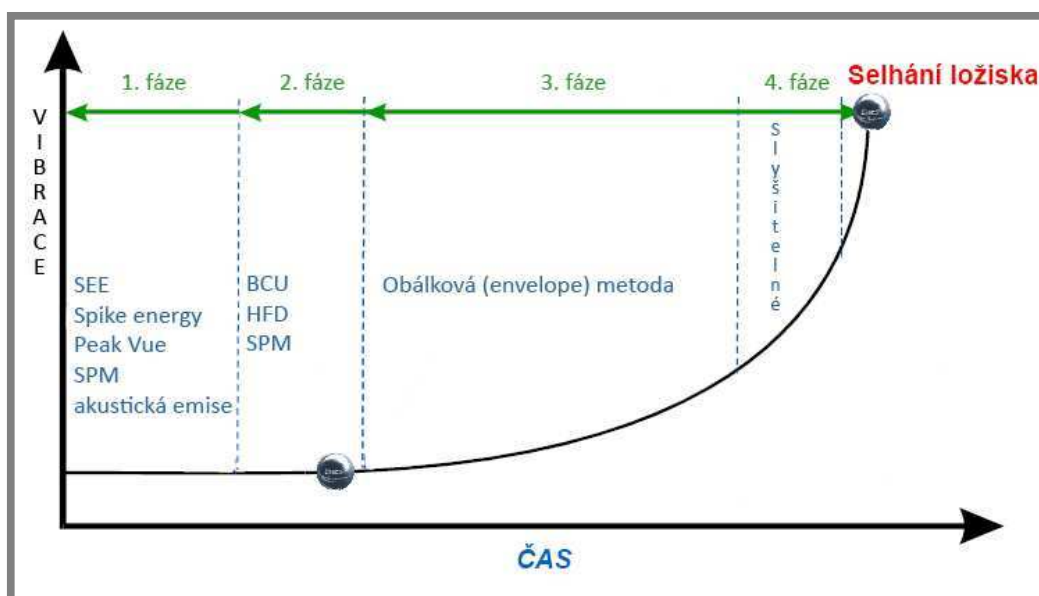
Obr. 3-3 Pitting na vnitřním kroužku ložiska

V neidealizovaných provozních podmínkách bývají poškození způsobena nesprávnou montáží a uložením (volba nevhodného náradí nebo postupu, nešetrné zacházení, nesouosost, nevyváženost, nekvalitní opracování stykových ploch) provozními podmínkami a údržbou (nevhodné mazání, extrémní teploty a vlhkost, znečištění, přetěžování, vibrace, průchod elektrického proudu, koroze). Poškození klece bývá způsobeno vibracemi, nadměrnými otáčkami, opotřebením, zablokovaním nebo nesouosostí. Klec je vyrobena z materiálu s nižší tvrdostí, proto je ovlivněna nedostatečným mazáním jako první. Pokud se otvory pro valivé elementy zvětší vlivem opotřebení, mohou výsledné síly způsobit rozlomení klece.

3.2.1.1 Jednotlivé fáze poškození ložiska

Z hlediska vibrodiagnostiky je s ohledem na použití zařízení a metod důležité rozlišit v jakém stádiu poškození se ložisko nachází. V počáteční neboli první fázi se vlivem defektů o rozměrech řádově několika mikrometrů začne tělesem ložiska akustická emise ve frekvencích několika Mhz. Spojitý signál z piezoelektrického snímače se obvykle filtruje pásmovou propustí v oblasti 10^5 Hz a poté je statisticky zpracován. Střední hodnota, efektivní hodnota, směrodatná odchylka aj. se porovnávají v průběhu životnosti ložiska a z trendu hodnot se určuje narůstající poškození nebo se srovnává s referenční hodnotou jako u metody *Spectral Emitted Energy* (SEE) patentované u firmy SKF. Dalšími použitelnými metodami v této fázi jsou *Spike energy* (SE), *Peak Value*, *Shock pulse method* (SPM) a další. V druhé fázi dochází již k poškození jednotlivých elementů, ale vibrační spektrální složky odpovídající nízkým frekvencím podle vztahů (viz. kapitola 3.4.6) jsou zcela maskovány nízkofrekvenčními spektrálními složkami oblasti středních kmitočtů, které jsou běžně vyvolávány např. záběrem ozubených kol převodovky. Z tohoto důvodu se diagnostika ložiska v této fázi provádí v rozmezí 20-60 kHz. Při měření se používají speciální akcelerometry s vysokou hodnotou vlastní rezonanční frekvence. Signál z akcelerometru se nejprve širokopásmově filtruje pro odstranění nízkofrekvenčních vibračních složek jiných částí stroje. Poté se pro diagnostické

zpracování signálu používá řada metod jako např. *High Frequency Detection* (HF), *Bearing Condition Unit* (BCU) nebo *Shock pulse method* (SPM). Blíže se budeme zabývat těmito jednotlivými metodami v následující kapitole. Ve třetí fázi poškození ložiska už lze použít klasické akcelerometry. Malé trhlinky z předchozích fází se zvětšují a rozšiřují i na hrany oběžných drah. Těleso ložiska se po rázech rozkmitá na frekvenci v rozmezí 5 kHz – 20 kHz. Pro zpracování signálu je vhodná například obálková (envelope) metoda. Některé studie uvádějí, že projde-li ložisko třetí fází zbývá mu cca 1% jeho průměrné životnosti. Ve čtvrté a také poslední fázi se už obvykle jedná o kritické poškození ložiska a lze zachytit vibrační spektrální složky přímo v oblasti nízkých frekvencí.

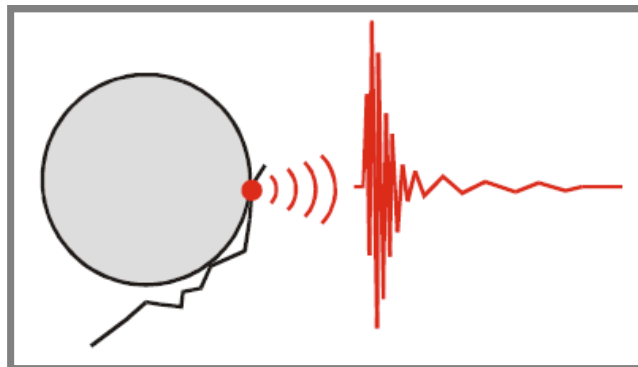


Obr. 3-4 Znárodnění použití jednotlivých diagnostických metod s ohledem na fázi poškození [6]

3.3 Vibrodiagnostika

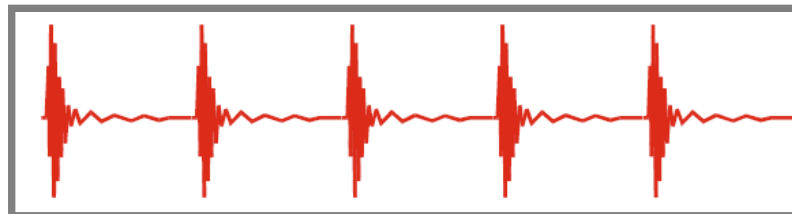
3.3.1 Obecná metodika vibrodiagnostiky

Podstatou funkce valivého ložiska je přenos zatížení za pomoci valivých elementů, které se rovnoměrně odvalují po kruhových drahách vnitřního a vnějšího kroužku. Existuje-li v drahách nebo na valivém elementu trhlina, je tento rovnoměrný pohyb narušen a vzniká dynamický ráz. Důsledkem rázu je signál, který se šíří tělesem ložiska, domkem a dalšími strukturami stroje až do místa, kde ho jsme schopni zachytit snímačem a vyhodnotit.



Obr. 3-5 Vznik dynamického rázu [4]

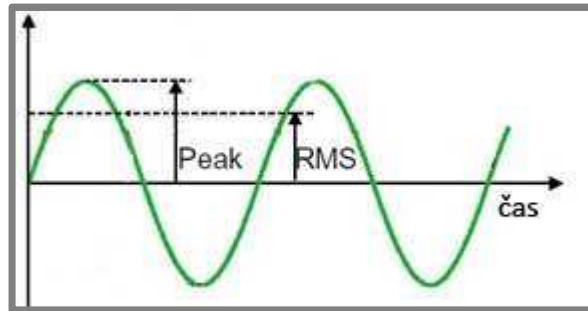
Protože se přes trhlinu odvalují stále další elementy, vzniká série rázů. Jejich průběh je zachycen na Obr. 3-6



Obr. 3-6 Série rázů vzniklá opakovaným odvalováním valivého elementu přes trhlinu [4]

Základním typem vyhodnocení jsou širokopásmové analýzy, při kterých je do cesty signálu vložen širokopásmový filtr, který propouští jen zvolené pásmo signálu. Pro standardní měření bývá toto pásmo v rozmezí 5-15 kHz. Poté se pro přefiltrovaný signál vyhodnotí efektivní (RMS) a špičková (PEAK) hodnota. Efektivní hodnota RMS zahrnuje energii obsaženou v signálu i její časový průběh a je dána vztahem (3). Pod pojmem špičkové hodnoty PEAK si lze jednoduše představit maximální naměřenou špičku signálu (viz. Obr. 3-7).

$$RMS = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2(t) \cdot dt \quad (3)$$

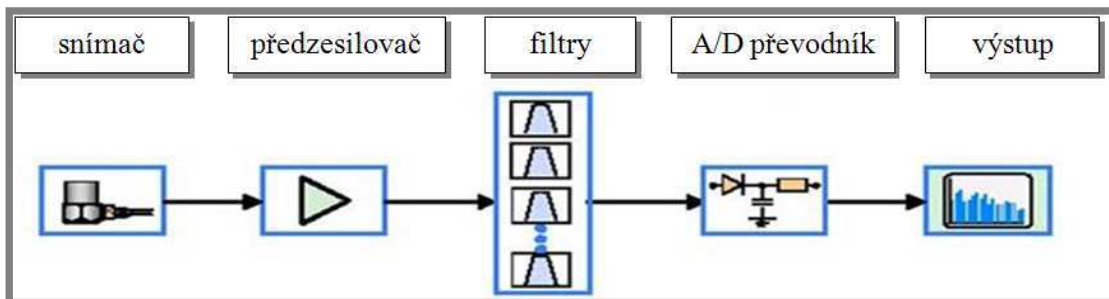


Obr. 3-7 Grafické znázornění hodnot PEAK a RMS [10]

3.3.2 Měřicí řetězec

3.3.2

Měřicím řetězcem rozumíme určitou posloupnost prvků, které se při měření technického stavu objektu používají. Obvykle se liší druhem a rozmístěním snímačů nebo také použitím různých typů pásmových filtrů. Základní schéma (viz. Obr 3-8) je však u většiny metod podobné.



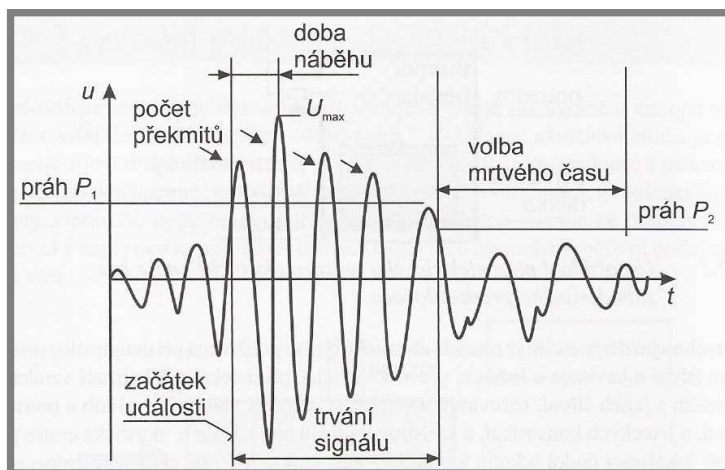
Obr. 3-8 Měřicí řetězec [10]

Signál ze snímače pokračuje přes předzesilovač do pásmových filtrů, kde se separuje pouze potřebná část signálu a odstraní se například vibrace, které se na ložisko přenášejí z jiné části stroje. Jelikož je signál, který vystupuje ze snímače analogový, je třeba ho pro budoucí zpracování digitalizovat. Převod z analogového signálu na digitální zabezpečuje tzv. A/D (analog to digital) převodník. Po projití signálu převodníkem je třeba zvolit metodu zpracování a výslednou analýzu zobrazit.

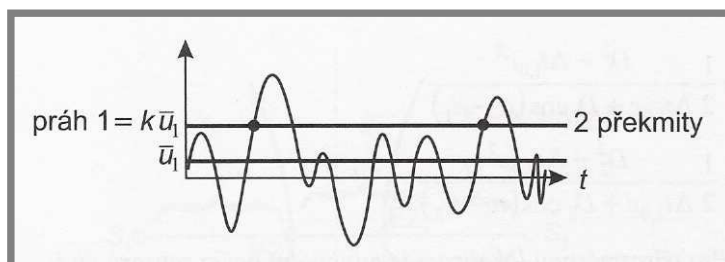
3.4 Jednotlivé metody vibrodiagnostiky

3.4.1 Akustická emise

Pomocí této metody lze detekovat první příznaky vznikajícího poškození, protože je schopna zachytit i velmi malé energeticky ztrátové procesy jakými jsou tření, kavitace a styk částí valivých ložisek. Principem je snímání energie vln, které vznikají v makrostruktuře i mikrostruktuře tělesa vlivem dislokačních a degradačních procesů. Energie těchto vln je velmi malá, proto se používají citlivé piezoelektrické senzory se zabudovaným předzesilovačem, které dokáží zachytit i dislokace v řádech 10^{-14} m. Akustická emise se dělí na nespojitou (impulsní) a spojitou. Pro nespojitou emisi je typický krátký, postupně tlumený signál v řádu několika nanosekund, který je charakteristický např. pro vznik trhliny. Zde vyhodnocujeme četnost akustické emise za časový interval, četnost překmitů přes zvolenou prahovou úroveň, čas prvního překročení prahu, maximální hodnotu signálu, dobu trvání události, dobu od překročení prahové úrovně do dosažení maximální amplitudy signálu, amplitudové spektrum signálu, deformaci tvaru impulzu pomocí časově-frekvenčního popisu a energii impulzu. Signál spojitě akustické emise je obvykle vyvolán událostmi, které nejsou časově ohraničeny, bývají to fyzikální jevy jako například kavitace v kapalině, plastická deformace při styku kovových povrchů atd. Při zpracování tohoto signálu vyhodnocujeme střední hodnotu, efektivní hodnotu, maximální hodnotu, amplitudovou distribuční funkci, standardní odchylku, rozptyl, vyšší řády momentů, histogram amplitud, spektrální hustotu výkonu, četnost překmitů přes prahovou úroveň, energii emisních událostí. Rozdíl mezi signály spojitě a nespojitě akustické emise je patrný z Obr. 3-9 a Obr. 3-10.



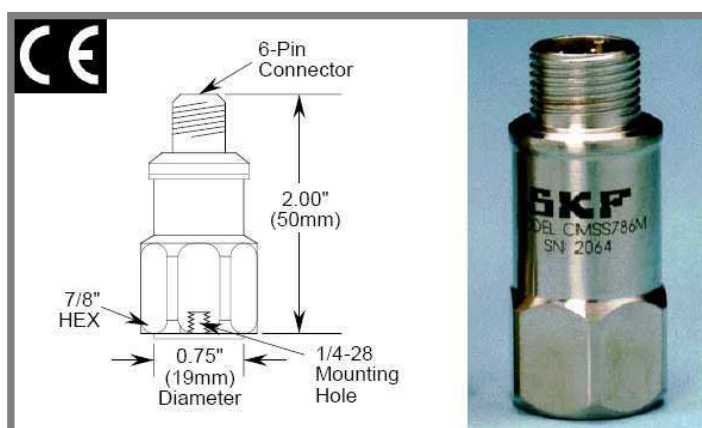
Obr. 3-9 Signál nespojitě emise [12]



Obr. 3-10 Signál spojitě emise [12]

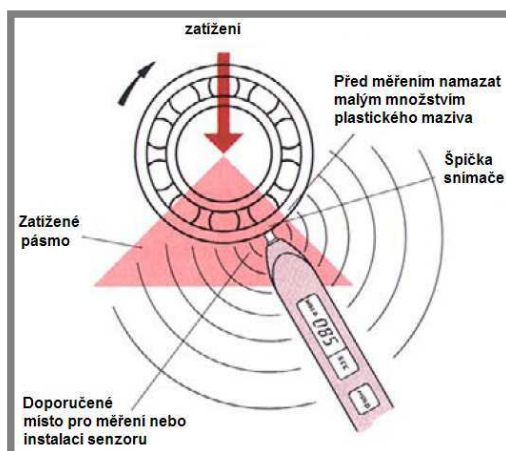
3.4.2 Spectral emission energy

Metoda Spectral Emission Energy patentované u firmy SKF se od ostatních metod odlišuje kombinací vysokofrekvenčních měření v oblasti 250 kHz – 350 kHz s obálkovou metodou pro zjištění stavu ložiska. Vytváření obálky spočívá v separaci pouze vysokofrekvenčních kmitů. Separací vysokofrekvenčních kmitů se snižuje energetický obsah, ale poruchy v signálu stále zůstávají ve stejných časových intervalech. Odebrané nízkofrekvenční kmitů bývají projevem nesouososti, montážních vůlí, vibrační pohonu apod. Metoda SEE umožňuje zachytit i styk kov-na-kov při poruše mazacího filmu, takže lze poté na základě těchto výsledků navrhnout změny v mazání ložiska a tím prodloužit jeho životnost. Používají se speciální snímače, které v sobě kombinují širokopásmový piezoelektrický akcelerometr a SEE snímač (viz. Obr. 3-11).



Obr. 3-11 Speciální snímač metody SEE [6]

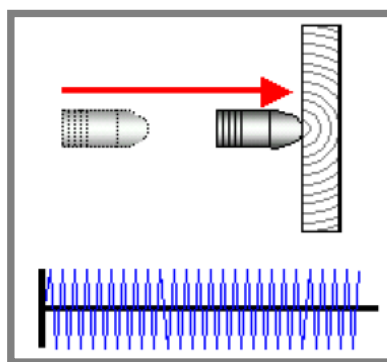
S ohledem na útlum signálu, by spojení snímače s povrchem mělo být dostatečně stálé, proto se při instalaci snímače nanáší na hrot malé množství plastického maziva nebo lehkého strojního oleje. Metoda SEE není příliš citlivá na umístění snímačů, přesto je nutno dodržet několik zásad. Snímač musí být umístěn kolmo k povrchu tělesa, přitlačován silou 5N – 20N a musí se nacházet v tzv. zatíženém pásmu, jak znázorňuje následující Obr. 3-12.



Obr. 3-12 Správné umístění snímače [13]

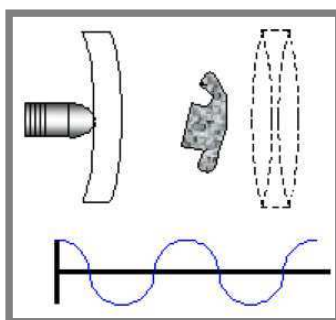
3.4.3 Shock Pulse Method

Metoda Shock pulse method (SPM) je metoda zpracování signálu využívající k měření kovový náraz a specifický hluk jaký můžeme najít u valivých elementů ložisek a ozubených kol. Uvádí se, že je mnohem kultivovanější (přesnější) než ostatní vysokofrekvenční měření. SPM má široké využití po celém světě jako podnět pro včasnou údržbu. Nejběžnější pro tuto metodu je měření valivých elementů ložiska, ale má i mnoho dalších aplikací např. pro zjišťování stavu převodovek, kompresorů a další aplikace, kde je kontakt kov-na-kov zdrojem opotřebení. Metoda SPM je založena na sledování dvou odlišných dějů, které nastávají při styku kov-na-kov. Jako první vzniká při nárazu tzv. rázová vlna o velké frekvenci a nevelké amplitudě. Její frekvence se nachází v pásmu ultrazvuku a její hodnota bývá kolem 36 kHz, výchylka je závislá na rychlosti nárazu. Rázová vlna se šíří kovem směrem od místa jejího vzniku, kde je pohlcována uhlíkem a drobnými defekty v materiálu.



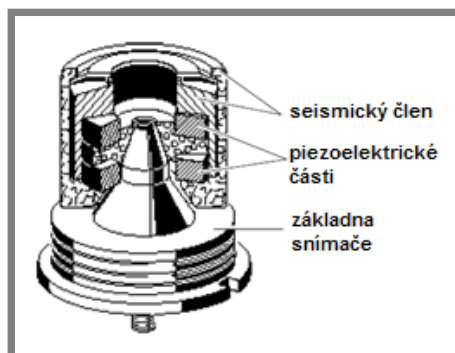
Obr. 3-13 Průběh signálu rázové vlny při nárazu [7]

Při dalším rozvíjení rázu nastává další fáze. Jednotlivé struktury povrchu kovu se vychylují a stlačují. Po jejich maximálním vychýlení se v několika cyklech zpátky pružně ustálí do své výchozí polohy. Tento jev je tzv. vibrační fáze. Frekvence vibrací je závislá na tvaru, hmotnosti a tuhosti materiálu.



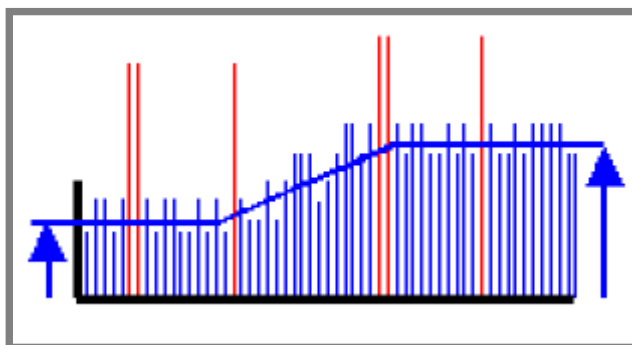
Obr. 3-14 Průběh vibrace [7]

K měření se používají speciální akcelerometry, které mají patentovanou konstrukci tzv. Tandem piezo accelerometers. Tandem piezo akcelerometry v sobě kombinují výhody akcelerometrů, které reagují na smykové a na tlakové namáhání. Těmito výhodami jsou zejména nízký práh napět'ové citlivosti, nízká citlivost na krátkodobé změny teploty, zabudovaný „line-drive“ zesilovač, vysoká odolnost proti rázům apod.



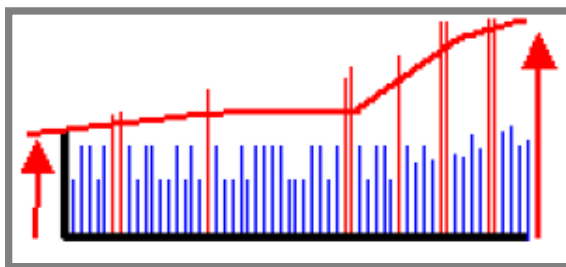
Obr. 3-15 Tandem piezo akcelerometr [9]

Metodou SPM získáváme dvě hodnoty tzv. Carpet Value a Max Value. Hodnota Carpet Value je popsána jako charakteristický šum v pozadí způsobený kontaktem styčných ploch. Tuto hodnotu získáme ikdyž je ložisko nepoškozeno, ale je poškozen pouze mazací film, protože i kontakt kov-na-kov bez poškození vyvolává zvýšení této hodnoty. Proto se tato hodnota využívá pro hodnocení mazacích schopností.



Obr. 3-16 Průběh hodnoty Carpet Value při zhoršování mazacích schopností [7]

Jestliže vznikne trhлина na ložiskovém elementu, vyvolá velké výchylky, které utvoří rázovou vlnu, která leží nad hodnotou Carpet Value (viz Obr. 3-17) tzv. Max Value. Se zvyšujícím se opotřebením ložiska hodnota Max Value roste. A proto je dobrým ukazatelem jeho opotřebením.

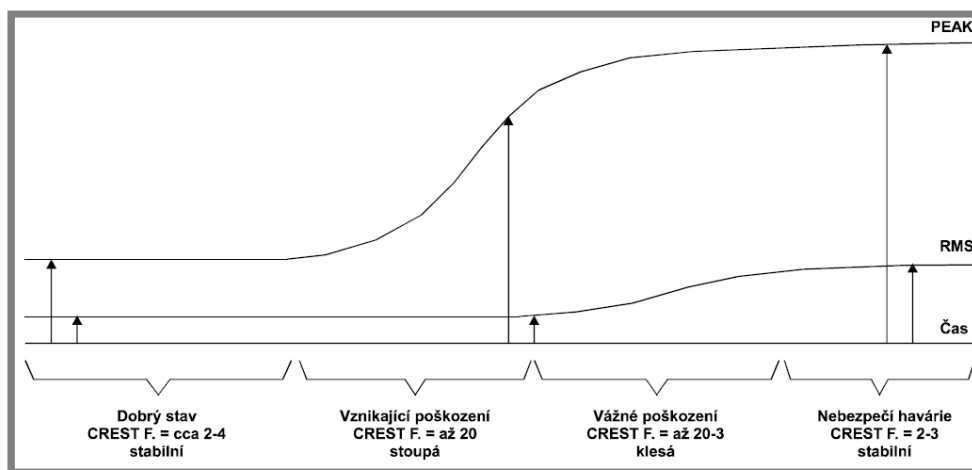


Obr. 3-17 Průběh hodnoty Carpet Value [7]

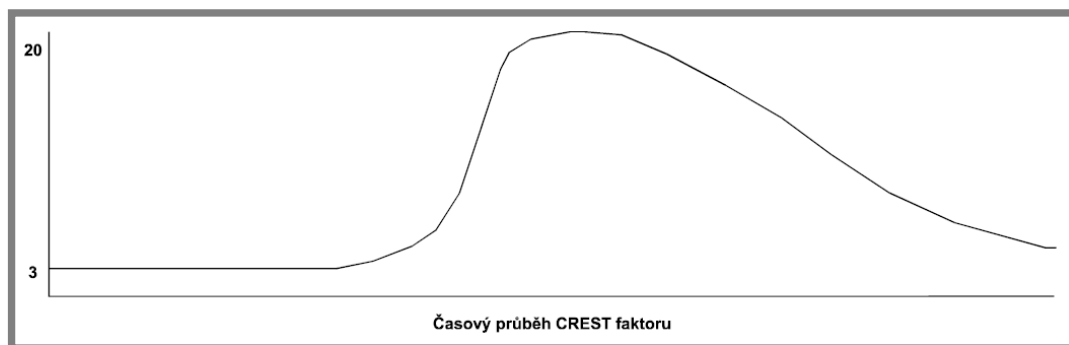
Při měření metodou SPM si musíme uvědomit, že jde o kombinaci výchylky a hustoty rázů kov-na-kov. Tyto hodnoty se nemění pouze s opotřebením ložiska, ale jsou závislé i na vnitřním průměru ložiska a počtu otáček. Proto se ke vstupu do zařízení SPM připojuje ještě snímač otáček a hodnota průměru se zadává.

3.4.4 Crest Faktor

Jedná se o jednu ze základních metod pro vyhodnocování stavu valivého ložiska. Crest faktor je dán poměrem mezi hodnotami Peak a RMS (viz. kapitola 3.3.1), proto patří do skupiny metod, které zpracovávají již naměřené hodnoty. Jeho velká citlivost je využívána i pro kontrolu mazacích filmů. Jeho nevýhodou je, že při velkém poškození ložiska se jeho hodnota velmi podobá nepoškozenému ložisku. Proto se vždy používá jako doplňková metoda. Podle starších publikací (např. Dyer D.; Stewart R.M.[19]) je hodnota crest faktoru nezávislá na rychlosti a zatížení. Pozdější publikace (Heng R.B.W.; Nor M.J.M. [20]) však dokazují opak. Crest faktor by se měl pohybovat v rozmezí hodnot 2÷4. Je-li překročena tato hodnota, jedná se o vznikající poškození. Průběh crest faktoru v závislosti na poškození ložiska je znázorněn na Obr. 3-18, časový průběh na Obr. 3-19.



Obr. 3-18 Průběh Crest faktoru v závislosti na poškození ložiska [4]



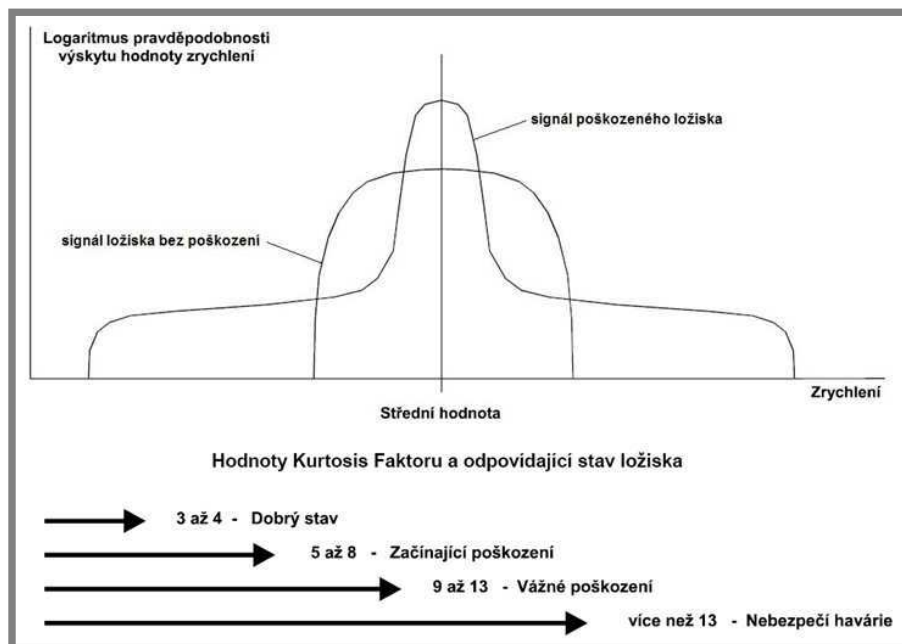
Obr. 3-19 Časový průběh Crest faktoru [4]

3.4.5 Kurtosis Faktor

3.4.5

Tento způsob zpracování zastupuje statistický přístup k řešení. Základem je předpoklad, že náhodný signál má Gaussovo normální rozdělení tzn., že se v něm nevyskytují žádné harmonické ani vysokofrekvenční pravidelné složky. Pro zjištění jestli má signál normální Gaussovo rozdělení se vyhodnocují 2 koeficienty tj. šikmost a špičatost signálu. Pro potřeby diagnostiky je důležitějším z nich špičatost. Z matematicko-statistického pohledu je Kurtosis faktor (4) vlastně jen vyhodnocením špičatosti signálu. Vyrůstá-li jeho hodnota, vyrůstá i poškození ložiska. Hodnoty Kurtosis faktoru pro ložisko bez poškození jsou v mezích 3÷4. Při překonání těchto mezí se začínají projevovat první známky poškození. Přestože se jeví Kurtosis faktor jako nejideálnější ze statistických indikátorů poškození, Tandon and Choudhury [1] podotkli, že v praxi se tato metoda příliš neujala a je používána spíše jen ve spojení s jinými vyspělými metodami např. high-frequency resonance technique (HFRT). Srovnání průběhů pro ložisko bez vady a s vadou je znázorněno na Obr. 3-20, současně zobrazuje hodnoty Kurtosis faktoru pro různá stadia poškození ložiska.

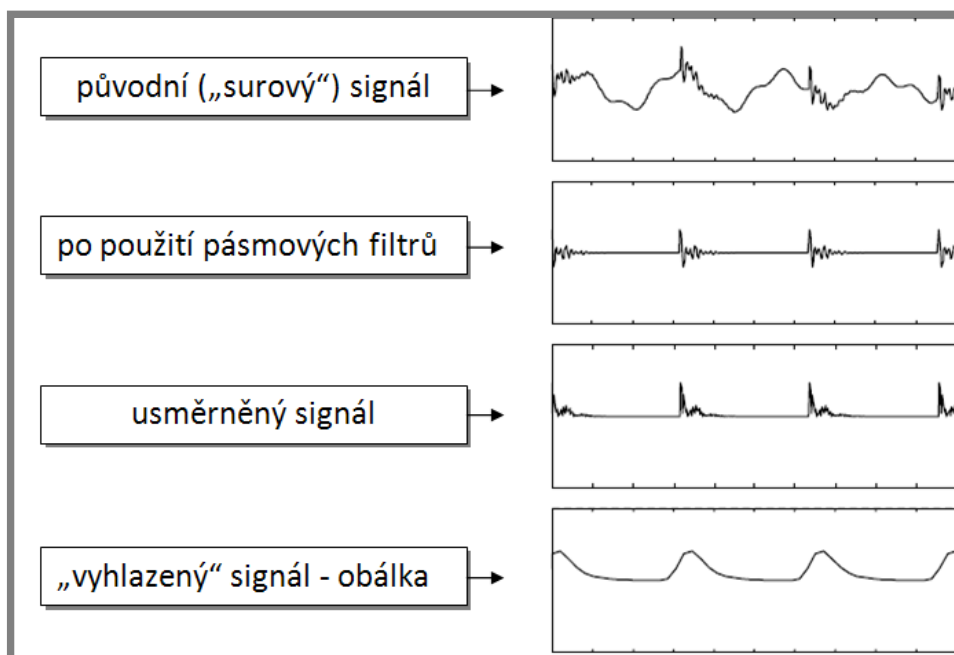
$$K = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 P(x) dx}{\sigma^4} \quad (4)$$



Obr. 3-20 Průběh Kurtosis faktoru a jeho hodnoty pro různé fáze poškození [4]

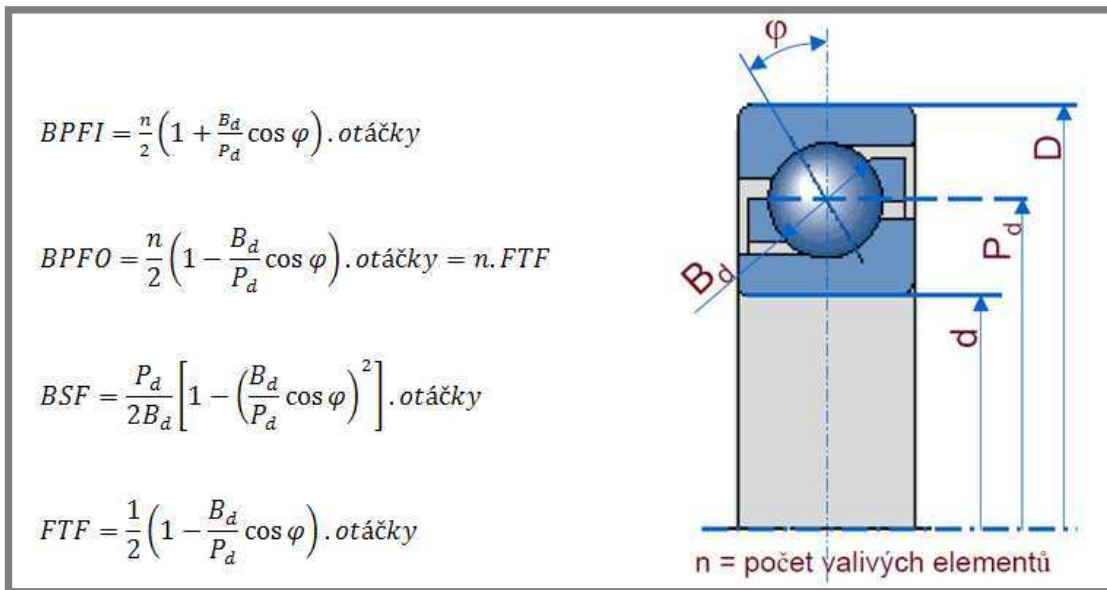
3.4.6 Obálková (envelope) metoda

Její principem je měření rázových impulsů, které vznikají odvalováním valivých elementů ložiska přes poruchy v oběžných drahách ložiska vzniklých opotřebením. Příchozí signál z akcelerometru prochází přes vysokofrekvenční filtry (odfiltrování nízkofrekvenčních kmitů, které jsou projevem montážních vůlí, nesouososti apod.) a obálkový detektor, kde dochází k vyhlazení signálu (viz. Obr. 3-21).



Obr. 3-21 Postup zpracování signálu z akcelerometru [4]

Při použití obálkové metody lze nejen indikovat poškození ložiska, ale ve spojení s FFT (Fast Fourier Transform) i poškozený element (vnitřní a vnější kroužek, valivé elementy nebo klec). Tato schopnost obálkové metody je dána tím, že tyto části mají různou relativní rychlost k ose rotace, a proto lze rozlišit specifické frekvence (viz. Obr. 3-22). (tyto rovnice se vztahují pro případ stojícího vnějšího kroužku, v opačném případě by se pouze změnilo znaménko (\pm) s výjimkou vzorce pro valivá tělíska.

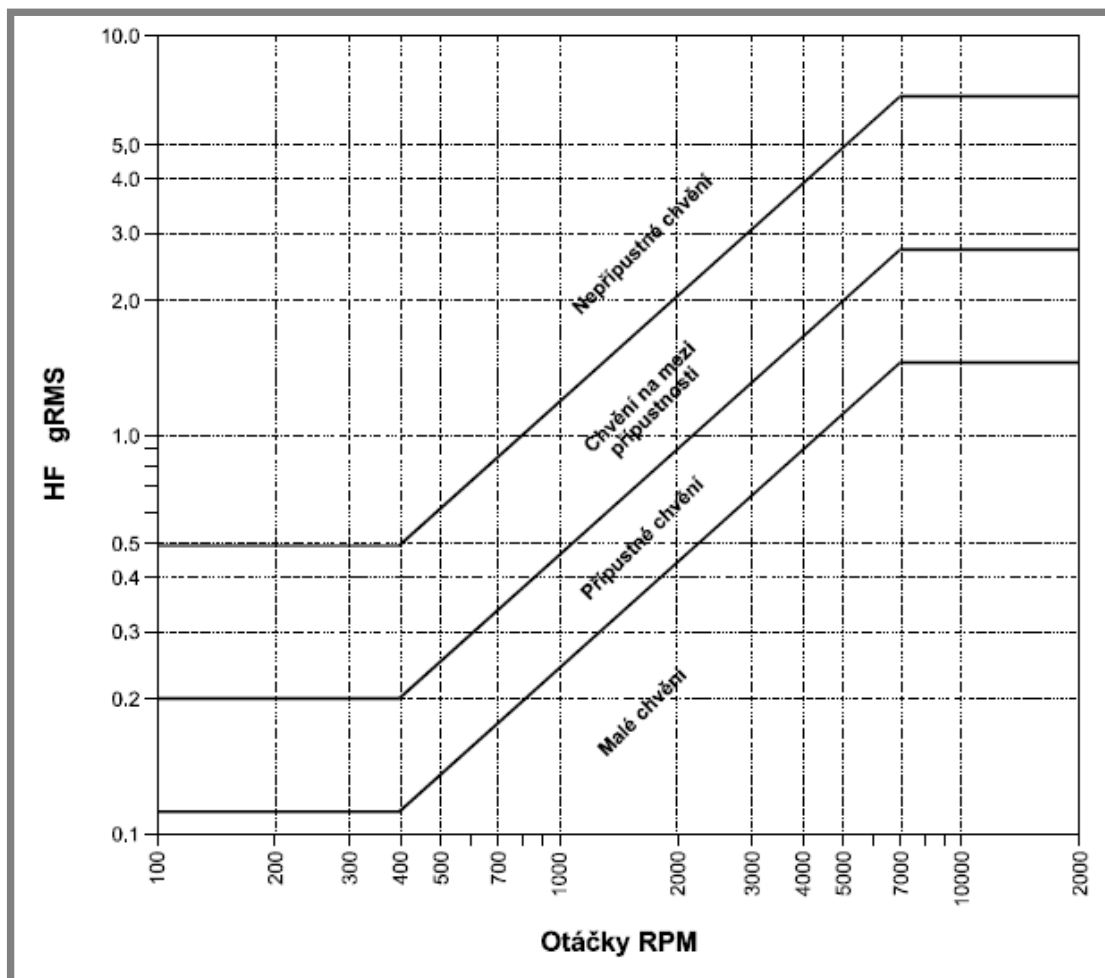


Obr. 3-22 Specifické frekvence ložiskových elementů [8]

BPFI – vnitřní kroužek, BPFO – vnější kroužek, BSF – valivá tělíska, FTF – klec
Z praktického hlediska je však možnost zjistit zda je poškozen vnitřní kroužek, vnější kroužek, klec nebo valivé elementy nepodstatná, protože ložisko musíme vždy stejně vyměnit celé.

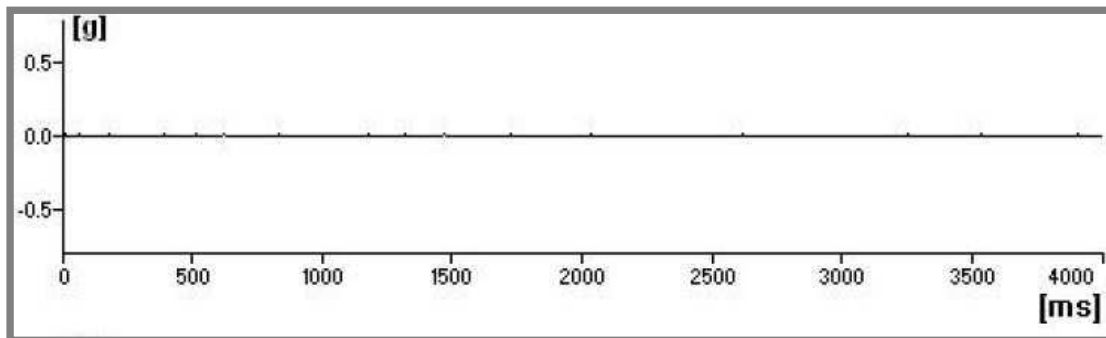
3.4.7 High frequency emission

Principem je poznatek rostoucí energie vibrací ve vyšších frekvencích současně s růstem poškození ložiska. Emitovaná vysokofrekvenční energie je udávána jako efektivní hodnota vyjádřená ve vztahu ke konstantě g (hodnota gravitačního zrychlení $g=9,81\text{m/s}^2$). Výsledná jednotka g_{RMS} je velmi citlivá na poruchy mazání a je schopna detekovat nedostatečné mazání i přítomnost nečistot v mazivu. Hodnoty g_{RMS} jsou závislé na otáčkách, proto se pro vyhodnocení stavu ložiska používá následující graf (viz. Obr. 3-23).

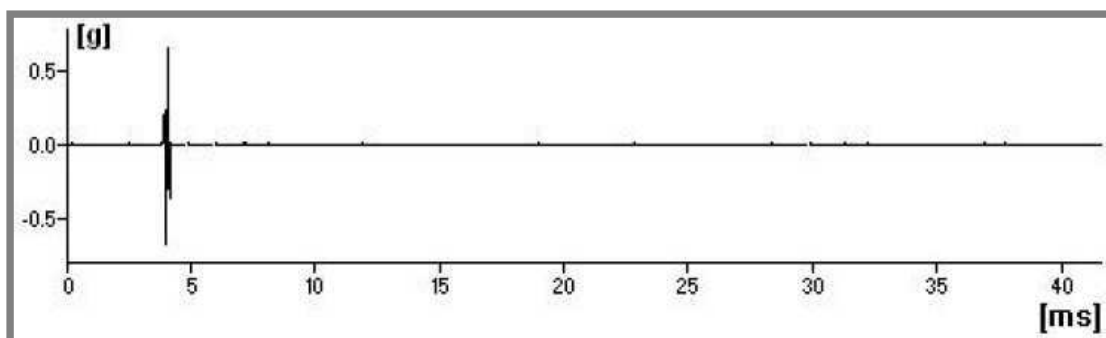
Obr. 3-23 Závislost hodnoty g_{RMS} na otáčkách [4]

3.4.8 Adash compressed time

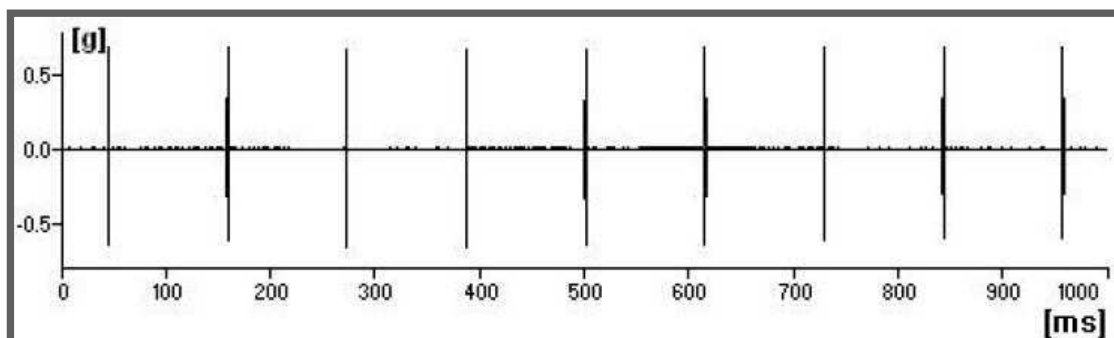
Při měření vibrací ložisek na pomaloběžném stroji (např. válcovací tratě, papírenské stroje) vzniká problém, jak nastavit tzv. vzorkovací frekvenci, protože narážíme na dva požadavky, které si navzájem odporují. Prvním je dlouhý časový záznam, abychom zachytili i rázy s nízkou četností. Druhým je potřeba měření s co nejvyšší vzorkovací frekvencí, protože rázy mohou být velmi krátké. Velká vzorkovací frekvence však klade velké nároky na záznamovou kapacitu, proto vzniká tato nelehká situace, kterou by měla řešit metoda ADASH Compressed Time (ACMT) vyvinuta firmou Adash spol. s.r.o. Ostrava. Jejím principem je schopnost nejdříve navzorkovat signál velmi rychle, což umožní zachytit i velmi krátké děje. Poté je provedeno převzorkování do nízké vzorkovací frekvence spojené s kompresí dat tak, aby informace o rázech zůstala zachována. Z následujících obrázků a popisem měření pod nimi je patrné, že metoda má opravdu své opodstatnění.



Obr. 3-24 Výsledek měření při použití nízké vzorkovací frekvence [4]



Obr. 3-25 Výsledek měření při použití vysoké vzorkovací frekvence [4]



Obr. 3-26 Výsledek měření při použití metody Adash compressed time [4]

Všechna měření byla provedena na ložisku 23132-TOR, které se otáčí s frekvencí 60 ot./min a má defekt na povrchu vnějšího kroužku. U prvního měření byla standardně nastavena délka signálu cca 4 sekundy, počet vzorků 2048 a horní frekvence antialiasingového filtru na 200 Hz. Z Obr. 2-23 vyplývá, že se nám nepodařilo zachytit žádné rázy, protože byly už na vstupu odfiltrovány antialiasingovým filtrem. V dalším měření byl proto zvětšen počet vzorků na 19200 za 1s, ale s ním musel být zkrácen záznam (s ohledem na kapacitu záznamu) na pouhých 42 ms. Protože se rázy opakují cca každých 114 ms lze zachycení rázu považovat spíše za štěstí. Na Obr. 2-24 se nám ráz podařilo zachytit, ale délka signálu je natolik malá, že nejsme schopni nic říct o jeho četnosti. Při posledním měření bylo použito metody ACMT a z Obr. 2-25 je jasně patrné, že z tohoto záznamu jsme schopni posoudit amplitudu rázů i jejich četnost.

4 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE

Pro zhodnocení výše uvedených vibrodiagnostických metod je nejprve rozdělíme do třech skupin. Do první skupiny spadají tzv. statistické metody jakými jsou např. Crest faktor nebo Kurtosis faktor. Ty jsou v dnešní praxi používány už jen jako doplňkové. Hlavním důvodem jejich nahrazování jinými metodami je velký vliv šumu z okolí, který maskuje spektra vibrací důležitá pro diagnostiku poškození ložiska. K odstranění tohoto nežádoucího jevu lze použít některé metody předzpracování např. spektrální odečítání, pásmovou filtraci nebo vlnkovou transformaci [18]. Použití vlnkové transformace vede k přepracování metod, které byly dříve založeny na FFT. Metoda FFT (Fast Fourier transform) je nahrazována, protože podává informace pouze o tom, jaké frekvence se v signálu nachází, ale vlnková transformace popisuje signál i z hlediska polohy frekvencí v signálu a tím celou diagnostiku velmi zpřesňuje.

Druhá skupina metod je založena na sledování rázových vln a vibračních fázích (např. SPM). Jsou vyvíjeny již od roku 1969, takže jejich vývoj je již nepatrný. Nejběžněji jsou využívány pro rozlišení poškození ložiska ve třetí fázi, ale jsou použitelné i pro tvorbu komplexního vyhodnocení stavu převodovek či kompresorů. Třetí skupina metod využívá obálkové analýzy, která vyhlazuje signál, zvýrazňuje pouze vysokofrekvenční spektra a se správným softwarem dokonce určí i element, který je poškozen. Tyto analýzy jsou v praxi využívány, ale s ohledem na budoucí vývoj nejsou příliš perspektivní.

Přestože je již vibrodiagnostika v dnešní době velmi vyspělá, do budoucna je snahou, aby bylo měření co možná nejrychlejší, nejpresnější a zároveň nejlevnější. Velký rozvoj v posledních několika letech zaznamenává akustická emise. Je vhodná zejména pro detekci poškození ložiska v první fázi. Jedním z hlavních důvodů rozvoje je velký pokrok výpočetní techniky, která je již ve většině případů schopna obrovské množství naměřených dat zpracovat v akceptovatelném časovém intervalu. Zaměříme-li se na používaný hardware, je patrný trend zavádění bezdotykových (např. laserových) měřících systémů vibrací. Mezi jejich výhody určitě patří umístění a uchycení snímače, což je problém všech kontaktních metod. Nemalou roli hraje i to, že snímač není fyzicky připevněn k měřenému prvku, a proto jeho vlastní hmotnost nezpůsobuje chybu měření.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TANDON , N., CHOUNDHURY, A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the. *Indian Institute of Technology* [online]. 1999 [cit. 2009-02-15], s. 469-480.
- [2] KARASEV, V.A., ROITMAN, A.B. Prevention of machine strength failures by vibrodiagnostic methods. *Springer New York* [online]. 2004, vol. 4, no. 12 [cit. 2004-12-13], s. 1672-1676. Dostupný z WWW: <<http://springerlink.metapress.com>>. ISSN 1573-9325.
- [3] SINGIRESU , S.Rao. Vibration of Continous System. *Interscience* [online]. 2007 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <www.3.interscience.wiley.com>. ISSN 9780441771715.
- [4] *Diagnostika valivých ložisek* [online]. [2009] [cit. 2009-04-12]. Čestina. Dostupný z WWW: <www.adash.cz>.
- [5] VASS, Jiří. Přehled metod detekce mechanického poškození. *ČVUT* [online]. 2004 [cit. 2009-03-12]. Dostupný z WWW: <www.noel.feld.cvut.cz>.
- [6] Vibration senzors. *SKF* [online]. 2003 [cit. 2009-01-14]. Dostupný z WWW: <www.skf.com>.
- [7] Shock pulse method. *Reliabilityweb* [online]. 2005 [cit. 2009-03-23]. Dostupný z WWW: <www.reliabilityweb.com/articles>.
- [8] Vibrační diagnostika. *Vsb* [online]. 2002 [cit. 2009-02-14]. Dostupný z WWW: <www.337.vsb.cz>.
- [9] Tandem-piezo accelerometers vs. conventional design. *Pruftechnik* [online]. 2002 [cit. 2008-12-15]. Dostupný z WWW: <www.pruftechnik.co.uk>.
- [10] Vibrodiagnostika. 2005 [cit. 2009-03-15]. Dostupný z WWW:<www.cmd.cas.cz>
- [11] Valivá ložiska. 2003 [cit. 2009-01-12]. Dostupný z WWW:<www.zkl.cz>
- [12] KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika*. Praha : BEN-technická literatura, 2006. 406 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [13] *Příručka SKF pro diagnostiku ložisek*. Praha: DIF s.r.o., 1999. 10s. CM5003-CZ
- [14] Akustická emise. 2004 [cit. 2009-01-17]. Dostupný z WWW: <www.preditest.cz>
- [15] BILLINGTON, S., et al. *Adaptive prognostics for rolling element bearing condition*. [s.l.] : Georgia Institute of Technology , 1999. 113 s. Dostupný z WWW: <[www\[www.idealibrary.com](http://www[www.idealibrary.com)>.
- [16] FERREIRA, J.L.A., BALHAZA, J.C., ARAUJO, A.P.N. *An investigation of rail bearing reliability under real*. [s.l.] : [s.n.], 2003. 758 s
- [17] MACKAY, Steve . *Vibration Analysis & Predictive Maintanance*. [s.l.] : [s.n.], 2004. 264 s.
- [18] PENG, Z.K.; CHU, F.L. *Application of the wavelet transform in machine condition monitoringand fault diagnostics* Vol. 18, No. 2, Mar. 2004, 199-221
- [19] DYER D.; STEWART R.M. *Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis*. *Journal of Mechanical Design*, Vol. 100, No. 2, 1978, 229-235.
- [20] HENG R.B.W.; NOR M.J.M. *Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition*. *Applied Acoustics*, Vol. 53, No. 1-3, Jan.-Mar.1998, 211-226

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

6.1 Seznam použitých zkratek

<i>aj.</i>	- a jiné
<i>atd.</i>	- a tak dále
<i>např.</i>	- například
<i>popř.</i>	- popřípadě
<i>tj.</i>	- tj.
<i>tzv.</i>	- tak zvaný

6.2 Seznam použitých symbolů a veličin

E	[J]	- energie vibrací
m	[kg]	- hmotnost
v_{ef}	[m/s]	- efektivní rychlost vibrace
L	[h, ot.]	- trvanlivost ložiska
L_{10}	[h, ot.]	- základní trvanlivost
a	[1]	- pro ložiska s bodovým stykem $a=3$, s čárovým stykem $a=10/3$
C_{10}	[kN]	- základní dynamická únosnost
F	[N]	- celkové zatížení ložiska
RMS	[μm]	- efektivní hodnota
T	[s]	- perioda kmitu
x	[μm]	- okamžitá hodnota výchylky
t	[s]	- čas
K	[1]	- Kurtosis faktor
\bar{x}	[μm]	- střední hodnota signálu x
$P_{(x)}$	[1]	- hustota pravděpodobnosti rozdělení
σ	[1]	- směrodatná odchylka
B_d	[mm]	- roztečný průměr kuličky nebo válečku
D	[mm]	- vnější průměr ložiska
P_d	[mm]	- roztečný průměr ložiska
n	[1]	- počet valivých elementů
φ	[$^\circ$]	- úhel dotyku
d	[mm]	- vnitřní průměr ložiska
B_{PFI}	[-]	- frekvence typická pro vnitřní kroužek
B_{PFO}	[-]	- frekvence typická pro vnější kroužek
BSF	[-]	- frekvence typická pro valivá tělíska
FTF	[-]	- frekvence typická pro klec

7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**7**

Obr. 3-1 Průběh určujících veličin vibrace [10]	15
Obr. 3-2 Valivá ložiska [11]	17
Obr. 3-3 Pitting na vnitřním kroužku ložiska	18
Obr. 3-4 Znázornění použití jednotlivých diagnostických metod s ohledem na fázi poškození [6]	19
Obr. 3-5 Vznik dynamického rázu [4]	20
Obr. 3-6 Série rázů vzniklá opakovaným odvalováním valivého elementu přes trhlinu [4]	20
Obr. 3-7 Grafické znázornění hodnot PEAK a RMS [10]	21
Obr. 3-8 Měřicí řetězec [10]	21
Obr. 3-9 Signál nespojitě emise [12]	22
Obr. 3-10 Signál spojitě emise [12]	22
Obr. 3-11 Speciální snímač metody SEE [6]	23
Obr. 3-12 Správné umístění snímače [13]	23
Obr. 3-13 Průběh signálu rázové vlny při nárazu [7]	23
Obr. 3-14 Průběh vibrace [7]	23
Obr. 3-15 Tandem piezo akcelerometr [9]	25
Obr. 3-16 Průběh hodnoty Carpet Value při zhoršování mazacích schopností [7]	25
Obr. 3-17 Průběh hodnoty Carpet Value [7]	26
Obr. 3-18 Průběh Crest faktoru v závislosti na poškození ložiska [4]	26
Obr. 3-19 Časový průběh Crest faktoru [4]	27
Obr. 3-20 Průběh Kurtosis faktoru a jeho hodnoty pro různé fáze poškození [4]	28
Obr. 3-21 Postup zpracování signálu z akcelerometru [4]	28
Obr. 3-22 Specifické frekvence ložiskových elementů [8]	29
Obr. 3-23 Závislost hodnoty g_{RMS} na otáčkách [4]	30
Obr. 3-24 Výsledek měření při použití nízké vzorkovací frekvence [4]	31
Obr. 3-25 Výsledek měření při použití vysoké vzorkovací frekvence [4]	31
Obr. 3-26 Výsledek měření při použití metody Adash compressed time [4]	31