

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

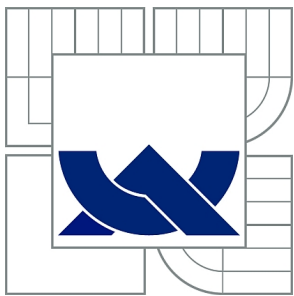
VIBRODIAGNOSTICKÝ SYSTÉM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

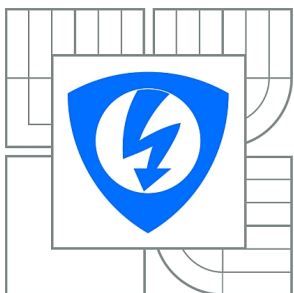
Bc. PAVEL BORTLÍK

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

VIBRODIAGNOSTICKÝ SYSTÉM

VIBRODIAGNOSTIC SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL BORTLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Pavel Bortlík

ID: 136505

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Vibrodiagnostický systém

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh měřicího systému pro dlouhodobé sledování stavu ložiska rotačních strojů.

1. Vypracujte literární průzkum metod pro sledování a vyhodnocení stavu ložiska.
2. Definujte soubor parametrů signálu, které charakterizují stav poškození ložiska a jsou vhodné pro vytváření trendu a detekci poruchy ložiska.
3. Navrhněte a realizujte měřicí systém na platformě cRio pro dlouhodobé měření a zpracování signálu z ložiska. Systém by měl splňovat tyto parametry - 2 kanály, vzorkovací kmitočet 1 MHz, logování vzorků signálu s definovaným intervalem, sledování, záznam a inteligentní vyhodnocení trendů.
4. Dle možností systém prakticky ověřte na zkušebním zařízení, vyhodnoťte dosažené výsledky a vhodnost implementovaných metod detekce poškození ložiska.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] McFadden. P. D and J. D. Smith, Vibration monitoring of rolling element bearings by the high frequency resonance technique – A review, Tribology International, vol. 17, 3-10, 1984.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 18.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o problematice detekce poruch ložisek projevujících se zvýšenou mírou vibrací a akustické emise. Úvodem se práce zabývá seznámením s běžnými poruchami vznikajícími na ložisku během provozu a negativními vlivy na stav ložiska. Práce seznámí čtenáře s pojmy jako vibrace a akustická emise. Součástí práce je popis dostupných metod vyhodnocení signálu vibrací a akustické emise za účelem diagnostiky stavu ložiska a to v časové i frekvenční oblasti. V praktické části je vysvětlena koncepce vibrodiagnostického systému se zaměřením na životnostní zkoušku ložiska. Součástí praktické části je rozvaha volby hardware s mezními parametry a popis software. Práce je doplněna tříděnou databází se zpracovanými tématy z magazínu Orbit Bentley Nevada.

KLÍČOVÁ SLOVA

stav ložisek, vibrace, akustická emise, vibrodiagnostika, dataloger, životnostní zkouška ložisek, vibrodiagnostický systém

ABSTRACT

Thesis discusses bearings failure detection that is manifesting with increased levels of vibration and acoustic emission. The first part of my work gives introduction to common disorders arising on bearings during operation and negative effects on the bearing condition. Further the thesis makes the reader familiar with the terms of vibration and acoustic emission. The work includes a description of available methods for signal evaluation of vibration and acoustic emissions in order to diagnose the state of the bearings in the domains of time and frequency. In the practical part is explained the vibrodiagnostic concept with focus on bearing endurance test. Part of this practical test is a balance sheet for hardware with marginal parameters and a software description. The work is complemented with sorted database of processed topics from the magazine Orbit Bentley Nevada.

KEYWORDS

bearing condition, vibrations, acoustic emission, vibrodiagnosis, datalogger, bearing endurance test, vibrodiagnostic system

BORTLÍK, Pavel *Vibrodiagnostický systém*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2015. 80 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Petr Beneš, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vibrodiagnostický systém“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost, podnětné návrhy k práci a příležitost stát se pomocným vědeckým pracovníkem během studia, což vedlo k vybudování opravdového zájmu o problematiku průmyslové automatizace a měřicích aplikací.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	12
1 Valivá ložiska	13
1.1 Typy valivých ložisek	13
1.2 Poruchy ložiska	14
1.2.1 Pitting na ložisku	14
1.2.2 Nadměrná vnitřní vůle v ložisku	14
1.2.3 Vydření hřídele v ložisku	15
1.3 Vlivy působící negativně na stav ložiska	15
1.3.1 Mechanická vůle	15
1.3.2 Rotorová nesouosost	16
1.3.3 Prokluzu v ložisku	17
1.3.4 Trhlina v hřídeli	17
1.3.5 Nevyváženost hřídele	17
1.3.6 Průchod elektrického proudu ložiskem	18
2 Vibrace	19
2.1 Definice vibrací	19
2.2 Dělení vibrací dle typu buzení	19
2.2.1 Periodicky buzené kmitání	19
2.2.2 Impulsně buzené kmitání	20
2.2.3 Kmitání buzené silou náhodného průběhu	20
2.3 Vyhodnocení signálu vibrací	21
2.3.1 Signál vibrací v časové oblasti	21
2.3.2 Parametry a metody vyhodnocení časového signálu	22
2.3.3 Signál vibrací ve frekvenční oblasti	27
2.3.4 Metody vyhodnocení frekvenčního spektra	30
3 Akustická emise	38
3.1 Definice akustické emise	38
3.2 Vlny	38
3.3 Události akustické emise	38
3.4 Parametry signálu akustické emise	39
3.5 Algoritmy vyhodnocení akustické emise ve vibrodiagnostice	41
3.5.1 Výčet základních veličin akustické emise	41
3.5.2 Složitější algoritmy vyhodnocení akustické emise	42

4	Životnostní zkouška	45
4.1	Vývoj poruchy ložiska během životnostní zkoušky	45
4.1.1	Etapa I. ultrazvukové frekvence	45
4.1.2	Etapa II. vlastní frekvence	45
4.1.3	Etapa III. chybové frekvence	46
4.1.4	Etapa IV. vysokofrekvenční prahový šum	46
5	Vlastní realizace vibrodiagnostického systému	47
5.1	Parametry měřicí jednotky	47
5.2	Koncepce životnostní zkoušky	49
5.2.1	Inicializace vibrodiagnostického systému	49
5.2.2	Předzpracování měřených signálů	51
5.2.3	Kontinuální kontrola míry vibrací	53
5.2.4	Navzorkování dat ze snímačů s přenosem k dalšímu zpracování	53
5.2.5	Analýzy	55
5.2.6	Záznam dat	57
5.3	Popis software	59
5.3.1	FPGA	59
5.3.2	Real-Time	59
5.4	Ověření funkčnosti realizovaného vibrodiagnostického signálu	61
5.4.1	Vzorkovací frekvence	61
5.4.2	Frekvenční charakteristiky	61
5.4.3	Kontinuální kontrola míry vibrací	62
5.4.4	Záznam dat a trendování	63
5.4.5	Analýzy	63
6	Závěr	65
	Literatura	67
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	70
	Seznam příloh	72
	A Tříděná databáze článků magazínu Orbit Bentley Nevada	73
	B Souhrn kontrolerů cRIO National Instruments	75
	C Ukázka obsahu inicializačního souboru	78
	D Obsah přiloženého CD	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Komponenty valivého ložiska [6]	13
1.2	Řezy základními typy valivých ložisek [1]	13
1.3	Pitting na vnitřní dráze ložiska[23]	14
1.4	Vnitřní vůle ložiska[22]	15
1.5	Typické soustavy rotačních strojů [24]	17
1.6	Rýha na vnější dráze ložiska vlivem el. proudu [22]	18
2.1	Vynucené kmitání harmonickou budící silou [6]	20
2.2	Vynucené kmitání budící silou A impulsního a B náhodného průběhu [6]	21
2.3	Princip parametru činitele výkmitu [13]	23
2.4	Meze přípustnosti vibrací u ložiska v závislosti na otáčkách [26]	27
2.5	Porovnávání frekvenčního spektra v průběhu životního cyklu stroje[6]	30
2.6	Geometrické parametry ložiska, nutné pro výpočet chybových frek- vencí [20]	31
2.7	Frekvence generované vadami různých částí valivého ložiska [6]	32
2.8	Aplikace obálkové analýzy [26]-upraveno ze zdroje	33
2.9	Parametry metody SPM A Carpet value a B Max value [14]	34
2.10	Výstup oktávové analýzy 24 % s vyznačenými alarmovými úrovněmi [27]	36
2.11	Postup aplikace metody Spike energy [17]	37
3.1	Zdroje akustické emise na elementu ložiska [11]	38
3.2	Vizualizace A spojitého a B nespojitého průběhu akustické emise [5]	39
3.3	Signál akustické emise s vyznačenými parametry [19]	40
3.4	Energie emisní události [5]	40
3.5	Mrtvá doba akustické emise [5]	41
3.6	Záznam životnostní zkoušky ložiska [8]	42
3.7	Závislost počtu překmitů na míře poruchy [9]	43
3.8	Metoda rozpoznávání vzoru [4]	44
4.1	Typický vývoj poruchy valivého ložiska [6]	46
5.1	Schéma zapojení životnostní zkoušky ložiska	49
5.2	Přenosy filtrů pro pásmovou propust ISO pásma	52
5.3	Diagram toku dat v software	54
5.4	Seznam subVI vytvořených v projektu vibrodiagnostického seznamu	60
5.5	Signál 80 kHz navzorkovaný frekvencí 1MHz realizovaným vibrodia- gnostickým systémem	61
5.6	Frekvenční přenos filtru při převodu zrychlení na rychlost lichoběžní- kovou metodou	62

5.7	Frekvenční přenos filtru při převodu zrychlení na rychlost metodou FFT	62
5.8	Obsah paměťového media po prvním běhu analýz	63
A.1	Základní rozdělení hierarchie tříděné databáze	73
A.2	Detailní rozdělení jednotlivých částí tříděné databáze 1	73
A.3	Detailní rozdělení jednotlivých částí tříděné databáze 2	74
A.4	Detailní rozdělení jednotlivých částí tříděné databáze 3	74

SEZNAM TABULEK

2.1	Rozdělení stavu stroje dle ef. hodnoty vibrací [21]	22
2.2	Hodnocení stavu stroje na základě K_t parametru [13]	26
2.3	Porovnání vzorců pro výpočet chybových frekvencí ložiska z různých zdrojů	31
5.1	Souhrn parametrů řídicí jednotky s jejich reálným dopadem na životnostní zkoušku	47
5.2	Parametry poskytnutého kontroléru cRIO 9076 [25]	48
5.3	Parametry měřicí karty cRIO 9223 [25]	48
5.4	Souhrn doby potřebné pro vykonání úkonu vzorkování a archivace dat	56
5.5	Souhrn analýz s výpočetním časem, trendy a metodou záznamu	56
5.6	Zatížení řídicí části realizovaného vibrodiagnostického systému dle NI Distributed Manageru	64
B.1	Souhrn dostupných kontrolerů cRIO část 1.	75
B.2	Souhrn dostupných kontrolerů cRIO část 2.	76
B.3	Souhrn dostupných kontrolerů cRIO část 3.	77

ÚVOD

Valivá ložiska jsou v současné době součástí většiny rotačních strojů malého a středního rozsahu. Údržba rotačních strojů je nedílnou součástí prevence před zadřením ložiska, které může způsobit rozsáhlou poruchu celého stroje či zranění obsluhujících pracovníků. Včasná výměna ložiska, na kterém je detekována nastávající porucha, může záchranou stroje a zamezením dlouhodobé odstávky provozu, ušetřit nezanedbatelné finanční prostředky.

V návaznosti na to výrobci ložisek výrobními technologiemi dosahují stále lepších technických parametrů, čímž se u ložisek prodlužuje životnost. Pro účely testování kvality a doby životnosti ložiska při definovaných podmínkách je výrobci vykonávána takzvaná životnostní zkouška ložiska, která obnáší zatížení ložiska a jeho běh až do stavu, kdy je míra vibrací neúnosná. Během této životnostní zkoušky jsou měřeny kvalitativní parametry vypovídající o stavu ložiska v jednotlivých fázích životnostní zkoušky. Mezi hlavní kvalitativní parametry patří teplota a míra vibrací na ložisku. Vibrace ložiska úzce souvisejí s geometrickou přesností ložiska, takže jsou využívány také jako indikátor jakosti ložiska. Možným přístupem v kontrole stavu ložiska je využití parametrů akustické emise.

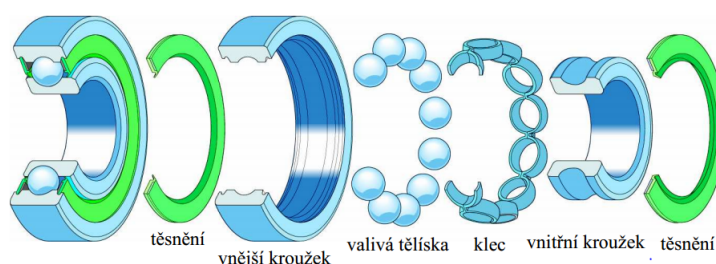
Během životnostní zkoušky jsou zaznamenávána data, která jsou během či po skončení zkoušky analyzována a jsou určovány příčiny a průběhy destruktivních změn na ložisku. Za účelem co nejpřesnějšího vyhodnocení zaznamenaných dat existuje řada algoritmů a postupů, které jsou využívány. Mezi jednotlivými výrobci ložisek a vibrodiagnostických systémů však neexistuje shoda, které z dostupných metod a algoritmů jsou k detekci na konkrétním typu valivého ložiska nejvhodnější.

V nedávné minulosti ještě byla provozní vibrační diagnostika velmi nákladnou záležitostí, kterou si mohli dovolit pouze výrobci ložisek ke svým testům a vývoji a provozovatelé velmi drahých zařízení, ovšem s příchodem cenově dostupných digitálně signálových procesorů, hradlových polí a piezoelektrických akcelerometrů existuje řada cenově dostupných systémů pro monitorování stavu konkrétního ložiska s funkcí vypnutí stroje v případě kritického stavu vibrací. Tyto systémy mají algoritmy vyhodnocení stavu ložiska na základě míry či spektra vibrací implementovány.

1 VALIVÁ LOŽISKA

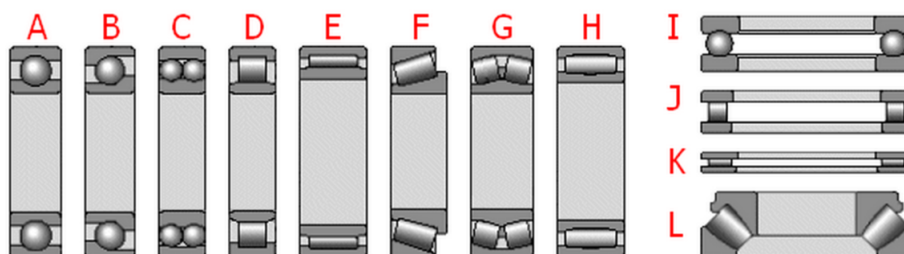
1.1 Typy valivých ložisek

V dnešní době existuje velké množství typů ložisek. Cílem této diplomové práce je navrhnout systém pro životnostní zkoušku valivého ložiska, proto se budu věnovat převážně jim. Některé vibrodiagnostické metody jsou odvozeny od geometrických parametrů ložiska, proto zde uvádím jednotlivé typy valivých ložisek pro přehled. Valivá ložiska jsou obvykle složena ze dvou kroužků, valivých těles, klece a těsnění, jak je vyobrazeno na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Komponenty valivého ložiska [6]

Základní typy a hlavní rozměry ložisek jsou mezinárodně normalizovány. Podle vnitřního uspořádání, tvaru valivých těles a směru sil, které mohou zachycovat, se valivá ložiska rozdělují do těchto několika základních typů: **A** kuličková ložiska, **B** kuličková ložiska s kosoúhlým stykem, **C** naklápěcí kuličková ložiska, **D** válečková ložiska, **E** jehlová ložiska, **F** kuželíková ložiska, **G** soudečková ložiska, **H** toroidní ložiska, **I** axiální kuličková ložiska, **J** axiální válečková ložiska, **K** axiální jehlová ložiska, **L** axiální soudečková ložiska [1].



Obr. 1.2: Řezy základními typy valivých ložisek [1]

Volba správného ložiska má velký vliv na jeho životnost a správnou funkci. Při volbě nevhodného typu ložiska pro specifickou aplikaci může dojít k dřívějšímu

vzniku vibrací, které indikují poškození. Při volbě typu ložiska je potřeba vzít v úvahu především následující zkušenosti: velikost a způsob zatížení, konstrukci uložení a způsob mazání ložiska, provozní parametry ložiska, jako jsou otáčky a tepelné poměry a požadavky na přesnost.

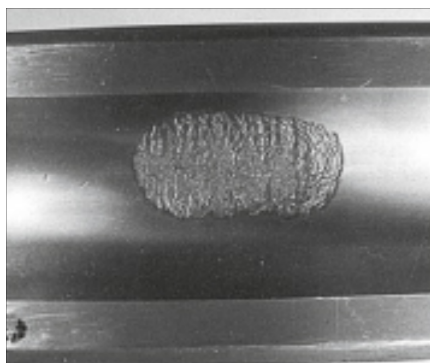
1.2 Poruchy ložiska

1.2.1 Pitting na ložisku

Jev, při kterém dochází k odlupování nebo drolení povrchové vrstvy materiálu kontaktních ploch, označujeme za poruchu nazvanou pitting viz obrázek 1.3. Doba prvních projevů pittingu je funkcí času, otáček, velikosti zatížení a základní dynamické únosnosti ložiska. Trhliny, které se na ložisku objevují progresivně rostou a způsobují nárůst vibrací do stavu, kdy rotační stroj není schopen dalšího bezpečného provozu.

Pitting na různých částech ložiska má své specifické projevy, které jsme díky spektrální analýze nejen schopni detekovat, ale také přesně lokalizovat viz metoda chybových frekvencí 2.3.4. Rozlišujeme pitting na vnější ložiskové dráze, na vnitřní ložiskové dráze, kleci valivých elementů a na valivých elementech samotných.

Mezi hlavní příčiny vzniku pittingu patří vysoký počet zátěžných cyklů, vysoké hodnoty kontaktních tlaků, napětí a jejich gradientů především v tenkých povrchových vrstvách, korozivní porušení povrchu, složitá pole napětí, působení tangenciálních sil a působení nestlačitelného maziva. [23]

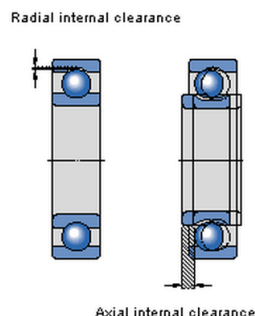


Obr. 1.3: Pitting na vnitřní dráze ložiska[23]

1.2.2 Nadměrná vnitřní vůle v ložisku

Vnitřní vůle ložiska je definována jako celková vzdálenost, o níž lze posunout jeden kroužek ložiska vůči druhému v radiálním (radiální vůle) nebo v axiálním směru

(axiální vůle) viz obrázek 1.4.



Obr. 1.4: Vnitřní vůle ložiska[22]

Radiální vnitřní vůle ložiska má rozhodující vliv na bezpečný provoz rotačního stroje. Všeobecně platí, že kuličková ložiska mají za ideálních podmínek nulovou provozní vůli, či malé předpětí. Válečková, souděčková a toroidní ložiska musí mít za bezpečného provozu malou vůli. V případě, kdy tyto podmínky nejsou u jednotlivých typů ložisek dodrženy, tak dochází ke vzniku vibrací indikující poruchu ložiska. Je nutno vzít v úvahu provozní teplotu a rozložení teploty v ložisku, které mohou způsobit zmenšení provozní vůle nebo zvětšení předpětí. [22]

1.2.3 Vydření hřídele v ložisku

Vydření hřídele nastává v místě styku hřídele a vnitřního kroužku valivého ložiska. Vlivem vydření hřídele nastává vůle mezi hřídelí a vnitřním kroužkem ložiska, což má za výsledek nárůst teploty ložiska kvůli tření vzniklém při prokluzu hřídele v ložisku.

Porucha nastává při volbě špatného typu ložiska pro danou hřídel. Tato porucha ložiska je řešitelná zalepením hřídele speciálními lepidly, které jsou na renovace hřídele určené. [22]

1.3 Vlivy působící negativně na stav ložiska

1.3.1 Mechanická vůle

Neopomenutelným zdrojem vibrací je mechanická vůle (např. uvolnění kotvicích šroubů, vůle ložiska v domku atd.), dalším zdrojem může být strukturální vůle a nebo deformace základů.

Vůle ložiska v domku

Ložisko je na rotačním stroji umístěno v ložiskovém domku. Ložiska jsou při provozu

stroje namáhána a vlivem jejich poruch dochází k vibracím. Vibrace jsou přenášeny z ložiska na domek a jsou dále vedeny strojem až do jejich útlumu. Kvůli tomuto přenosu energie vibrací na domek ložiska v kombinaci s degradací materiálu vlivem jeho stáří, dochází k vzniku vůle mezi ložiskem a ložiskovým domkem. Tato vůle způsobuje vibrace, které jsou pro ložisko zdrojem vzniku poruch.

Vibrace způsobené mechanickou vůlí ložiska v domku se projevují ve spektru signálu jako vysoké násobky harmonických a subnásobky subharmonických složek otáčkové frekvence. Vibrace se projevují převážně v radiálním směru, ale často jsou také směrové závislé v oblasti $\pm 30^\circ$.

Vůle ložiska v ložiskovém domku je řešitelná vyvločkováním ložiskového domku a nebo nalepením ložiska do ložiskového domku lepidlem, které je na tento účel určené.

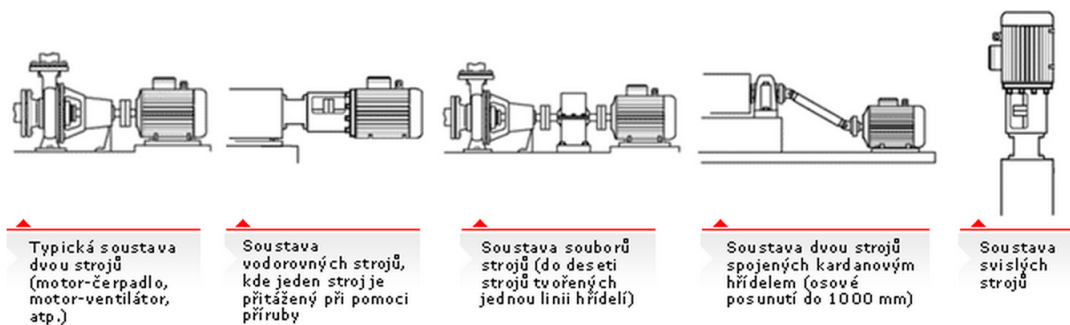
1.3.2 Rotorová nesouosost

Centricita os je základním předpokladem pro správný chod soustavy strojů. Centricitou os je vyjádřen stav, kdy jsou osy vzájemně spojených strojů viz obrázek 1.5 totožné. Tedy, aby byla jejich společná osa s určitou tolerancí pouze 1. Pokud tato podmínka není dodržena, dochází k vzniku radiálních tlaků na ložiska, což může způsobit zkrácenou dobu životnosti ložiska. Rozlišujeme dva základní typy nesouososti rovnoběžnou a úhlovou.

Rovnoběžná nesouosost se projevuje výrazným nárůstem radiálních vibrací a fázovým posunem o 180° v radiálním směru na spojce. Při detekci rovnoběžné nesouososti sledujeme převládající druhou harmonickou otáčkové frekvence nebo vybuzení vyšších harmonických složek.

Úhlová nesouosost se projevuje výraznými vibracemi v axiálním směru. Stejně jako u rovnoběžné nesouososti se úhlová nesouosost projevuje 180° fázovým posuvem. Indikátorem úhlové nesouososti jsou výrazné složky vibrací na druhé a třetí harmonické otáčkové frekvence. Platí jednoduché pravidlo, že pokud je druhá harmonická otáčková frekvence vyšší než 60 % první harmonické jedná se s vysokou pravděpodobností o úhlovou nesouosost.

Některá ložiska jsou konstruována tak, aby se nesouososti dokázaly přizpůsobit bez poškození ložiska. Tato ložiska jsou nazývána naklápěcí. Hodnoty dovolené nesouososti jsou uváděny v technických specifikacích daného typu ložiska k jednotlivým výrobkům. Příkladem ložisek se schopností přizpůsobit se na nesouosost jsou axiální kuličková ložiska s kulovými kroužky a podložkami, ložiskové jednotky Y a naklápěcí jehlová ložiska. [24]



Obr. 1.5: Typické soustavy rotačních strojů [24]

1.3.3 Prokluzu v ložisku

Mezi hlavní zdroje tření při kontaktech valivého elementu ložiska s drážkou ložiskového kroužku patří mikroprokluzu. Příčinou mikroprokluzů jsou rozdílné obvodové rychlosti povrchu valivého elementu a drážky ložiskového kroužku v kontaktní oblasti. Hlavním faktorem ovlivňujícím mikroprokluzu je hodnota přimknutí.

Skuzová rychlost v kontaktní oblasti je za určitých podmínek ovlivňována takzvanými makroprokluzu. Makroprokluzu se projevují převážně u valivých ložisek pracujících za vysokých otáček a nízkých zatížení.

1.3.4 Trhlina v hřídeli

Trhlina v hřídeli je zdrojem vibrací, který je nutno brát v úvahu jako vliv negativně působící na stav ložiska.

Prasklina rotoru se projeví při analýze rozběhu/doběhu na základě amplitudy a fáze vibrací při základní a dvojnásobné otáčkové frekvenci, a to například srovnáním komplexního spektra (Nyquistovy křivky) při průchodu rezonancí v bezporuchovém stavu. [20]

1.3.5 Nevyváženost hřídele

Nerovnoměrné rozložení hmoty rotačního stroje vůči jeho ose otáčení způsobuje zdroj vibrací. Takto vzniklému zdroji vibrací říkáme nevyváženost. Nevyváženost rozlišujeme na:

- statickou
- momentovou
- dynamickou

Nejčastěji se v technické praxi setkáváme s nevyvážeností dynamickou, která vzniká, když jsou hmoty nevyváhy na obou vyvažovacích rovinách rozdílné. Tento typ

nevývahy rotačního stroje způsobuje vibrace v převážně radiálním směru. Tento typ nevývahy je diagnostikován dle kvadratické závislosti růstu amplitudy první harmonické otáčkové frekvence vibrací s nárůstem rychlosti rotačního stroje (třikrát vyšší otáčky způsobí nárůst vibrací na devítinásobek).

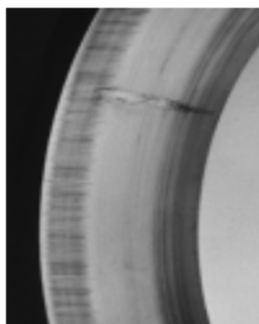
Možným případem nevývahy je nevývaha převislého rotoru, která se typicky vyskytuje u ventilátorů. U takto nevyvážených rotorů pozorujeme nárůst amplitudy vibrací první a druhé harmonické otáčkové frekvence v radiálním i axiálním směru. [20]

1.3.6 Průchod elektrického proudu ložiskem

Pokud projde jedním kroužkem přes valivý element ložiska do druhého kroužku elektrický proud, ať už střídavý nebo stejnosměrný, dojde k porušení valivého ložiska. Pro ložisko jsou nebezpečné i nízké intenzity proudu, ale pokud se ložisko nepohybuje je znatelně odolnější průchodu proudu než pohybuující se ložisko, které je po průchodu proudu zničeno ve většině případů.

Průchod elektrického proudu způsobuje podobný proces jako při svařování elektrickým obloukem. Materiál se tedy zahřeje na teplotu mezi bodem popouštění a tavení. Vlivem tohoto procesu dojde k strukturálním změnám materiálu a vzniku zvlnění na oběžných drahách ložiska.

Rozsah poškození ložiska průchodem elektrického proudu závisí na mnoha faktorech. Převážně jsou to však intenzita působícího proudu, délka působení proudu na ložisko, zatížení ložiska, otáčky ložiska při zasažení elektrickým proudem a mazivu použitým na ložisku. [22]



Obr. 1.6: Rýha na vnější dráze ložiska vlivem el. proudu [22]

2 VIBRACE

2.1 Definice vibrací

Vibrace neboli kmitání je takový mechanický pohyb hmotného bodu či tělesa, při kterém je tento hmotný bod či těleso vázán na určitou rovnovážnou polohu. Vibrace je možné také chápat jako odezvu hmoty na působící sílu. Pružně uložené těleso o hmotnosti m a tuhosti uložení k je působením síly vychýleno ze své rovnovážné polohy a vykonává kmitavý pohyb. Zanedbáme-li tlumení bude hmota kmitat vlastní frekvencí ω :

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

kde

$$\omega \text{ vlastní kruhová frekvence [rad/s]}$$

V technické praxi se však častěji užívá frekvence f , která odpovídá počtu celých cyklů za sekundu, vyjádřená v Hertzích:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} [Hz] \quad (2.2)$$

nebo periodou T , která je vyjádřena obrácenou hodnotou frekvence f :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} [s] \quad (2.3)$$

2.2 Dělení vibrací dle typu buzení

Působící sílu na hmotný bod dělíme na tři základní typy:

- periodickou budící sílu
- impulsní budící sílu
- náhodnou budící sílu

2.2.1 Periodicky buzené kmitání

Harmonická síla je nejjednodušším případem síly periodické. V technické praxi se s harmonickou silou sice setkáme zřídka, ale většina sil vyskytujících se u rotačních strojů lze vyjádřit jako součet harmonických sil. Díky této zákonitosti je možné popsat vlastnosti periodické síly a její vliv na vibrační odezvu pomocí harmonické síly a odezvy. Působí-li na pružně uložené těleso harmonická síla $f(t)$ je pohyb tělesa

po ustálení také harmonický se stejnou kruhovou frekvencí ω , ale obecně s jinou amplitudou. Takovému kmitání viz obrázek 2.1 říkáme vynucené kmitání. [6] Výchylku takového kmitání lze vyjádřit rovnicí [6]:

$$x(t) = x_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_F - \varphi) \quad (2.4)$$

kde

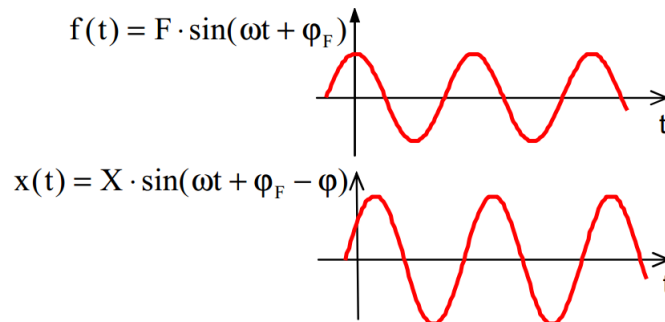
x_0 amplituda vynuceného kmitání

ω kruhová frekvence budící síly [rad/s]

t čas [s]

φ_F počáteční fázový posun budící síly

φ fázový posun – zpoždění výchylky za budící silou



Obr. 2.1: Vynucené kmitání harmonickou budící silou [6]

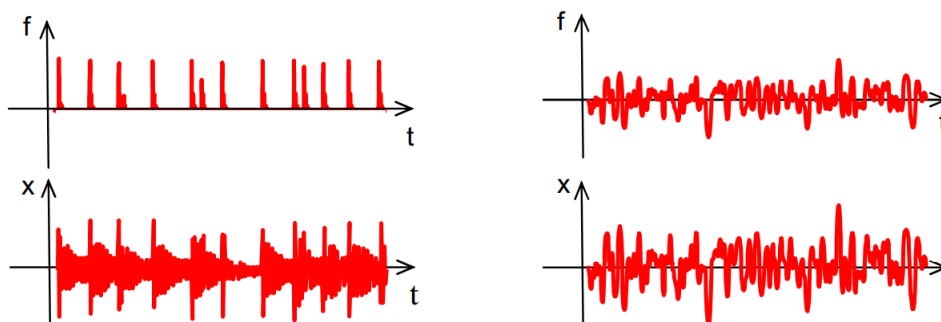
2.2.2 Impulsně buzené kmitání

Působení impulsní síly na těleso, způsobí vychýlení tělesa z rovnovážné polohy a následné volné kmitání na jedné nebo více vlastních frekvencích viz obrázek 2.2A. Impulsní nebo-li rázové kmitání je v praxi využíváno pro účely modální zkoušky či takzvaného "bumptestu". S nezáměrným rázovým buzením se setkáváme při závadách valivých ložisek, kdy na vlastních frekvencích můžeme ve spektru vibrací sledovat zvýšené amplitudy a na jejich základě vyhodnocovat stav ložiska viz podkapitola 2.3.4. [6]

2.2.3 Kmitání buzené silou náhodného průběhu

Působí-li na těleso síla náhodného průběhu je odezva rovněž náhodného charakteru viz obrázek 2.2B, ale navíc jsou také buzeny vlastní frekvence tělesa stejně jako

u impulsního buzení. Náhodné buzení je přítomné vždy. Většinou je vnímáno pouze jako šum, ale ve vibrační diagnostice je nutné s touto složkou počítat. [6]



Obr. 2.2: Vynucené kmitání budící silou **A** impulsního a **B** náhodného průběhu [6]

2.3 Vyhodnocení signálu vibrací

2.3.1 Signál vibrací v časové oblasti

V časové oblasti se pracuje s třemi základními veličinami popisujícími vibrace a to: výchylka vibrací [mm]

$$x(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.5)$$

rychlost vibrací [mm/s]

$$v(t) = x_0 \omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.6)$$

a zrychlení vibrací [mm/s^2]

$$a(t) = -x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.7)$$

Míru vibrací lze obecně vyhodnocovat z každé z těchto veličin, ale v technické praxi je nutné počítat s vnějšími rušivými vlivy, které měřený signál mohou ovlivňovat. V technické praxi se tedy měřená veličina volí tak, aby byl její odstup od šumu co největší. Konvenčně se využívá tohoto rozdělení- pro ISO pásmo¹ vibrací se užívá signálu rychlosti vibrací, pro vysoké frekvence vstupního signálu se volí zrychlení vibrací a pro velmi nízké frekvence vstupního signálu se volí měření výchylky vibrací. Dle odborné literatury není striktně vymezeno v jakém formátu jsou naměřená data vstupem pro jednotlivé analýzy. Vstupem může být dle kapitoly 2.3.1 rychlost, zrychlení a výchylka se zmíněnými jednotkami.

¹ISO pásmo vibrací je 10-1000 Hz dle ČSN-ISO 10816

2.3.2 Parametry a metody vyhodnocení časového signálu

Efektivní hodnota

Pro jednotlivé typy strojů jsou dle normy ČSN-ISO 10816² stanoveny hranice pásem A,B,C a D, které odpovídají mezním hodnotám efektivní hodnoty rychlosti vibrací:

$$x_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.8)$$

Příslušná norma ČSN-ISO 10816 stanovuje frekvenční rozsah, ve kterém je zavedeno kritérium konstantní rychlosti (rozmezí $f_x - f_y$), pod a nad tímto frekvenčním rozsahem je přípustná rychlost vibrací funkcí frekvence[21].

Efektivní hodnota rychlosti vibrací [mm/s]	Třída I	Třída II	Třída III	Třída IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	A
1,80				
2,80	C	C	B	B
4,50				
7,10	D	D	C	C
11,20			C	
18,00			D	D
28,00			D	
45,00			D	

Tab. 2.1: Rozdělení stavu stroje dle ef. hodnoty vibrací [21]

Význam pásem z tabulky 2.1 dle příslušné normy [21]:

pásmo A: Vibrace stroje odpovídají stavu nově vyrobeného stroje.

pásmo B: Vibrace stroje odpovídají provozování stroje po neomezeně dlouhou dobu.

pásmo C: Vibrace stroje odpovídají stavu, který je považován za neuspokojivý pro dlouhodobý a trvalý provoz. Obeně je stroj považován za způsobilý provozu na dobu nezbytně nutnou do opravy či výměny stroje.

pásmo D: Vibrace stroje odpovídají stavu, který je považován za nezpůsobilý k dalšímu provozu stroje do jeho opravy či výměny.

Specifikace tříd z tabulky 2.1 dle příslušné normy[21]:

Třída I: Typicky elektrické motory s výkonem do 15 kW.

²ČSN-ISO 10816-hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech

Třída II: Elektrické motory s výkonem 15-75 kW a rotační stroje s výkonem do 300 kW připevněné na speciálních podkladech.

Třída III: Velké pohonné jednotky s rotačními částmi, připevněné na těžkých podkladech, které jsou ve směru měření vibrací tuhé.

Třída IV: Velké pohonné jednotky s rotačními částmi, připevněné na pevných a těžkých základech, které jsou ve směru vibrací měkké.

Mohutnost vibrací

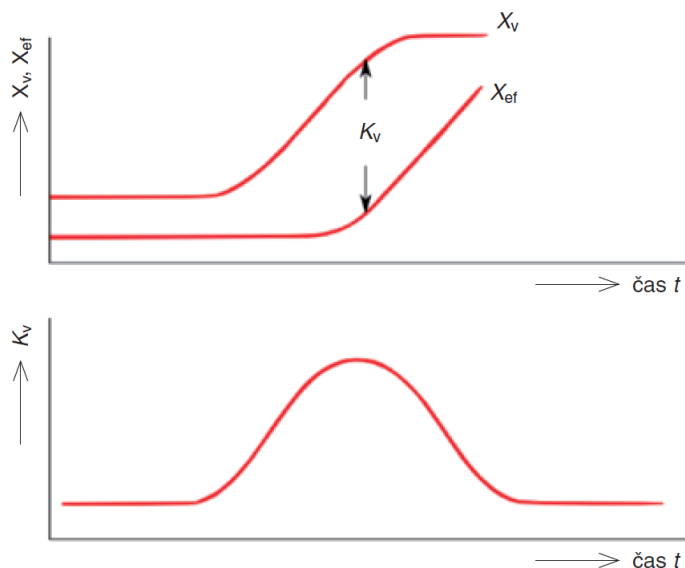
Mohutnost vibrací je parametr, který získáme dle normy ČSN-ISO 10816 tak, že změříme efektivní hodnotu vibrací na domku každého ložiska ve směru axiálním, horizontálním a vertikálním. Nejvyšší takto naměřená hodnota je označována jako mohutnost vibrací [21].

Činitel výkmitu

Činitel výkmitu neboli anglicky Crest faktor odpovídá poměru špičkové a efektivní hodnoty vibrací dle vztahu [13]:

$$K_v = \frac{|x|_v}{x_{ef}} = \frac{\max(x) - \min(x)}{\text{sqrt}(\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt)} \quad (2.9)$$

Činitel výkmitu je pro účel analýzy rychlým nástrojem pro zjištění průběhu



Obr. 2.3: Princip parametru činitele výkmitu [13]

poruchy. Výhodou této metody proti analýze stroje ve frekvenční oblasti je rozlišení působení poruchy na ložisku a náhodného šumu. Tato metoda ovšem není příliš přesná a není odolná proti parazitním rázům. Činitel výkmitu je pro účel orientačního monitorování stavu stroje vykreslován do grafu například viz obrázek 2.3.

Statistické metody

Signál vibrací nepoškozeného ložiska odpovídá šumu, který má Gausovo normální rozložení. Gausovo normální rozložení se vyznačuje absencí harmonických a vysokofrekvenčních složek. Poškozením ložiska dojde k projevení odchylek od příslušného Gausova rozložení přírůstkem harmonických a vysokofrekvenčních složek, díky nimž lze určit míra poškození ložiska. Statistické metody jsou užívány na náhodné signály, které mohou být prohlášeny za stacionární. Takto nazvaným stacionárním procesem myslíme takový proces, který splňuje podmínku, že jeho pravděpodobnostní rozložení není závislé na čase.

Mezi parametry, které popisují tvar rozdělení a jsou určeny z centrálních momentových popisů patří **špičatost** (kurtosis) popisující statistické rozdělení amplitud vibrací se zřetelem na odchylku od normálního rozdělení ve frekvenčním rozsahu 2.5-80 kHz při rozdělení do čtyř frekvenčních pásem f_{1-4} . Koeficient špičatosti γ_2 popisuje špičatost histogramu amplitudového rozdělení s jedním maximem vypočítaný dle vztahu [12]:

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2\right)^2} - 3, [-] \quad 3 \quad (2.10)$$

kde

\bar{x} střední hodnota digitalizovaného záznamu signálu x

μ_2 druhý centrální moment prvního řádu

μ_4 čtvrtý centrální moment prvního řádu

N počet vzorků signálu x

Vyhodnocení ložiska pokud koeficient špičatosti $\gamma_2 \in f_n$:

$\gamma_2 < 3, 4 >$ -dobrý stav ložiska

$\gamma_2 < 5, 8 >$ -počátek poškození ložiska

$\gamma_2 < 9, 13 >$ -vážné poškození ložiska

$\gamma_2 < 13, - >$ -kritický stav ložiska

³Vztah platí pro ergodický náhodný proces, což je proces, který splňuje podmínku, že ho lze stanovit z jedné realizace z jednoho měření. Má tedy stabilní charakter.

šikmost rozdělení (skewness) určující míru asymetrie rozdělení vůči průměru dle vztahu [12] [18]:

$$s = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, [-] \quad (2.11)$$

kde

μ_3 *třetí centrální moment prvního řádu*
 σ *směrodatná odchylka*

Parametry β funkce

Statistické parametry a, b vycházejí z metody beta distribuční funkce. Tato distribuční funkce je založena na normalizovaném rozložení gamma funkce dle vztahu [2]:

$$\beta(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} x^{a-1}(1-x)^{b-1} \quad (2.12)$$

kde musí být splněna podmínka ($0 \leq x \leq 1$) a $a > 0$; $b > 0$

kde

x *měřený signál*

Protože algoritmus výpočtu β funkce požaduje jako vstup hodnoty v rozsahu $0 - 1$ je nutno odstranit stejnosměrnou složku a přistoupit k normalizaci. Po splnění těchto kroků lze vypočítat výsledné parametry a, b popisující stav kondice ložiska ze vztahů [2]:

$$a = \frac{R_v(R_v R_p - R_q^2)}{R_t R_q^2}, [-] \quad (2.13)$$

$$b = \frac{R_p(R_v R_p - R_q^2)}{R_t R_q^2}, [-] \quad (2.14)$$

kde

R_p *amplituda nejvyššího peaku signálu*

R_v *amplituda lokálního minima*

R_q *standartní odchylka signálu*

R_t *maximální peak to peak hodnota signálu*

Parametry a, b jsou ve srovnání s centrálními momenty jako je špičatost a šikmost méně závislé na lokálních extrémech. Proto jsou parametry β funkce považovány za stabilnější. Detekce typu poruchy valivého ložiska je dle [2] prováděna na základě průběhu parametru a a nebo vynášením závislosti parametru a na parametru b do grafu. Z grafu poté na základě shlukové analýzy vyvozujeme stav ložiska.

K_t parametr

K_t parametr odpovídá poměru počátečního stavu vibrací neporušeného ložiska a stavu ložiska v čase t . Hodnota K_t parametru se určí ze vztahu [13]:

$$K_t = \frac{a_r(0)a_{ef}(0)}{a_r(t)a_{ef}(t)}, [-] \quad (2.15)$$

kde

$a_r(0)$ počáteční rozkmit zrychlení změřený po montáži ložiska⁴

$a_{ef}(0)$ počáteční efektivní hodnota zrychlení změřená po montáži ložiska⁵

$a_r(t)$ rozkmit zrychlení změřený v čase t od zahájení provozu ložiska

$a_{ef}(t)$ efektivní hodnota zrychlení změřená v čase t od zahájení provozu ložiska

Stav ložiska je hodnocen dle mezí stanovených příslušnou normou. Příklad mezí stanovených pro ložisko je uveden na tabulce viz 2.2.

Tab. 2.2: Hodnocení stavu stroje na základě K_t parametru [13]

Hodnota K_t	Stav ložiska
$0 < K_t \leq 0,02$	havarijní stav
$0,02 < K_t \leq 0,2$	poškozené ložisko
$0,02 < K_t \leq 1$	dobré ložisko

HFE

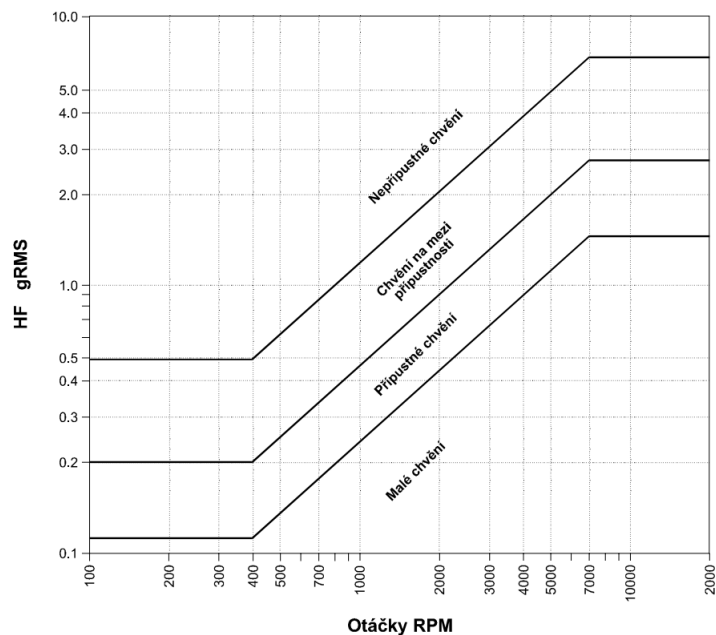
Pod zkratkou HFE se rozumí metoda s anglickým názvem High frequency emission užívaná společností Adash, která je jednou ze základních pro analýzu valivých ložisek. Tato metoda opět využívá poznatku, že s počínajícím poškozením valivého ložiska narůstá energie vibrací ve vyšších frekvencích. [26]

Metoda využívá značné závislosti otáček hřídele a emitované vysokofrekvenční energie, která je vyhodnocována do efektivní hodnoty a vyjádřena v jednotce g_{RMS} ⁶. Stav ložiska je vyhodnocován dle mezí daných na obrázku 2.4.

⁴není-li parametr $a_r(0)$ znám, doporučuje se ho položit $a_r(0)=40 \text{ mm.s}^2$

⁵není-li parametr $a_{ef}(0)$ znám, doporučuje se ho položit $a_{ef}(0)=10 \text{ mm.s}^2$

⁶Jednotka g_{RMS} odpovídá závislosti $g(9,81 \text{ m/s}^2)$ na otáčkách



Obr. 2.4: Meze přípustnosti vibrací u ložiska v závislosti na otáčkách [26]

2.3.3 Signál vibrací ve frekvenční oblasti

Signály, které jsou generovány poruchami ve valivých ložiscích popisujeme z hlediska frekvenční analýzy těmito základními vlastnostmi:

- široké spektrum frekvencí
- nízká energie signálů
- cyklostacionárnost signálů

Široké spektrum frekvencí s nízkou energií

Rázy, které vznikají vlivem průchodu valivých částí přes defekt ložiska, dochází ke generování mechanických rázů. Frekvence vibrací ložiska potom odpovídá různým módům vlastní mechanické rezonanční frekvence. Signál, který je takto generovaný (vyznačující se výskytem krátkých pulsů v čase) je charakteristický velmi nízkým energetickým obsahem [15].

Cyklostacionárnost signálů

Prokluzu valivých elementů v ložisku způsobují, že mechanické rázy nemají periodický charakter a nejsou fázově svázané s otáčkami hřídele. Vlivem tohoto faktu mají tyto signály stochastický charakter s ohledem na energii i periodicitu jednotlivých pulsů v signálu obsažených. Takovéto signály nazýváme cyklostacionární ⁷.

⁷Cyklostacionární signál je stochastický signál jehož vybrané statistické momenty se mění periodicky v čase

Fourierova transformace

Signál vibrací v časové doméně je možno aplikací příslušných transformací převést do frekvenční domény, kde jsme z pohledu vibrodiagnostiky schopni detekovat nejen stav ložiska, ale také možnou příčinu vibrací.

Periodický neharmonický signál lze chápat jako syntézu dílčích harmonických kmitů. Transformace časového signálu do frekvenční domény znamená rozklad signálu do sumy kmitů harmonických složek obsažených v časovém signálu. Harmonické tvořící novou bázi prostoru mají rozdílnou frekvenci. Základním signálem ve frekvenční doméně jsou harmonické signály sinus a cosinus. Výsledkem transformace je přiřazení každé frekvenci komplexní číslo odpovídající jejímu umístění v signálu, které reprezentuje amplitudu a fázový posun.

Pro převod časového signálu do frekvenční oblasti existuje několik transformací, které je možno využít. Ve vibrodiagnostice jsou využívány Fourierovy transformace, která časový signál rozkládá do Fourierovy řady komplexních čísel.

Z matematiky je známo, že periodický signál $x(t)$ v časové oblasti lze popsat nekonečnou posloupností [12]:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (2.16)$$

koefficienty a_n a b_n jsou spektrální Fourierovy koefficienty funkce $x(t)$ a jsou vypočteny dle vztahů:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2.17)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2.18)$$

Diskrétní Fourierova transformace

Analyzátoři vibrací nepracují se spojitými časovými signály, ale naměřený signál projde na vstupu přístroje A/D převodníkem, který zaznamená časový signál jako posloupnost N diskretních hodnot s pravidelnými rozestupy v intervalu T . V tomto případě tedy pracujeme s naměřenými signály za určitý časový interval. Tyto signály považujeme za periodické v naměřeném intervalu T .

Diskretizovaný signál $x(k)$ definovaný na množině N jednotlivých časových okamžiků t_k můžeme vyjádřit jako konečnou Fourierovu řadu dle vztahu [12]:

$$x_k = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) \right) \quad (2.19)$$

U DFT jsou často Fourierovy koefficienty vyjádřeny ve tvaru amplitudy c_n a fáze Φ :

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.20)$$

$$\Phi = \arctg\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (2.21)$$

v tomto případě můžeme vyjádřit konečnou Fourierovu řadu vztahem:

$$x_k = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left(c_n \cos \left(\frac{2\pi n t_k}{T} + \Phi_n \right) \right) \quad (2.22)$$

U diskrétní Fourierovy transformace platí základní vztah mezi počtem diskrétních hodnot N , délkou vzorku T a vzorkovací frekvencí f_s , rozsahem a rozlišením frekvenčního spektra. Vztahy jsou vyjádřeny:

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{f_s}{N} \quad (2.23)$$

$$f_{max} = \frac{f_s}{2} = \frac{N}{2T} \quad (2.24)$$

Rozsahem frekvenčního spektra je $0 - f_{max}$, kde f_{max} je Nyquistova frekvence a rozlišení čar ve spektru je Δf .

Rychlá Fourierova transformace

V současných přístrojích převládá algoritmus rychlé Fourierovy transformace neboli FFT, kde je N celočíselnou mocninou čísla 2.

Aby digitální Fourierova transformace vedla ke správným výsledkům, tak je nutné ošetřit několik rysů. Tyto rysy se týkají diskretizace. Jde o chybu aliasing a únik. U časového signálu je nutné dodržet vzorkovací teorém⁸ a omezit jeho délku tak, aby byl považován naměřený úsek signálu délky T jako periodicky se opakující. Toho docílíme odstraněním nespojitosti využitím okénkové funkce, přes kterou se na úsek signálu budeme dívat [6].

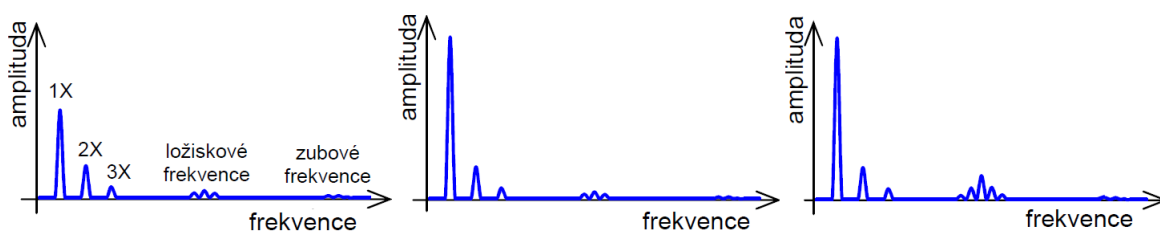
⁸Vzorkovací teorém říká, že Nyquistova frekvence (polovina vzorkovací frekvence) musí být vyšší než nejvyšší frekvence vzorkovacího signálu

2.3.4 Metody vyhodnocení frekvenčního spektra

Porovnávání spektra

Metoda porovnávání spektra je založena na předpokladu, že frekvenční spektrum ložiska se v průběhu životního cyklu v závislosti na stavu ložiska mění.

Metoda spočívá v změření referenčního spektra po usazení ložiska, které je v pravidelných cyklech porovnáváno s aktuálním frekvenčním spektrem změřeným na ložisku. Zvýšená pozornost se věnuje vyšším frekvencím, které odpovídají frekvencím poruchy ložiska viz. obrázek 2.5, kde můžeme na referenčním spektru (spektrum vlevo) sledovat zanedbatelnou míru vibrací v oblasti ložiskových frekvencí. V druhém frekvenčním spektru (spektrum uprostřed) vyhodnoceném po určitém časovém úseku sledujeme nárůst amplitudy první harmonické otáčkové frekvence, což může znamenat poruchu rotačního stroje. Po dalším časovém úseku ve frekvenčním spektru (spektrum vpravo) vidíme nárůst vibrací v oblasti vyšších frekvencí, což odpovídá počátku poruchy či opotřebení ložiska.[6]



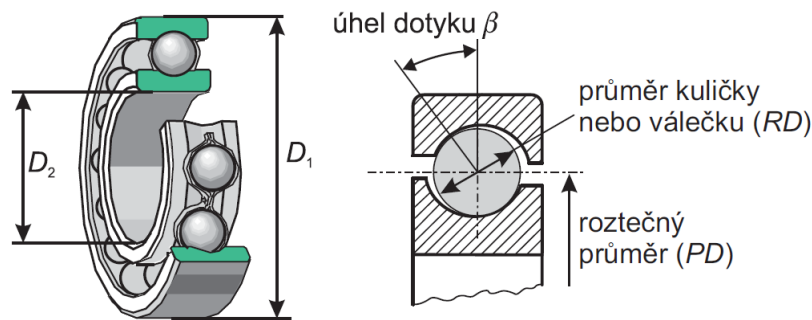
Obr. 2.5: Porovnávání frekvenčního spektra v průběhu životního cyklu stroje[6]

Změna spektra se numericky může vyhodnotit součtem jednotlivých hodnot amplitud frekvenčních čar a tato hodnota je porovnávána s referenční sumou. Tento přístup je možno využít k detekci kvalitativních změn ložiska v průběhu času bez potřeby lokalizace, kde chyba vznikla, či čím je způsobena. Tento postup je ekvivalentem k porovnávání efektivní hodnoty v časové oblasti s referenční hodnotou. Je zřejmé, že tato metoda není pro automatizované vyhodnocování ve frekvenční oblasti příliš vhodná. Ovšem pro vibrodiagnostiku může být rychlým nástrojem pro zhodnocení stavu rotačního stroje pouhým pohledem na vypočtená spektra.

Chybové frekvence

U valivých ložisek existuje závislost mezi geometrickými parametry 2.6 součástí ložisek a výstupem spektrální analýzy při poruše ložiska na jednotlivých komponentech. Nejčastější poruchy valivého ložiska, jak již bylo řečeno v kapitole 1.2.1, se projevují

formou pittingu na valivých elementech, vnitřní dráze valivého ložiska, vnější dráze valivého ložiska a nebo na kleci valivých elementů.



Obr. 2.6: Geometrické parametry ložiska, nutné pro výpočet chybových frekvencí [20]

Při průchodu valivého elementu poškozenou částí ložiska dochází ke generování pravidelně se opakujících mechanických rázů. Defekty na různých částech ložiska se projevují různými opakovacími frekvencemi. Pokud uvažujeme čistě valivý pohyb a ideálně bodový defekt⁹ můžeme tyto opakovací frekvence popsat pomocí vztahů níže. Odborná literatura se rozchází v reprezentaci vzorce pro výpočet chybové frekvence na valivém elementu, proto jsou zde uvedeny různé varianty s citacemi zdroje pro porovnání:

Tab. 2.3: Porovnání vzorců pro výpočet chybových frekvencí ložiska z různých zdrojů

Typ	Vzorec	Zdroje
f_{BPFO}^{10}	$\frac{n_e}{2} f_h \left(1 - \frac{RD}{PD} \cos \beta \right)$	[20],[6],[15],[4],[10]
f_{BPF1}^{11}	$\frac{n_e}{2} f_h \left(1 + \frac{RD}{PD} \cos \beta \right)$	[20],[6],[15],[4],[10]
f_{BSF}^{12}	$\frac{PD}{2RD} f_h \left(1 - \left(\frac{RD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right)$	[20],[6]
	$\frac{PD}{RD} f_h \left(1 - \left(\frac{RD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right)$	[15],[10]
	$\frac{PD}{RD} f_h \left(1 + \left(\frac{RD}{PD} \right)^2 \cos \beta \right)$	[4]
f_{FTF}^{13}	$\frac{1}{2} f_h \left(1 - \frac{RD}{PD} \cos \beta \right)$	[20],[6],[15],[10]
	-	[4]

⁹ Pitting neodpovídá ideálně bodovému defektu, proto jsou vypočtené frekvence s odpovídajícími frekvencemi v reálném spektru mírně rozdílné

kde dle obrázku 2.6

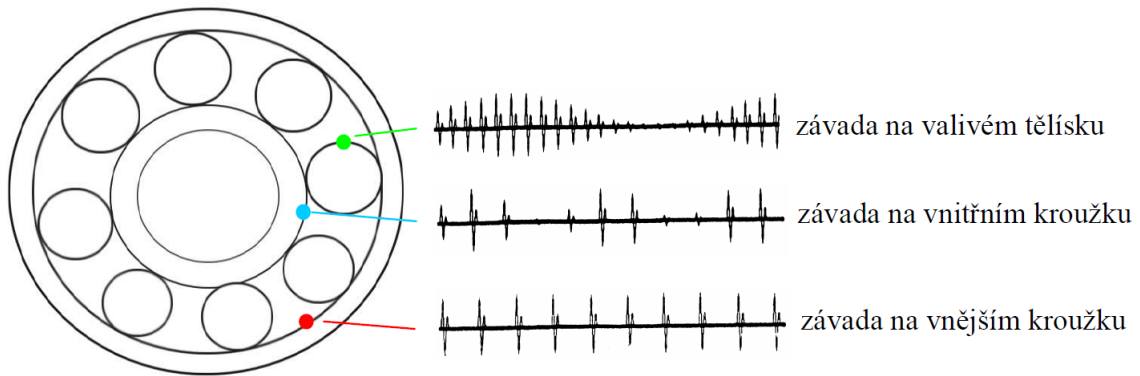
n_e počet valivých elementů

RD průměr valivého elementu [mm]

PD roztečný průměr ložiska [mm]

β úhel dotyku mezi kroužkem ložiska a valivým elementem [deg]

f_h otáčková frekvence hřídele [Hz]



Obr. 2.7: Frekvence generované vadami různých částí valivého ložiska [6]

Obálková analýza

Z teorie vyplývá, že dominantní frekvence ložiska leží blízko 100X otáčkové frekvence. Při otáčkové frekvenci 50 Hz se tedy druhá vlastní frekvence ve spektru objeví v oblasti kolem 5 kHz. Zpracování signálu je realizováno, tak že je zvolena oblast ve frekvenční oblasti, kde by se na ložisku objevují pulzy- tedy zvýšená úroveň. Tato oblast je ze signálu zvýrazněna pásmovou propustí s mezními frekvencemi, které ji ohraničují. U zkoumání stavu ložisek se vyhodnocuje signál v oblasti rezonančních frekvencí a to 5-20 kHz.

Poté je vypočtena dle vztahu níže obálka signálu.

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad (2.25)$$

$$\tilde{x}^2(t) = \mathcal{H}\{x(t)\} \quad (2.26)$$

Obálka signálu umožní zobrazení opakujících se signálů, který má natolik nízkou energii, že by v běžném signálu zcela ztratil svůj projev v šumu a dalších budících

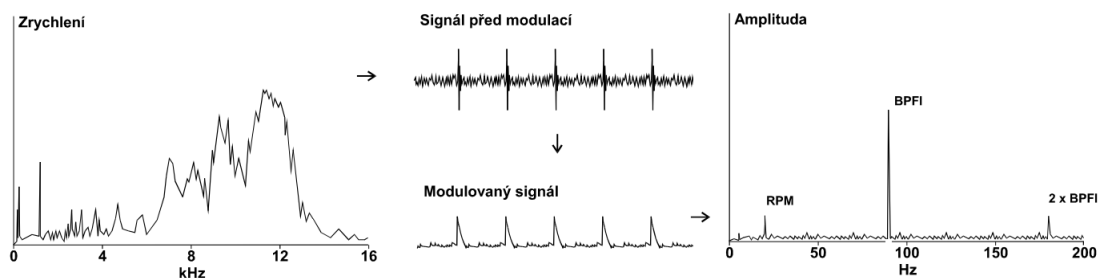
¹⁰ f_{BPFO} (Ball Pass Frequency-Outer Race)-opakovací frekvence příslušná vadě vnější dráhy

¹¹ f_{BPFI} (Ball Pass Frequency-Inner Race)-opakovací frekvence příslušná vadě vnitřní dráhy

¹² f_{BSF} (Ball Spinn Frequency)-opakovací frekvence příslušná vadě valivého elementu

¹³ f_{FTF} (Fundamental Train Frequency)- frekvence příslušná vadě klece ložiska

frekvencích. Pomocí obálky signálu dojde k jeho zvýraznění a na základě následné frekvenční analýzy (spektrální nebo kepstrální) jsme poruchu schopni nejen detekovat ale také lokalizovat. Na základě známé opakovací frekvence jsme schopni zjistit její původ na základě známých chybových frekvencí 2.3.4. Celý tento proces je zobrazen na obrázku 2.8. [15]



Obr. 2.8: Aplikace obálkové analýzy [26]-upraveno ze zdroje

Kepstrální analýza

Při detekci poruchy u nefiltrovaného signálu může nastat situace, kdy jsou vibrace valivého ložiska zamaskovány jinými výraznějšími zdroji. Pro tento případ je příhodná metoda výpočtu kepstrální analýzy často označované jako "spektrum spektra". Ta svou citlivostí na ekvidistantně rozložené komponenty ve spektru signálu, které jsou typickým projevem postranních pásem při amplitudové modulaci nebo skupin harmonických, slouží k jejich detekci.

Kepstrální analýze odpovídá výpočet zpětné Fourierovy transformace logaritmu výkonového spektra dle vztahu [20]:

$$C(\tau) = \mathcal{F}^{-1} \{ \log S(f) \} \quad (2.27)$$

kde

$$S(f) \text{ výkonová spektrální hustota signálu } x(t)$$

$$\mathcal{F}^{-1} \text{ zpětná Fourierova transformace}$$

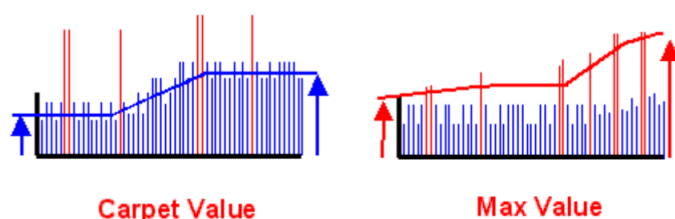
Aplikací kepstrální analýzy dochází k transformaci multiplikativního zkreslení spektra vibrodiagnostického signálu vlivem přenosové cesty na zkreslení aditivní, které je z hlediska výhodnocení signálu vhodnější. Aplikace kepstrální analýzy je často spojována s obálkou spektra, kdy dochází k detekci opakovací frekvence valivého ložiska.

SPM

Metoda SPM (shock pulse method) vyhodnocuje stav ložiska na základě vzniku rázových vln při styku kov na kov. Díky této metodě jsme schopni detekovat poruchu ložiska, kdy valivý element přichází do styku s vodící dráhou kov na kov, anebo poruchu mazacího filmu. Během styku kovů dochází ke vzniku dvou jevů a to vznik rázové vlny vysoké frekvence ale nízké amplitudy a rozvoj rázu, kdy dochází ke strukturálním pohybům povrchů kovu. Povrh se během několika kmitů ustálí. Měřená frekvence vibrací, takto generovaná je závislá na několika parametrech, a to zejména na tvaru, hmotnosti a tuhosti materiálu.

Metoda SPM definuje dva parametry, které udávají kondici ložiska. První z nich je tzv. Carpet Value, která je popsána jako charakteristický šum způsobený kontaktem styčných ploch. V případě nepoškozeného ložiska není hodnota Carpet value nulová, ale dosahuje definovaných hodnot v závislosti na typu mazání a kvalitě ložiska. S přicházející poruchou dochází k nárůstu šumu, až dojde k překročení limitní hodnoty viz obrázek 2.9 A. Hlavní příčinou nárůstu tohoto parametru je nedostatečná funkce mazání.

Druhým vyhodnocovaným parametrem metody SPM je tzv. Max value, která odpovídá poškození ložiska projevujících se nárazy valivých elementů průchodem porušenou strukturou ložiska (popřípadě poškození valivého elementu). Periodický průchod poruchou vytváří skupiny pulsových vln, které překračují hladinu Carpet value viz obrázek 2.9 B. Pro vyhodnocení stavu ložisku se využívá metod s názvem "peak hold signal processing", která umožňuje takto vzniklý signál ze spektra vyfiltrovat od Carpet value hodnot v pozadí. S nárůstem poškození ložiska narůstá i amplituda těchto pulsů. [14]



Obr. 2.9: Parametry metody SPM A Carpet value a B Max value [14]

Indikace špiček

Metoda indikace špiček je užívána pro provozní detekci stavu ložiska. Z obálky signálu je vypočtena Fourierova transformace a z ní je detekován určitý počet významných špiček. Tedy spektrálních čar s největší amplitudou. U výrobců se hodnota

špiček, které jsou zobrazovány, liší. Adash detekuje například 3 maximální špičky. [26]

Tato metoda slouží pro přehlednou a jednoduchou orientaci při pochůzkovém měření. Výstupem tohoto měření jsou vyobrazené maximální amplitudy a příslušné frekvence, na kterých se vibrace objevují. Některé přístroje obsahují expertní systémy, které dokáží neználemu člověku, který je zaučen měření provádět, co daný výsledek znamená a jak by měl postupovat v případě projevení poruchy.

CPB

Pod zkratkou CPB¹⁴ se skrývá metoda zpracování signálu vibrací s názvem oktávová analýza. Z anglického názvu vyplývá, že se jedná o metodu s konstantní procentuální šířkou zobrazovaných pásem. Tato metoda se ze svého principu vyznačuje logaritmickým rozlišením. Tato vlastnost je vhodná při vibrační diagnostice celého stroje, kde je nutno věnovat zvýšenou pozornost projevům poškození stroje na nízkých frekvencích. Na vyšších frekvencích dochází k periodickému opakování pulsů buzených poruchami ložisek či převodovek, kde již není rozlišení do takové míry nutné.

Analyzované spektrum oktávovou analýzou se rozlišuje dle dvou parametrů a to středem propustného pásma definovaném jako geometrický průměr horní a dolní frekvence [27]:

$$f_c = \sqrt{f_s f_h} \text{ [Hz]} \quad (2.28)$$

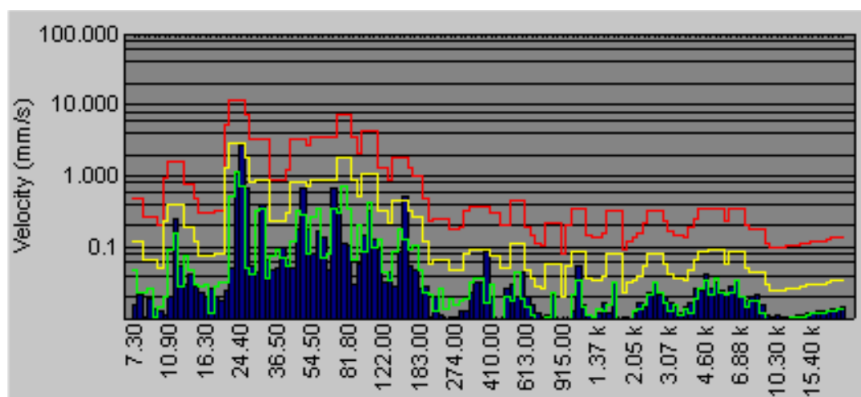
a šířkou pásma udávaného v oktávách a vyjádřeného v procentech y od středu propustného pásma:

$$B = \frac{y f_c}{100} \text{ [%]} \quad (2.29)$$

Výhodou této metody je nejen přehlednost výsledných analýz, ale také možnost využití referenční analýzy pro stroj při změně jeho otáček. Tato korekce se dělá posunem celého spektra o počet kroků dle procentuální změny rychlosti.

Na obrázku 2.10 je vyobrazen výstup z oktávové analýzy 24 % s vyznačenými alarmovými úrovněmi. Oranžová úroveň značí nutnost zvýšené pozornosti stavu stroje a červená úroveň odpovídá poškození stroje neslučitelné s jeho dalším bezpečným provozem.

¹⁴CPB = Constant Percentage Bandwidth



Obr. 2.10: Výstup oktávové analýzy 24 % s vyznačenými alarmovými úrovněmi [27]

BCU

BCU¹⁵ je patentovanou metodou společnosti Schenck. Tato metoda spočívá ve faktu, že průchod valivého elementu přes poškozené místo vyvolá vybuzení vibrací ve snímači v rezonanční oblasti (36-38 kHz). Zjišťuje se energetický rozsah doznívajícího kmitání společně s četností svého výskytu. Z těchto veličin se potom vytváří charakteristika stavu valivého ložiska BCU.

Jako měřítko pro posouzení lze použít charakteristiku totožného ložiska, zabudovaného na stejném místě uvažovaného stroje, která je trendována od počátku svého běhu až po destrukci. Na základě této křivky jsme schopni zvolit míru BCU hodnoty, která odovídá potřebě zvýšené pozornosti či úplného odstavení stroje. Ne vždy máme k dispozici takto naměřená data, takže se využívá alternativní varianty a stanovení míry neúnosného poškození na 3-4 násobek počáteční hodnoty BCU po instalaci nového ložiska. [3]

SEE

SEE¹⁶ je metoda patentovaná společností SKF. Tato metoda je založena na měření v oblasti vysokých frekvencí v intervalu 250 - 350 kHz.

Z takto změřeného signálu jsou aplikací obálkové metody separovány pouze vysokofrekvenční složky vibrací. Tímto krokem sice dochází ke snižování energetického obsahu spektra, ale poruchy v signálu jsou od sebe odděleny stejným časovým intervalem. [22]

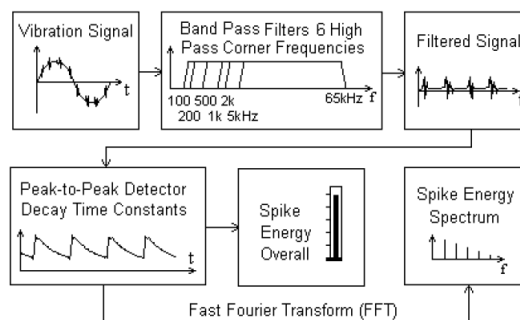
¹⁵BCU = Bearing Condition Unit

¹⁶SEE = Spectral Emission Energy

Spike energy

Spike energy je metoda, která se vyznačuje širokým pásmem frekvencí (do 65 kHz), čímž splňuje podmínku detekce většiny poruch, včetně poruch valivých ložisek. Signál, který je vstupem do metody Spike energy je zpravidla měřen akcelerometrem. Tedy jedná se o metodu zpracující signál zrychlení. Amplituda této metody je vyjádřena ve speciální jednotce, která se jmenuje gSE (jednotky zrychlení vztahované ku spike energy) [17].

Tato metoda spočívá ve filtraci signálu pásmovou propustí s následným výpočtem obálky signálu. Takto upravený signál je možné dále zpracovat sumou, kdy je výstupem tzv. Spike energy overall a nebo výpočtem FFT dosáhnout Spike energy spektra dle obrázku 2.11.

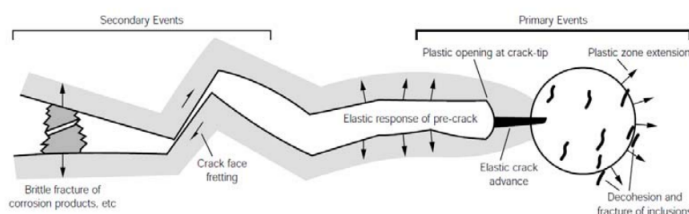


Obr. 2.11: Postup aplikace metody Spike energy [17]

3 AKUSTICKÁ EMISE

3.1 Definice akustické emise

Akustickou emisí se označuje fyzikální jev, při němž pozorujeme akustické signály šířené v materiálu, který vzniká vlivem uvolnění energie, které jsou způsobeny vlivem plastické deformace, narušení materiálu konstrukcí, netěsností kapalin držených pod tlakem či třením. Metoda akustické emise je díky svým parametrům vhodná pro online diagnostiku cyklicky zatěžovaných součástí mezi něž se řadí i valivá ložiska. Při vzniku pittingu na dráze valivých elementů ložiska dochází ke generování praskavého signálu akustické emise viz obrázek 3.1. Tento signál se s rozvíjející mírou poruchy mění tak, že se zvýší amplituda a počet zdrojů akustické emise.



Obr. 3.1: Zdroje akustické emise na elementu ložiska [11]

3.2 Vlny

Materiál je z hlediska mikroskopického pohledu soustava částic, které jsou mezi sebou elasticky spojeny. Vznikem defektu v této struktuře vzniká elastická vlna, která je zachycena snímačem na povrchu diagnostikovaného objektu. Z hlediska vyhodnocení stavu diagnostikované struktury jsou rozpoznávány kombinace těchto základních typů vln: podélná vlna v tlusté desce, příčná vlna, dilatační vlna v tenké desce-symetrická, dilatační vlna v tenké desce-asymetrická, Rayleighova vlna na povrchu tlusté desky. U těchto vln jsou dále vyhodnocovány další parametry, které jsou detailněji popsány v kapitole 3.4. [16]

3.3 Události akustické emise

Akustická emise je reprezentována vznikem událostí generujících signál. Události si můžeme představit jako příchod rázové vlny 3.2, která generuje takzvané hity

elektrického signálu. Hitem elektrického signálu myslíme překročení definovaného prahu 3.4 akustické emise amplitudou příchozí akustické vlny.

Spojitá akustická emise je vyvolávána událostmi, které nejsou časově odděleny. Hity elektrického signálu se překrývají viz obrázek A 3.2.

Nespojitá akustická emise je vyvolávána časově oddělenými událostmi, které trvají řádově milisekundy až nanosekundy. Hity elektrického signálu tvoří jednoduchou nepřekrývající se posloupnost viz obrázek B 3.2. Příkladem nespojité posloupnosti signálu akustické emise je praskavý signál. [5]



Obr. 3.2: Vizualizace A spojitého a B nespojitého průběhu akustické emise [5]

3.4 Parametry signálu akustické emise

Práh je nastavená konstantní hodnota, která definuje hranici počátku a konce emisní události.

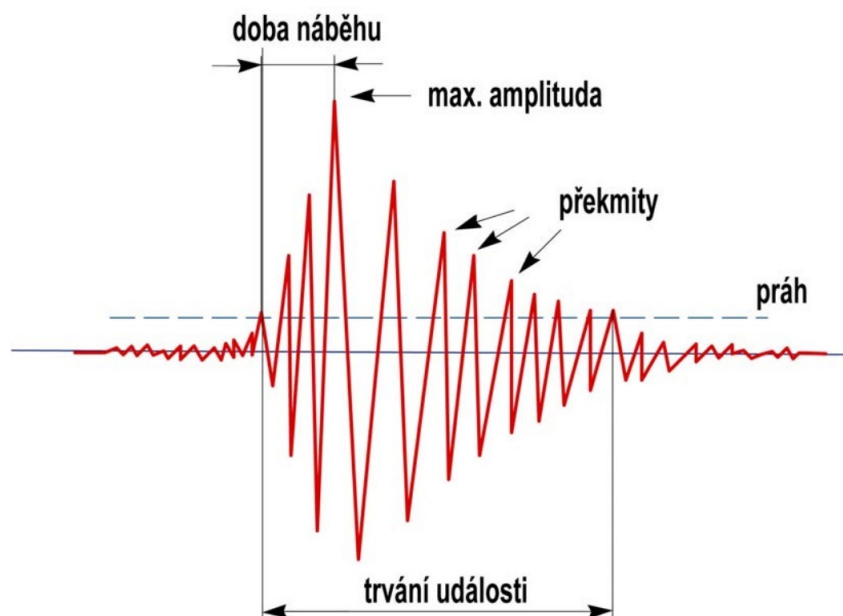
Počet emisních překmitů udává počet kmitů přes nastavenou prahovou hodnotu od začátku do konce emisní události.

Počet emisních překmitů do maxima udává počet kmitů přes nastavenou prahovou hodnotu do dosáhnutí amplitudy emisní události. Tento parametr udává strmost náběhu emisní události.

Amplituda emisní události je maximální hodnota emisní události.

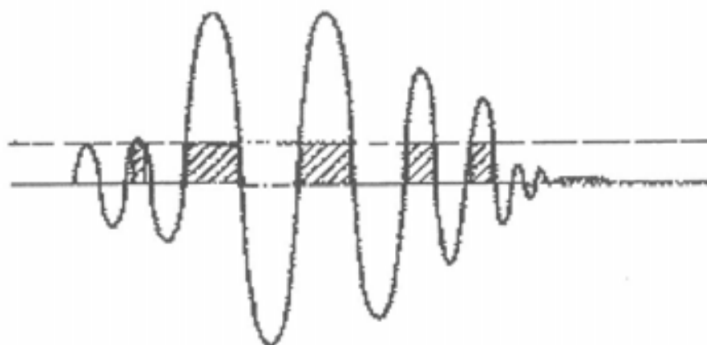
Délka emisní události je doba mezi prvním a posledním překročením prahové hodnoty.

Doba náběhu je čas mezi počátkem události akustické emise a její amplitudy. Tento parametr se vyhodnocuje pro rozlišení zdroje signálu a k účelům jeho následné filtrace.



Obr. 3.3: Signál akustické emise s vyznačenými parametry [19]

Energie emisní události je přímo úměrná ploše pod obálkou emisní události viz obrázek 3.4.



Obr. 3.4: Energie emisní události [5]

Průměrná frekvence emisní události udává koeficient poměru počtu emisních překmitů ku době emisní události.

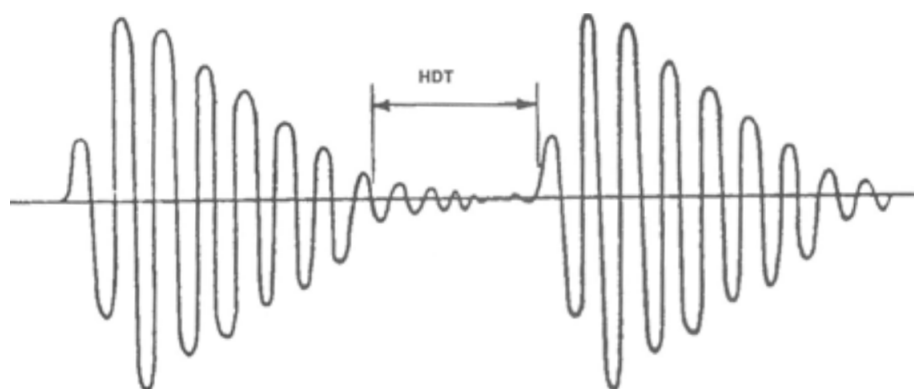
Čas příchodu udává absolutní čas, kdy došlo k počátku emisní události.

Časový rozdíl udává časovou diferenci dvou měření téže události akustické emise. Snímače jsou umístěny na rozdílných místech. Tento parametr slouží k lokalizaci zdroje akustické emise.

Parametrické signály jsou signály, které jsou ukládány s každou emisní událostí doplňují průběh signálu akustické emise. Tyto parametrické neboli pomocné signály mají přímou souvislost se zatěžováním měřeného objektu. Zpravidla jde o výstupy ze snímačů tlaku, teploty, síly atd.

Průměrná hladina je využívaným parametrem u spojitého signálu akustické emise. A udává průměrnou hodnotu

Mrtvý čas udává dobu mezi koncem jedné události akustické emise a začátkem další události akustické emise. [5]



Obr. 3.5: Mrtvá doba akustické emise [5]

3.5 Algoritmy vyhodnocení akustické emise ve vibrodiagnostice

3.5.1 Výčet základních veličin akustické emise

V běžné vibrodiagnostické praxi se sledují obdobné základní parametry jako u signálu vibrací. V časové oblasti jmenovitě:

- Efektivní hodnota
- Špičková hodnota
- Činitel výkmitu
- Špičkatost
- Šikmost
- Počet pulsů

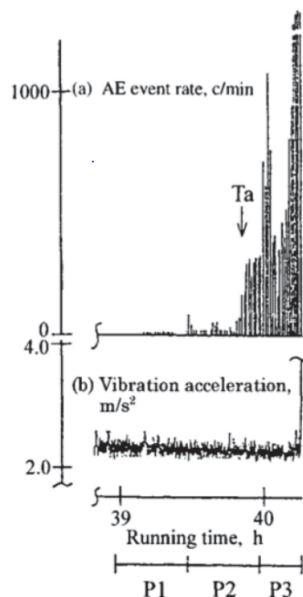
Mimo metody shodné s vyhodnocení signálu vibrací dále vyhodnocujeme překmitu a hodnotu ASL.

Metoda detekce překmitů

Metoda překmitů porovnává signál ze senzoru akustické emise ve frekvenčním rozsahu 200 - 400 kHz. Překmity akustické emise jsou ve srovnání se signálem vibrací citlivější na detekci poruchy.

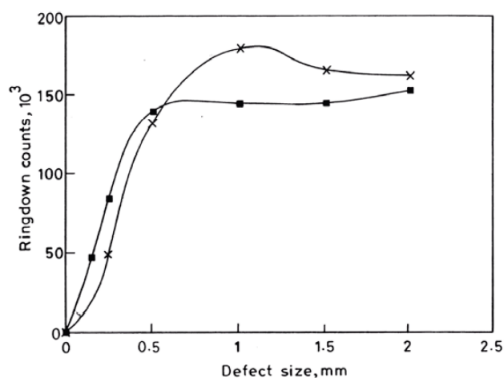
Typická krajní mez pro zastavení běhu chodu stroje je v rozsahu 6-8 m/s^2 .

Na obrázku 3.6 je vidět záznam životnostní zkoušky. Za pozornost stojí, že událost akustické emise Ta nastala dříve než nárůst vibrací.



Obr. 3.6: Záznam životnostní zkoušky ložiska [8]

Dle [9] existuje závislost počtu překmitů za jednotku času a míry poruchy. Tato závislost je vynesena v grafu 3.7. Dva průběhy odpovídají dvěma typům ložisek.



Obr. 3.7: Závislost počtu překmitů na míře poruchy [9]

Metoda vyhodnocení ASL

Pod zkratkou ASL se skrývá "average signal level". Výpočet ASL je realizován dle vztahu [7]:

$$ASL = 20 \log_{10}(1, 4RMS), [m/s^2] \quad (3.1)$$

3.5.2 Složitější algoritmy vyhodnocení akustické emise

Existují však i složitější algoritmy využívající pokročilejších metod zpracování signálu například metoda rozpoznání vzorů.

Metoda rozpoznání vzorů

Algoritmus využívá takzvané "short-time" zpracování signálu, což je technika, která používá oknové funkce pro vyhledání frekvence a amplitudy impulsu události akustické emise, které mohou být výsledkem lokalizované vady ložiska.

Dle schématu 3.8 jsou vstupem do algoritmu vypočtené chybové frekvence daného ložiska dle 2.3.4 a signál akustické emise.

Signál akustické emise je filtrován horní propustí a mediánovým vyhlazovačem od kterého je odečten výstup horní propusti, čímž dojde k zostření signálu. Z takto upraveného signálu je vypočten průběh emisní energie dle vztahu [4]:

$$E(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x^2(m)w(n-m) \quad (3.2)$$

kde

$$\begin{aligned} x(n) & \text{ navzorkovaný signál akustické emise} \\ w(n) & \text{ váhové okno funkce splňující podmínku :} \\ w(n) = 1 & \text{ když } 0 \leq n \leq N-1 \text{ jinak } w(n) = 0 \end{aligned}$$

a rychlost průchodů nulou dle vztahu [4]:

$$Z(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} |\operatorname{sgn}[x(m)] - \operatorname{sgn}[x(m-l)]|w(n-m) \quad (3.3)$$

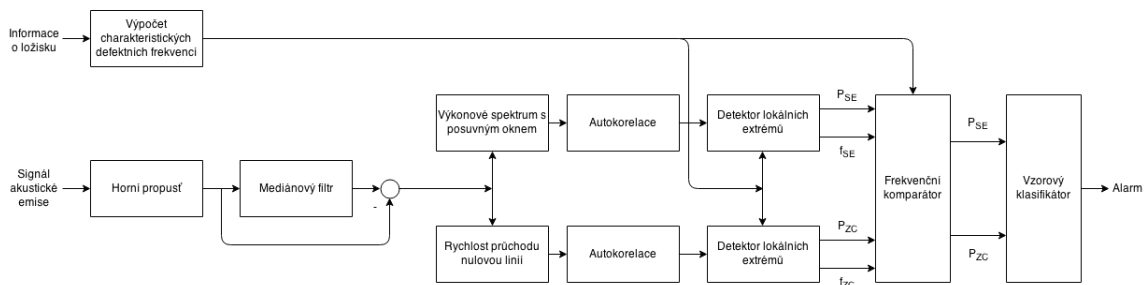
kde

$$\begin{aligned} x(n) & \text{ navzorkovaný signál akustické emise} \\ w(n) & \text{ váhové okno funkce splňující podmínku :} \\ \operatorname{sgn}[x(n)] = 1 & \text{ když } x(n) \leq 0 \\ \operatorname{sgn}[x(n)] = -1 & \text{ když } x(n) < 0 \text{ a } w(n) = 1/2N \text{ (} 0 \leq n \leq N-1 \text{), } w(n) = 0 \end{aligned}$$

Poté jsou vypočteny autokorelační funkce amplitudy význačných impulsů P_{SE}, P_{ZC} a jim příslušných frekvencí f_{SE}, f_{ZC} . Z nich je vypočtena hodnota frekvence generování impulsu váhovaným průměrem dle vztahu:

$$f = \frac{P_{SE}f_{SE} + P_{ZC}f_{ZC}}{P_{SE} + P_{ZC}}, [Hz] \quad (3.4)$$

Takto vypočtená frekvence je porovnávána s chybovými frekvencemi zadanými na vstup algoritmu. Na základě shody a amplitudy je vyhodnocován stav ložiska.



Obr. 3.8: Metoda rozpoznávání vzoru [4]

4 ŽIVOTNOSTNÍ ZKOUŠKA

Životnostní zkouška ¹ je zpravidla provedena zatížením ložiska definovaným tlakem při konstantních otáčkách po dobu, dokud testované ložisko není poškozeno do stavu, kdy dále není schopno bezpečného provozu. Zatížení ložiska je nutno volit tak, aby ložisko nevykazovalo extrémní nedefinovatelné poruchy. Je experimentálně dokázáno², že nad určité zatížení již nedochází ke vzniku běžného pittingu.

Provoz životnostní zkoušky má hned několik významů. Pro výrobce ložisek je životnostní zkouška nástrojem pro ověření deklarovaných parametrů z hlediska garantované provozní doby ložiska. Jiný význam pro výrobce ložisek má životnostní zkouška při vývoji a inovacích jejich produktů. Neméně důležitý význam má životnostní zkouška pro vývojáře nových metod v oblasti vibrodiagnostiky a provozní diagnostiky rotačních strojů.

4.1 Vývoj poruchy ložiska během životnostní zkoušky

Vývoj poruchy valivého ložiska má ve většině případů svůj specifický průběh. Argumentem pro nástroje provozní údržby je fakt, že poškození ložiska se rozvíjí v posledních 20 % doby životnosti ložiska s exponenciálním trendem. Vývoj poruchy dle [6] dělíme na 4 základní etapy viz obrázek 4.1.

4.1.1 Etapa I. ultrazvukové frekvence

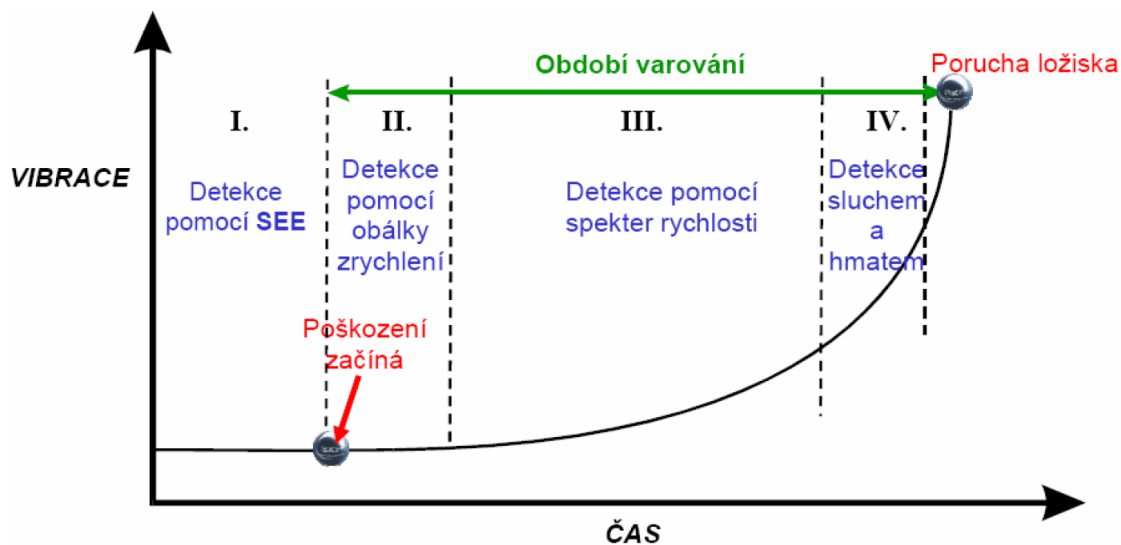
Prvotní problémy ložiska se objevují v ultrazvukovém frekvenčním pásmu (250-300 kHz). Při vzniku poškození frekvence poruchy klesne na nižší frekvence (20-60 kHz). Pro tyto frekvence je užívána metoda SEE viz 2.3.4. [6]

4.1.2 Etapa II. vlastní frekvence

Malé vady valivého ložiska způsobují vybudování vlastních frekvencí komponent ložiska (0.5-2 kHz) nebo rezonanci nosných částí ložiska. Koncové stadium fáze II je vznik postranních pásem kolem rezonanční špičky. Pro detekci tohoto stadia je užívána demodulace spekter vysokých frekvencí obálkovou analýzou viz 2.3.4.[6]

¹Životnostní zkouška bude probíhat na zkušebně ložisek Fakulty strojního inženýrství pod Vysokým učeníem technickým v Brně. Cílem této zkoušky je sběr dat při vývoji poškození valivého ložiska.

²Testy na FSI pod VUT Brno- jmenovitě Ing. Milan Klapka Ph.D



Obr. 4.1: Typický vývoj poruchy valivého ložiska [6]

4.1.3 Etapa III. chybové frekvence

V této fázi dochází k nárustu amplitud u chybových frekvencí valivých ložisek. Rozvoj lze sledovat i na jejich harmonických násobcích, jejichž počet se během rozvoje poruchy zvětšuje. Rovněž také dochází k nárustu počtu postranních pásem, které se objevují kolem harmonických násobků i kolem vlastních poruchových frekvencí. Pro detekci poruch v této fázi se užívá metod vyhodnocení spektra rychlostí vibrací například chybové frekvence 2.3.4. [6]

4.1.4 Etapa IV. vysokofrekvenční prahový šum

Tato fáze odpovídá již konci životnosti valivého ložiska. Projevem tohoto stavu je nárůst amplitud frekvence otáčkové složky 1X a jejich harmonických násobků. Vlivem zvětšení vůle v ložisku začínají ze spektra mizet význačné amplitudy na chybových a vlastních frekvencích valivého ložiska. Tyto frekvence jsou nahrazeny náhodným širokopásmovým vysokofrekvenčním prahovým šumem. [6]

5 VLASTNÍ REALIZACE VIBRODIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU

5.1 Parametry měřicí jednotky

V rámci této práce bylo rozhodnuto, že software bude vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW od společnosti National Instruments. Z důvodu kompatibility s tímto vývojovým prostředím proběhla volba měřicího systému z produktů této společnosti.

Při životnosní zkoušce s měřením signálu akustické emise je nutné vzorkovat signál vysokou frekvencí (v tomto případě 1MHz) z důvodu projevu poruch ložisek na vysokých frekvencích v řádu stovek kHz. Vysoká vzorkovací frekvence znamená velké nároky na výpočetní výkon při výpočtech analýz a ukládání dat. Vysoká vzorkovací frekvence znamená velké množství vzorků, proto je nutná velká nonvolatilní paměť či přítomnost USB portu pro připojení datového úložiště. Pro obsluhu požadavku na 1MHz *fvz* je nutno využít metod v FPGA. Nutným požadavkem při životnosní zkoušce je nepřetržitá kontrola míry vibrací stroje, aby pro případ neúnosného nárůstu došlo k vypnutí rotačního stroje.

Dle rozvahy výše jsou základními parametry pro výběr výhodnocovací jednotky s jejich dopadem na samotnou realizaci v tabulce 5.1:

Tab. 5.1: Souhrn parametrů řídicí jednotky s jejich reálným dopadem na životnosní zkoušku

<i>Parametr řídicí jednotky</i>	<i>Dopad na realizaci životnosní zkoušky ložisek</i>
Velikost paměti RAM	Kapacita fronty obsahující navzorkovaná data
Počet jader/f procesoru	Doba výpočtu analýz, vyčítání a ukládání dat
Přítomnost FPGA modulu	Sběr dat na 1MHz <i>fvz</i> , online monitoring vibrací
Velikost nonvol. paměti	Kapacita uložení naměřených záznamů/trendů
Přítomnost USB portu	Možnost připojení externího paměťového úložiště
Počet slotů na karty	Možnost připojení měřicí karty a IO karty
Provozní teplota	Umístění jednotky blízko rotačních strojů

Vzhledem k možnostem fakulty byla k účelu této diplomové práce poskytnuta výhodnocovací jednotka typu NI cRIO 9076 s měřicí kartou NI 9223 pro sběr dat ze snímače vibrací a snímače akustické emise na principu piezoelektrického jevu a vstupně výstupní karta NI 9401 pro nouzové vypnutí motoru v případě překročení povolené meze rychlosti vibrací.

Parametry komponent jsou shrnuty níže v tabulkách 5.2 a 5.3¹:

Tab. 5.2: Parametry poskytnutého kontroléru cRIO 9076 [25]

Typ NI cRIO	9076
Frekvence procesoru	400 MHz
Počet jader	-
Typ OS	Real-Time
Nonvolatilní paměť	512 MB
Systémová paměť	256 MB
FPGA	Spartan- 6
Počet slotů	4
Ethernet port	1
Serial port (RS 232)	1
Serial port (RS 485)	-
USB port	1
MXI-express	-
Pracovní teplota	-20°C - 55°C
Cena	50 400 Kč

Tab. 5.3: Parametry měřicí karty cRIO 9223 [25]

NI cRIO modul	9223
Počet diferenčních kanálů	4
Rozlišení analogového vstupu	16 bitů
Rozsah	-10V- 10V
Přesnost	0,00306V
Kontinuální vzorkování	ANO
Maximální frekvence	1MHz
Vstupní impedance	1GOhm
Pracovní teplota	-40°C - 70°C
Cena	44 000 Kč

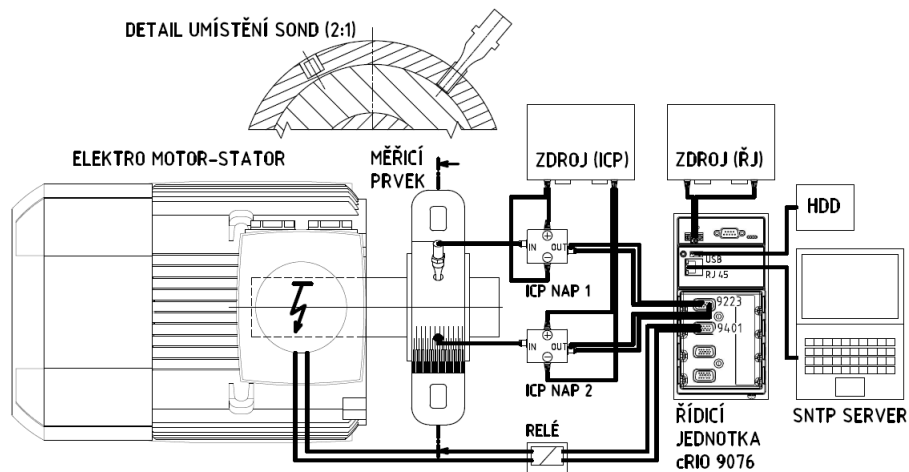
Poskytnuté komponenty jsou výzvou pro splnění zadání, protože při porovnání parametrů a požadavků je zřejmé, že se budeme pohybovat na hranici možností tohoto hardware. Ovšem software je možno modifikovat pro výkonější hardware, kdy

¹Pro širší přehled jsou shrnuty všechny dostupné kontrolery cRIO se svými parametry v příloze B této práce B.

dojde ke značně lepším výsledkům z hlediska optimalizace tohoto vibrodiagnostického systému.

5.2 Koncepce životnostní zkoušky

Zvolená koncepce životnostní zkoušky z hlediska hardware je znázorněna na obrázku 5.1:



Obr. 5.1: Schéma zapojení životnostní zkoušky ložiska

Z hlediska software je životnostní zkouška rozdělena do 6 základních bloků:

- Inicializace
- Předzpracování měřených signálů
- Kontinuální kontrola míry vibrací
- Navzorkování dat ze snímačů s přenosem k dalšímu zpracování
- Analýzy na vzorkovaných datech
- Záznam dat

5.2.1 Inicializace vibrodiagnostického systému

Realizovaný vibrodiagnostický systém je navržen tak, aby uživatel byl schopen bez zásahu do kódu nastavit vybrané parametry. Inicializační soubor `Init.txt` je uložen na nonvolatilní paměti cRIO. Ukázka inicializačního souboru je v příloze C.

Geometrické parametry ložiska

Nastavením geometrických parametrů ložisek dle 2.6 je umožněn výpočet chybových frekvencí ložiska, které jsou vstupem do analýz vibrací/akustické emise ve frekvenčním spektru. Programově je ošetřeno, aby nebylo možné vybrané analýzy vykonat pokud jsou zadané parametry rovny defaultní hodnotě (0).

Výběr vykonávaných analýz

Není pravidlem, že při životnostní zkoušce musí být vykonávány v Real-Time všechny dostupné analýzy. Pro tento případ je možnost v inicializačním souboru vybrat, které analýzy budou vykonávány. Výběr je realizován binárním výběrem. Zadáním parametru 1 u vybrané analýzy bude analýza vykonávána. Zadáním parametru 0 bude analýza ve stavovém automatu překročena. K vykonání některých analýz je zapotřebí splnit podmínky dle 5.2.1.

Počet vybraných analýz ovlivňuje dobu mezi vyčítáním vzorků dle 5.2.5.

Nastavení mezních hodnot

Výstupy z každé dostupné analýzy v realizovaném vibrodiagnostickém systému jsou trendovány dle algoritmu inteligentního záznamu dat 5.2.6. Protože není z literatury naprosto zřejmé², jak volit mezní hodnoty, tak je žádoucí, aby si mohl realizátor životnostní zkoušky nastavit své ať už teoretické či prakticky zjištěné meze.

Nastavení počátku životnostní zkoušky

Součástí vibrodiagnostického systému jsou analýzy, které vycházejí z referenční hodnoty, která je uložena při prvním vykonání analýzy. Z hlediska validního výstupu z takto dělaných analýz by mělo být ložisko při ukládání referenční hodnoty alespoň v základním záběhu. Bylo by ovšem nebezpečné připojit zařízení až po tomto záběhu, protože není jistota, že ložisko není z výroby poškozené a mohlo by dojít k nevratnému poškození rotačního stroje či ublížení na zdraví obsluze.

Pro tento případ obsahuje realizovaný vibrodiagnostický systém možnost zadání datumu a času spuštění prvního vykonání analýz ve formátu: HH:MM:SS-MM-DD-YYYY. Během čekání na tento čas však již běží monitoring vibrací dle 5.2.3.

²V literatuře se uvádí, že nárůst o 3dB značí potřebu zvýšené pozornosti a nárůst o 6dB značí nebezpečí poškození stroje

5.2.2 Předzpracování měřených signálů

Signál vibrací je výstupem z piezoelektrického akcelerometru. Protože, jsou dovolené meze uváděny pro míru rychlosti vibrací a některé analýzy vyžadují jako vstup rychlost vibrací v ISO pásmu, tak je nutné tento signál transformovat.

U akcelerometru musíme počítat s driftem, který se předpokládá do rozsahu 5 Hz. U signálu zrychlení bude tento drift filtrován horní propustí s mezním kmitočtem 1Hz. ISO pásmo rychlosti vibrací je definováno v intervalu 10-1000 Hz, takže drift bude eliminován v rámci filtrace na toto pásmo.

V rámci této práce jsou využívány dva přístupy k transformaci signálu zrychlení do rychlosti. A to:

- Integrace lichoběžníkovou metodou v FPGA
- Integrace Fourierovou analýzou v Real-Time

Integrace v FPGA

Při požadavku na online monitoring efektivní hodnoty vibrací je nutné signál v FPGA transformovat na rychlost v ISO pásmu. Protože FPGA modul neumožňuje využít předprogramovaný blok pro realizace integrace, tak bylo nutné tuto numerickou metodu v FPGA naprogramovat. Ze všech dostupných numerických metod výpočtu určitého integrálu jsem zvolil metodu lichoběžníkovou. Z důvodu omezeného výpočetního výkonu a paměti FPGA je tato metoda vhodná, protože si stačí pamatovat průběžně 4 hodnoty: minulou hodnotu signálu, hodnotu integrálu, počet vzorků a aktuální měřenou hodnotu.

Lichoběžníková metoda spočívá v rozdělení zadaného intervalu signálu na $n \in N$ stejně velkých intervalů. V hraničních bodech jednotlivých intervalů je vyhodnocována hodnota funkce $f(x)$ a na jednotlivých intervalech je tato funkce aproximována lineární funkcí, která se rovná funkci $f(x)$ v hraničních bodech. Poté přistupujeme k výpočtu určitých integrálů, kdy jde o výpočet plochy lichoběžníku. Odhad určitého integrálu funkce $f(x)$ je dán dle vztahu:

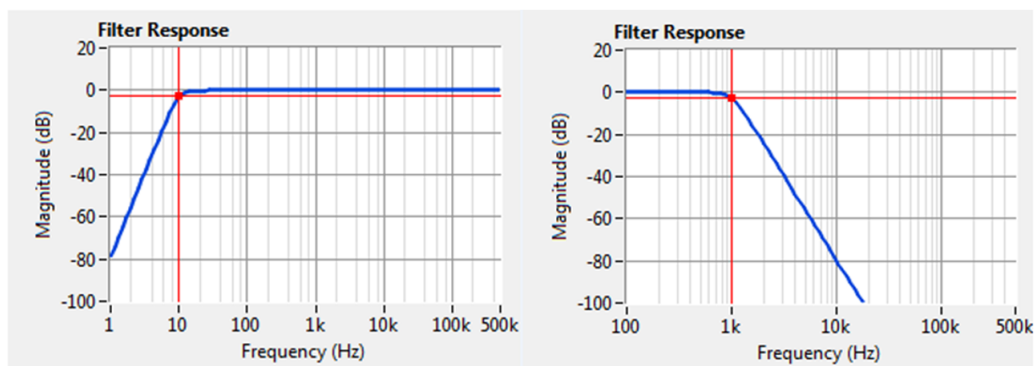
$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=1}^n \frac{f(x_{i-1}) + f(x_i)}{2} (x_i - x_{i-1}) \quad (5.1)$$

Vysoká vzorkovací frekvence v kombinaci s nedostatečným výpočetním výkonem FPGA a potřebou signálu zrychlení vibrací pro některé druhy analýz neumožňuje provádět transformaci signálu na rychlost pouze v FPGA. Proto je nutné navzorkovaný signál zrychlení přenést přes DMA³ frontu do Real-Time.

Protože v FPGA je vypočítávána pouze efektivní hodnota rychlosti vibrací, není nutno řešit případné rozlišení Fourierovy analýzy. Nutno je pouze před samotným

³DMA-Direct memory acces slouží k přenosu dat mezi FPGA a Real-time

výpočtem integrálu signál filtrovat pásmovou propustí. V tomto případě byl použit Butterworthův filtr čtvrtého řádu s mezními frekvencemi 10 Hz a 1 kHz. Frekvenční charakteristiky filtru jsou uvedeny na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Přenosy filtrů pro pásmovou propust ISO pásma

Integrace v Real-Time

V Real-Time části je k dispozici dostatek výpočetního výkonu pro využití Fourierových transformací pro převod signálu zrychlení do rychlosti. Protože v signálu rychlosti pro analýzy je opět důležité ISO pásmo, je nutno přistoupit k filtraci. Princip Fourierovy transformace nám umožňuje operací aplikace oknové funkce o vhodné délce odstranit postranní pásma kolem pásma ISO.

Protože může být signál rychlosti vibrací vstupem do frekvenčních analýz, je nutné vzít v úvahu problém s omezeným počtem dat v buňce RT fronty kvůli velikosti systémové paměti RAM, vysokou vzorkovací frekvencí a možnostmi vyčítání dat z RT fronty. Data jsou v RT frontě ukládána v jednotlivých polích o velikosti 10000 vzorků (5000 akustická emise a 5000 signál vibrací) při délce záznamu 10 s v počtu 2000 polí. Z důvodu omezené paměti a potřebě data zachovat pro další analýzy dle 5.2.5 není možné vytvořit z dat vyčtených z RT fronty, bez omezení délky záznamu, pole o větší délce. Díky čemuž bychom byli schopni jako vstup do analýzy vložit delší časový záznam signálu při vysoké vzorkovací frekvenci. Dle vztahu 2.23 je rozlišení definováno jako poměr vzorkovací frekvence ku počtu vzorků. Proto je nutné přistoupit k podvzorkování naměřeného záznamu dat na minimálně 200 kHz při požadavku na rozlišení minimálně 40 Hz. Kvůli tomuto kroku musí dojít k doplnění antialiasingového filtru s mezní frekvencí na 77,5 kHz.

Převod signálu zrychlení do rychlosti s metodou Fourierových transformací je realizován výpočtem spektra s následným vydělením každé spektrální čáry hodnotou

rovnou $2\pi f$. Násobením každé spektrální čáry imaginární jednotkou i zajistíme posun fázoru o 90 stupňů. Takto upravené spektrum je oknováno obdelníkovou funkcí s mezními frekvencemi 10 a 1000 Hz , čímž je signál filtrován pro ISO pásmo. Následně je signál zpětnou Fourierovou transformací převeden zpět do časové oblasti.

5.2.3 Kontinuální kontrola míry vibrací

U životnostní zkoušky je nutností zajistit bezpečnost stroje. Pokud signál vibrací v efektivní hodnotě překročí povolenou mez dle 2.1, tak musí být bezpodmínečně odstaven z provozu.

Pro tyto účely je vhodné FPGA, protože v něm dochází k vyčítání všech neměřených vzorků na frekvenci 1 MHz. Komplikací je, že při převodu signálu zrychlení do ISO pásma rychlosti dle 5.2.2 musí dojít k filtraci vzorků. Filtrace je však natolik výpočetně náročná, že dochází k vzniku chyby přepisování vzorků při paralelním zasílání dat přes DMA do Real-Time. Z tohoto důvodu je program uzpůsoben tak, aby převod do rychlosti s následným výpočtem efektivní hodnoty probíhal pouze v době, kdy nedochází k přenosu dat do Real-Time. Přenos dat do Real-Time trvá cca 11 s. Po tuto dobu není na rotačním stroji monitorována míra vibrací.

Reakce na náhlou změnu míry vibrací musí být okamžitá, proto je nutno vyřešit setrvačnost efektivní hodnoty při výpočtu na delším záznamu. V tomto případě by skoková změna byla průměrována a nedošlo by k okamžité reakci. Proto je algoritmus výpočtu efektivní hodnoty dle vztahu 2.8 doplněn o zapomínání, kdy dochází v pravidelném intervalu 1 s k nulování efektivní hodnoty vibrací. Tímto krokem dochází k pohybu okna o definované délce po signálu s výpočtem efektivní hodnoty v každém kroku okna nezávisle na ostatních hodnotách.

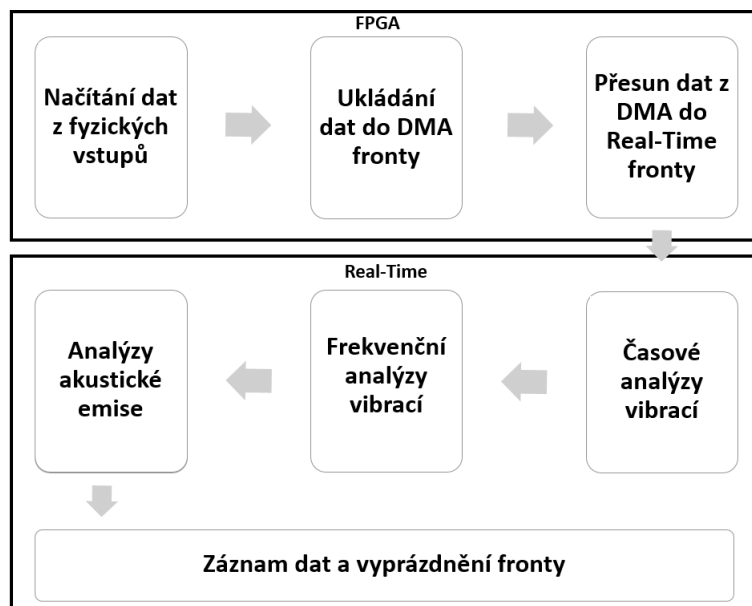
Mezní hodnoty jsou nastaveny dle 2.1 tak, že pokud dojde k překročení hodnoty 4 mm/s , tak dojde k sepnutí výstupu, který by měl být napojen na indikátor značící nutnost zvýšené pozornosti. Pokud dojde k překročení hodnoty 7.5 mm/s , tak dojde k sepnutí výstupu napojeného na relé, jehož sepnutím je rotační stroj odstaven z provozu.

5.2.4 Navzorkování dat ze snímačů s přenosem k dalšímu zpracování

Software je navržen tak, aby byla na začátku víceúrovňového stavového automatu data navzorkována při definované frekvenci (1 MHz). A poté, aby byla data ve frontě uchována až po poslední blok stavového automatu (záznam dat), kde je fronta vyprázdněna. Uchování dat ve frontě je nutno ošetřit na základě faktu, že data vyčtená z fronty jsou z téže fronty vyjmuta. Proto musí být data po vyčtení do téže fronty se

stejnou referencí ukládána. Jelikož se jedná o frontu typu FIFO, tak jde o kruhový buffer, kde jsme na základě známého počtu vzorků schopni deterministicky data točit.

Data, která jsou vstupem do jedné analýzy jsou paralelně s výpočtem analýz ukládána dle popisu výše zpět do fronty. Tímto je zajištěno, že na vstupu všech analýz jsou stejná data, která byla navzorkována v FPGA. Tok dat jednoho cyklu od jejich vzniku až do zániku je vyobrazen na digramu 5.3.



Obr. 5.3: Diagram toku dat v software

Data ve formátu s pevnou desetinnou čárkou jsou do RT fronty ukládány po polích o definovaném počtu vzorků⁴. Protože obsluha a synchronizace dvou RT front by byla zbytečná a nic by nezměnila na kapacitě pro délku záznamu, tak jsou data ukládána do jedné fronty s tím, že sudý vzorek odpovídá vibracím a lichý akustické emisi⁵. Pro jednotlivé analýzy jsou tříděny liché a sudé prvky metodou decimace.

Jak již bylo vysvětleno výše 5.2.2 není možné z důvodu velikosti RAM paměti data držet v kruhovém bufferu pro další použití a zároveň vytvořit pole obsahující celý záznam signálu o délce 10 s. Proto jsou vstupem do analýz pole obsahující pouze zlomek z takto navzorkovaného signálu. Jednotlivé výsledky z každé analýzy po celé délce signálu jsou navzájem průměrovány. Výstupem každé analýzy pro trend a vyhodnocení pro záznam dat na jednom záznamu o délce 10 s je průměrná hodnota výstupů z dané analýzy.

⁴ Při 10 s záznamu jsou délky polí v RT frontě 10 000 při počtu 2000 těchto polí

⁵ Toto pořadí je závislé na správném zapojení fyzických vstupů na DAQ kartu

5.2.5 Analýzy

Realizovaný vibrodiagnostický systém ve svém základu obsahuje značné množství analýz jak v časové oblasti tak v oblasti frekvenční. Jak již bylo zmíněno, tak je koncepce software postavena na víceúrovňovém stavovém automatu, díky této koncepci je možno velmi snadno doplňovat další analýzy. Doplnění analýzy spočívá pouze v přidání dalšího kroku stavového automatu s algoritmem nové analýzy.

Všechny analýzy v realizovaném vibrodiagnostickém systému jsou programovány dle předpisu v teoretickém úvodě.

Analýzy jsou v programu rozděleny na:

- Analýzy vibrací v časové oblasti
- Analýzy vibrací ve frekvenční oblasti
- Analýzy akustické emise

Dle teorie 4.1 se počáteční poruchy ložiska projevují v signálu zrychlení na vyšších frekvencích (2-20 kHz) a s nárůstem poškození dochází k projevu poruch v signálu rychlosti (ISO pásmo). Pokud by se tato teorie potvrdila, tak by bylo vhodné komponovat algoritmus se změnou vstupního signálu do analýz. V principu by potom po určitou mez vibrací či akustické emise byly analýzy vykonávány na signálu zrychlení, ale po překročení určité míry by došlo k změně vstupního signálu do analýz na signál rychlosti vibrací. Nutností by samozřejmě bylo rozdělení záznamů s trendy do dvou souborů pro každou etapu analýz (rychlost a zrychlení).

Protože nebylo z důvodu přestavby zkušebny ložisek možné testovací životnostní zkoušku realizovat, tak je software udělán tak, že jsou paralelně vypočítávány jednotlivé analýzy, jak ze signálu rychlosti vibrací, tak ze signálu zrychlení vibrací. Tímto dostane provozovatel životnostní zkoušky možnost porovnat trendy vývoje s možnostmi vyvodit nové poznatky či stávající předpoklad potvrdit.

Časová rozvaha

Tento přístup zdvojeného výpočtu analýz znamená nárůst časové náročnosti na výpočet analýz, proto byly změřeny doby pro výpočet jednotlivých úkonů, aby si uživatel mohl v inicializačním souboru dle 5.2.1 navolit analýzy tak, aby byla frekvence opakování analýz vyhovující. Software funguje cyklicky tak, že pokud analýzy skončí, tak dojde buď k archivaci záznamu dle 5.2.6 s následným spuštěním nového přenosu dat dle 5.2.4 a nebo při nesplnění podmínky pro archivaci dat k pouhému spuštění nového přenosu dat přes DMA. Jednotlivé časy nutné pro vykonání úseků programu jsou k dispozici v tabulkách 5.4 a 5.5. Úsekem je myšlen celý cyklus analýzy včetně průměrování po celém záznamu.

Tab. 5.4: Souhrn doby potřebné pro vykonání úkonu vzorkování a archivace dat

Část programu	Doba vykonání [s]
Přenos DMA->Real-Time	10,5
Archivace dat	190,5

Trendované veličiny

Výstupem z analýz jsou trendované hodnoty. Trendy totiž z hlediska dlouhodobého monitoringu ložiska mají největší vypovídající hodnotu. Poslední záznamy z trendů slouží také jako vstupní data pro algoritmus inteligentního záznamu dat metodou rozptylu 5.2.6. Trendy jsou vynášeny v jednotlivých analýzách jak pro signál vibrací, tak pro signál zrychlení. Každý trend je uložen do svého vlastního souboru v binárním formátu a obsahuje výsledek analýzy dle 5.2.5 a časovou stopu, pro lepší orientaci v datech. Výčet trendovaných veličin z jednotlivých analýz je shrnut v tabulce 5.5.

Tab. 5.5: Souhrn analýz s výpočetním časem, trendy a metodou záznamu

<i>Analýza</i>	<i>t výpočtu[s]</i>	Trend	Metoda záznamu
Vibrace-v,a			
RMS+Crest faktor	18,8	RMS, Crest faktor	Rozptyl
Špičatost&šikmost	20,0	Špič. + Šikm.	Rozptyl
K(t) parametr	17,9	K(t) param.	Rozptyl
Beta parametr	31,1	Param. a,b	Rozptyl
Chyb. frekvence	26,4	<i>BPFO, BPFI, BSF, FTF</i>	Rozptyl
Obálková analýza	33,5	<i>BPFO, BPFI, BSF, FTF</i>	Rozptyl
Cepstrum	49,8	<i>BPFO, BPFI, BSF, FTF</i>	Rozptyl
CPB	36,5	Změna k ref	Reference
Akustická emise			
RMS+Crest faktor	7,6	RMS, Crest faktor	Rozptyl
Špičatost&šikmost	9,1	Špič. + Šikm.	Rozptyl
K(t) parametr	6,3	K(t) param.	Rozptyl
Beta parametr	24,8	Param. a,b	Rozptyl
Porovnání vzoru	19,1	<i>P_{SE}, P_{ZC}</i>	-

5.2.6 Záznam dat

Záznam surových dat je koncipován tak, aby minimálně jednou za den ve stejný čas došlo k archivaci dat na paměťové médium. Nezávisle na záznamu surových dat dochází k trendování výstupu jednotlivých analýz. Trendy nejsou paměťově náročné natolik, aby je nebylo možné ukládat na paměťové médium při každém výpočtu analýz. Trendy jednotlivých veličin slouží k obecné představě o vývoji stavu ložiska v průběhu zkoušky a jako vstupní hodnota do algoritmu inteligentního záznamu dat. Mimo tohoto záznamu jsou ukládána data při splnění jedné z podmínek vyvolání mimořádného záznamu. O vyvolání mimořádného záznamu rozhoduje algoritmus inteligentního záznamu dat dle 5.2.6.

Navržený algoritmus záznamu dat zohledňuje fakt, že pokud se na ložisku objeví porucha, tak dojde ke změně stavu vibrací/akustické emise proti hodnotám minulým. V důsledku nás nezajímá konstantní průběh poruchy, ale význačné situace. Algoritmus vyhodnocení rozptylu je možno aplikovat na základě trendovaných hodnot veličin, které jsou výsledkem rozličných metod zpracování navzorkovaného signálu dle 2.3.

V případě archivace záznamu dat jsou vždy ukládána data jak akustické emise tak vibrací do jednoho souboru v binárním formátu bez jakékoliv filtrace.

Název archivovaného záznamu

Při ukládání záznamu dat pro následné zpracování pojmenováváme záznam dle času a datumu spuštění sběru dat ve formátu: DD.MM.YYYY.HH.MM. Takto přiřazená časová známka slouží k seřazení záznamů v logickou časovou posloupnost. Časová stopa je také ukládána ke každému záznamu do trendu výstupů jednotlivých veličin. Pokud se v trendu objeví událost, kterou bude žádoucí dále detailněji prozkoumat, je možno si k této události najít dle časové známky záznam se surovými daty pro další zpracování. Časová známka je vyčítána přímo z interních hodin cRIO.

Protože životnostní zkouška probíhá na dlouhém časovém intervalu je nutné v řešení obsáhnout i situace, kdy dojde k výpadku proudu a tedy i k restartování řídicí jednotky. Při restartování řídicí jednotky dochází v základním nastavení k načtení defaultní hodnoty času. K zajištění načtení správného času se nabízí hned několik možností.

Výčet možností:

- Připojení cRIO na místní SNTP server
- Záložní zdroj napájení (UPS)
- GPS modul do cRIO
- GPS modul třetích stran
- Využití radiem řízeného budíku

Ideální variantou je doplnění GPS modulu do cRIO, protože tato varianta eliminuje problémy se zasítováním zařízení do interní sítě, v místě kde má vibrodiagnostický systém pracovat. Tam kde není se zasítováním zařízení problém, tak je z hlediska nákladů na vibrodiagnostický systém výhodnější volit tuto variantu. Ovšem při výpadku internetu dochází k poškození výsledku sběru dat záznamy, které dle označení není možné zařadit do časové osy. V tomto ohledu je GPS modul spolehlivější.

Popis algoritmu inteligentního záznamu dat

Požadavek na inteligentní záznam dat je z důvodu omezené paměti pro záznam surových dat. Ideální variantou by bylo kontinuální ukládání dat po celou dobu životnostní zkoušky. Toto si bohužel při požadované vzorkovací frekvenci, vypočetním výkonu cRIO 9076 a očekávané délce životnostní zkoušky nemůžeme dovolit. Proto inteligentní záznam dat zajišťuje ukládání pouze na základě význačné události. V realizovaném vibrodiagnostickém systému se užívá dvou základních přístupů:

- Algoritmus rozptylu
- Algoritmus porovnání aktuálního stavu s referenční hodnotou

Využití typu přístupu inteligentního záznamu dat u jednotlivých analýz je shrnuto v tabulce 5.5.

Rozptylová metoda

Algoritmus je založen na principu měření rozptylu posledních n vypočtených hodnot z vybraných analýz. Pokud nedojde ke vzniku poruchy na ložisku, tak se předpokládá nízký rozptyl vypočtených parametrů z daných analýz. V případě, kdy dojde k události, která může značit počínající poruchu ložiska, ať už chvilkově vyvolaná uměle (rušivé parazitní vlivy), nebo opravdovým poškozením ložiska, začnou se data ukládat častěji přímo úměrně s rostoucím rozptylem. Tedy záznam dat na paměťové medium nebude pouze jednou za den v definovaný čas, ale dojde k ukládání záznamů po dobu, kdy bude rozptyl u jedné z analýz překračovat definovanou hodnotu. Tato hodnota bude zvolena na základě testovacího běhu životnostní zkoušky pro danou sestavu čítající daný typ ložiska zatíženého definovaným tlakem.

Pokud se však již bude ložisko nacházet v trvalém stavu poruchy (např. dojde k částečnému vyválnování pittingu), která je ještě v toleranci míry vibrací pro bezpečný provoz, není záznam dat v krátkých časových intervalech v rámci omezené paměti nutný, protože nedochází k událostem, které potřebujeme dále analyzovat. V tomto případě je rozptyl pod mezní hodnotou a záznam je ukládán pouze dle pevného časového intervalu zadaného v počátku životnostní zkoušky. Tento algoritmus využívá faktu, že po ustálení ač ve vyšší hladině vibrací dochází k udržení nízkého rozptylu.

Metoda porovnání s referenční hodnotou

Další možnou variantou je uložení referenční hodnoty analýzy po začátku zkoušky dle 5.2.1. Poté dochází k pravidelnému porovnávání výstupu analýzy s referenční hodnotou na základě pravidla nárůstu měřené hodnoty o 3 dB. Pokud dojde k nárůstu o 3 dB, tak dojde k vyvolání cyklického záznamu dat. Nevýhodou tohoto přístupu proti předchozímu je v tom, že jakmile dojde k ustálení výstupu analýzy nad touto mezí, tak již bude docházet k archivaci záznamu dat vždy, což může vést k zahlcení paměťového úložiště.

5.3 Popis software

Software se skládá ze dvou částí:

- FPGA
- Real-Time

5.3.1 FPGA

Část FPGA vychází z návrhového vzoru společnosti National Instruments pro obsluhu měřicí karty NI 9223. Tento návrhový vzor byl upraven pro synchronizaci s Real-Time částí pomocí přerušení, které vyvolá žádost o navzorkování nového balíku surových dat.

Pokud není vykonáván přesun dat přes DMA frontu do Real-Time části, tak je FPGA vytěžováno integrací a výpočtem efektivní hodnoty míry vibrací.

Návrhový vzor v FPGA je dále doplněn o obsluhu vstupně výstupní digitální karty NI 9401.

5.3.2 Real-Time

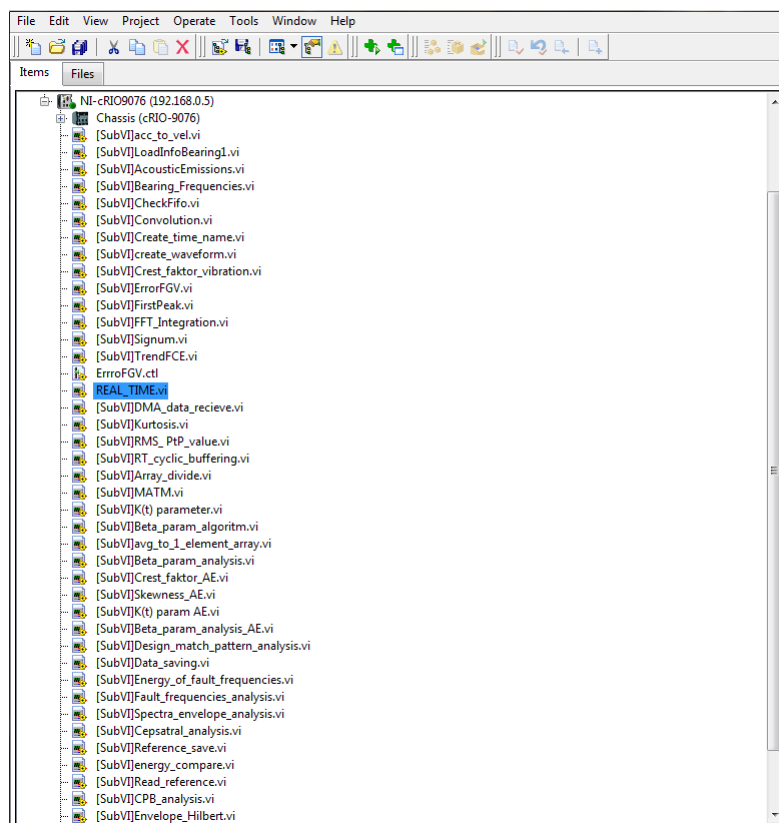
Real-Time část je koncipována jako víceúrovňový stavový automat, ve kterém jsou naprogramovány tyto části vibrodiagnostického systému dle popisu výše 5.2:

- inicializace
- časová synchronizace
- DMA přenos dat
- analýzy
- algoritmus inteligentního záznamu dat
- archivace naměřených dat

Obě dvě části (FPGA i Real-Time) jsou programovány dle pravidel programování ve vývojovém prostředí LabVIEW. Velký důraz je kladen na dodržení pravidel error-handlingu a přehlednosti kódu.

Přehlednost kódu je zajištěna pomocí užívání SubVI, které obsahují opakující se části kódu či ucelené celky kódu.

Seznam vytvořených SubVI v projektu je k vidění na obrázku 5.4. Hlavní VI, kde se jednotlivá SubVI volají je vyznačen pod názvem REAL_TIME.vi.



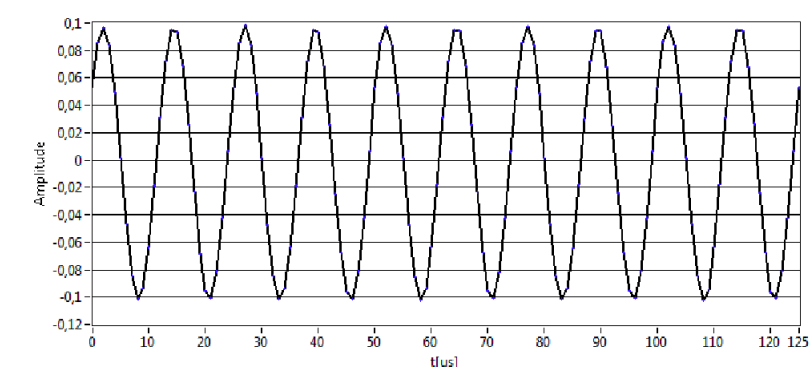
Obr. 5.4: Seznam subVI vytvořených v projektu vibrodiagnostického seznamu

5.4 Ověření funkčnosti realizovaného vibrodiagnostického signálu

5.4.1 Vzorkovací frekvence

Celá práce se zabývá primárně problematikou vzorkování dat na hranici možností řídicí jednotky cRIO 9076. Test vzorkovací frekvence 1 MHz proběhl ve třech úrovních.

1. Počet vzorků v uloženém souboru je roven teoretickému výpočtu
2. Na vstup FPGA byla přivedena místo fyzických vstupů lineární křivka s derivací rovnou jedné. Po vyčtení hodnot byla zkontrolována lineární závislost výpočtem derivací po celém průběhu.
3. Na fyzický vstup byla z generátoru přiveden harmonický signál Sinus o frekvenci 80 kHz s porovnáním signálů z pořízeného záznamu. Takto navzorkovaný záznam je na obrázku 5.5



Obr. 5.5: Signál 80 kHz navzorkovaný frekvencí 1MHz realizovaným vibrodiagnostickým systémem

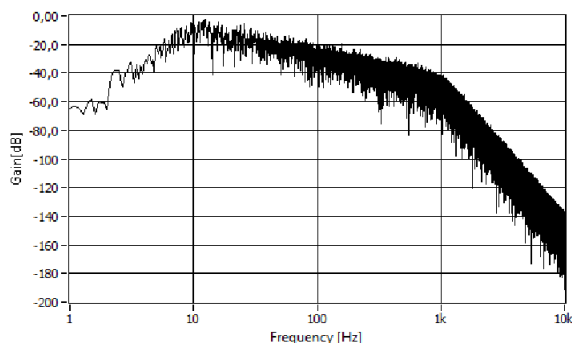
5.4.2 Frekvenční charakteristiky

Předzpracováním signálu dle 5.2.2 může docházet k nežádoucímu zkreslení signálu. Pro ověření, že filtrace s následnou integrací⁶ oběma metodama dle 5.2.2 funguje správně vycházíme z teoretického předpokladu, že pásmová propust má v ISO pásmu zesílení 0 dB/dek a po integraci zesílení -20 dB/dek.

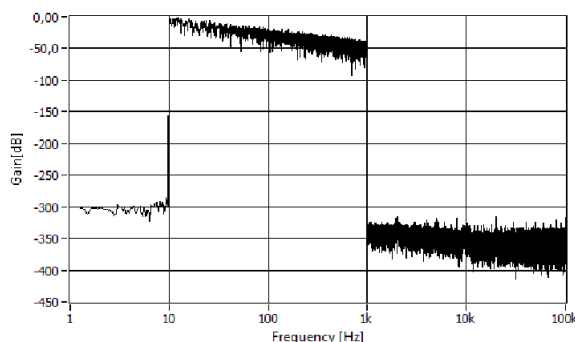
Pro ověření funkčnosti je nejvýhodnější využít bílý šum, který se vyznačuje přítomností všech frekvenčních složek ve stejném množství na intervalu $(-\infty, +\infty)$.

⁶Integrace je také formou filtrace

Což umožňuje proměřit přenosovou charakteristiku filtru v celém frekvenčním rozsahu. Dle přenosových charakteristik 5.6 a 5.7 můžeme na základě zesílení v ISO pásmu rovnému -20 dB/dek konstatovat, že filtrace funguje správně.



Obr. 5.6: Frekvenční přenos filtru při převodu zrychlení na rychlost lichoběžníkovou metodou



Obr. 5.7: Frekvenční přenos filtru při převodu zrychlení na rychlost metodou FFT

5.4.3 Kontinuální kontrola míry vibrací

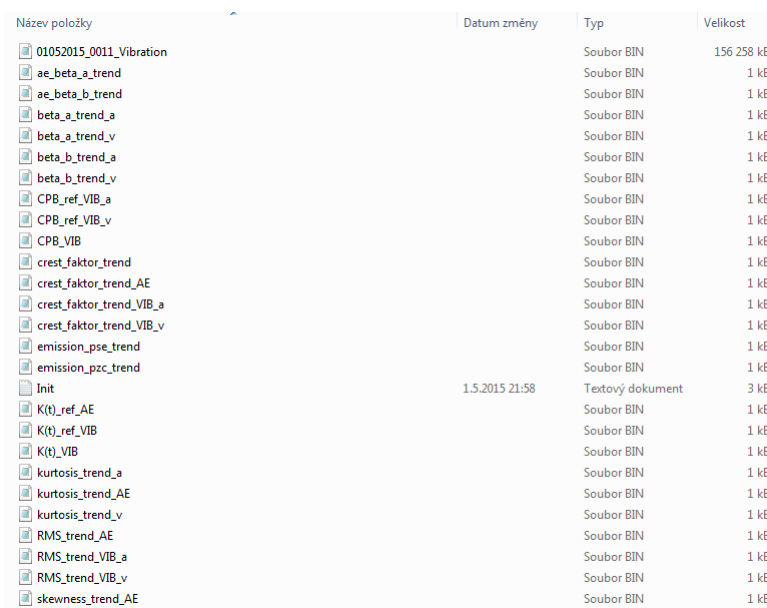
Monitoring efektivní hodnoty vibrací v FPGA po integraci lichoběžníkovou metodou byl ověřen tak, že na fyzickém vstupu měřicí karty byl přiveden signál sinus. Efektivní hodnota signálu po integraci signálu pro kontrolu byla dopočítána ručně. Po překročení meze efektivní hodnoty dle 5.2.3 7.5 mm/s dojde k nárůstům napětí 5 V dle TTL logiky na výstupu zvoleného pinu vůči zemi na vstupně výstupní kartě.

Tímto krokem je ověřena funkčnost výpočtu efektivní hodnoty v FPGA i funkčnost rutiny pro ovládání vstupně výstupní karty.

5.4.4 Záznam dat a trendování

Záznam dat a trendování bylo ověřeno povolením všech analýz v inicializačním souboru a přivedením definovaného signálu na fyzické vstupy měřicí karty.

Záznam byl spuštěn několik hodin bez vyvolání mimořádné události. Po několika hodinách došlo k vyvolání mimořádné události nastavením nízké hodnoty pro rozptyl u RMS vibrací. Po tomto vyvolání mimořádné události došlo k uložení mimořádného záznamu dle předpokladu. Obsah paměťového úložiště po jednom běhu analýzy je možno vidět na obrázku 5.8



Název položky	Datum změny	Typ	Velikost
01052015_0011_Vibration		Soubor BIN	156 258 kB
ae_beta_a_trend		Soubor BIN	1 kB
ae_beta_b_trend		Soubor BIN	1 kB
beta_a_trend_a		Soubor BIN	1 kB
beta_a_trend_v		Soubor BIN	1 kB
beta_b_trend_a		Soubor BIN	1 kB
beta_b_trend_v		Soubor BIN	1 kB
CPB_ref_VIB_a		Soubor BIN	1 kB
CPB_ref_VIB_v		Soubor BIN	1 kB
CPB_VIB		Soubor BIN	1 kB
crest_faktor_trend		Soubor BIN	1 kB
crest_faktor_trend_AE		Soubor BIN	1 kB
crest_faktor_trend_VIB_a		Soubor BIN	1 kB
crest_faktor_trend_VIB_v		Soubor BIN	1 kB
emission_pse_trend		Soubor BIN	1 kB
emission_pzc_trend		Soubor BIN	1 kB
Init	1.5.2015 21:58	Textový dokument	3 kB
K(t)_ref_AE		Soubor BIN	1 kB
K(t)_ref_VIB		Soubor BIN	1 kB
K(t)_VIB		Soubor BIN	1 kB
kurtosis_trend_a		Soubor BIN	1 kB
kurtosis_trend_AE		Soubor BIN	1 kB
kurtosis_trend_v		Soubor BIN	1 kB
RMS_trend_AE		Soubor BIN	1 kB
RMS_trend_VIB_a		Soubor BIN	1 kB
RMS_trend_VIB_v		Soubor BIN	1 kB
skewness_trend_AE		Soubor BIN	1 kB

Obr. 5.8: Obsah paměťového media po prvním běhu analýz

5.4.5 Analýzy

Funkčnost jednotlivých analýz byla ověřena pomocí testovacích signálů přivedených na fyzické vstupy měřicí karty.

Spektrální analýzy byly ověřeny tak, že na vstup byl přiveden signál o frekvenci odpovídající jedné z chybových frekvencí a na základě nárůstu energie na dané frekvenci můžeme hodnotit, že analýza je funkční. Vzhledem k tomu, že samotné algoritmy výpočtu FFT, Cepstra, Obálky, či oktávové analýzy vycházejí z Sound and Vibration toolkitu, tak není důvod, aby dané analýzy nebyly funkční.

Časové analýzy byly ověřeny obdobou analýz v samotných VI při definovaném vstupním signálu tak, že se na výstupu objevila očekávaná hodnota.

Celková náročnost operací vykonávaných v realizovaném vibrodiagnostickém systému je znázorněna v tabulce 5.6. Tyto hodnoty byly změřeny nástrojem společnosti National Instruments s názvem NI Distributed Manager. Z hodnot je zřejmé, že se z hlediska RAM paměti a výkonu procesoru pohybujeme na hranici možností. Tento výsledek odpovídá předpokladu z teoretické rozvahy.

Tab. 5.6: Zatížení řídicí části realizovaného vibrodiagnostického systému dle NI Distributed Manageru

	Volná paměť RAM (256)[MB]	Zatížení procesoru [%]
Převod dat DMA-RT	19	50
Analýzy	22	99
Zápis do souboru	22	35

6 ZÁVĚR

Závěrem této práce bych chtěl shrnout počáteční cíle, dosažené výsledky, vysvětlit problémy, které během práce nastaly a poskytnou názor, jak by se s vibrodiagnostickým systémem mohlo pokračovat, aby se dosáhlo nástroje, který by byl uplatnitelný v praxi.

Počátečním cílem práce bylo navrhnout vibrodiagnostický systém na platformě cRIO s maximem analýz, které by Real-Time monitorovaly signál ze snímače akustické emise a snímače vibrací. Hlavní motivací návrhu tohoto systému bylo nasazení vibrodiagnostického systému na zkušebně ložisek. Předpokladem bylo, že během závěrečného ročníku studia stihnu dvě až tři kompletní životnostní zkoušky a budu mít dostatečné množství trendů a surových dat, abych mohl na archivovaná data aplikovat předprogramované analýzy, najít spojitost a vztahy mezi výstupy analýz akustické emise a vibrací. První testovací životnostní zkouška ložiska byla zamýšlena jako testovací pro odladění vibrodiagnostického systému, druhá životnostní zkouška byla zamýšlena pro detekci mezních hodnot jednotlivých analýz a třetí životnostní zkouška již měla být ostrá, kde by realizovaný vibrodiagnostický systém sloužil jako plnohodnotný nástroj k detekci a lokalizaci poruch valivých ložisek.

K dispozici byla poskytnuta jako řídicí jednotka cRIO 9076, které má uvedeny požadované parametry jako mezní. Z tohoto důvodu bylo během vývoje software zapotřebí velké množství konzultací s technickou podporou společnosti National Instruments, kdy jsem byl nepřímo varován, že můj záměr nemusí být realizovatelný na tomto konkrétním typu a byl mi doporučen nákup modelu o řadu vyššího. Závěrem se nakonec podařilo dosáhnout modifikací návrhového vzoru pro práci s 1Ms/s měřicí kartou požadovaných výsledků. Výsledný software je projekt čítající velké množství SubVI, obsluhu modulu FPGA a několika úrovněového stavového automatu v Real-Time části, který je připraven pro vytvoření takzvané stand alone aplikace pro cRIO 9076. Bohužel však pouze jedno jádro na procesoru a velmi malá RAM paměť značně omezily možnosti paralelizace a proto nejsou časové výsledky jednotlivých operací zcela optimální.

Součástí software je značné množství analýz v časové oblasti jmenovitě: činitel výkmitu, efektivní hodnota, špičatost, šikmost, beta parametr. Z frekvenční oblasti jmenovitě: metoda detekce chybových frekvencí, obálková analýza, kepstrální analýza, oktávová analýza či metoda rozpoznávání vzorů. Tyto analýzy jsou sice v omezené míře testovány, rozhodně však nejsou optimalizovány a vyladěny k dokonalosti z důvodu absence záznamů dat s definovanými poruchami ložisek. Program je však připraven k testování a doplnění dalších analýz díky koncepci rozdělení hlavní smyčky na víceúrovňový stavový automat.

Zklamáním u diplomové práce byla vytíženost zkušebny ložisek probíhajícími

zkouškami a probíhající přestavbou, což vedlo k odepření možnosti systém otestovat a zhodnotit analýzy. Přes enormní snahu se nepodařilo od fakulty strojní získat záznamy signálů akustické emise a vibrací z proběhlých životnostních zkoušek ložisek. Tímto nebylo možné splnit poslední bod zadání, který již ve své formulaci s touto alternativou počítal.

Závěrem závěru bych shrnul, že byla vypracována rešerše používaných metod pro detekci poruchy ložiska včetně vytvoření tříděné databáze dle témat z magazínu Orbit Bentley Nevada, byl vytvořen software, který splňuje podmínku vzorkování signálu ze dvou kanálů na frekvenci 1MHz. Systém obsahuje značné množství algoritmů analýz a algoritmus pro inteligentní archivaci záznamů dat na paměťové úložiště včetně ukládání trendů jednotlivých výstupů analýz.

LITERATURA

- [1] MITCALC. *MITCalc: Výběr Valivého ložiska* [online]. Děčín, 2014 [cit. 2014-11-06]. Dostupné z: <http://www.mitcalc.cz/doc/help/cz/c_bearing_choice.htm>.
- [2] HENG, R.B.W., M.J.M. NOR. *Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition..* Applied Acoustics. 1998, vol. 53, 1-3, s. 211-226. DOI: 10.1016/s0003-682x(97)00018-2.
- [3] SCHENCK, PRVNÍ BRNĚNSKÁ STROJÍRNA. Preventivní údržba strojů. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. s.346. ISBN SIP 05355.
- [4] LI, C. James, S.Y. LI a Ahmed ONSY. Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring. Wear. 1995, vol. 185, 1-2, s. 67-74. DOI: 10.3403/30148701.
- [5] PAZDERA, L., SMUTNÝ, J., MAZAL, P. *Využití metody akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí.* Vysoké učení technické v Brně, 2004. 111 stran. ISBN 80-214-2802-3
- [6] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: Vibrační diagnostika* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2014-11-07]. ISBN bude zajištěno hromadně. Dostupné z: <http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/BilosovaVIBDI_skripta.pdf>.
- [7] ELFORJANI, M. a MBA, D. Detecting the onset, propagation and location of non-artificial defects in a slow rotating thrust bearing with acoustic emission. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, May 2008, Vol. 50, No. 5, p. 264-268, ISSN 1354-2575.
- [8] YOSHIOKA, T; Diagnosis of Machinery using Acoustic Emission Techniques. Acoustic Emission-Beyond the Millennium, 2000, pp. 215-230, ISBN: 0444539158.
- [9] CHOUDHURY, A; TANDON, N. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings, Tribology International, Vol. 33, No. 1, Jan 2000, pp. 39-45, ISSN 0301-679X, [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00012-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00012-8).
- [10] ORBIT BENTLEY NEVADA. Methodology for monitoring rolling element bearing machines: Back to basics. první. Nevada: Orbit, 1976, 5 s.

- [11] ROGERS, L. M. Structural and engineering monitoring by acoustic emission methods—fundamentals and applications. Lloyd's Register Technical Investigation Department, 2001.
- [12] DOČEKAL, Adam. *Separace signálů v diagnostice rotačních strojů*. Praha, 2010. Dostupné z: <http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/DI_2010_Docekal_Adam_locked.pdf>. Disertační práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta elektrotechnická Katedra měření. Vedoucí práce Doc.Ing. Marcel Kreidl, CSc.
- [13] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*. Automa: Snímače a měřicí technika. 2010, roč. 2010, č. 1, s. 5. DOI: ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [14] GREG LEE *What is shock pulse method?* LuDeca Inc [online]. 2005 [cit. 2014-11-23]. Dostupný z: <http://www.reliabilityweb.com/articles/shock_pulse.pdf>
- [15] BRÜEL & KJAER. *Detecting faulty rolling-element bearings*. [online]. 2014 [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/BO0210.pdf>
- [16] KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. 1.vydání. Akademické nakladatelství CERM Brno, 2008. 580 stran. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [17] MING,XU *SPIKE ENERGY MEASUREMENT AND CASE HISTORIES*. 1.vydání. ENTEK IRD International Corp., 2009. 16 stran. Dostupný z: <http://www.vibrotechnology.org/pdf/Spike_Energy.PDF>
- [18] MICHIGAN SAS USERS GROUP Estimating and Comparing Kurtosis and Skewness from an Arbitrary Population [cit. 2015-4-25]. Anglicky
 SUCHANEK, D. *Přehled současného stavu a nových trendů při hodnocení poškození valivých ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 39 s. Vedoucí bakal
- [19] PREDITEST *Akustická emise podrobně* [online]. [cit. 2014-11-10]. Dostupné z: <http://www.preditest.cz/download/informace/akusticka_emise_podrobne.pdf>.
- [20] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. BEN, Praha 2006. 408 stran. ISBN 80-7300-158-6

- [21] ČSN ISO 10816-1. *Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha : Český normalizační institut, 1998. 24 s.
- [22] SKF. *Webová prezentace společnosti SKF* [online]. 2014 [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/index.html>
- [23] ZKL. *Webová prezentace společnosti ZKL* [online]. 2014 [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/>
- [24] PRUFTECHNIK-WIBREM. *Webová prezentace společnosti PRUFTECHNIK-WIBREM* [online]. 2014 [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: <http://www.pruftechnik-wibrem.com/cz/index.htm>
- [25] NATIONAL INSTRUMENTS *Webová prezentace společnosti National Instruments* [online]. 2015 [cit. 2015-4-25]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/14155>
- [26] ADASH *webová prezentace společnosti Adash* [online]. [2014] [cit. 2014-11-23]. Čestina. Dostupný z: <www.adash.cz>.
- [27] BRÜEL & KJAER VIBRO *Webová prezentace společnosti Brüel & Kjaer Vibro* [online]. [2014] [cit. 2014-11-23]. angličtina. Dostupný z: <<http://www.bkvibro.com/measurement-techniques/cpb-analysis.html>>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

f_{vz}	vzorkovací kmitočet
ISO	Mezinárodní organizace zabývající se tvorbou norem – International Organization for Standardization
ČSN	Chráněné označení českých technických norem
RMS	Označení pro efektivní hodnotu – Root Mean Square
HFE	Metoda detekce stavu ložiska ve časové oblasti – High Frequency Emission
g_{RMS}	Jednotka efektivní hodnoty zrychlení vztažené ku tíhovému zrychlení g
A/D	Analogově digitální převodník
DFT	Diskrétní Fourierova Transformace
FFT	Rychlá Fourierova Transformace – Fast Fourier Transformation
f_{BPFO}	Chybová frekvence vnější dráhy–Ball Pass Frequency Outer Race
f_{BPMI}	Chybová frekvence vnitřní dráhy–Ball Pass Frequency Inner Race
f_{BSF}	Chybová frekvence valivého elementu–Ball Spinn Frequency
f_{FTF}	Chybová frekvence klece ložiska–Fundamental Train Frequency
SPM	Metoda stavu ložiska ve frekvenční oblasti – Shock Pulse Method
CPB	Metoda Oktávové analýzy – Constant Percentage Bandwidth
SEE	Metoda stavu ložiska ve frekvenční oblasti – Spectral Emmitted Energy
BCU	Metoda stavu ložiska ve frekvenční oblasti – Bearing Condition Unit
ASL	Průměrná úroveň signálu – Average Signal Level
USB	Seriový port – Universal Serial Bus
FPGA	Programovatelné hradlové pole – Field Programmable Gate Array
RAM	Typ paměti – Random Acces Memmory
NI	National Instruments
OS	Operační systém

cRIO	Programovatelná řídicí jednotka s hradlovým polem
DMA	Přímý kanál pro přenos dat mezi FPGA a Real-Time – Direct Memory Acces
RT	Část software běžící na systému reálného času – Real-Time
SNTP	Protokol časových serverů – Simple Network Time Protocol
UPS	Zdroj nepřerušovaného napětí–Uninterruptible Power Source
GPS	Globální polohový systém–Global Positioning system
VI	Virtuální Instrumentace
MATM	Rozptyl–Moment About The Mean

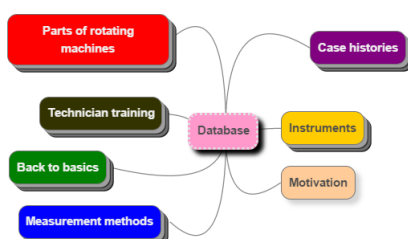
SEZNAM PŘÍLOH

A	Tříděná databáze článků magazínu Orbit Bentley Nevada	73
B	Souhrn kontrolerů cRIO National Instruments	75
C	Ukázka obsahu inicializačního souboru	78
D	Obsah přiloženého CD	80

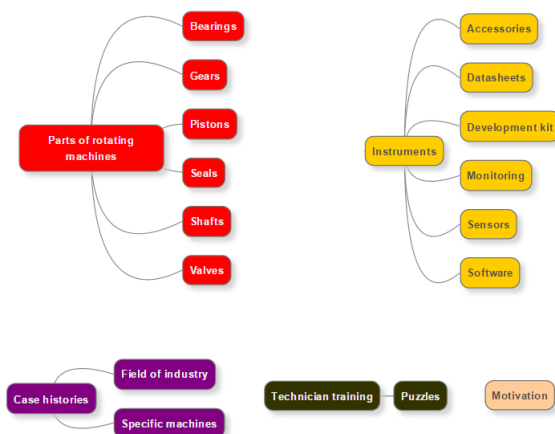
A TŘÍDĚNÁ DATABÁZE ČLÁNKŮ MAGAZÍNU ORBIT BENTLEY NEVADA

Magazín Orbit Bentley Nevada je měsíčník, který se věnuje tématům měření vibrací a vibrodiagnostiky. Z důvodu ambice dalších aktivit v oblasti vibrodiagnostiky byla vytvořena tříděná databáze jednotlivých článků dle probíraných témat ze všech vydaných magazínů od roku 1982 až do současnosti. Celá databáze článků je součástí přiloženého CD.

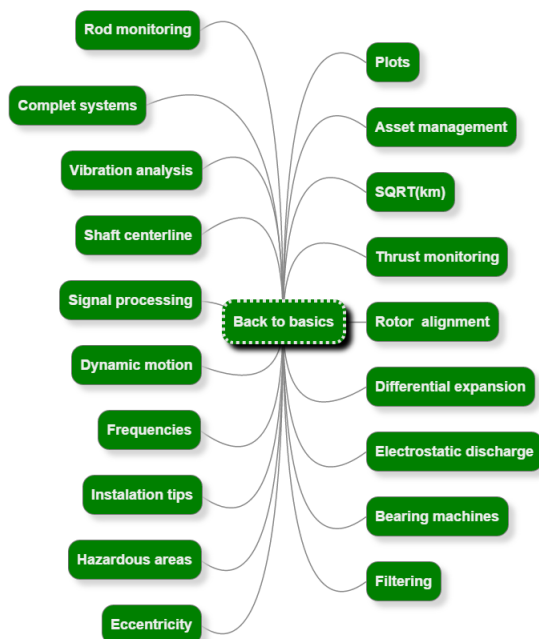
Hierarchie tříděných sekcí



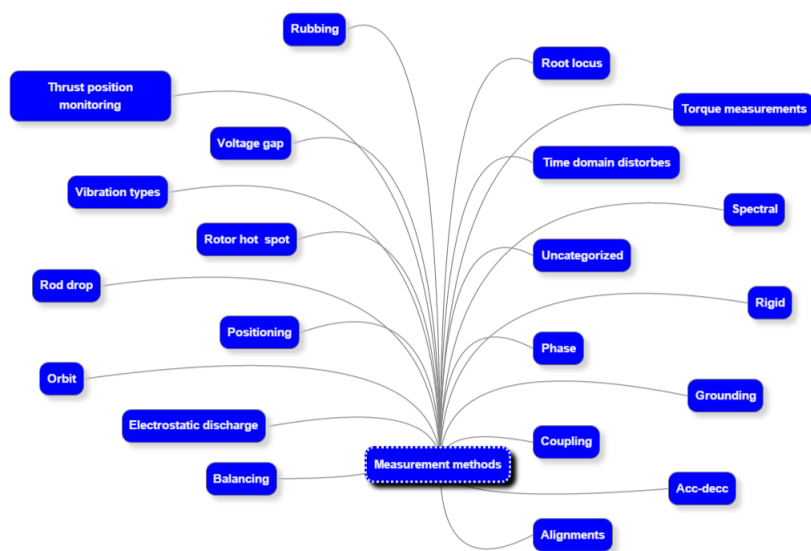
Obr. A.1: Základní rozdělení hierarchie tříděné databáze



Obr. A.2: Detailní rozdělení jednotlivých částí tříděné databáze 1



Obr. A.3: Detailní rozdělení jednotlivých částí tříděné databáze 2



Obr. A.4: Detailní rozdělení jednotlivých částí tříděné databáze 3

B SOUHRN KONTROLERŮ CRIO NATIONAL INSTRUMENTS

Tab. B.1: Souhrn dostupných kontrolerů cRIO část 1.

Typ NI cRIO-	9033	9031	9030	9068	9067	9066
Frekvence procesoru	1,33 GHz	1,33 GHz	1,33 GHz	667 MHz	667 MHz	667 MHz
Počet jader	Dual-Core	Dual-Core	Dual-Core	Dual-Core	Dual-Core	Dual-Core
Typ OS	Linux Real-Time	Linux Real-Time	Linux Real-Time	Linux Real-Time	Linux Real-Time	Linux Real-Time
Nonvolatilní paměť	8 GB	4 GB	4 GB	1 GB	1 GB	512 MB
Systémová paměť	2 GB	1 GB	1 GB	512 MB	512 MB	256 MB
FPGA	Kintex- 7	Kintex- 7	Kintex- 7	Artix- 7	Artix- 7	Artix- 7
Počet slotů	4	4	4	8	8	8
Ethernet port	2	2	2	2	2	1
Serial port (RS 232)	1	1	1	2	1	1
Serial port (RS 485)	1	1	1	1	-	-
USB port	2	2	2	1	1	1
MXI-express	-	-	-	-	-	-
Pracovní teplota	-40°C - 70°C	-40°C - 70°C	-20°C - 55°C	-40°C - 70°C	-20°C - 55°C	-20°C - 55°C
Cena	146 590 Kč	106 590 Kč	79 990 Kč	100 700 Kč	79 990 Kč	52 990 Kč

Tab. B.2: Souhrn dostupných kontrolerů cRIO část 2.

Typ NI cRIO-	9082	9081	9076	9075	9025	9024
Frekvence procesoru	1,33 GHz	1,06 GHz	400 MHz	400 MHz	800 MHz	800 MHz
Počet jader	Dual-Core i7	Dual-Core	-	-	-	-
Typ OS	Win 7 Real-Time	Win 7 Real-Time	Real-Time	Real-Time	Real-Time	Real-Time
Nonvolatilní paměť	32 GB	16 GB	512 MB	256 MB	4 GB	4 GB
Systémová paměť	2 GB	2 GB	256 MB	128 MB	512 MB	512 MB
FPGA	Spartan- 6	Spartan- 6	Spartan- 6	Spartan- 6	-	-
Počet slotů	8	8	4	4	-	-
Ethernet port	2	2	1	1	2	2
Serial port (RS 232)	1	1	1	1	1	1
Serial port (RS 485)	1	1	-	-	-	-
USB port	4	4	1	-	1	-
MXI-express	1	1	-	-	-	-
Pracovní teplota	0°C- 55°C	0°C- 55°C	-20°C - 55°C	-20°C - 55°C	-40°C - 70°C	-20°C - 55°C
Cena	209 900 Kč	183 700 Kč	50 400 Kč	32 800 Kč	121 300 Kč	107 600 Kč

Tab. B.3: Souhrn dostupných kontrolerů cRIO část 3.

Typ NI cRIO-	9023	9022	9074	9073	9014	9012
Frekvence procesoru	533 MHz	533 MHz	400 MHz	266 MHz	400 MHz	400 MHz
Počet jader	-	-	-	-	-	-
Typ OS	Real-Time	Real-Time	Real-time	Real-Time	Real-time	Real-time
Nonvolatilní paměť	2 GB	2 GB	256 MB	128 MB	2 GB	128 MB
Systémová paměť	256 MB	256 GB	128 MB	64 MB	128 MB	64 MB
FPGA	-	-	Spartan-3	Spartan-3	-	-
Počet slotů	-	-	8	8	-	-
Ethernet port	2	2	2	1	1	1
Serial port (RS 232)	1	1	1	1	1	1
Serial port (RS 485)	-	-	-	-	-	-
USB port	-	1	-	-	1	1
MXI-express	-	-	-	-	-	-
Pracovní teplota	-40°C - 70°C	-20°C - 55°C	-20°C - 55°C	-20°C - 55°C	-40°C - 70°C	-40°C - 70°C
Cena	99 600 Kč	86 100 Kč	77 300 Kč	51 500 Kč	78 400 Kč	47 600 Kč

C UKÁZKA OBSAHU INICIALIZAČNÍHO SOU- BORU

Initialization of vibrodiagnostics system:

=====
Author: Pavel Bortlik

Date: 1/4/2015

Contact: pavel.bortlik[at]solarin.cz

In case of any problems feel free to contact me.

=====
Before the bearing endurance test, please fill in the information about the tested bearing:

If the information about the bearing is not known, fill in the values equal to zero.

In this case, some of the analyzes will not be executed!

=====
; *Bearing rotating speed* : 80

; *Roller diameter* : 165

; *Bearing pitch diameter* : 12.63

; *Contact angle between race and ball* : 100

; *Number of rollers* : 26
=====

Analysis options:

To enable analysis fill in 1 for disabling fill in 0.

=====
; *vib_t Crest factor + RMS val* : 0

; *vib_t Skewness & kurtosis* : 0

; *vib_t K(t) parameter* : 0

; *vib_t Beta parameter* : 0

; *vib_f Faultfrequencies* : 0

; *vib_f Spectra envelope* : 0

; *vib_f Cepstral analysis* : 0

; *vib_f CPB* : 0

; *vib_f SPIKE* : 0

; *ae_t Crest factor + RMS val* : 0

; *ae_t Skewness & kurtosis* : 0

; *ae_t K(t) parameter* : 0

; *ae_t Beta parameter* : 0

; *ae_t Pattern match* : 0

=====
Fill in the MATM. The value could not be zero if the analysis is allowed.
MATM = moment about the mean of choosen analysis. This parameter is limit value
for saving special event data.
=====

;MATM_vib Crest factor : 10
;MATM_vib RMS val : 10
;MATM_vib Skewness : 10
;MATM_vib Kurtosis : 10
;MATM_vib K(t) parameter : 10
;MATM_vib Beta parameter : 10
;MATM_vib Fault frequencies : 10
;MATM_vib Spectra envelope : 10
;MATM_vib Cepstral analysis : 10
;MATM_vib CPB : 10
;MATM_ae Crest factor : 10
;MATM_ae RMS val : 10
;MATM_ae Skewness : 10
;MATM_ae Kurtosis : 10
;MATM_ae K(t) parameter : 10
;MATM_ae Beta parameter : 10
;MATM_ae Pattern match : 10

=====
Time of first program running in format HH:MM:SS-MM-DD-YYYY.
=====

;time : 10 : 00 : 00 - 04 - 25 - 2015

D OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Projekt se zdrojovými kódy realizovaného vibrodiagnostického systému (LabVIEW 2013)

Tříděná databáze témat magazínu Orbit Bentley Nevada

Zdrojový kód textu diplomové práce (LaTeX)