

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra kybernetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Plzeň, 2015

Martin VOLAVKA

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra kybernetiky

**Metody detekce stavu valivých ložisek
v rotačních strojích**

Plzeň, 2015

Martin VOLAVKA

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr navazujícího studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne

.....

Martin Volavka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jindřichu Liškovi, Ph.D. odbornou za pomoc, vstřícnost, čas obětovaný konzultacím a radám, které mi hodně pomohly. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Richardu Polákovi jednatelem společnosti PROFESS za zadání praktické části této práce a poskytnutí technického zázemí. Rád bych také poděkoval panu Ing. Petru Šťáhlavskému za čas obětovaný konzultacím, poskytnutí technické dokumentace a za rychlé uvedení do problematiky měření ve vibrodiagnostice.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou diagnostiky stavu valivých ložisek rotačních strojů na základě bezdemontážního přístupu. Mezi cíle této diplomové práce patří seznámení se s ložisky po konstrukční stránce, dále podrobný popis vznikajících vad a jejich časo-frekvenčních vlastností. Hlavním cílem této práce je použít diagnostické metody aktuální kondice valivých ložisek využívané v průmyslu s bližším zaměřením na dvě metody tj. ACMT firmy ADASH a PeakVue firmy EMERSON. Na základě praktického měření pomocí testovacího standu valivých ložisek určíme výpovědní schopnosti použitých diagnostických metod. Dále určíme, která z metod je nejcitlivější na danou poruchu ložiska.

KLÍČOVÁ SLOVA

Valivá ložiska, opotřebení a umělé poškození ložiska, zpracování signálu, statistická analýza, frekvenční analýza, akustická emise, rázové pulzy, testovací stand, charakteristické veličiny, poruchové frekvence, spektrum, keprum, obálka, filtrace, firma PROFESS, ACMT, ADASH, PeakVue, EMERSON, výpovědní schopnosti.

ABSTRACT

This thesis deals with the diagnosis of condition of rolling bearings. These rolling bearings are the part of rotating machinery which are all based on not to be dismantled approach. Targets of this thesis include introduction with bearings in a structural way, next there are detailed descriptions of emerging defect and their time-frequency characteristics. The main aim of this thesis is to use diagnostical methods of current condition of rolling bearings which are used in industry with a bigger focus on two methods id est. ACMT of ADASH company and PeakVue of EMERSON company. On the basis of practical measurements using the test stand of rolling bearings we identify termination capabilities of used diagnostical methods and then we identify which of the methods is the most sensitive to the failure of bearings.

KEYWORDS

The rolling bearings, wear and artificial damage, signal processing, statistical analysis, frequency analysis, acoustic emission, shock pulses, test stand, characteristic quantities, failure frequency, spectrum, cepstrum, cover, filtration, PROFESS company, ACMT, ADASH, PeakVue, EMERSON, termination capabilities.

Obsah

1	ÚVOD	7
2	LOŽISKA	8
3	VALIVÁ LOŽISKA	9
3.1	Typy konstrukcí valivých ložisek.....	9
3.2	Stykový úhel.....	10
3.3	Geometrie valivého ložiska.....	10
3.4	Kinematika ložiska.....	11
3.4.1	Frekvence valivého ložiska	12
3.5	Měření vibrační ložiska.....	12
3.6	Poškození valivého ložiska.....	13
3.6.1	Fáze poškození valivých prvků ložisek.....	14
3.6.2	Poškození jednotlivých komponent ložiska	14
3.6.3	Příklady poškození valivých ložisek	16
4	MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU	17
4.1	Snímač kmitavého pohybu	17
4.2	Absolutní kmitání ložisek	19
4.2.1	Jednotlivé oblasti posuzování stavu valivého ložiska	20
4.3	Základy zpracování signálu	20
4.3.1	Frekvenční analýza	20
4.3.2	Kepstrální analýza.....	21
4.3.3	Hilbertova transformace.....	22
4.3.4	Akustická emise	23
5	DIAGNOSTICKÉ METODY STAVU VALIVÝCH LOŽISEK.....	23
5.1	Statistické diagnostické metody	23
5.1.1	Činitel výkmitu (Crest-factor).....	24
5.1.2	K-hodnota	25
5.1.3	Kurtosis.....	25
5.2	Diagnostické metody využívající rezonanci snímače	27
5.2.1	Metoda rázových pulzů – SPM.....	27
5.3	Diagnostické metody ve frekvenční oblasti.....	28
5.3.1	Obálková analýza.....	29
5.3.2	Kepstrální analýza.....	30
5.4	Implementace popsaných metod.....	30
6	SPECIÁLNÍ DIAGNOSTICKÉ METODY.....	30
6.1	ACMT	30

6.1.1	Princip metody ACMT.....	30
6.2	PeakVue	32
6.2.1	Zpracování signálu metodou PeakVue.....	32
6.2.2	Správné nastavení metody PeakVue	33
6.2.3	Stav valivého ložiska pomocí PeakVue	34
7	TECHNICKÉ ZÁZEMÍ EXPERIMENTU	37
7.1	Testovaná ložiska	37
7.2	Použité snímače vibrací	41
7.3	Analyzátoři.....	42
7.4	Testovací stand	43
8	EXPERIMENTY	45
8.1	Provozní teplota testovacího zařízení	45
8.2	Měření vibrací a zpracování naměřených dat.....	46
8.2.1	Měření vibrací.....	46
8.2.2	Analýza naměřených dat.....	47
8.2.3	Zobrazení a označení naměřených vibračních signálů.....	48
8.3	Převodní poměr řemenové převodovky	49
8.4	Měření vibrací na novém ložisku ZKL 1206 K	50
8.5	Měření vibrací na opotřebeném ložisku 8FL3 111206.....	53
8.6	Měření vibrací na uměle poškozovaných ložiscích.....	56
9	VÝPOVĚDNÍ SCHOPNOSTI POUŽITÝCH METOD	61
9.1	Činitel výkmitu (Crest – factor).....	61
9.2	K-hodnota	62
9.3	Kurtosis.....	64
9.4	Metoda rázových pulzů-SPM.....	68
9.5	Obálková analýza	72
9.6	Kepstrální analýza	76
9.7	ACMT	81
9.7.1	Validace ACMT.....	82
9.7.2	Diagnostika pomocí ACMT	84
9.8	PeakVue	87
9.8.1	Validace PeakVue	88
9.8.2	Diagnostika pomocí PeakVue	89
10	POROVNÁNÍ VÝPOVĚDNÍCH SCHOPNOSTÍ DIAGNOSTICKÝCH METOD.....	91
11	ZÁVĚR.....	94
12	LITERATURA.....	95

13	SEZNAM OBRÁZKŮ	96
14	PŘÍLOHY	99
14.1	Katalogový list použitého ložiska ZKL 1206 K	99
14.2	Katalogový list použitého akcelerometru	100

1 Úvod

Valivá ložiska lze považovat za nepostradatelné součásti všech rotačních strojů. Jejich hlavním úkolem je udržet rotační části strojů, nejčastěji hřídele, ve správné poloze uvnitř skříně soustrojí a především omezit tření rotujících částí. Provoz každého rotačního stroje je doprovázen mechanickým kmitáním, které přináší cenné informace o provozním stavu stroje. Tyto mechanické vibrace jsou základním stavebním kamenem bezdemontážní diagnostiky rotačních strojů. Na základě změřeného mechanického kmitání (vibračního signálu) získaného nejčastěji pomocí akcelerometru, lze určit aktuální stav a opotřebení diagnostikovaného ložiska.

V této práci se zaměříme na průmyslově používané metody diagnostiky stavu valivých ložisek, statistického, frekvenčního a rezonančního přístupu se zaměřením na metody ACMT firmy ADASH a PeakVue firmy EMERSON. Všechny průmyslové metody detailně popíšeme, určíme jejich algoritmickou strukturu a jejich charakteristické veličiny. Správnou funkci diagnostických metod nakonec otestujeme prostřednictvím naměřených dat získaných pomocí testovacího standu s různě poškozenými testovanými valivými ložisky. Měření vibrací bude provedeno ve firmě PROFESS, která poskytla veškeré technické zázemí potřebné k provedení experimentů. Experimenty budou provedeny na valivých ložiscích stejného typu a konstrukčního provedení, některé z nich budou cíleně poškozeny pomocí modelářské frézky. Umělé poškození bude vhodně simulovat skutečné vznikající poškození ložisek.

Cílem této práce je pomocí vypočítaných charakteristických veličin zmíněných diagnostických metod určit aktuální stav testovaného valivého ložiska, otestovat zdali dané metody správně fungují a jaké mají omezující vlastnosti. Dále tato práce poslouží pracovníkům firmy PROFESS jako jednoduchý návod, kterou z diagnostických metod použít a jak správně nastavit její parametry před započítím finálního měření.

2 Ložiska

Ložiska jsou důležitým prvkem strojů a zařízení, ve kterých dochází k rotačnímu nebo translačnímu pohybu. Jejich konstrukční uspořádání umožňuje snížit tření při vzájemném otáčení nebo posuvném pohybu součástí stroje. Ložiska lze rozdělit do několika skupin podle těchto vlastností. [1], [6]

Podle druhu pohybu

- Rotační
- Translační (posuvný)

Podle směru zatížení

- Radiální
- Axiální

Podle principu eliminace tření

- Kluzná ložiska (princip snížení tření na základě kluzu materiálů)
 - Pneumatické
 - Hydraulické
- Valivá ložiska (obsahuje valivé elementy snižující tření při pohybu)
 - Kuličková
 - Válečková
 - Soudečková
 - Jehličková
 - Kuželíková
- Magnetická ložiska
 - Aktivní
 - Pasivní

V této práci se budeme zabývat pouze valivými ložisky. Ložiska tohoto typu budou umístěna v testovacím standu. Dalším důvodem zaměření na tento druh ložisek je jejich markantní zastoupení ve strojním průmyslu. Detailní konstrukce a vlastnosti valivých ložisek budou popsány v následující kapitole.



2.1: Příklad kluzného, valivého a magnetického ložiska

3 Valivá ložiska

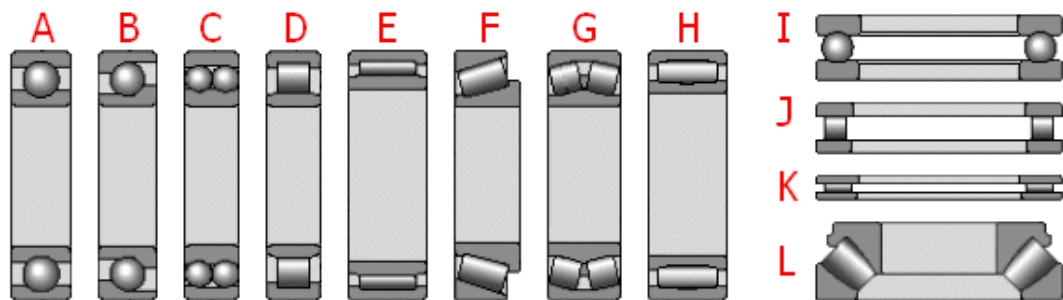
Valivé ložisko je nejpoužívanějším typem ložiska v průmyslu. Jeho konstrukce musí být plně přizpůsobena umístění a provozním vlastnostem rotačního stroje. Pro správnou a dlouhotrvající funkci ložiska je důležité dodržovat výrobcem určené maximální zatížení a správné mazání ložiska. Životnost celého stroje je ovlivněna životností jeho ložisek.



3.1: Příklad valivého ložiska

3.1 Typy konstrukcí valivých ložisek

Valivá ložiska dělíme podle druhu tj. směru zatížení na axiální a radiální, dále podle druhu valivých elementů, viz následující obrázek.

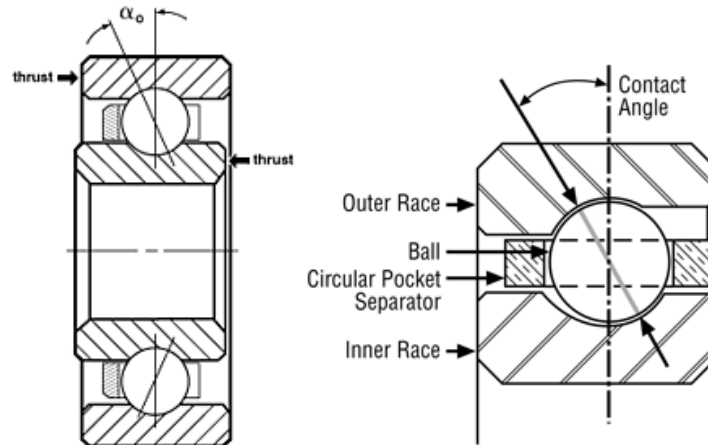


3.2: Konstrukční typy valivých ložisek.

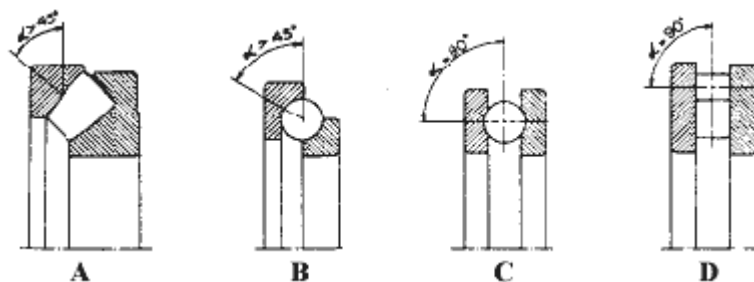
- A Jednořadé kuličkové ložisko
- B Jednořadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem
- C Dvouřadé kuličkové naklápěcí ložisko
- D Jednořadé válečkové ložisko
- E Jehlové ložisko
- F Kuželíkové ložisko
- G Dvouřadé soudečkové výklopné ložisko
- H Toroidní ložisko
- I Axiální jednořadé kuličkové ložisko
- J Axiální jednořadé válečkové ložisko
- K Axiální jehlové ložisko
- L Axiální soudečkové ložisko

3.2 Stykový úhel

Směr zatížení valivého ložiska je nejlépe popsán stykovým úhlem. Jedná se o úhel, který svírá spojnice stykových bodů valivého elementu a oběžných drah s kolmicí na osu ložiska. [7]



3.3: Stykový úhel radiálních ložisek



3.4: Stykový úhel axiálních ložisek

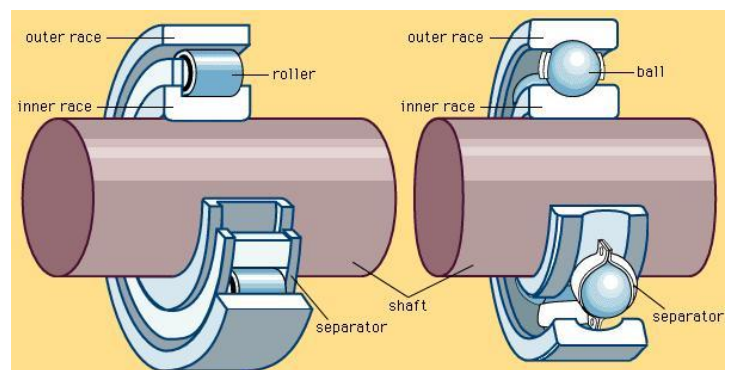
Radiální ložiska mají stykový úhel v rozsahu $\alpha \in \langle 0^\circ \dots 45^\circ \rangle$ a axiální ložiska v rozsahu $\alpha \in \langle 45^\circ \dots 90^\circ \rangle$.

3.3 Geometrie valivého ložiska

Nyní bude detailně popsáno konstrukční provedení valivého ložiska a jeho komponent.

Komponenty valivého ložiska

- Vnější kroužek (outer race)
- Vnitřní kroužek (inner race)
- Valivé elementy (roller, ball)
- Klec (separator)



3.5: Konstrukce valivého ložiska

Princip funkce valivého ložiska

Vnější kroužek (vnější oběžná dráha) ložiska je nejčastěji pevně připevněn do kostry stroje (kliková skříň, převodová skříň) a zaujímá v ložisku stacionární část. Vnitřní kroužek (vnitřní oběžná dráha) je napevno připevněn na otáčející se hřídel stroje. Prostor mezi vnějším a vnitřním kroužkem je vyplněn valivými elementy umožňující plynulé odvalování s minimálním třením. Valivé elementy (kuličky, válečky, kuželíky, soudečky, jehly) nacházejí se v prostoru mezi vnějším a vnitřním kroužkem nejsou umístěny natěsno, ale s provozní vůlí, která umožňuje ložisku lepší tepelné přizpůsobení, tj. vlivem tepelné roztažnosti by došlo k zabránění plynulého odvalování. Valivé elementy jsou v prostoru mezi kroužky udržovány prostřednictvím nosné klece.

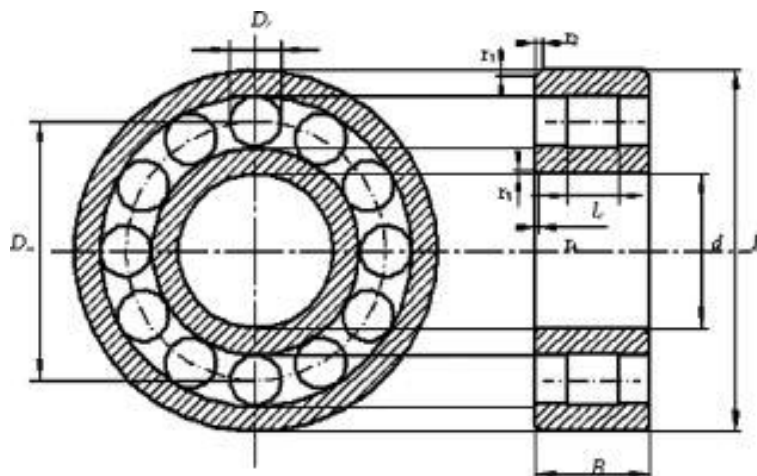
Mazání ložiska

Mazání neboli lubrikace ložiska je velmi důležité pro jeho správnou provozní funkci. Úkolem maziva je vytvořit na povrchu kluzných ploch (vnější, vnitřní kluzná dráha, povrch valivých elementů) stálý kluzný film. Pomocí takto vytvořené vrstvy dochází k omezení tření a následného opotřebení, únavy materiálu, koroze a snížení hlučnosti ložiska.

K mazání ložisek se nejčastěji používá tuk, minerální olej nebo pevné mazivo v podobě grafitu. Ložiska mazaná olejem nejčastěji obsahují těsnění tzv. gufero, které zamezí úniku mazacího oleje, vniknutí nečistot a vlhkosti do ložiska. Tuk je vhodné používat, pokud ložisko nemá zmíněné gufero a je používáno při nižších provozních otáčkách. Minerální olej se používá pro mazání ložisek zatížených vysokými otáčkami a při vysokých provozních teplotách. Mazání se provádí v olejové lázni, olejovým oběhem nebo olejovou mlhou. Pevná maziva se nejčastěji používají při velkém tepelném a silovém zatížení ložiska.

3.4 Kinematika ložiska

Pomocí kinematiky (konstrukčního provedení) valivého ložiska lze určit frekvence odvalování jednotlivých částí přes vzniklé poruchy ložiska. Je předpokládán ideální stav, kdy dochází k odvalování bez skluzů (valivý element - vnitřní, vnější kluzná dráha). Vliv setrvačných sil je zanedbán a provozní stykový úhel α je pro vnitřní a vnější kroužek stejný.



3.6: Geometrie valivého ložiska

Výpočet frekvencí poruch ložiska

Pro výpočet důležitých frekvencí poruch ložiska je důležité znát tyto parametry testovaného valivého ložiska.

- Frekvence otáčení f_N [Hz]
- Průměrná rozteč D_u [mm]
- Průměr valivého elementu D_r [mm]
- Počet valivých elementů Z [-]
- Provozní stykový úhel α [°]

3.4.1 Frekvence valivého ložiska

Frekvence vad klece pro fixovaný vnější kroužek

Fundamental Train Frequency

$$f_{FTF} = \frac{1}{2} f_N \left(1 - \frac{D_r}{D_u} \cos(\alpha_B) \right) \text{ [Hz]}$$

Frekvence odvalování po vnějším kroužku

Ball Pass Frequency Outer Race

$$f_{BPFO} = \frac{1}{2} Z f_N \left(1 - \frac{D_r}{D_u} \cos(\alpha_B) \right) \text{ [Hz]}$$

Frekvence odvalování po vnitřním kroužku

Ball Pass Frequency Inner Race

$$f_{BPFI} = \frac{1}{2} Z f_N \left(1 + \frac{D_r}{D_u} \cos(\alpha_B) \right) \text{ [Hz]}$$

Frekvence odvalování elementu po vnitřní a vnější dráze

Ball Spin Frequency

$$f_{BSF} = f_N \frac{D_u}{D_r} \left(1 - \left(\frac{D_r}{D_u} \cos(\alpha_B) \right)^2 \right) \text{ [Hz]}$$

Aplikací frekvenční analýzy na naměřený vibrační signál lze získat amplitudové spektrum signálu. Pokud je ložisko nějakým způsobem poškozeno, spektrálně se projeví zvýšením amplitudy některé z poruchových frekvencí testovaného ložiska.

3.5 Měření vibrací ložiska

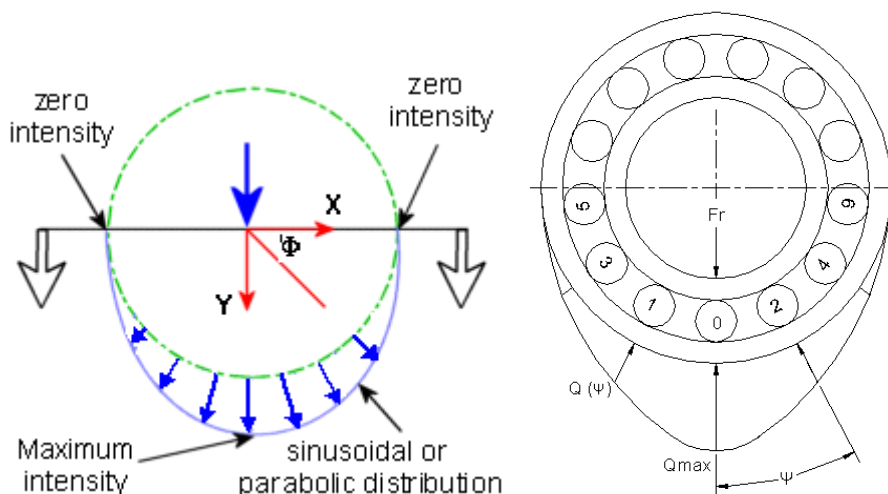
U poškozeného ložiska vznikají vlivem odvalování valivých elementů mechanické rázy, krátkodobé oscilace (silně tlumené kmity). Intenzita těchto kmitů roste se zatížením ložiska a jsou přenášeny na pouzdro. [7], [1]

Impulsy se nejlépe šíří v emisním okně ložiska, které závisí na směru radiálního zatížení tj. $\pm 45^\circ$ od směru působení zatížení. U axiálních ložisek leží zatížení na celém obvodu 360° kotouče skříně zařízení.

Ostré hrany způsobené poškozením ložiska a mezery mezi jednotlivými částmi ložiska způsobují podstatný útlum síly signálu, proto je nutné měřící snímač vibrací umístit do emisního okna nejlépe přímo proti směru působení maximálního zatížení ložiska. Mezi snímačem vibrací a ložiskem by měl být nepřerušitelný styk.

Požadavky na umístění snímače [1]

- Nutno umístit v emisním okně ložiska nejlépe proti směru působícího zatížení.
- Mezi cestou signálu smí být pouze jedno přerušení materiálu (ložisko-ložiskové tělo).
- Směr dráhy signálu mezi ložiskem a měřícím místem musí být přímý a průchozí.
- Vzdálenost mezi bodem měření a ložiskem nesmí být větší jak 75 mm .
- Hlavní osa snímače musí směřovat přímo na osu zatížení ložiska a nesmí se odchýlit od tohoto směru více jak 5 stupňů.
- Pokud je snímač kmitavého pohybu připevněn pomocí dvupólového magnetu, je nutné z povrchu diagnostikovaného stroje odstranit vrstvu nátěru (silně tlumí vibrační signál).



3.7: Emisní okno valivého ložiska

V levé části je umístěn schematický obrázek popisující rozložení působící síly zatížení (modré čáry) a emisní okno ložiska tj. úhel Φ na obě dvě strany od osy působení síly (červená barva). V pravé části je opět znázorněno působení zatěžovací síly ložiska F_r a emisní okno ložiska Ψ na obě dvě strany osy působení zatěžovací síly.

3.6 Poškození valivého ložiska

[1] Opotřebení valivých ložisek je způsobeno mechanickým zatěžováním během vykonávaného rotačního pohybu jeho součástí. Dalším důležitým faktorem ovlivňující životnost ložisek je působení okolního prostředí a mazání.

[8] Ukončení životnosti ložiska je nejčastěji způsobeno odrolováním materiálu z povrchu oběžných drah kroužků a valivých elementů a s tím spojená tvorba důlků tzv. Pitting. Jinými slovy dochází k únavě kluzného materiálu. Poškození ložiska může také dojít neodbornou montáží, provozními podmínkami a nevhodnou popř. žádnou údržbou. Jelikož klec ložiska bývá z materiálu s nižší tvrdostí, dochází vlivem opotřebení (větší provozní vůle ložiska) ke vzniku sil, které dokážou klec rozlomit.

3.6.1 Fáze poškození valivých prvků ložisek

Poškození valivých prvků ložisek lze rozdělit do čtyř fází postupného destruktivního nevratného procesu.

První fáze

První známky poškození valivého ložiska se projevují v pásmu ultrazvuku tj. frekvence nad 20 kHz. Ve dnešní době již existují diagnostické metody měřící a zpracovávající ultrazvukový signál. Jejich odezva a opakovatelnost závisí na specifikaci senzoru, měřícím místě a technologii upevnění, otáčkách rotoru a geometrii daného ložiska.

Druhá fáze

Velmi nepodstatné poruchové frekvence se začínají projevovat při provozu ložiska (začínají zvonit). Dále je patrná vyšší frekvence násobená základními poruchovými frekvencemi ložiska. Ultrazvukové metody stále diagnostikují stav ložiska.

Třetí fáze

V této fázi se objevují razantní poruchové frekvence ložiska se souvisejícími harmonickými složkami. Růst poškození ložiska se projevuje vznikem počtu postranních pásem kolem frekvencí poruch a vlastní frekvence ložiska. Hladiny diagnostikovaného ultrazvuku stále rostou. V této fázi poškození by mělo být ložisko vyměněno.

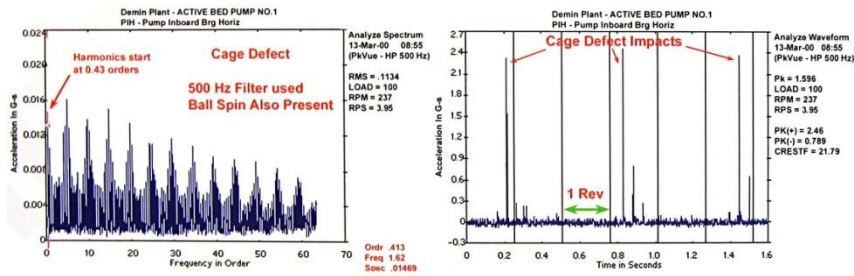
Čtvrtá fáze

Dochází k likvidaci ložiska po markantním nárůstu poruchových frekvencí a zániku vlastní frekvence součástky. Tyto frekvence jsou nahrazeny náhodnými a širokopásmovými frekvencemi, které způsobují hluk. Hodnoty diagnostikovaného ultrazvuku mohou během poruchové fáze poklesnout, ale dalším zhoršením stavu ložiska se zvětší na enormní hodnotu.

3.6.2 Poškození jednotlivých komponent ložiska

Poškození klece (FTF) [5]

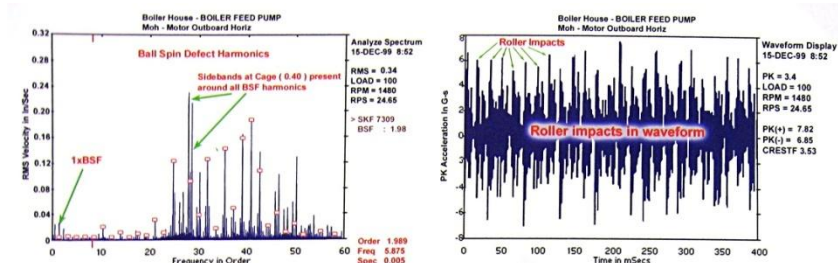
Základní poruchové frekvence klece ložiska jsou nejčastěji generovány v rozsahu $0,35 \dots 0,48 * n_{RPM}$. Poruchy klece jsou nejčastějším důvodem poruchy dalších částí ložiska, jako jsou poruchy valivých elementů a jeví se jako frekvence postranního pásma. Porušená klec ložiska způsobuje jeho prudké poškozování, projevuje se méně častými vysokými amplitudami, vzhledem k tomuto faktu je velmi obtížné poruchy detekovat.



3.8: Poškození klece ložiska v čase a spektru

Poškození valivých elementů (BSF) [5]

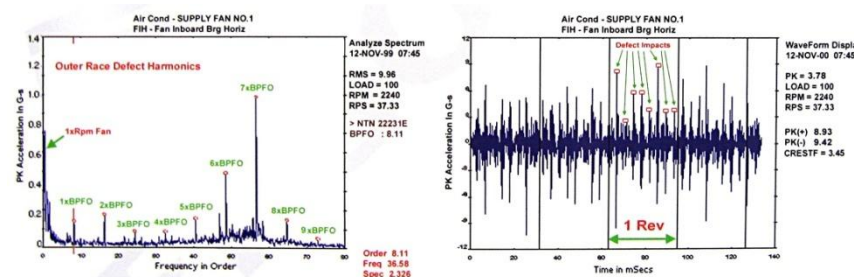
Frekvence poruch valivých elementů f_{BSF} se nejčastěji objevují, při poškození povrchu valivých elementů (kuliček, válečků, atd.) a jsou často nesynchronní vůči otáčkové frekvenci. Frekvence poruch jsou závislé na počtu porušených valivých prvků, lze je odhadnout z naměřeného časového signálu, kde špička odpovídá jednotlivé poruchové frekvenci.



3.9: Poškození valivých elementů

Poškození vnějšího kroužku (BPFO) [5]

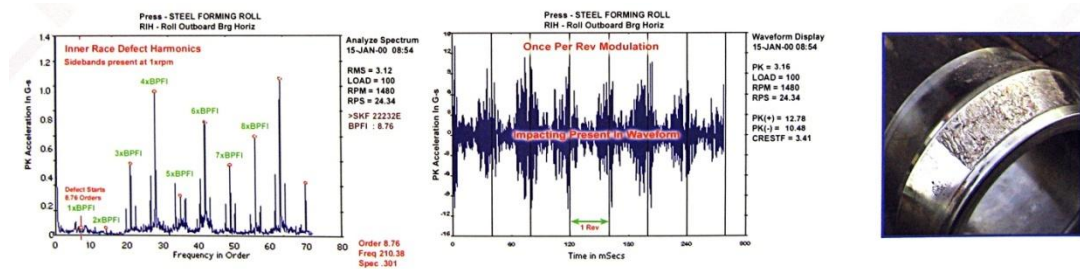
Frekvence poruchy vnějšího kroužku f_{BPFO} vznikají odvalováním valivých prvků přes poruchu na vnější dráze ložiska. Jednotlivé frekvence f_{BPFO} jsou zpravidla nesynchronní. V případě, kdy vnější kroužek rotuje a vnitřní je zafixován mohou být frekvence poruch modulovány otáčkami rotoru, čímž vznikají postranní pásma frekvence otáčení okolo frekvencí poruch.



3.10: Poruchy vnějšího kroužku ložiska

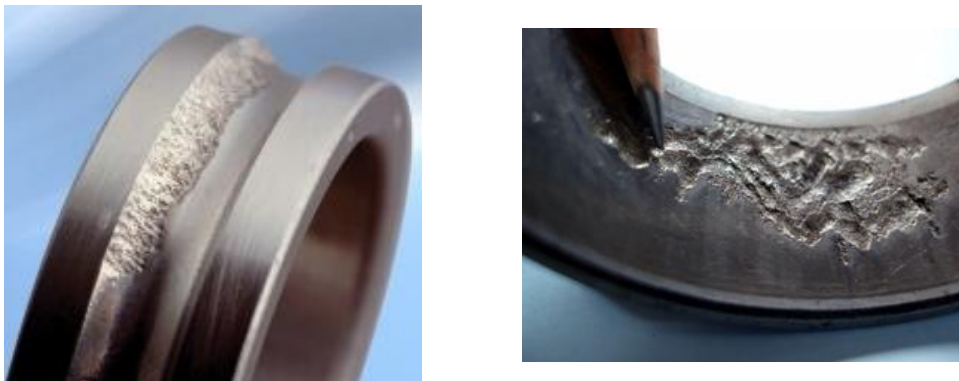
Poškození vnitřního kroužku (BPFI) [5]

Frekvence poruchy vnitřního kroužku f_{BPFI} vznikají odvalováním valivých prvků přes poruchu na vnitřní dráze ložiska. Jsou v základu nesynchronní, ačkoliv v některých případech téměř synchronní. Spektrální a časové charakteristiky pro problém f_{BPFI} jsou velmi podobné jako u problematiky f_{BPFO} , ačkoliv s rozdílem postranního frekvenčního pásma otáčkové frekvence rotoru.



3.11: Poruchy vnitřního kroužku ložiska

3.6.3 Příklady poškození valivých ložisek



3.12: Poškození vnitřního kroužku a Pitting vnějšího kroužku



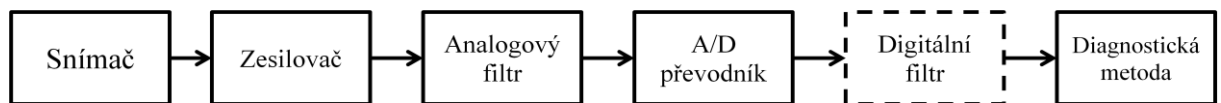
3.13: Poškození valivé kuličky a poškození klece ložiska

Takto poškozené části ložiska generují během odvalování velmi silné kmity v podobě tlumených rázů, dochází k akustické emisi. Výměna ložiska je bezpodmínečná.

4 Měření a zpracování signálu

V předchozí kapitole bylo popsáno konstrukční provedení a funkce valivého ložiska, dále byly určeno vhodné umístění snímačů měřených vibrací a bylo uvedeno několik příkladů poničených komponent ložiska.

Tato kapitola bude zaměřena na způsob měření vibračního signálu určitým druhem snímače tj. převodníku vibrace-elektrické napětí. Způsob přenosu, úpravy signálu (filtrace) a nakonec finální číslicové zpracování a vyhodnocení danou diagnostickou metodou (algoritmem). Pomocí jednoduchého blokového schématu lze popsat měřicí řetězec diagnostického systému.

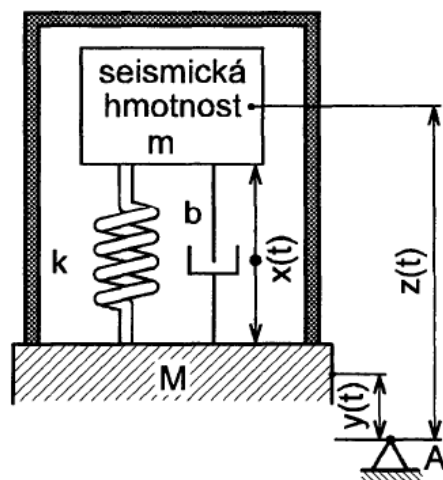


4.1: Schema diagnostického systému

- **Snímač** vibračního signálu (zrychlení, rychlosti) je napájen z předzesilovače, po vodivém stíněném vedení se přenáší měřený signál (napětí, proud) do analogového filtru.
- **Analogový filtr** může být typu horní, dolní nebo pásmové propust (zádrž) a jeho funkcí je odříznout nežádoucí frekvence měřeného signálu (šum okolí, frekvence napájení 50 Hz, nežádoucí rušení, otáčková frekvence, aliasing) a ponechat pouze užitečné frekvence, které nejlépe popisují vibrační signál.
- **A/D převodník** převádí filtrovaný analogový signál do digitální podoby na základě třech po sobě jdoucích procedur tj. vzorkování, kvantování a kódování. Parametry A/D převodníku je vhodné volit dle měřené úlohy.
- **Digitální filtr** může být zapojen do měřicího obvodu, ale nemusí. Slouží k finální úpravě frekvenčního spektra měřeného signálu (přesné odstranění nežádoucích frekvencí), kterou nelze uskutečnit analogovými filtry.
- **Diagnostická metoda** slouží pro finální zhodnocení stavu valivého ložiska na základě měřeného, upraveného signálu. Tato metoda nejčastěji využívá časo-frekvenční zpracování signálu.

4.1 Snímač kmitavého pohybu

Kmitavým pohybem se rozumí časová změna vybraného bodu na objektu ke vztažnému (referenčnímu) bodu (viz[7]). Ve většině případů nelze relativní měření realizovat (pohyb nelze vztáhnout vůči pevnému bodu, jelikož vibruje celý stroj), proto se používá absolutní měření pomocí absolutních senzorů kmitavého pohybu, ve kterém je uvnitř umístěn tížený vztažný bod (seismická hmotnost).



4.2: Model absolutního senzoru kmitavého pohybu

Absolutní senzor kmitání je složen z kmitavé soustavy, která je tvořena seismickou hmotností m , pružinou k a tlumením b . Kmitavá soustava je popsána následující pohybovou rovnicí.

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

Pro časově proměnné složky souřadnic platí:

$$z(t) = x(t) + y(t)$$

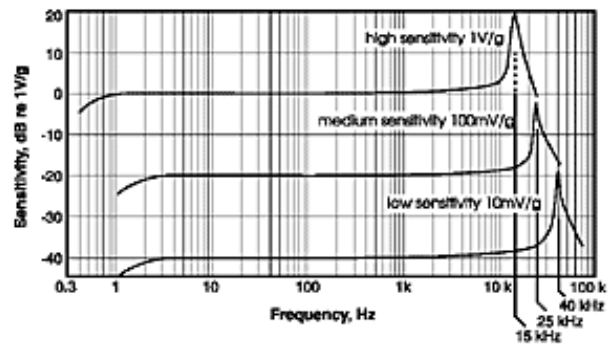
Pokud aplikujeme předchozí vztah do pohybové rovnice:

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

Dva případy měření kmitavého pohybu

- Pro případ $kx \gg m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt}$, $x \sim \frac{d^2 y}{dt^2}$ pracuje senzor v režimu měření zrychlení. Na tomto principu pracuje většina absolutních senzorů kmitavého pohybu, dále pouze akcelerometry.
- Pro případ $m \frac{d^2 x}{dt^2} \gg b \frac{dx}{dt} + kx$ pracuje senzor v režimu měření amplitudy (dráhy) pohybu $y(t)$.

Rezonanční frekvenci senzoru lze vypočítat pomocí vzorce $f_r = \frac{\sqrt{k}}{2\pi m} [Hz]$. Pro měření zrychlení absolutního kmitání je nutno měřit frekvence nižší než f_r . Pro měření dráhy kmitavého pohybu je nutné měřit nad rezonanční frekvencí f_r .



4.3: Příklad frekvenční charakteristiky akcelerometrů

Snímače absolutních vibrací jsou nejčastěji vyrobeny pomocí piezoelektrického krystalu umístěného v kovovém (nerozovém) pouzdře. Mezi hlavní vlastnosti piezoelektrických akcelerometrů patří vysoká citlivost na nízkou úroveň mechanického kmitání, vysoká hodnota rezonanční frekvence f_r (desítky až stovky kHz), vysoká stabilita parametrů, vysoká pracovní teplotou a nízká citlivost na změny teploty a magnetického pole.



4.4: Příklad akcelerometrů firmy Wilcoxon

4.2 Absolutní kmitání ložisek

U strojních zařízení obsahující valivě uložené rotory přenášejí absolutní kmity ložiska nejcennější informaci o stavu stroje. Absolutní kmity ložiska lze definovat jako velmi rychlé pohyby (pulsy) ložiska, na kterém je připevněn (na vnější straně ložiska) měřící absolutní senzor kmitání, nejčastěji akcelerometr.

Pro posuzování absolutních kmitů ložiska byla definována mohutnost kmitání:

$$v_{ef} = v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

- $v(t)$ [$mm s^{-1}$] rychlost kmitání (integrál zrychlení měřeného akcelerometrem)
- T [s] časová délka měření

Mohutností kmitání se míněna největší efektivní hodnota rychlosti kmitů v_{RMS} ve frekvenčním rozsahu 10 – 1000 Hz . Pro posouzení aktuálního stavu stroje se naměřená maximální mohutnost kmitání porovnává s mezními hodnotami podle normy VDI 2056 (ISO 2372, nebo také ISO 10816 [11]). Z mohutnosti kmitání však nelze určit počátek rozsáhlého poškození valivých ložisek.

Velocity Severity		Velocity Range Limits and Machine Classes ISO Standard 10816-1			
mm/s RMS	in/s PEAK	Small Machines Class I	Medium Machines Class II	Large Machines	
				Rigid Supports Class III	Less Rigid Supports Class IV
0.28	0.02	Good	Good	Good	Good
0.45	0.03				
0.71	0.04	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory
1.12	0.06				
1.80	0.10	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)
2.80	0.16				
4.50	0.25	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)
7.10	0.40				
11.20	0.62	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)
18.00	1.00				
28.00	1.56	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)
45.00	2.51				

4.5: Posuzování absolutních vibrací normou VDI 2056/ISO 10816

- Small Machines Class I Malé stroje do výkonu $P = 15 \text{ kW}$.
- Medium Machines Class II Středně velké stroje s výkonem $P = 15 - 75 \text{ kW}$.
- Large Machines Class III Velké stroje na pevných základech s výkonem $P > 75 \text{ kW}$.
- Large Machines Class IV Velké stroje na měkkých základech s výkonem $P > 75 \text{ kW}$.

4.2.1 Jednotlivé oblasti posuzování stavu valivého ložiska

Dle normy VDI 2056/ISO 10816 popíšeme jednotlivé oblasti (viz obrázek 4.5) poškození valivých ložisek.

- Dobrý (Good) - Oblast kmitání nově osazeného ložiska v daném zařízení.
- Upotřebitelný (Satisfactory) - Stav ložisek je způsobilý pro další dlouhodobý provoz.
- Ještě přípustný (Unsatisfactory) - Stav ložiska je nezpůsobilý pro dlouhodobý provoz, ale stroj může být na omezenou dobu používán, než dojde k výměně ložiska.
- Nepřípustný (Unacceptable) - Stav ložiska je považován za nepřípustný a nebezpečný pro další provoz stroje. Mohlo by dojít k poškození celého stroje nebo zařízení.

4.3 Základy zpracování signálu

V této podkapitole budou popsány základní (elementární) metody zpracování signálu. Tyto metody jsou základem všech sofistikovaných diagnostických metod.[9], [7]

4.3.1 Frekvenční analýza

Pro převod naměřeného signálu z časové do frekvenční oblasti (frekvenční analýza) je v této práci použita Fourierovy transformace (FT), pomocí které získáme komplexní frekvenční složky (frekvenční spektrum). Jelikož se při zpracování naměřeného vibračního signálu nejčastěji používá diskretních měřicích přístrojů (zpracování diskretních signálů v čase i hodnotách) je nutné použít principy diskretní Fourierovy transformaci (DFT).

Spojité Fourierova transformace (FT) a její inverze

$$X(\omega) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \omega = 2\pi f$$

$$x(t) = F^{-1}[X(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega$$

- $X(\omega)$ Fourierův obraz transformovaného signálu (Fourierovy koeficienty)
- $x(t)$ analyzovaný časový signál
- $\omega(t)$ kruhová frekvence

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) a její inverze

$$X^f[f] = X^f[k_f \Delta f] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i)e^{-jk_f i \frac{2\pi}{N}}$$

$$x(i) = \Delta f \sum_{i=0}^{N-1} X^f[i]e^{jk_f i \frac{2\pi}{N}}$$

- $x(i)$, kde $i = 0, 1, \dots, N - 1$ jednotlivé vzorky analyzovaného signálu
- $X^f[k_f]$ Fourierův obraz analyzovaného signálu
- k_f k -tá složka transformovaného signálu
- Δf krok, kterým je rozdělena frekvenční osa

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{T_s N}$$

- $f = k_f \Delta f$, kde $k_f = 0, 1, \dots, N - 1$ odpovídající frekvenční (komplexní) obraz dané složky signálu

Prodloužením délky analyzovaného okna signálu $N_{FT} T_s$ získáme jemnější frekvenční rozlišení Δf Fourierových koeficientů. Výpočet diskretní Fourierovy transformace je časově náročná procedura, protože dochází k výpočtu N členů posloupnosti X^f z N naměřených hodnot $x(i)$. Ze vzorce pro výpočet diskretní Fourierovy transformace vyplývá, že je nutné provést N^2 komplexního násobení a N^2 komplexního sčítání. Pro urychlení algoritmu výpočtu Fourierovy transformace se používá algoritmus rychlé Fourierovy transformace (FFT), jejíž výpočetní složitost je nižší $N \log(N)$. Je však nutné upravit analyzovaná data tak, aby jejich délka odpovídala mocnině dvou $N = 2^n$.

4.3.2 Kepstrální analýza

Kepstrální analýza patří mezi nelineární techniky zpracování digitalizovaného signálu. Základem kepstrální analýzy je použití logaritmické funkce na amplitudové spektrum signálu a následné převedení tohoto spektra inverzní Fourierovou transformací zpět do časové oblasti. Tato technika je využitelná v široké oblasti praktických aplikací. Výsledkem kepstrální analýzy je výkonové kepstrum.

$$C(\tau) = F^{-1}\{\log[|X^F(f)|^2]\}$$

- τ kvefrence (v jednotkách času [s])
- $X^F(f)$ Fourierův obraz analyzovaného signálu $x(t)$

Výhody kepstrální analýzy

- Multiplikativní komponenty ve spektru se aplikací logaritmu mění na aditivní a jako takové se objeví ve spektru.
- Kepstrum zvýrazňuje jakoukoliv změnu nebo periodicitu ve spektru. Výrazné extrémny ve funkci $C(\tau)$ odpovídají ve spektru spektrálními čarám, které mají konstantní rozestup.

4.3.3 Hilbertova transformace

Hilbertova transformace je nejpoužívanějším nástrojem pro demodulaci naměřeného signálu v Obálkové analýze.

Hilbertova transformace (HT)

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\tau - t} d\tau$$

Použitím konvoluce lze zmíněný vztah převést na následující tvar.

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} x(t) * \frac{1}{t}$$

Provedeme další úpravu použitím Fourierovy transformace.

$$H(jf) = \frac{1}{\pi} F\{x(t)\} F\left\{\frac{1}{t}\right\} = \frac{1}{\pi} X(jf) \pi(-j \operatorname{sgn}(f))$$

Hilbertova transformace pracuje ve frekvenční oblasti takovým způsobem, že složkám se zápornou frekvencí posouvá fázi o $\pi/2$ a složkám s kladnou frekvencí o $-\pi/2$ při zachování velikosti amplitudy.

Obálka měřeného signálu

Obálku $\tilde{x}(t)$ měřeného signálu $x(t)$ získáme aplikací zpětné Fourierovy transformace na předchozí vztah.

$$\tilde{x}(t) = F^{-1}\{H(jf)\} = F^{-1}\{F\{x(t)\}(-j \operatorname{sgn}(f))\}$$

Obálku měřeného signálu lze následně použít pro potřeby Obálkové analýzy signálu.

4.3.4 Akustická emise

Akustická emise je fyzikální jev, při kterém v určitých lokalitách materiálu dochází v důsledku dynamických procesů stimulovaný vnějšími nebo vnitřními silami k uvolňování energie[12]. Tato energie je převedena na mechanické napěťové impulsy, které se šíří materiálem v podobě elastické napěťové vlny. Pokud vlna dosáhne povrchu materiálu je převedena na jeden nebo více módů vlnění a šíří se hlavně povrchovým vlněním. Vlivem podélné a příčné složky vlnění, interferencím odráženého vlnění o danou geometrii tělesa má časový průběh naměřeného signálu charakter náhodného signálu. Složka vlnění kolmá k povrchu materiálu lze detekovat pomocí širokopásmového piezoelektrického senzoru akustické emise.

Akustická emise může mít impulsní nebo spojitý charakter, nejčastěji se však jedná o impulsní charakter. Impulsní akustická emise je způsobena událostí, která může trvat několik nanosekund až jednotky milisekund. Pomocí impulsní akustické emise lze detekovat a lokalizovat vznik a šíření mikrotrhlin v materiálu.

5 Diagnostické metody stavu valivých ložisek

V současné době se v průmyslu využívá nespočet sofistikovaných metod umožňujících bezdemontážní diagnostiku stavu valivých ložisek. Větší část těchto metod se opírá o popsané základní principy (kapitola 4.3) zpracování signálu. Využívají skutečnosti, že během odvalování valivých částí ložiska přes poruchu dochází ke vzniku rázových pulzů. Ložisko se tím pádem stává budičem vibračního signálu. Tento vibrační signál je následně měřen vhodným senzorem a zpracováván danou diagnostickou metodou.

V rámci zadání této práce budou použity průmyslově aplikované metody diagnostiky stavu valivých ložisek založeny na různých principech. Dále popsána algoritmičká struktura a omezující vlastnosti těchto metod. Pomocí praktického měření na testovacím standu získáme vibrační signál, který bude analyzován všemi zmíněnými průmyslovými diagnostickými metodami. Nakonec pomocí výpovědních schopností popsaných metod bude určeno, která z metod nejlépe určí stav testovaného valivého ložiska.

5.1 Statistické diagnostické metody

Statistické metody diagnostiky využívají pro výpočet své charakteristické veličiny pouze statistických vlastností naměřeného vibračního signálu tj. maximální, efektivní nebo střední hodnotu, rozptyl signálu, pravděpodobnostní rozdělení atd. Mezi statistické metody diagnostiky stavu valivých ložisek patří tyto metody:

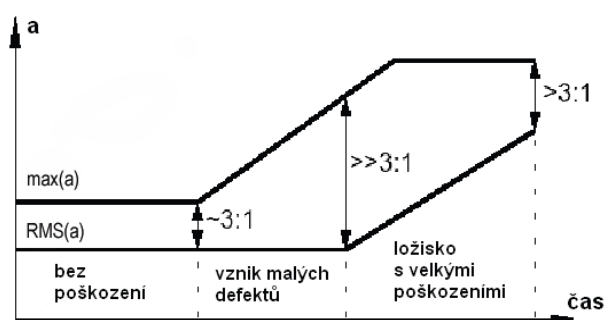
- Činitel výkmitu (Crest-factor)
- K-hodnota
- Kurtosis

5.1.1 Činitel výkmitu (Crest-factor)

Metoda činitele výkmitu je založena na faktu, že periodicky se opakující ráz, který vzniká poruchou valivých částí ložiska lze s postačujícím rozlišením vyhodnotit z výkmitu vibračního signálu. Činitel výkmitu C_f lze určit jako poměr maximální k efektivní hodnotě zrychlení $a(t)$ naměřeného vibračního signálu. Tento poměr se vyhodnocuje pro naměřený časový záznam vibrací ve frekvenčním pásmu s rozsahem 10 Hz až 10 kHz. [9]

$$C_f = \frac{\max[a(t)]}{RMS[a(t)]} [-]$$

Nárůst četnosti mechanických rázů vypovídá o zhoršujícím se stavu valivého ložiska. Efektivní hodnota vibračního signálu roste se zvyšující se četností rázů, hodnota maximálního výkmitu se přitom stabilizuje.



5.1: Metoda činitele výkmitu

Princip metody činitele výkmitu je použit například v přístrojích B&K 2513 firmy Brüel&Kjaer a VM15 firmy Metra Mess und Frequenztechnik.

U ložiska bez poškození nedochází ke změnám maximální a efektivní hodnoty měřeného zrychlení $a(t)$. Při vzniku prvních vad dochází vlivem odvalování ke generování mechanických rázů, hodnota maximálního výkmitu roste a efektivní hodnota se drží na konstantní úrovni. Dalším provozem ložiska s poruchou dochází k rozrůstání vad valivých ploch, hodnota maximálního výkmitu stále roste až do určité hodnoty a následně se ustálí. Jelikož jsou mechanické rázy při tomto poškození velmi intenzivní, dochází ke stálému růstu efektivní hodnoty měřeného zrychlení $a(t)$. Výsledné hodnocení stavu valivého ložiska v závislosti na hodnotě činitele výkmitu C_f je popsán následující tabulkou.

Stav ložiska	RMS(a)	max(a)	max(a)/RMS(a)	max(a).RMS(a)
bez poškození	malá	malá	~ 3	malý
počátek poškození	malá	zvýšená	> 3	lehce zvýšený
rozšiřující se poškození	zvýšená	zvýšená	> 3	středně zvýšený
velké poškození	zvýšená	velká	>> 3	zvýšený
ložisko před výměnou	velká	velká	> 3	velký

5.2: Hodnocení stavu ložiska

Metoda činitele poskytuje hrubý odhad stavu valivého ložiska, je velmi jednoduchá, laciná avšak méně přesná. Nelze přesně (číselně) určit aktuální stupeň opotřebení testovaného ložiska.

5.1.2 K-hodnota

Metoda K-hodnoty nebo také Metoda parametru $K(t)$ vychází z předpokladu znalosti efektivní a maximální hodnoty výkmitu měřeného zrychlení $a^*(t)$ nově osazeného valivého ložiska. Hodnota parametru K je definována následujícím vztahem.

$$K(t) = \frac{RMS[a^*(0)]max[a^*(0)]}{RMS[a(t)]max[a(t)]} [-]$$

Pro stanovení stavu ložiska byly určeny hranice parametru $K(t)$, které vycházejí z dlouholetých zkušeností a poznatků z praxe.



5.3: Příklad časového průběhu $K(t)$ parametru

$K(t)$	Stav ložiska
> 1	zlepšený
$1 - 0.2$	dobrý stav
$0.2 - 0.02$	vznikající poškození
< 0.02	nutná výměna ložiska

5.4: Hodnocení stavu valivého ložiska [1]

Metoda K-hodnoty je rychlá a jednoduchá diagnostická metoda, která však vyžaduje sledování provozních otáček analyzovaného zařízení z důvodu silné závislosti $K(t)$ parametru na otáčkách přístroje, ve kterém je umístěno valivé ložisko. Metoda umožňuje detekovat všechny druhy poškození valivých ložisek a nebylo nalezeno omezení její platnosti.

5.1.3 Kurtosis

Metoda Kurtosis není založena na zpracování maximální nebo RMS hodnoty naměřeného signálu. Pracuje na principu statistického procesu, založeného na rozdělení amplitud signálu. Charakteristickou veličinou metody Kurtosis je hodnota K .

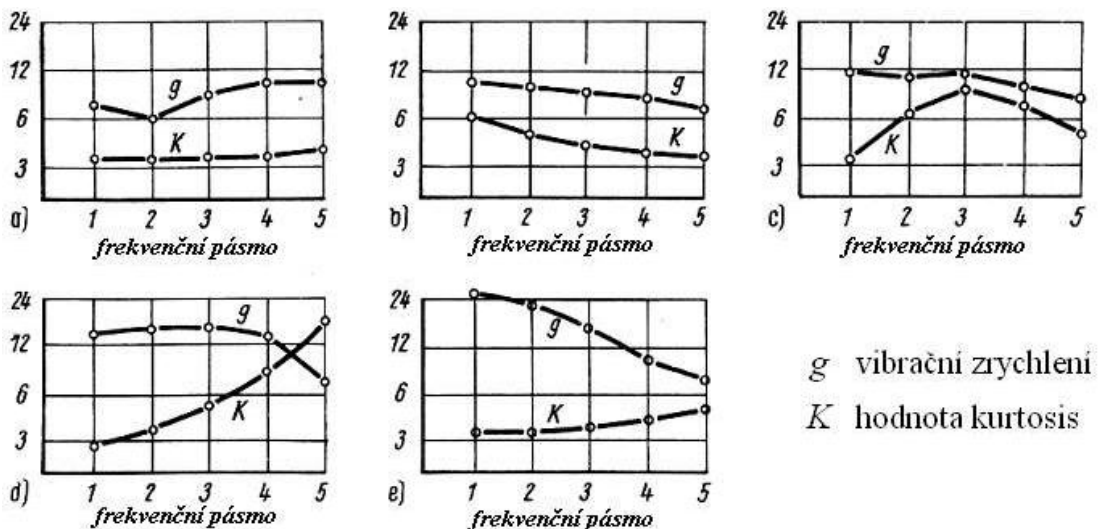
$$K = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (a(t) - \bar{a}(t))^4 p(a) da}{\sigma^4} [-]$$

- $a(t)$ měřené zrychlení vibrací akcelerometrem
- $\bar{a}(t)$ střední hodnota naměřeného vibračního signálu $a(t)$
- $p(a)$ hustota pravděpodobnosti rozdělení vibračního signálu $a(t)$
- σ směrodatná odchylka měřeného signálu $a(t)$

Nově osazené ložisko je generátorem stochastického kmitání, které má normální (Gaussovské) rozdělení pravděpodobnosti s K parametrem $K = 3$. Tuto hodnotu lze naměřit nezávisle na zatížení a otáčkách přístroje v širokém frekvenčním pásmu od 2,5 kHz do 80 kHz s odchylkami $\pm 8\%$. S rostoucím poškozením valivých drah ložiska roste parametr K na vyšších frekvencích, na nízkých frekvencích parametr K klesá zpět na hodnotu $K \approx 3$. Diagnostika stavu valivého ložiska se metodou Kurtosis určuje pomocí pěti frekvenčních pásem.

- 1. Pásmo 2,5 kHz – 5 kHz
- 2. Pásmo 5 kHz – 10 kHz
- 3. Pásmo 10 kHz – 20 kHz
- 4. Pásmo 20 kHz – 40 kHz
- 5. Pásmo 40 kHz – 80 kHz

Na vzniklá poškození valivých drah ložiska tj. vznik mechanických rázů a pulzního kmitání, reaguje metoda Kurtosis silným růstem parametru K . Metoda je velmi přesná pokud se poškození ložiska projevuje vysokými a úzkými pulzy v měřeném vibračním signálu.



5.5: Hodnocení stavu valivého ložiska

Provozní stavy valivého ložiska, viz předchozí obrázek

- Nepoškozené
- Začínající poškození
- Poškození s velkým plošným rozsahem
- Velké poškození s rizikem havárie
- Stav bezprostředně před havárií

5.2 Diagnostické metody využívající rezonanci snímače

Metody diagnostiky využívají zesílení měřeného signálu pomocí rezonanční frekvence použitého snímače (senzoru). Signál je povětšinou předzpracován pásmovou propustí ve frekvenčním pásmu rezonančního převýšení snímače. Předpokládá se, že v měřicím pásmu rezonančního převýšení se nevyskytují vibrační složky z jiných částí testovaného mechanismu nebo jeho okolí. Valivé ložisko pak bude hlavním zdrojem kmitání.

Diagnostické metody využívající rezonanci snímače

- Metoda rázových pulzů – SPM

5.2.1 Metoda rázových pulzů – SPM

Metoda SPM (Shock Pulse Method) byla vyvinuta pro diagnostiku rotačních strojů s jednoduchými valivými ložisky, jako jsou elektromotory, ventilátory, pumpy atd. Pracuje na principu analýzy mechanických pulzů, které vznikají narážením valivých elementů o poruchu (prasklinu, pitting) dráhy (vnitřní nebo vnější kroužek) během odvalování ložiska. V měřicím zařízení dochází k filtraci naměřeného signálu pásmovou propustí se střední frekvencí pásma v okolí rezonanční frekvence použitého snímače.

Nejčastěji se používají snímače s vlastní rezonanční frekvencí 36 kHz. Vlastní stav ložiska lze určit sledováním charakteristické veličiny tj. maximální hodnoty špičky impulsu (Shock Value) měřeného signálu. Nárůst této maximální hodnoty výkmitu poukazuje na počínající poškození (opotřebení) valivých drah ložiska. Prahová hodnota (Carpet Value) popisuje vibrační šum ložiska, nárůst této hodnoty nejčastěji poukazuje na problémy s mazáním. Pro zobrazení měřené hodnoty Shock Value (SV) metody SPM se nejčastěji používá logaritmické měřítko, charakteristická veličina je pak označována dB_m (maximum SV) a dB_c (Carpet). Měřicí technika je potom nazývána $dB_{SV} = \frac{dB_m}{dB_c}$.

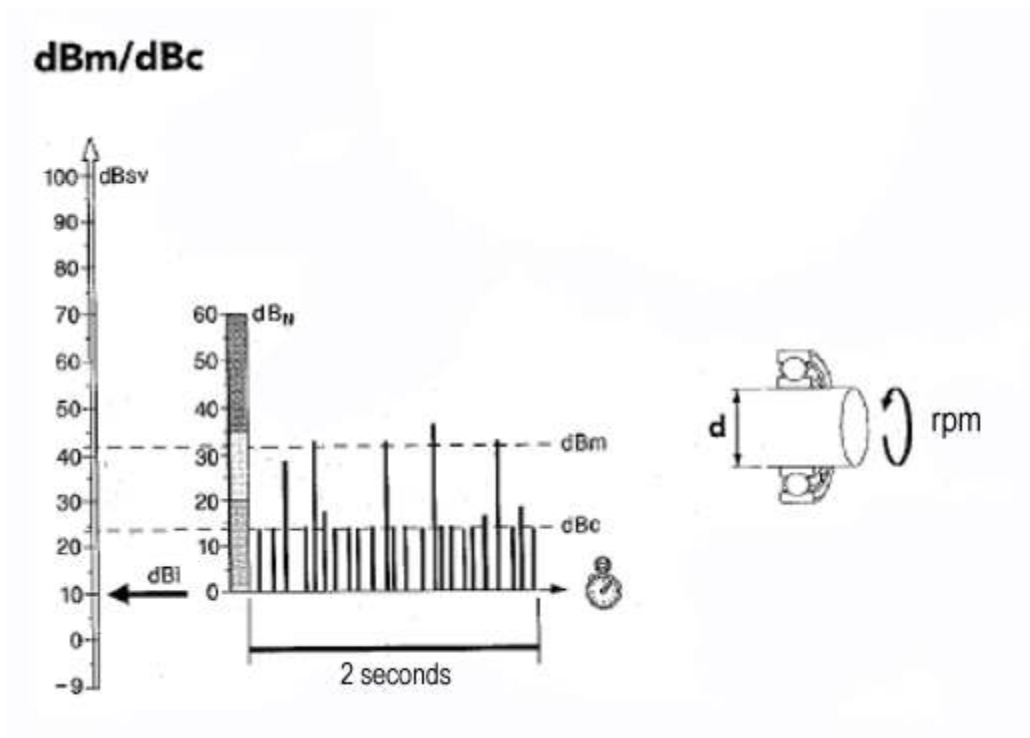
Tyto charakteristické veličiny dB_m, dB_c jsou velmi závislé na provozních parametrech daného ložiska tj. rychlosti rotace, útlumu signálu, kvalita mazání. Aby mohl být stav ložiska posuzován objektivně, je nutné provést normování pomocí naměřeného signálu na nově osazeném ložisku. Definice špičkové (SV) a prahové hodnoty (CV) se pak blíží svými vlastnostmi k činiteli výkmitu (Crest-factor). Normování vychází z průměru rotující hřídele s testovaným ložiskem (D) a provozních otáček (n). Pomocí těchto hodnot vypočítáme koeficient, kterým upravíme naměřený signál a získáme tak normovaný signál, viz následující vztah.

$$dB_N = dB_{SV} - dB_i$$

- dB_N Normovaná veličina SPM v decibelech
- dB_{SV} Hodnota naměřené veličiny dB_m/dB_c
- dB_i Počáteční hodnota veličiny nově osazeného a namazaného ložiska

Hodnotu dB_i lze vypočítat pomocí následujícího vztahu.

$$dB_i = 20(\log(n) + 0.6\log(D) - \log(2150))$$



5.6: Technika dB_m/dB_c

Z důvodu redukce naměřených dat a zjednodušení zobrazování je vstupní vibrační signál transformován do pravoúhlých impulzů (200 impulzů na jednu sekundu). Výška každého impulzu je rovna maximální hodnotě v pásmu měřeného signálu. Hodnota dB_m je velikost maximálního (nejvyššího) impulsu za čas jedna sekunda. Hodnota dB_c je průměrná hodnota impulsů za jednu sekundu. Ze získané hodnoty dB_N lze určit provozní stav valivého ložiska viz následující tabulka.

dB_N	Stav ložiska
0 - 20	dobrý stav
20 - 35	počátek poškození
> 35	špatný stav

5.7: Stav ložiska pomocí SPM

Metoda SPM je rychlá a přesná diagnostická metoda, pomocí které lze určit nejen stav, ale i mazání ložiska. Nutností je však znalost rozměrů ložiska a jeho pracovních otáček. Pro získání věrohodných výsledků je nutné správně směřovat měřící sondu a dodržovat podmínky měření (konstantní otáčky měřeného přístroje).

5.3 Diagnostické metody ve frekvenční oblasti

Diagnostické metody ve frekvenční oblasti zpracování signálu se opírají o základní techniky zpracování signálu, viz kapitola 4.3. Mezi tyto metody patří:

- Obálková analýza
- Kepstrální analýza

5.3.1 Obálková analýza

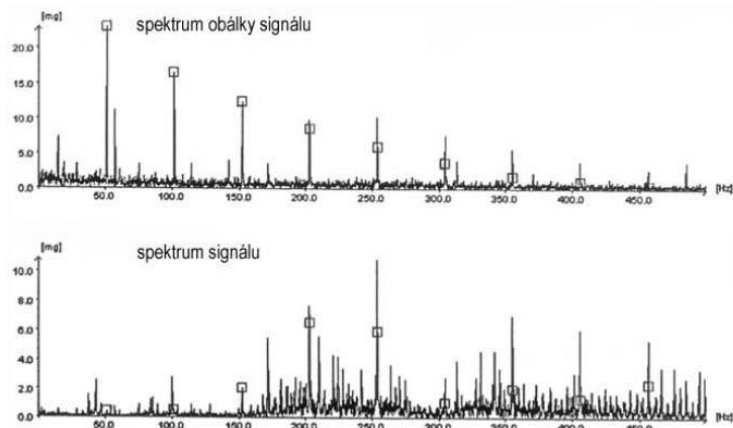
[9] Metodou Obálkové analýzy lze monitorovat stav ložiska pomocí měřeného vibračního signálu. Poškozené ložisko je silným generátorem rázových pulzů. Tyto pulzy jsou velmi krátké a tlumené, ale nesou důležitou informaci o stádiu poškození valivého ložiska. Jelikož se krátké pulzy nedají zpracovat přímou frekvenční analýzou, musí být použita Obálková analýza, která vytvoří kolem časového naměřeného signálu obálkovou křivku.

Naměřený signál se nejdříve filtruje horní propustí (pásmovou propustí) pro odstranění frekvencí související s otáčkami ložiska a dalších rušivých frekvencí. Po filtraci získáme signál obsahující pouze vysoké frekvence, které nesou informaci o rázových pulzech. V dalším kroku je signál usměrněn a dále filtrován dolní propustí. Tímto postupem odstraníme nosný signál rotujícího ložiska a výsledkem je obálka původního časového signálu. Výsledný signál obálky se dále analyzuje pomocí frekvenčního spektra aplikací FFT.



5.8: Měřicí řetězec Obálkové analýzy

Z frekvenčního spektra obálky lze odečíst opakující se frekvence impulzů, odpovídajících poruše vnějšího nebo vnitřního kroužku, valivých elementů nebo klece. Tyto frekvence lze určit z konstrukčního provedení testovaného ložiska, viz kapitola 3.4.1. Porovnáním těchto frekvencí lze určit kondici ložiska a případnou poruchu nějaké jeho části.



5.9: Příklad výstupu metody Obálkové analýzy

Pro vytvoření obálky lze použít Hilbertovu transformaci, viz kapitola 4.3.3.



5.10: Měřicí řetězec Obálkové analýzy s normováním a využitím Hilbertovy transformace

5.3.2 Kepstrální analýza

Metoda analýzy Kepstra (Kepstrální analýza) byla popsána v kapitole 4.3.2. Měřicí řetězec je popsán následujícím obrázkem.



5.11: Měřicí řetězec Kepstrální analýzy

Kepstrální analýza slouží k získání obrazu o periodicitě frekvenčního spektra analyzovaného signálu. Pro periodické spektrum signálu se vzdálenými harmonickými 50 Hz se v kepstrálním spektru objeví převýšení na kvefreci 2 ms . Aplikujeme princip Kepstrální analýzy na naměřený signál a zobrazíme kvefrence odpovídající frekvencím poruch jednotlivých částí ložiska (f_{FTF} , f_{BPFO} , f_{BPFI} , f_{BSF}). Podle těchto převýšení bude proveden odhad druh a rozsah vzniklé poruchy. [13]

5.4 Implementace popsaných metod

Zmíněné diagnostické metody budou implementovány do programového a výpočetního prostředí Matlab/Simulink v podobě funkcí (metod). Naměřený signál v digitální podobě bude analyzován těmito metodami. Výsledky metod budou vykresleny do společných 3D grafů, obsahující úroveň klasifikující aktuální stav valivého ložiska.

6 Speciální diagnostické metody

Tato kapitola bude zaměřena na dvě diagnostické metody stavu valivých ložisek, které se staly hlavním základem zadání této diplomové práce. Bude popsána jejich algoritmická struktura a diagnostické vlastnosti. Jedná se o tyto metody:

- ACMT
- PeakVue

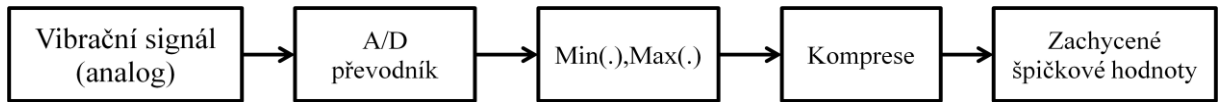
6.1 ACMT

[3] Diagnostická metoda ACMT (ADASH Compressed Time) byla vyvinuta firmou ADASH spol. s.r.o. Ostrava a je určena pro diagnostiku stavu valivých ložisek pomaloběžných strojů (papírenské stroje, válcovací tratě, transportní mechanismy, atd.). Zmíněnou metodu lze také použít na diagnostiku stavu zubových převodovek.

6.1.1 Princip metody ACMT

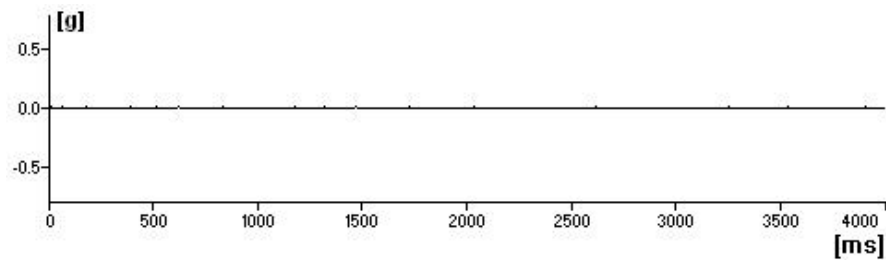
Metoda pracuje na principu měření četností rázových pulzů, které vznikají při odvalování poškozeného ložiska. Jelikož se jedná o pomaloběžné stroje, je nutné správně zvolit periodu vzorkování tak, aby bylo možné vzniklé rázové impulzy navzorkovat (detekovat) a zároveň určit jejich časový interval opakování.

ACMT dokáže vyhovět oběma požadavkům provedením dvojitého vzorkování měřeného signálu. Nejprve se provede vzorkování velkou vzorkovací frekvencí, aby byly zachyceny i velmi krátké děje. Poté se provede převzorkování do nízké vzorkovací frekvence spojené s kompresí dat.

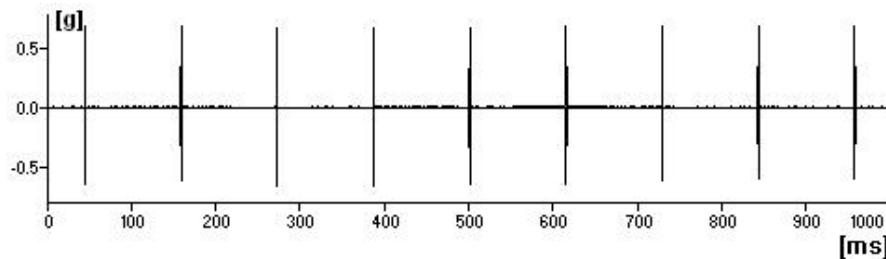


6.1: Měřicí řetězec ACMT

Kompresa dat je prováděna rozdělením naměřeného časového signálu do bloků nastavitelné délky. V každém bloku je nalezeno minimum a maximum výkmitu měřeného signálu, které následně charakterizuje celý blok.

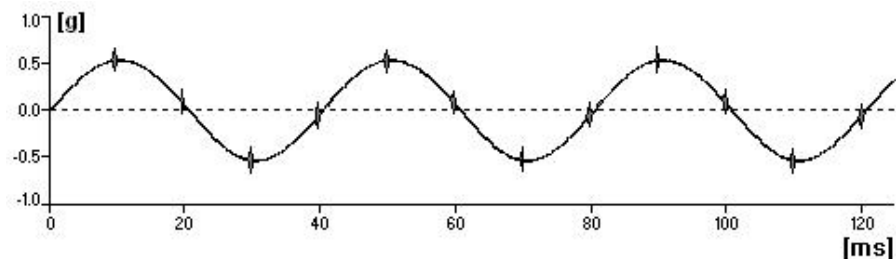


6.2: Příklad navzorkovaného signálu bez použití ACMT

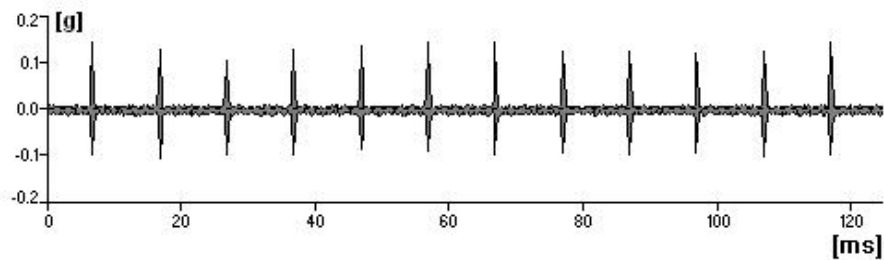


6.3: Použití ACMT pro stejný případ kmitavého signálu

Je-li měřený vibrační signál rázů modulován otáčkovou frekvencí rotoru stroje, lze správným nastavením parametru frekvenčního filtru tuto nosnou frekvenci odfiltrovat a získat tak následující, výsledný signál rázových pulzů, který se bude dále lépe zpracovávat.



6.4: Rázové impulzy modulované nosnou frekvencí rotoru



6.5: Odfiltrovaná nosná frekvence rotoru a zachycené rázy

6.2 PeakVue

[2] Diagnostická metoda PeakVue (Peak Values - špičkové hodnoty) byla vyvinuta firmou EMERSON a je určena k diagnostice stavu valivých ložisek rotačních strojů a zubových převodovek. Metoda je založená na analýze působení vlnového namáhání v kovových částech stroje. U točivých strojů se nejčastěji jedná o defekty točivých prvků ložisek a defekty spojových zubů převodovek, které přenášejí vlnění na povrch.

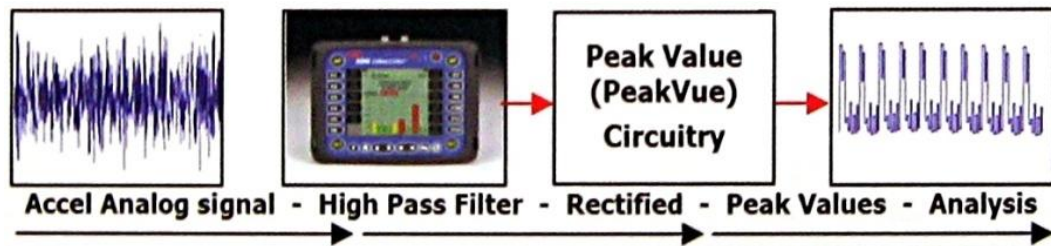
Parametry vlnového namáhání

- Amplituda jednotlivých událostí.
- Čas k detekci výskytu takové události.
- Doba, za kterou se tyto události opakují, vzhledem k rychlosti otáčení stroje.

6.2.1 Zpracování signálu metodou PeakVue

Vibrace stroje jsou snímány pomocí akcelerometru, jehož výstupní signál je přepočítáván na hodnoty zrychlení v g nebo hodnoty rychlosti, pokud je požadována. Měřicí obvod pro výpočet rychlosti z měřeného zrychlení používá analogový integrátor. Analogový signál získaný z akcelerometru (hodnoty g nebo rychlosti) je filtrován dolní propustí (LP) před vlastním převodem do digitální podoby. Pomocí filtrace jsou ze spektra naměřeného analogového signálu odstraněny vyšší harmonické složky tj. frekvence nad polovinou frekvence vzorkování (Nyquistova frekvence). Využívají se extrémně vysoké vzorkovací frekvence. Další částí zpracování signálu je rozdělení navzorkovaných dat podle délky do bloků. Délka bloků odpovídá hodnotě $2n$, kde n je celé číslo. Pro takto vytvořené bloky je pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) vypočítané spektrum. Spektrální analýza zde slouží k oddělení frekvenčních komponent otáčení diagnostikovaného stroje od komponent užitečného vibračního signálu. Kromě analýzy spektra signálu, metoda PeakVue obsahuje auto-korelační analýzu, kterou lze aplikovat na bloky naměřených digitálních dat. Tento druh analýzy slouží ke zviditelnění časového průběhu signálu v zašuměných datech.

Při analýze špičkových hodnot je na upravený digitální signál splňující podmínky vzorkování aplikována horní nebo pásmová propust. Získaný digitální blok dat obsahuje maximální absolutní hodnoty výkmitu signálu s časovým přírůstkem, viz perioda vzorkování, proto je tento typ analýzy nazýván analýzou špičkových hodnot. Analýza špičkových hodnot je zaměřena na posouzení získaných špičkových hodnot (charakteristická veličina) a na jejich periodicitě, kterou lze nejlépe určit spektrální analýzou.



6.6: Měřicí řetězec analýzy špičkových hodnot

Volba senzoru a jeho umístění

Metoda PeakVue používá pro snímání vibračního signálu klasické akcelerometry s minimální potřebnou odezvou 15 kHz s citlivostí 100 mV/g. Pokud chceme měřit vyšší amplitudu špiček o hodnotách $\pm 40 g$, je doporučeno zvolit akcelerometr s předepsanou citlivostí 10 mV/g.



6.7: Možnosti připevnění a umístění akcelerometru

Akcelerometr by měl být umístěn co nejbližší ke zdroji vlnového namáhání, zpravidla na ložiskovém krytu. Povrch, na kterém je umístěn snímač by měl být plochý, čistý a ideálně bez nátěru (kov na kov). Akcelerometr je nejlépe připevněn k testovanému zařízení pomocí oboustranného šroubu nebo pomocí magnetu ze vzácných zemin. Použití ruční sondy je při tomto druhu měření nevhodné.

6.2.2 Správné nastavení metody PeakVue

- **Šířka pásma F_{max}** - nejvyšší možná naměřená (navzorkovaná) poruchová frekvence. Pro valivá ložiska je vhodné toto pásmo nastavit na čtyřnásobek f_{BPFI} frekvence vad vnitřního kroužku ložiska nebo pokud tuto frekvenci neznáme lze jí nastavit jako horní rozsah zvoleného filtru.
- **Počet spektrálních čar** - nutno nastavit tak, aby naměřená data byla čitelná s možností určení nejnižší frekvence.
- **Počet vzorků (rozlišení) na blok dat** - vhodné nastavit tak, aby bylo zachyceno šest period nejnižší poruchové frekvence, což bývají poruchy ložiskové klece f_{FTF} průměrně $0.4 \cdot n$, kde n je počet otáček rotoru stroje. Počet vzorků lze také vypočítat viz následující vzorec.

$$\text{počet vzorků} = \text{počet otáček} \cdot F_{max}$$

- **Průměrování** - vhodné nastavit na hodnotu 1. Průměrováním získáme lepší poměr signál/šum při analýze spektra. Při průměrování 4 – 16 zredukujeme šum o 50 %.
- **Datové jednotky** - vhodné měřit časové průběhy a spektrum v hodnotách zrychlení.

Typical Set-ups for Rolling Element Bearing Fault Detection

RPM	Fmax	HP Filter	Min LOR	Avg	Magnet
0-750	4 x BPI	500 Hz	800	1	2-pole
750-1500	4 x BPI	500 or 1000 Hz	1600	1	Rare Earth
1500-3000	4 x BPI	1000 Hz	1600	1	Rare Earth
3000-4000	4 x BPI	2000 Hz	3200	1	Rare Earth

6.8: Příklady vhodného nastavení parametrů PeakVue metody

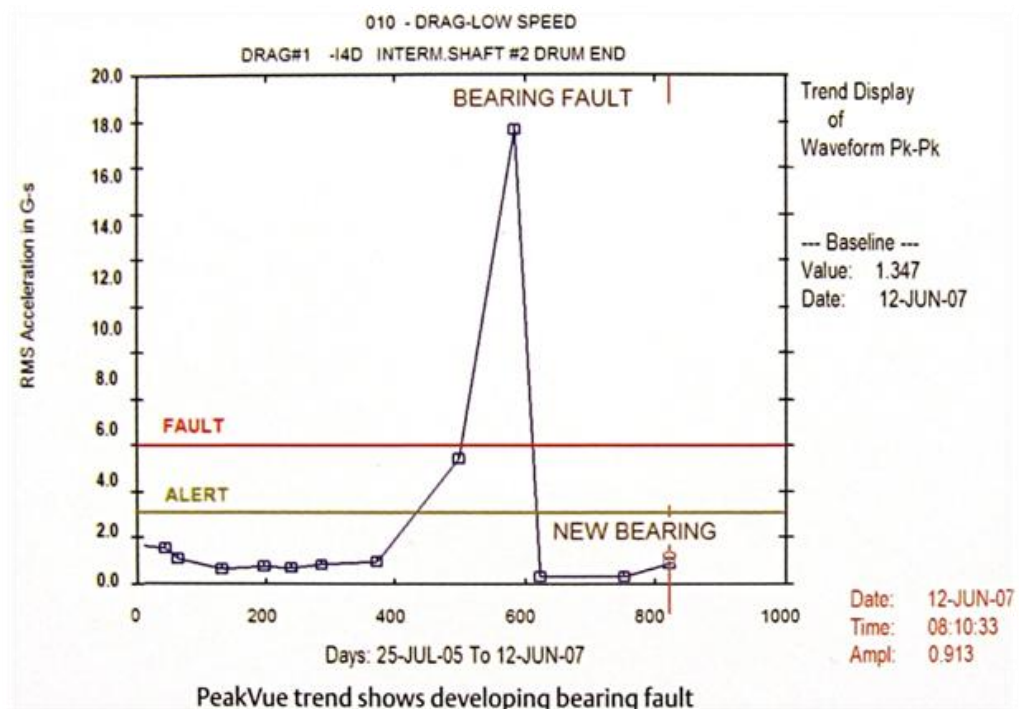
Selectable Filter Options

High Pass	Band Pass
500 Hz	20-150 Hz
1000 Hz	50-300 Hz
2000 Hz	100-600 Hz
5000 Hz	500-1000Hz
10,000 Hz	5.0-6.0 kHz
20,000 Hz	-

6.9: Příklady použití filtrů PeakVue metody

6.2.3 Stav valivého ložiska pomocí PeakVue

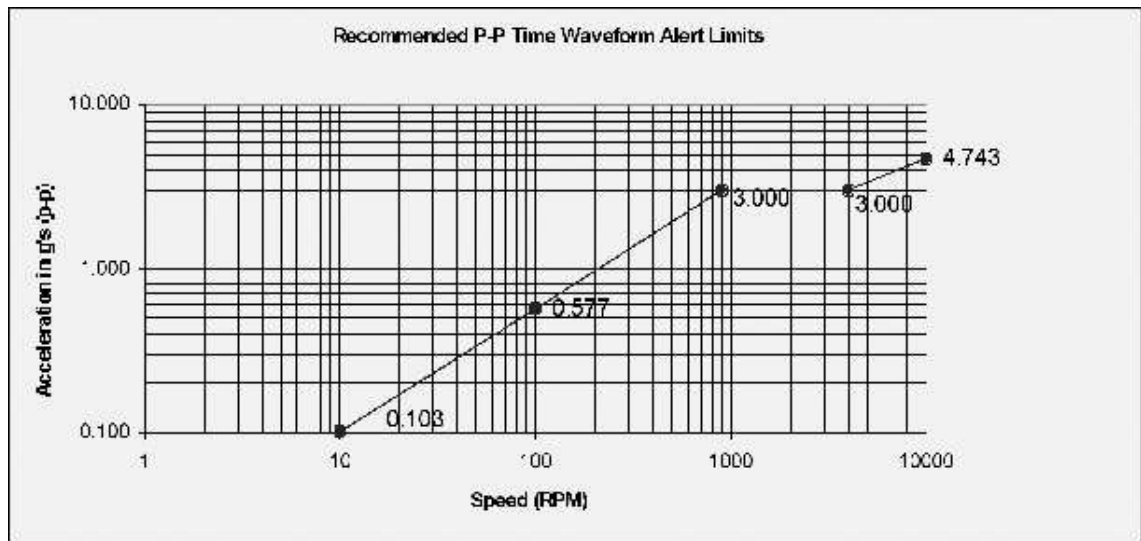
Diagnostická metoda PeakVue umožňuje stanovit stav valivého ložiska na základě sledování trendu špičkových hodnot a nastavitelný hladin dle otáček testovaného ložiska.



6.10: Příklad trendu PeakVue stavu valivého ložiska

Výpočet doporučených hodnot alarmů

[2] Hodnoty alarmů vycházejí ze sledování špičkových hodnot měřeného časového záznamu valivého ložiska nebo převodovky. Amplitudy špičkových hodnot jsou velmi citlivé na rychlost otáčení v rozsahu 10 ... 900 RPM dále 3000 ... 10 000 RPM. V rozsahu 900 ... 3000 RPM jsou amplitudy konstantní. Tabulkové hodnoty alarmů jsou určeny experimentálně a jsou definovány pro rozsahy otáček stroje 10 ... 10 000 RPM. Hodnoty alarmů v zobrazené tabulce lze považovat za orientační. Úrovně alarmů se mohou měnit pro specifické případy. Jelikož poruchy vnitřního kroužku jsou více tlumeny, než poruchy vnějšího kroužku, doporučuje se nastavit sledování hladin na poruchy vnitřní dráhy. Pokud je chyba identifikována jako porucha vnějšího kroužku, bude úroveň alarmu zvýšena o 2.0. Pro případ detekce poruchy valivých elementů je nutné zvýšit úroveň o 1.5.



6.11: Doporučené hodnoty výstrahy pro měřené špičkové hodnoty při dané rychlosti otáčení

Vyhodnocení stavu valivého ložiska probíhá pomocí PeakVue metody statistickým vyhodnocením. Pro věrohodná data je nutné provést vyhodnocení na dostatečném počtu testů. Je vhodné nastavit úroveň výstrahy na střední hodnotu statistiky + tři směrodatné odchylky. Úroveň alarmu poruchy se nastavuje jako dvojnásobek hodnoty úrovně výstrahy. Výpočty klasifikačních úrovní stavu testovaného ložiska jsou popsány následující tabulkou a jednoduchými příklady.

COMPONENT RPM	R.E. BEARING FAULTS		GEAR FAULTS	
	Inner Race, Cage or Rolling Element Fault	Outer Race Fault	Worn or Scored Teeth ³	Cracked Teeth ⁴ (Fully Loaded)
0-900	$Nominal\ Speed\ Alarm\ X\ \left(\frac{Actual\ RPM}{900}\right)^{0.75}$			
901-4000 (Nominal Speed)	3g	6g	3g	6g
4001-10,000	$Nominal\ Speed\ Alarm\ X\ \left(\frac{Actual\ RPM}{4000}\right)^{0.5}$			
10,001-UP	5g	10g	5g	10g

6.12: Poruchové hodnoty valivých ložisek a převodovek podle otáček stroje

Dojde-li k překročení poruchové hladiny, je technik odkázán na PeakVue spektrum, které napoví, k jakému druhu chyby mohlo dojít. Pokud jsou diagnostikována ložiska přesných strojů, např. obráběcích strojů, je nutné snížit hodnoty alarmů (výstrahy a poruchy) o faktor 2,0. Nastavení úrovně alarmů pro PeakVue porucha = dvojnásobek PeakVue výstraha.

Příklad nastavení úrovní alarmů

- Předpokládaná porucha vnějšího kroužku při 250 RPM.

$$PeakVue\ porucha = \left(\frac{250}{900}\right)^{0.75} \cdot 6g = 0.383 \cdot 6 = 2.6g$$

$$PeakVue\ výstraha = \frac{1}{2} \cdot PeakVue\ porucha = 1.3g$$

- Předpokládaná chyba vnitřního kroužku při 1793 RPM.

$$PeakVue\ porucha = 3g$$

$$PeakVue\ výstraha = \frac{1}{2} \cdot 3 = 1.5g$$

- Předpokládaná porucha vnitřního kroužku při 8000 RPM.

$$PeakVue\ porucha = \left(\frac{8000}{4000}\right)^{0.5} \cdot 3g = 1.414 \cdot 3 = 4.24g$$

$$PeakVue\ výstraha = \frac{1}{2} \cdot peakVue\ porucha = \frac{1}{2} \cdot 4.24 = 2.12g$$

7 Technické zázemí experimentu

Zmíněné diagnostické metody budou otestovány pomocí experimentálně naměřených dat, při stejných počátečních podmínkách prováděných experimentů. Budou porovnány jejich výpovědní schopnosti. Experiment provedeme na testovacím standu valivých ložisek.

7.1 Testovaná ložiska

Firma PROFESS poskytla pro potřeby testování diagnostických metod několik valivých ložisek stejného typu, tj. dvouřadá kuličková ložiska s výklopným vnějším kroužkem. Čtyři zcela nová ložiska s označením ZKL 1206 K (30x62x16). Jedno z nich bude použito pro stanovení referenčních vibrací nového ložiska, zbylá nová ložiska budou následně uměle poškozena modelářskou frézou. Další testované ložisko s označením 8гп3 111206 je provozně poškozeno a jeho technické specifikace odpovídají ostatním, novým ložiskům. Použitá testovaná ložiska budou vždy dostatečně lubrikována stejným plastickým mazivem MOGUL VL 2-3 (PND 22-053). Katalogový list popisující použitá ložiska ZKL 1206 K je umístěn v příloze.

Nové ložisko

Na novém ložisku je připevněno upínací pouzdro FBJ 206, které slouží k pevnému spojení ložisko – hřídel rotoru.



7.1: Nové ložisko ZKL 1206 K

Opotřebené ložisko

Poškozené ložisko je připevněno k rotující hřídeli pomocí upínacího pouzdra stejného typu. Poškození ložiska spočívá v deformaci nosné klece, viz následující obrázek. Valivé dráhy poškozeného ložiska nejeví známky výrazného provozního opotřebení. Vlivem deformace nosné klece valivých elementů dochází k nesouměrnému odvalování kuliček po vnitřním a vnějším kroužku. Díky tomuto poškození dochází při odvalování k mechanickým rázům (přeskakování kuliček).



7.2: Poškozené ložisko 8ГЛ3 111206

Uměle poškozené ložisko L0

Nové ložisko ZKL 1206 K je mechanicky poničeno pomocí modelářské frézky. Konkrétně je poškozen vnější kroužek testovaného ložiska. Vytvořené lehké poškození vnějšího valivé dráhy odpovídá skutečně vznikajícímu uvolňování materiálu tzv. Pittingu.





7.3: Uměle poškozené ložisko L0

Uměle poškozené ložisko L1

Poškození nového ložiska ZKL 1206 K je provedeno stejným způsobem jako u poškození L0. Na valivé dráze vnějšího kroužku je vytvořena hluboká rýha, viz následující obrázky.



7.4: Uměle poškozené ložisko L1

Uměle poškozené ložisko L2

Byly poškozeny valivé elementy nového ložiska ZKL 1206 K. Přesněji, je poškozen povrch třech sousedících kuliček. Povrch kuliček je obroušen a obsahuje náhodné vrypy, viz následující obrázky.



7.5: Uměle poškozené ložisko L2

Vibrační vlastnosti použitých ložisek

Pomocí konstrukčních rozměrů uvedených od výrobce použitých ložisek bude provedena úprava vzorců pro výpočet poruchových frekvencí ložisek.

Technické údaje použitých ložisek

- Frekvence otáčení (dle měření) f_N [Hz]
- Průměrná rozteč $D_u = 46$ mm
- Průměr valivého elementu $D_r = 8$ mm
- Počet valivých elementů $Z = 14$
- Provozní stykový úhel $\alpha_B = 25^\circ$

Frekvence poruch použitých ložisek

$$f_{FTF} = 0.5f_N(1 - 0.174\cos(25)) \text{ [Hz]}$$

$$f_{BPFO} = 7f_N(1 - 0.174\cos(25)) \text{ [Hz]}$$

$$f_{BPFI} = 7f_N(1 + 0.174\cos(25)) \text{ [Hz]}$$

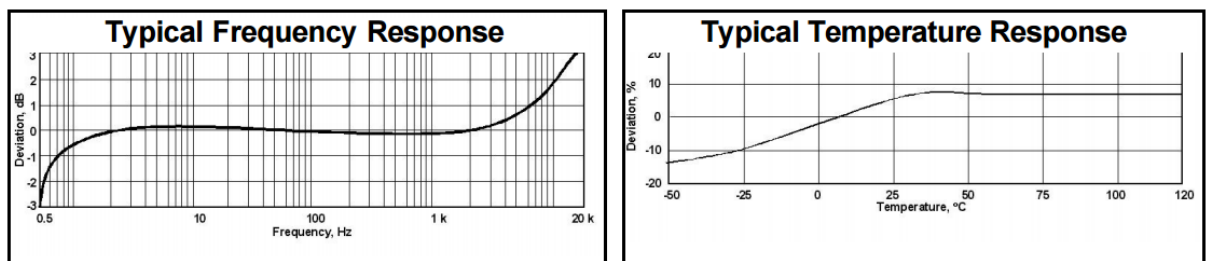
$$f_{BSF} = f_N 5.75 \left(1 - (0.174\cos(25))^2\right) \text{ [Hz]}$$

7.2 Použité snímače vibrací

Vibrace ložiska budou snímány pomocí absolutního snímače kmitavého pohybu (piezoelektrického akcelerometru). Měření bude prováděno vždy se stejným akcelerometrem s označením AC102-1A. Katalogový list použitého akcelerometru je uveden v příloze.



7.6: Použitý akcelerometr



7.7: Frekvenční charakteristika a závislost odchylky na teplotě použitého akcelerometru

Typ akcelerometrů

- | | |
|--------------------|---|
| • Sériové číslo | SN: 33429 |
| • Citlivost | 100 mV/g ($\pm 10\%$) |
| • Frekvenční pásmo | 0.5 – 15000Hz pro $\pm 3dB$
2.0 – 10000Hz pro $\pm 10\%$ |
| • Připevnění | oboustranný šroub |

7.3 Analyzátoři

Pro digitalizaci a úpravu naměřeného signálu budou použity dva analyzátoři vibračního signálu. ADASH 4400 - VA4 Pro a EMERSON CSI 2600. Oba dva přístroje byly kalibrovány, takže splňují podmínky věrohodného měření. Pomocí analyzátoru firmy ADASH bude otestována diagnostická metoda ACMT a pomocí analyzátoru firmy EMERSON bude otestována metoda PeakVue. Ostatní průmyslové diagnostické metody budou otestovány ve výpočetním prostředí Matlab/Simulink prostřednictvím vytvořených funkcí a naměřeného časového signálu z analyzátoru vibrací ADASH 4400 - VA4 Pro.



7.8: Analyzátor ADASH s příslušenstvím



7.9: Analyzátor EMERSON s příslušenstvím

7.4 Testovací stand

Vibrační experimenty budou prováděny na zapůjčeném testovacím standu ve firmě PPROFESS Plzeň. Testovacím zařízením bude simulován chod rotačního stroje v průmyslovém provozu.



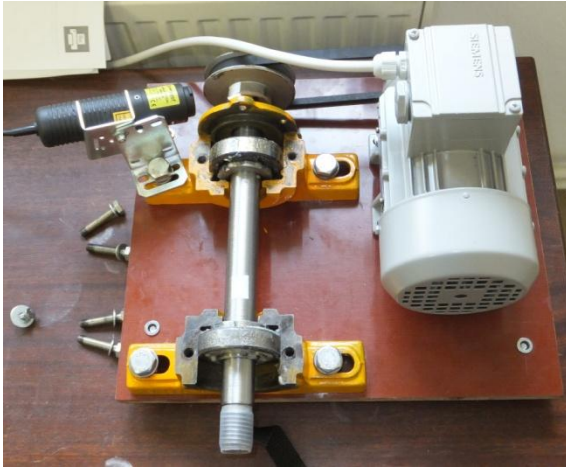
7.10: Testovací zařízení

Složení testovacího zařízení

- 1) Asynchronní elektrický motor SIEMENS UD 1107/1369144-001-3
- 2) Řemenová převodovka
- 3) Ložisková tělesa (SN 506 - 1) s instalovanými ložisky ZKL 1206 K, 8ГЛЗ 111206
- 4) Ocelová rotující hřídel o průměru 30 mm
- 5) Laserové odměřování fázové značky COMPACT VLS5/T/LSR
- 6) Použitý akcelerometr a CTC AC102 – A1
- 7) Frekvenční měnič ABB ACS150 – 01E – 09A8 – 2
- 8) Analyzátor ADASH VA4 Pro, popř. EMERSON CSI 2600

Popis testovacího standu

Pomocí frekvenčního měniče (7) budou nastavovány otáčky asynchronního elektromotoru (1) tak, aby měla rotující hřídel (4) upevněná v ložiskových tělesech (3) zvolené konstantní otáčky (nutno přepočítat přes převodový poměr řemenové převodovky). V ložiskovém tělese (3a) blíže k převodovce je instalováno zcela nové ložisko ZKL 1206 K, které je správně lubrikováno. V ložiskovém tělese (3b) na opačném konci rotující hřídele (4) je instalováno testované ložisko. Rychlost otáčení hřídele je snímána laserovým snímačem fázové značky (5) a získaný signál je vyhodnocen v měřícím analyzátoru (8). Vibrace testovaného ložiska umístěného v ložiskovém tělese (3) jsou snímány pomocí akcelerometru (6), tento signál je dále zpracováván v měřícím analyzátoru (8). Veškeré parametry měření vibrací (vzorkovací frekvence, frekvenční pásmo, délka záznamu, ...) se nastavují v analyzátoch vibrací (8). Měřené vibrace testovaného ložiska jsou snímány pouze ve vertikální ose (kolmé na osu rotace hřídele). Tímto způsobem (směrem) jsou nejčastěji měřeny vibrace v průmyslu.



7.11: Detailní pohled na testovací stand

Řemenová převodovka převádí točivý pohyb hřídele elektromotoru na otáčky hřídele s umístěnými ložisky v převodovém poměru do pomala.



7.12: Frekvenční měnič ABB a laserový snímač fázové značky

Způsob nastavení otáček hřídele s ložisky

Otáčky celého rotačního mechanismu se nastavují pomocí potenciometru na panelu frekvenčního měniče. Informace o a nastavení aktuální otáčkové frekvence je zobrazena na displeji. Pokud žádáme, aby měla hřídel s ložisky konstantní zvolené otáčky, je nutné nastavovanou rychlost otáčení motoru přepočítat pomocí převodového poměru řemenové převodovky. Frekvenční měnič neobsahuje regulátor otáček hřídele motoru, tudíž není 100% zaručené, že hřídel elektromotoru má přesnou hodnotu rychlosti otáčení. Pro určení přesných otáček hřídele s ložisky je testovací stand vybaven laserový snímačem měření fázové značky. Na řemenici je umístěn reflexní proužek plnící funkci fázové značky. Přesně nastavené otáčky jsou důležitým faktorem pro výpočet a určení poruchových frekvencí ložiska.

8 Experimenty

Pomocí popsaného testovacího standu a poskytnutých valivých ložisek provedeme experimentální měření absolutních vibrací. Měření bude provedeno ve firmě PROFESS vždy se snahou docílit ideálních podmínek experimentu, tj. přesné umístění a dotažení testovaného ložiska, shodná úroveň lubrikace, konstantní pokojová teplota. Vibrace budou měřeny při provozní teplotě, tj. testovací stand necháme alespoň 10 minut v chodu na zvolených konstantních otáčkách, aby došlo k tepelnému přizpůsobení maziva a valivých částí ložiska. Skutečnost, že došlo k tepelnému přizpůsobení maziva a valivých částí ložiska otestujeme pomocí infračerveného teploměru FLIR TG165 umožňující zaznamenat termovizní snímek měřeného okolí. Přesnost bezkontaktního měření teploty je $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ pro rozsah teplot 0°C až 380°C .

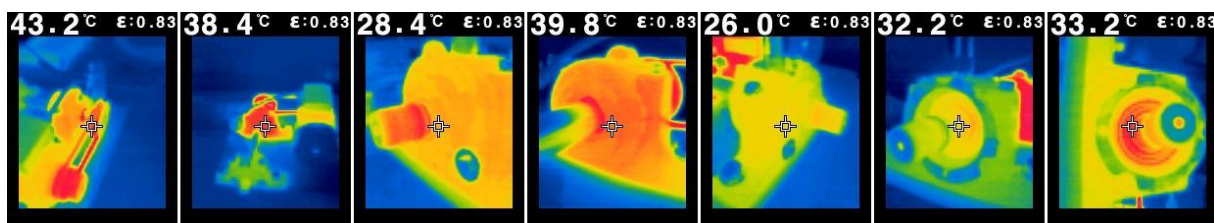
Experimenty budou prováděny při různých provozních otáčkách hřídele s ložisky v rozmezí od $200\text{ ot}/\text{min}$ (dále ot/min odpovídá RPM) do 3000 RPM s krokem 200 RPM tj. Stupnice1. V případě testované metody ACMT, která je zaměřena na pomaloběžné stroje použijeme spodní hranici otáček na 100 RPM a krok 20 RPM do 380 RPM tj. Stupnice2. V obou případech získáme pro jedno testované ložisko balík naměřených dat s patnácti časovými průběhy. Délka jednoho měřeného časového průběhu bude nastavena na jednu minutu. Pro přesné nastavení otáček je nutné určit poměr řemenové převodovky, tento poměr určíme experimentálně.

Budou provedeny tyto experimenty

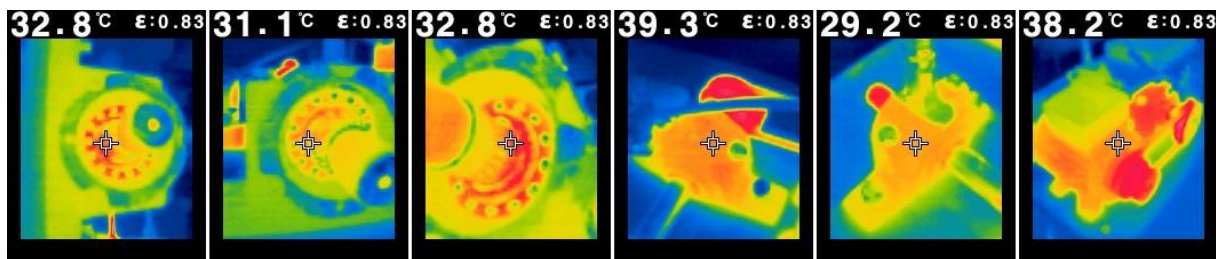
- Určení převodního poměru převodovky.
- Měření vibrací na novém ložisku ZKL 1206 K.
- Měření vibrací na opotřebeném ložisku 8гп3 111206.
- Měření vibrací na uměle mechanicky poškozených ložiscích ZKL 1206 K.

8.1 Provozní teplota testovacího zařízení

Pro stanovení provozní teploty testovacího standu bude provedeno experimentální měření vyzařované tepelné energie pomocí infračerveného teploměru FLIR TG 156. Testovací stand s připevněným poškozeným ložiskem 8гп3 111206 v ložiskovém tělese bude uveden do pracovního stavu při otáčkách 2000 RPM po minimální dobu 30 minut. Během tohoto procesu dojde k ohřátí a tepelnému přizpůsobení všech kluzných částí testovacího soustrojí. Po uplynutí stanoveného časového intervalu bude provedeno měření teploty celého zařízení pomocí infračerveného teploměru.



8.1: Měřené teploty testovacího standu za provozu



8.2: Měření teploty testovacího standu po uvedení do klidu

Ze zobrazených termovizních záznamů je zřetelně vidět intenzita a pozice uvolňovaného tepla. Kříž na jednotlivých snímcích označuje uvažované místo měření teploty. Hodnota měřené teploty může z důvodu různé odrazivosti povrchu kolísat, proto je tato informace spíše odhadem skutečné teploty v daném místě, viz tolerance měřícího zařízení $\pm 1,5^\circ\text{C}$.

Pokud se zaměříme na teploty valivých částí měřeného ložiska, dospějeme k následujícímu závěru. Vlivem tření dochází k zahřívání řemenové převodovky zhruba na 42°C , ložiskové těleso (3a) se vlivem namáhání způsobené správným natažením řemene ohřívá na teplotu cca. 40°C . Nejdůležitější informací je však pracovní teplota testovaného (správně lubrikovaného) ložiska v ložiskovém tělese, která činí průměrně 33°C při otáčení hřídele 2000 RPM . Během vlastního měření vibrací se budeme pohybovat okolo této teploty. Před započítím každého měření tento údaj kontrolně změříme.

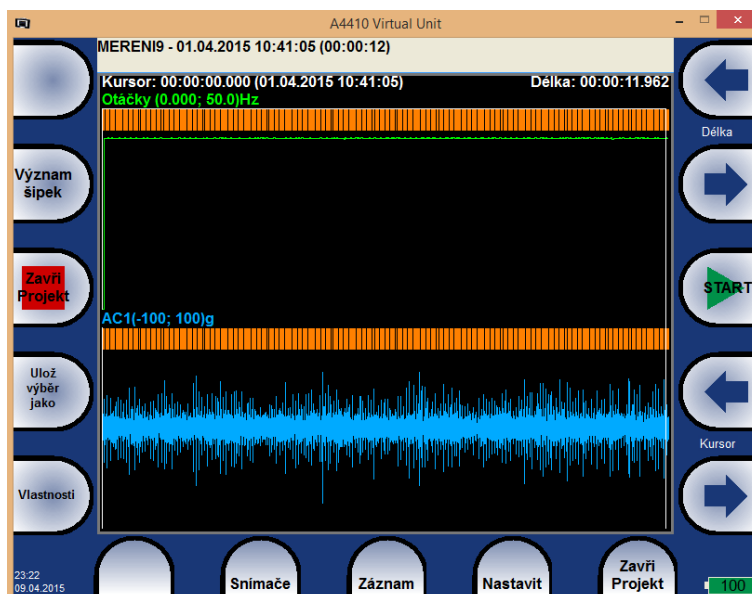
8.2 Měření vibrací a zpracování naměřených dat

Před vlastním započítím měření vibrací valivého ložiska je nutno stanovit způsob a přesný postup experimentálního měření. Měření bude provedeno vždy stejným způsobem, při stejných počátečních podmínkách. Naměřený signál je nutné vhodně exportovat tak, aby byl zpětně rekonstruovatelný a mohl sloužit k určení aktuálního stavu testovaného ložiska.

8.2.1 Měření vibrací

[4] Vlastní experimentální měření vibrací a otáček hřídele bude provedeno pomocí analyzátoru ADASH VA4Pro. Toto zařízení dokáže v módu Recorder zaznamenat libovolně dlouhý časový průběh vibračního signálu (měřené zrychlení) se zvolenou vzorkovací frekvencí, exportovat záznam do formátu wav a uložit na interní disk. Takto uložený záznam na VA4_DISC lze prostřednictvím sériové komunikace USB zkopírovat do PC a následně načíst do programového prostředí Matlab, ve kterém bude provedena analýza naměřených vibrací. Při měření časového záznamu vibrací bude použita maximální možná vzorkovací frekvence, kterou měřící analyzátor podporuje tj. $f_{vz} = 196608\text{ Hz}$.

Analyzátor EMERSON CSI 2600 nebude použit pro veškeré experimentální měření pro jeho složitou obsluhu a časově náročné měření vlastního průběhu vibračního signálu. Toto zařízení bude použito pouze pro ověření správně naprogramované funkce metody PeakVue v Matlabu. Ověření provedeme porovnávací metodou při shodně nastavených parametrech v následující kapitole.



8.3: Příklad naměřeného vibračního signálu pomocí VA4 Recorderu.

8.2.2 Analýza naměřených dat

Pomocí programového prostředí Matlab implementujeme zmíněné diagnostické metody v podobě funkcí. Naměřená data budou načtena základním programem, který tento balík dat (ve formátu wav) přepočítá na skutečné hodnoty zrychlení v hodnotách g. Následně vyvolá jednotlivé funkce diagnostických metod a vykreslí průběhy jejich charakteristických veličin. Pomocí charakteristických veličin určíme aktuální stav valivého ložiska.

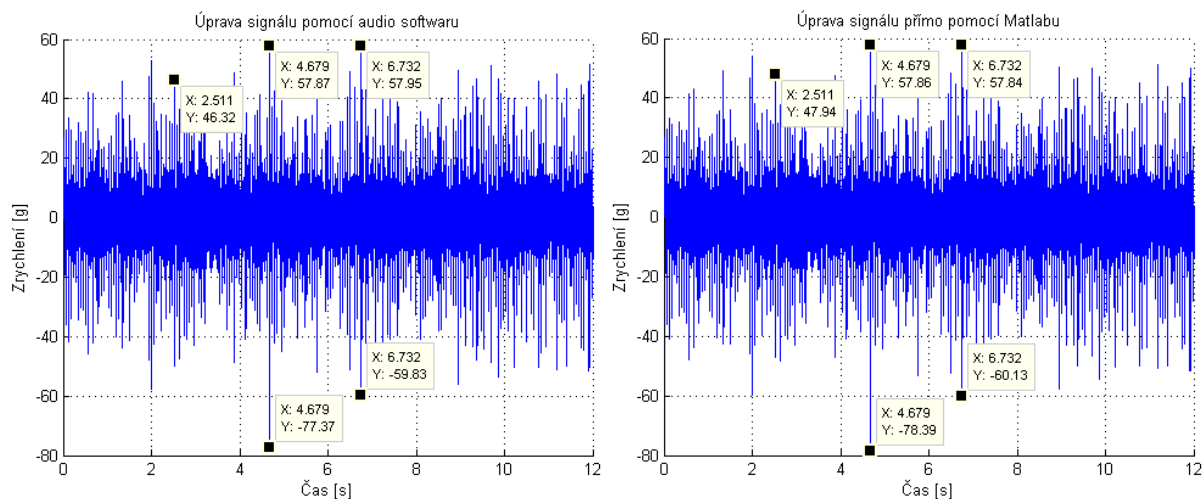
Zpracování naměřených dat

Naměřená data ve formátu wav nelze přímo načíst do programového prostředí Matlab. Zvukovou stopu je nutné nejdříve převést do použitelného formátu. Tento převod lze provést pomocí dvou způsobů.

- Úprava signálu v audio softwaru např. zvolený Adobe Audition.
- Úprava signálu přímo v programovém prostředí Matlab.

Při použití první varianty (audio software) je nutné naměřený signál převzorkovat ze vzorkovací frekvence $f_{vz} = 196609 \text{ Hz}$ do nižší maximálně dosažitelné frekvence softwaru $f_{vzN} = 192000 \text{ Hz}$. Touto úpravou získáme čitelný signál pro prostředí Matlab, ale ztratíme důležitou informaci o vyšších frekvencích v naměřeném signálu.

Použitím druhé varianty lze získat signál se shodnou vzorkovací frekvencí. Jelikož nedochází ke ztrátě informace ve frekvenčním spektru (není nutné provést převzorkování), která je v tomto případě měření velmi důležitá. Použijeme tento způsob úpravy naměřeného signálu.



8.4: Porovnání úprav naměřeného signálu.

Výše uvedené časové záznamy popisují 12 sekund trvající měření experimentálních vibrací. Záznamy slouží pro porovnání možných způsobů převodu (úpravy) signálu do skutečných měřených hodnot zrychlení v hodnotách g. Na každém průběhu je znázorněno 5 bodů, sloužících pro porovnání aktuální amplitudy zrychlení. Jak je vidět mezi hodnotami amplitud ve stejných časových okamžicích jsou nezanedbatelné odchylky. Rozdíly lze odůvodnit převzorkováním naměřeného signálu (ve formátu wav) na nižší vzorkovací frekvenci v audio softwaru Adobe Audition. Tento fakt je spolu s větší časovou náročností přípravy dat důkazem, že není vhodné používat audio software Adobe Audition pro úpravu vibračního signálu.

8.2.3 Zobrazení a označení naměřených vibračních signálů

Naměřené časové záznamy vibrací budou vykresleny pro názornost do jednoho společného grafu složeného z prvních dvousekundových úseků jednotlivých naměřených časových záznamů (při určitých otáčkách) z balíku dat. Jednotlivé naměřené časové záznamy jsou barevně odlišeny (barevná stupnice) a odděleny černými čarami. Postup měření při daných otáčkách odpovídá směru zleva doprava tj. průběh vlevo nejnižší otáčky a průběh vpravo nejvyšší otáčky pro danou stupnici (Stupnice1, Stupnice2).

Pro lepší přehled v naměřených datech budou označeny jednotlivé balíky dat čísly s následujícím pořadím.

- | | |
|-------------------------------------|-------------|
| • Nové ložisko, lubrikované | Měření č. 1 |
| • Nové ložisko, suché | Měření č. 2 |
| • Opatřené ložisko, lubrikované | Měření č. 3 |
| • Opatřené ložisko, suché | Měření č. 4 |
| • Poškozené ložisko L0, lubrikované | Měření č. 5 |
| • Poškozené ložisko L1, lubrikované | Měření č. 6 |
| • Poškozené ložisko L2, lubrikované | Měření č. 7 |

Jelikož při měření vibrací jsou použity dvě stupnice nastavovaných otáček (Stupnice1, Stupnice2), číslování naměřených balíků dále rozvětvíme na části *a* odpovídající Stupnici1 a *b* pro Stupnici2.

8.3 Převodní poměr řemenové převodovky

Pro správné nastavení otáček hřídele s připevněnými ložisky umístěnými v ložiskových tělesech je nutné znát převodní poměr řemenového převodu. Při určování převodu je nutné zahrnout v potaz možné náhodné prokluzování řemene, tření řemen – řemenice a nepřítomnost zpětnovazebního řízení otáček elektromotoru při zatížení. Měření bude provedeno při daných konstantních otáčkách elektromotoru pomocí frekvenčního měniče (otáčková frekvence v *Hz*) s odečítáním hodnoty otáček hřídele pomocí analyzátoru ADASH VA4Pro. Měření bude provedeno pro pět případů nastavených otáček elektromotoru. Následně bude vypočítán převodní poměr pro každou úroveň otáček. Tyto poměry budou zprůměrovány, viz následující tabulka.

N motoru [Hz]	N hřídele [RPM]	N hřídele [Hz]	Převodní poměr [-]
10	499	8,3	0,83
20	1015	16,9	0,85
30	1538	25,6	0,85
40	2059	34,3	0,86
50	2572	42,9	0,86
60	3079	51,3	0,86
			0,85

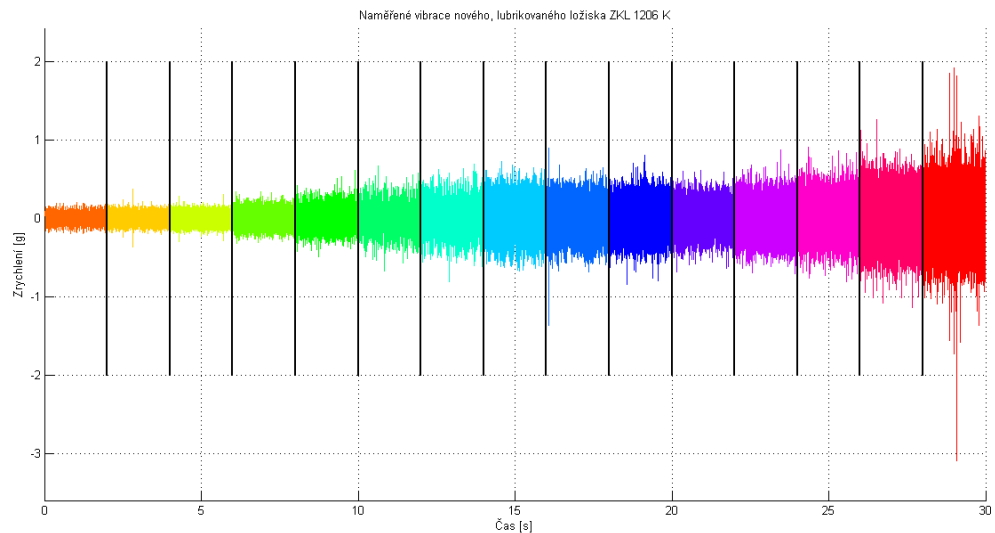
Řemenová převodovka má převod do pomala s poměrem otáček 1:0,85. Dalším možným způsobem určení tohoto poměru je pomocí měření konstrukčního provedení tj. změření vnitřního průměru hnací a hnané řemenice. Tento přístup k problému je založen na ideálním předpokladu převodu otáček frekvenční měnič-elektromotor, bez působení tření a prokluzu řemene. V našem případě není tento přístup vhodný z hlediska přesnosti.

Experimentálně bylo zjištěno, že nejlepším způsobem jak přesně nastavit otáčky rotující hřídele s ložisky je postupné jemné doladování otáčkové frekvence elektromotoru generované frekvenčním měničem. Pro sledování aktuálních otáček je použit analyzátor ADASH VA4Pro v módu Analyzer (zle zobrazit otáčky v hodnotách *RPM, Hz*).

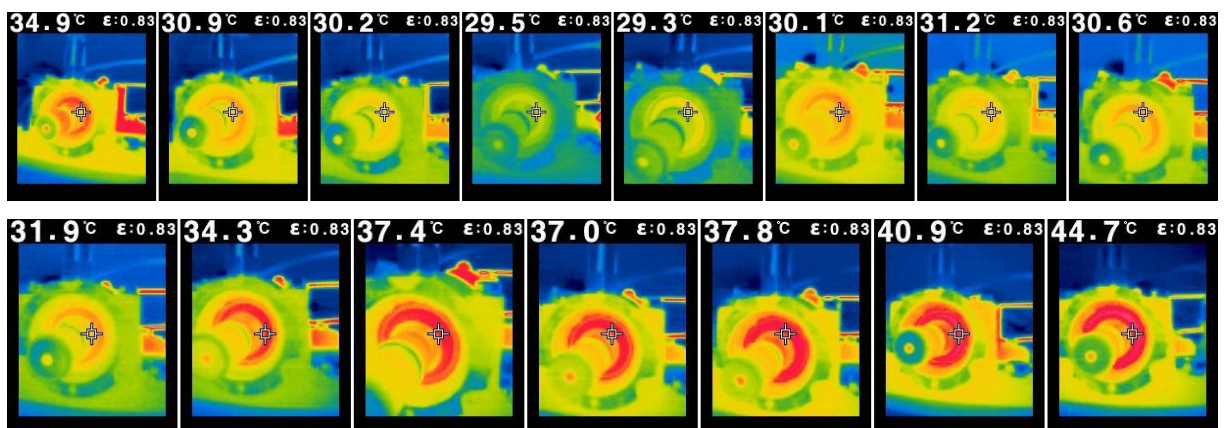
8.4 Měření vibrací na novém ložisku ZKL 1206 K

Experimentální měření na novém ložisku bude provedeno dle zadaného postupu s tepelným přizpůsobením.

Nové lubrikované ložisko (Stupnice1)

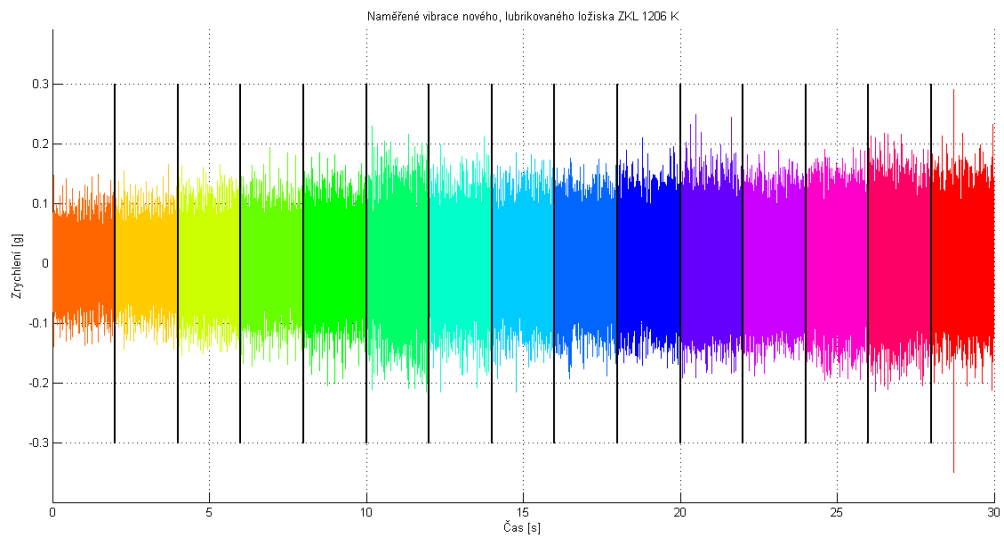


8.5: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 1(a)

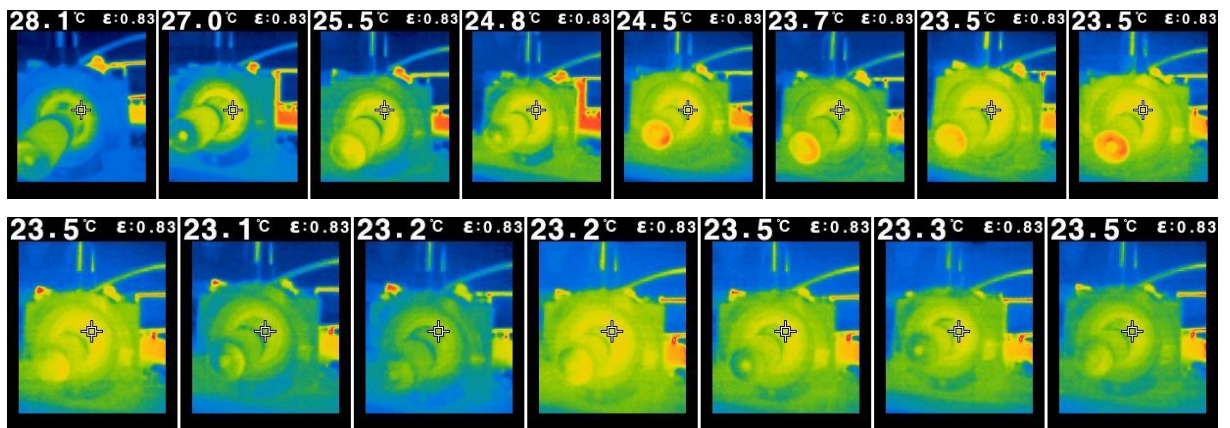


8.6: Tepelné přizpůsobení měření č. 1(a)

Nové lubrikované ložisko (Stupnice2)

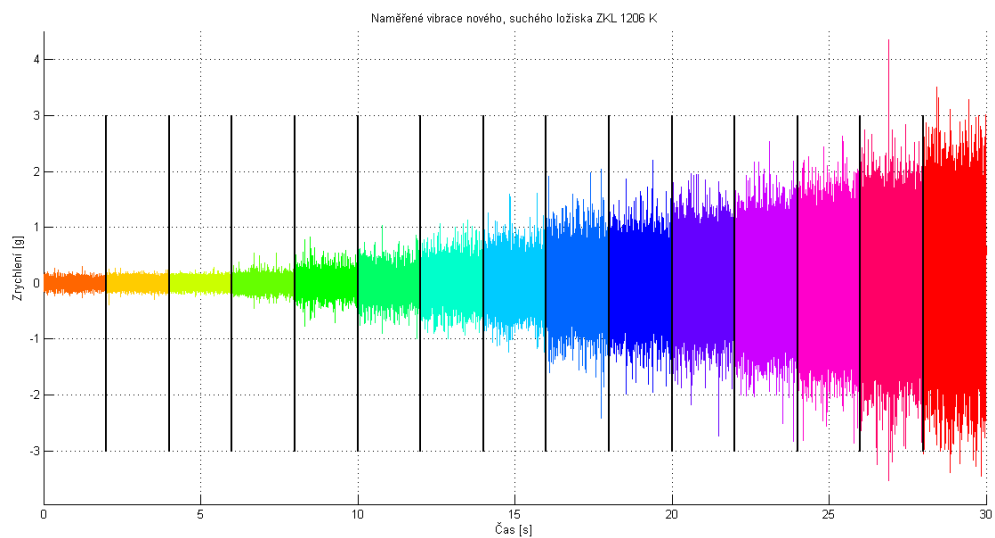


8.7: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 1(b)

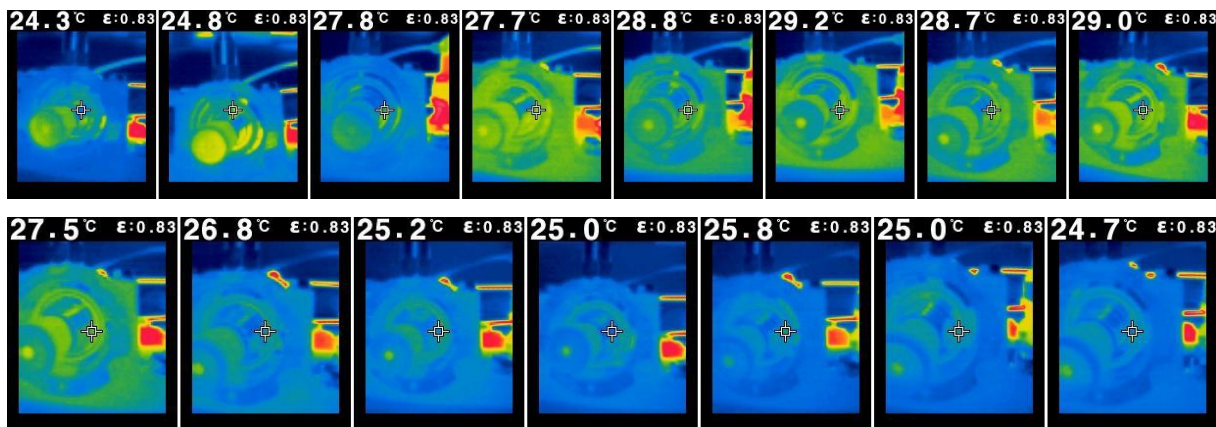


8.8: Tepelné přizpůsobení měření č. 1(b)

Nové suché ložisko (Stupnice1)

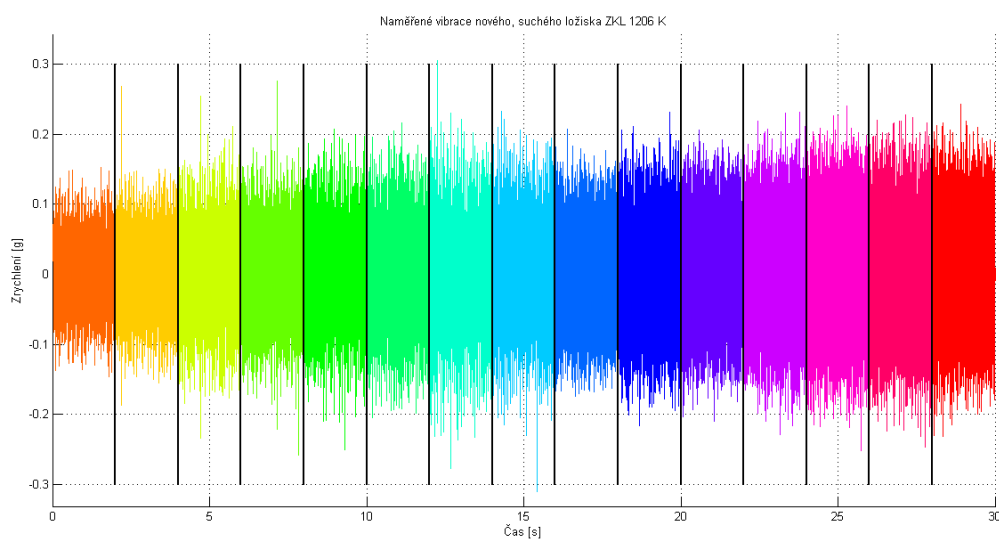


8.9: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 2(a)

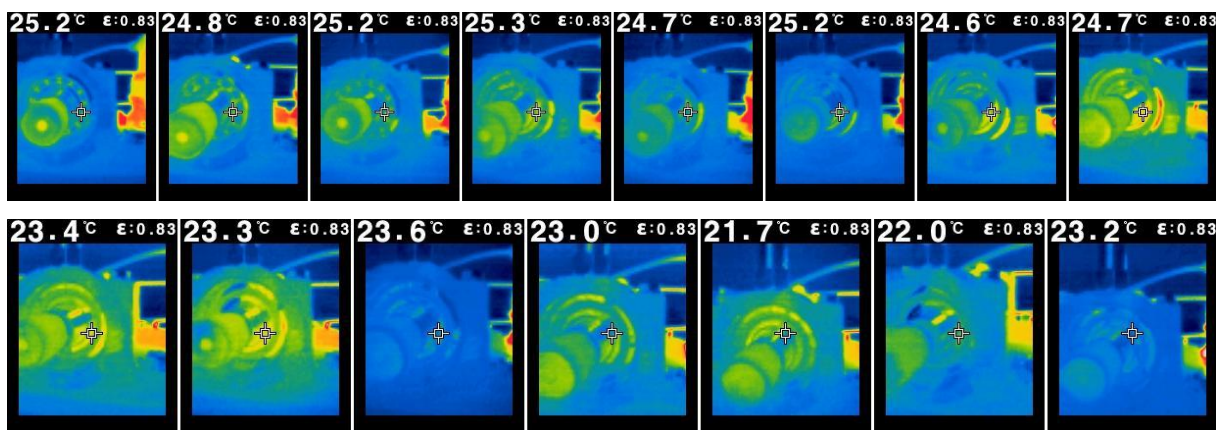


8.10: Tepelné přizpůsobení měření č. 2(a)

Nové suché ložisko (Stupnice2)



8.11: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 2(b)



8.12: Tepelné přizpůsobení měření č. 2(b)

Zhodnocení provedeného měření

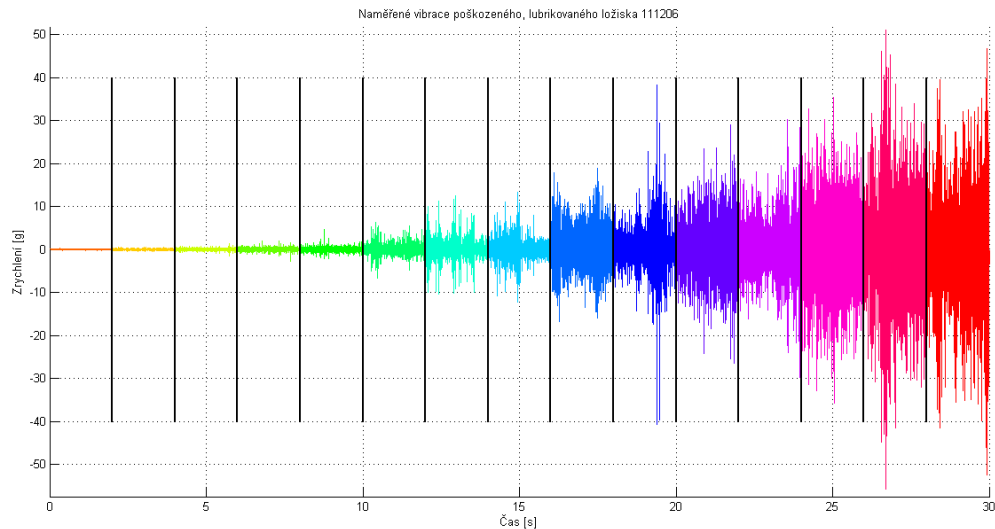
Pokud porovnáme zobrazené časové záznamy naměřených vibrací, je zřetelně vidět, že v lubrikovaném stavu ložisko emituje vibrace s maximální hodnotou špičky cca. 3g. U suchého ložiska je úroveň maximálního výkmitu špičky zhruba ve stejné úrovni.

Pokud se zaměříme na telené přizpůsobení během měření, zjistíme, že se ložisko v lubrikovaném stavu mnohem více zahřívá, než v suchém stavu. Zvýšení pracovní teploty lubrikovaného ložiska během měření je způsobeno adhezními vlastnostmi použitého maziva.

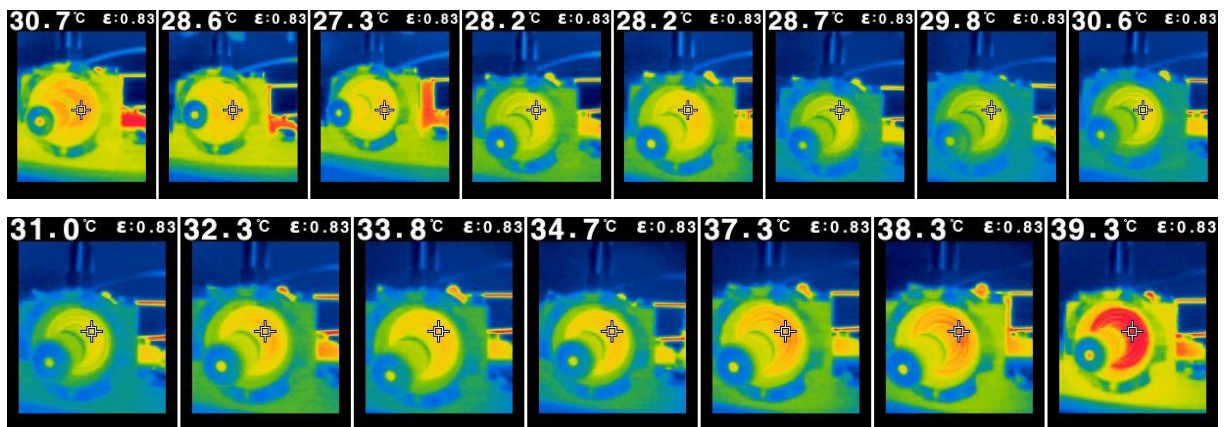
8.5 Měření vibrací na opotřebeném ložisku 8ГЛ3 111206

Experimentální měření na opotřebeném ložisku bude provedeno dle zadaného postupu s tepelným přizpůsobením.

Opotřebené lubrikované ložisko (Stupnice1)

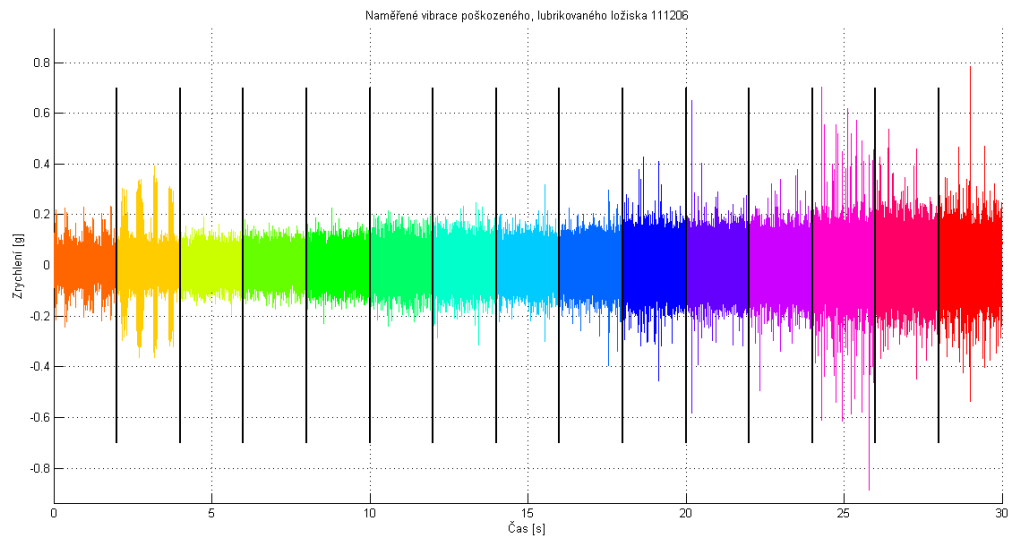


8.13: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 3(a)

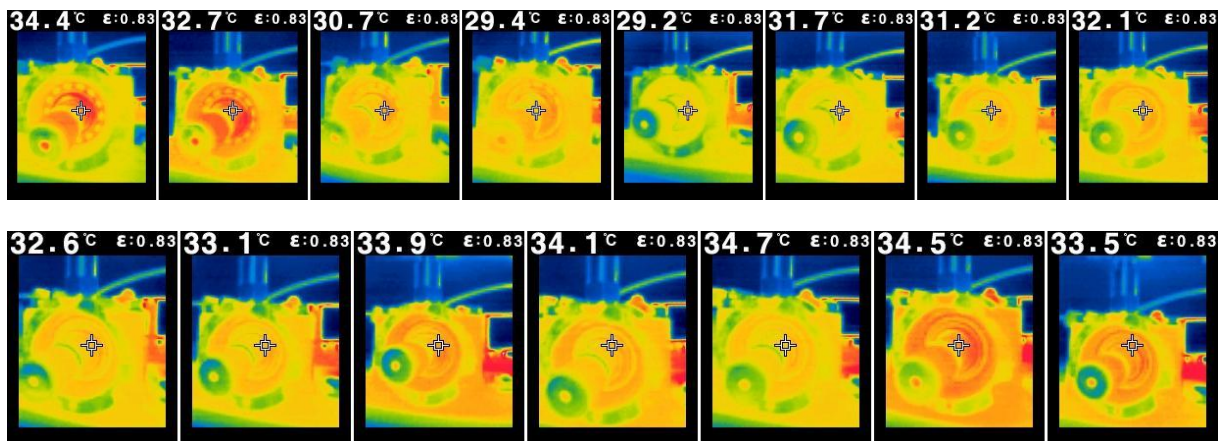


8.14: Tepelné přizpůsobení měření č. 3(a)

Opotřebené lubrikované ložisko (Stupnice2)

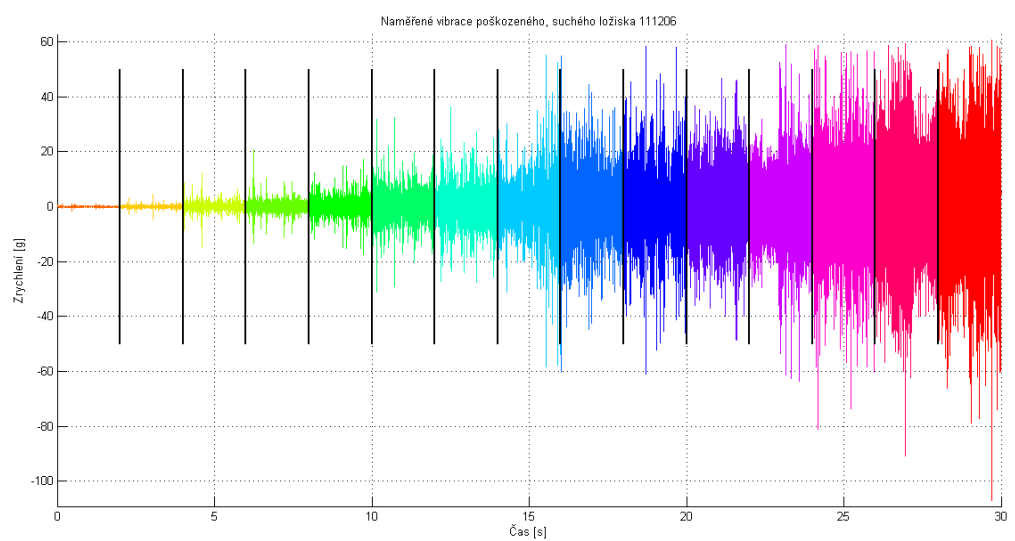


8.15: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 3(b)

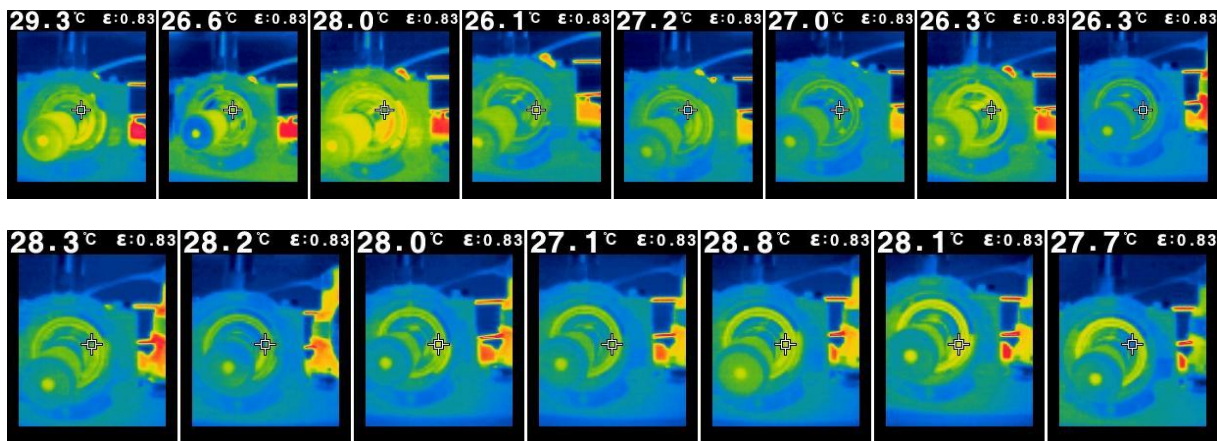


8.16: Tepelné přizpůsobení měření č. 3(b)

Opotřebené suché ložisko (Stupnice1)

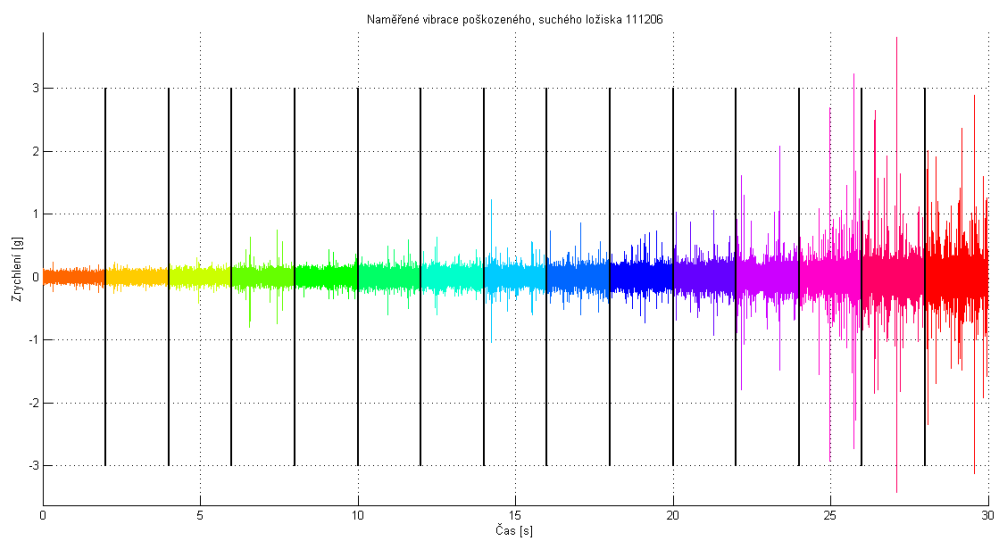


8.17: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 4(a)

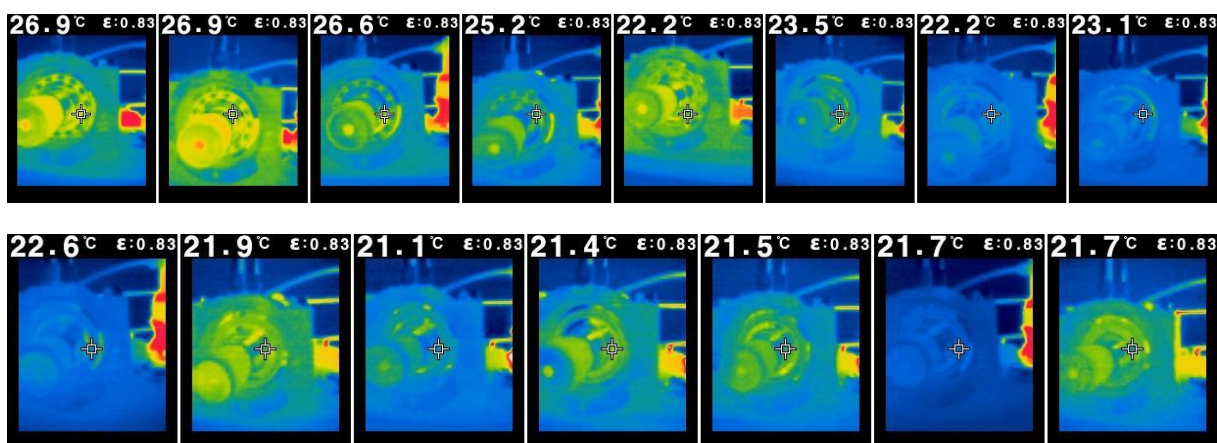


8.18: Tepelné přizpůsobení měření č. 4(a)

Opatřebené suché ložisko (Stupnice2)



8.19: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 4(b)



8.20: Tepelné přizpůsobení měření č. 4(b)

Zhodnocení provedeného měření

Pokud porovnáme zobrazené časové záznamy naměřených vibrací, je zřetelně vidět, že v lubrikovaném stavu ložisko emituje vibrace s maximální hodnotou špičky cca. 50 g. Suché ložisko emituje vibrační signál s maximálními hodnotami špiček okolo 70 g s větším podílem záporných impulsů. Zaměříme-li se na měření vibrací se Stupnicí2 zjistíme, že naměřené vibrace ložiska v suchém stavu mají mnohem větší amplitudu, než v lubrikovaném stavu. Tento rozdíl je mnohem výraznější než pro případ měření se Stupnicí1.

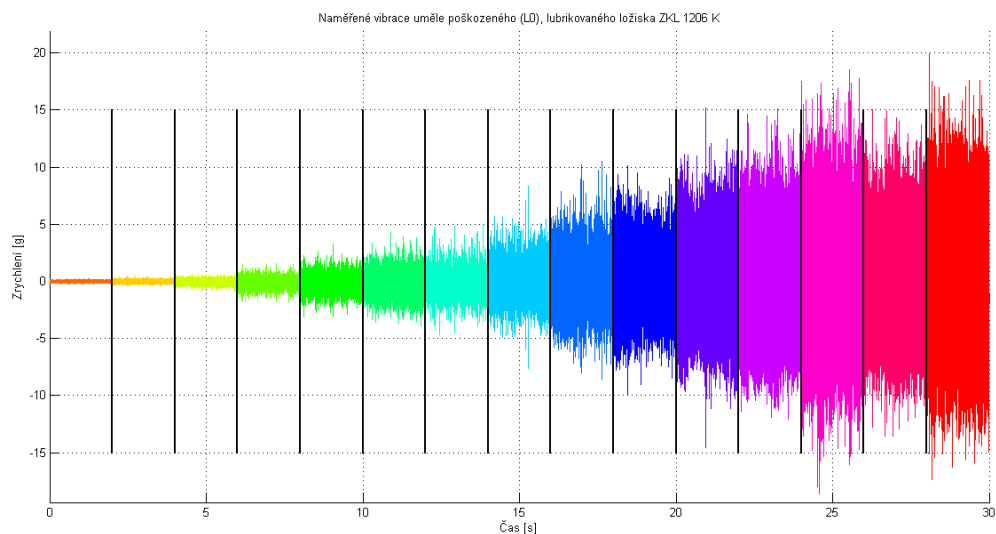
Tepelné přizpůsobení odpovídá stejnému případu jako v kapitole 8.4. Projevují se zde adhezní vlastnosti použitého maziva.

8.6 Měření vibrací na uměle poškozených ložiscích

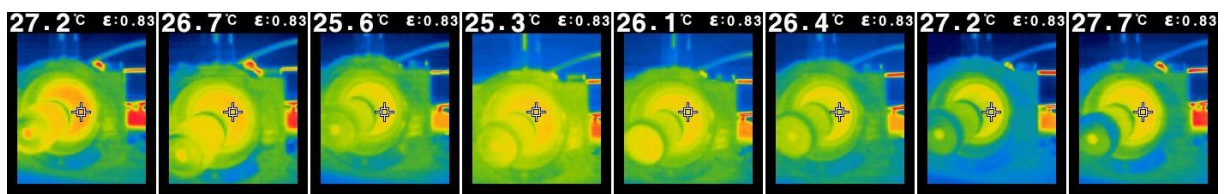
Experimentální měření na uměle poškozených ložiscích bude provedeno dle zadaného postupu s tepelným přizpůsobením. Jednotlivé experimenty jsou pro připomenutí označeny tímto způsobem.

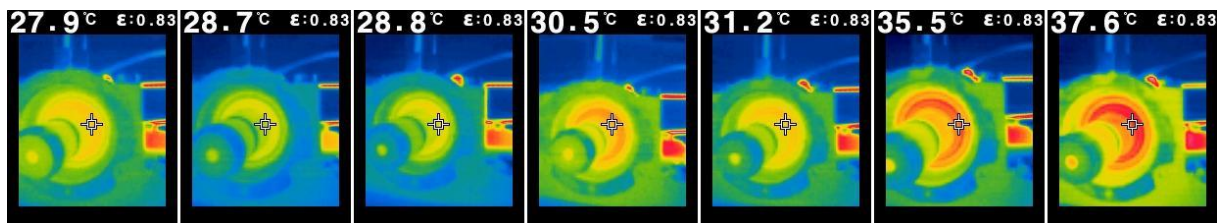
- Poškozený vnější kroužek L0 Měření č. 5
- Poškozený vnější kroužek L1 Měření č. 6
- Poškozené valivé elementy L2 Měření č. 7

Poškození vnějšího kroužku L0, lubrikované ložisko s tepelným přizpůsobením (Stupnice1)



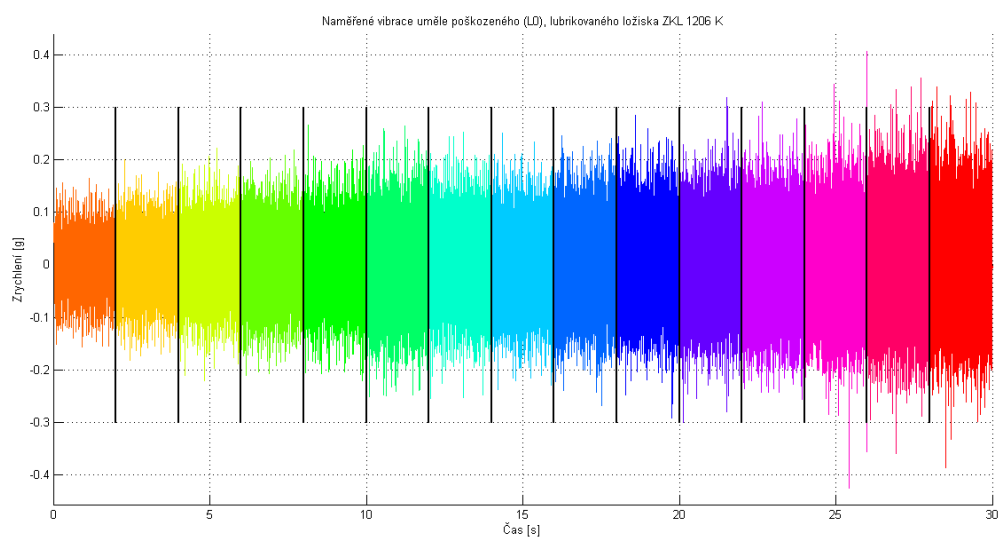
8.21: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 5(a)



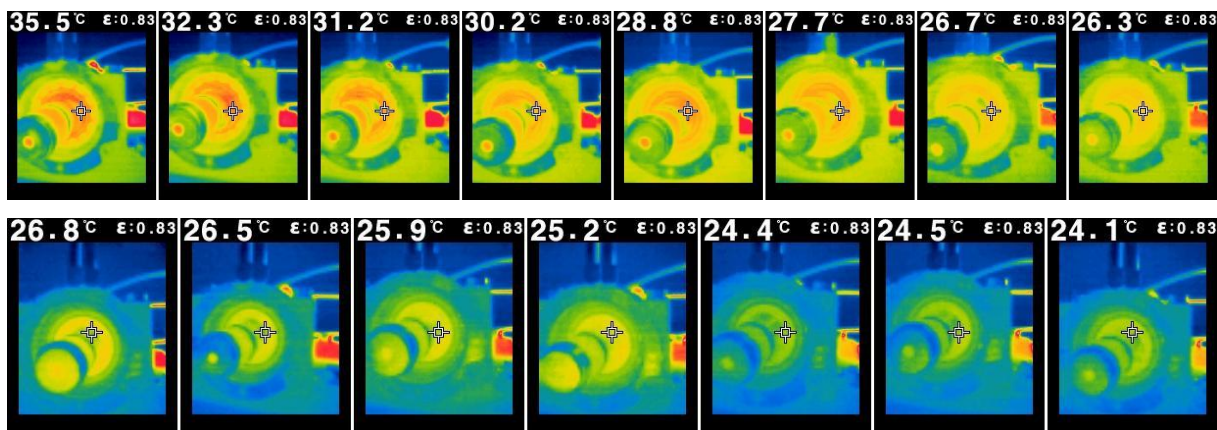


8.22: Tepelné přizpůsobení měření č. 5(a)

Poškození vnějšího kroužku L0, lubrikované ložisko s tepelným přizpůsobením (Stupnice2)

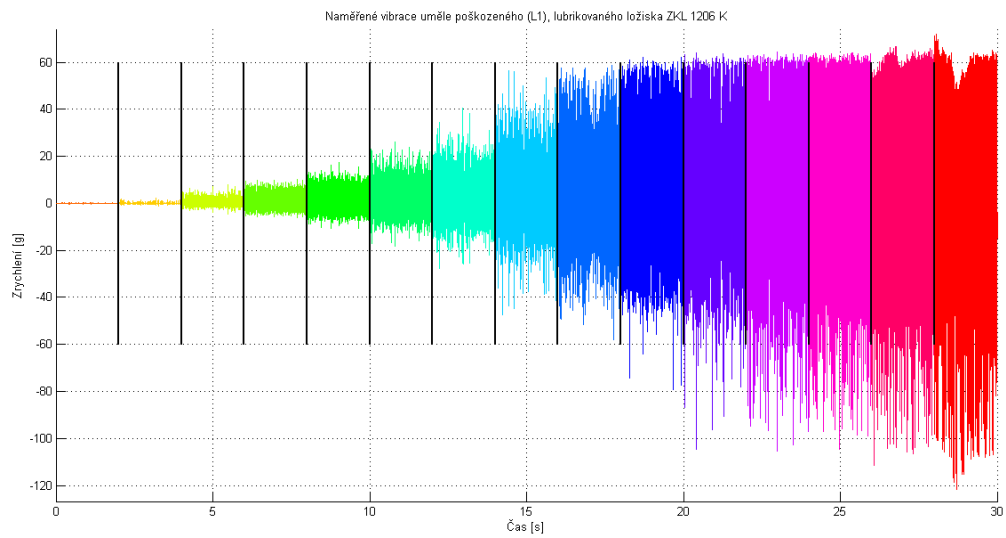


8.23: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 5(b)

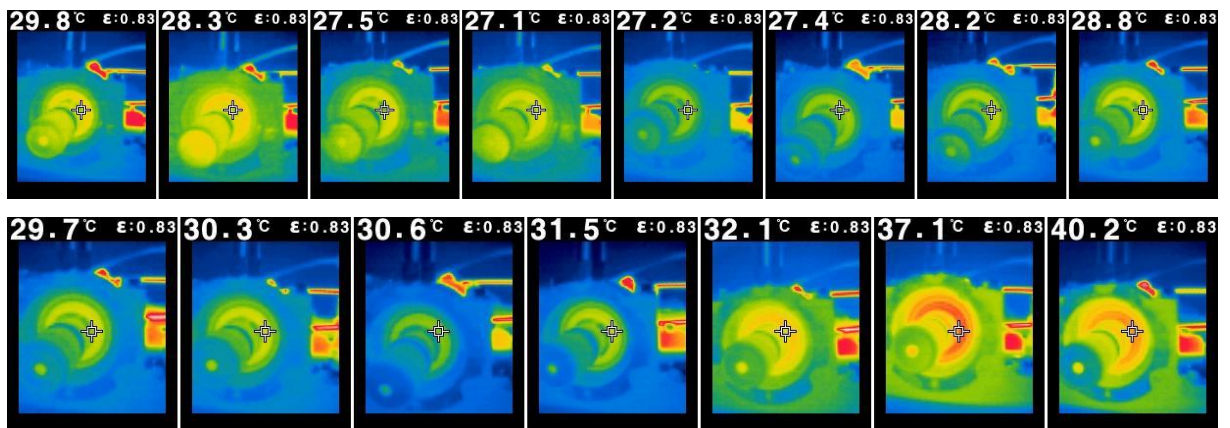


8.24: Tepelné přizpůsobení měření č. 5(b)

Poškození vnějšího kroužku L1, lubrikované ložisko s tepelným přizpůsobením (Stupnice1)

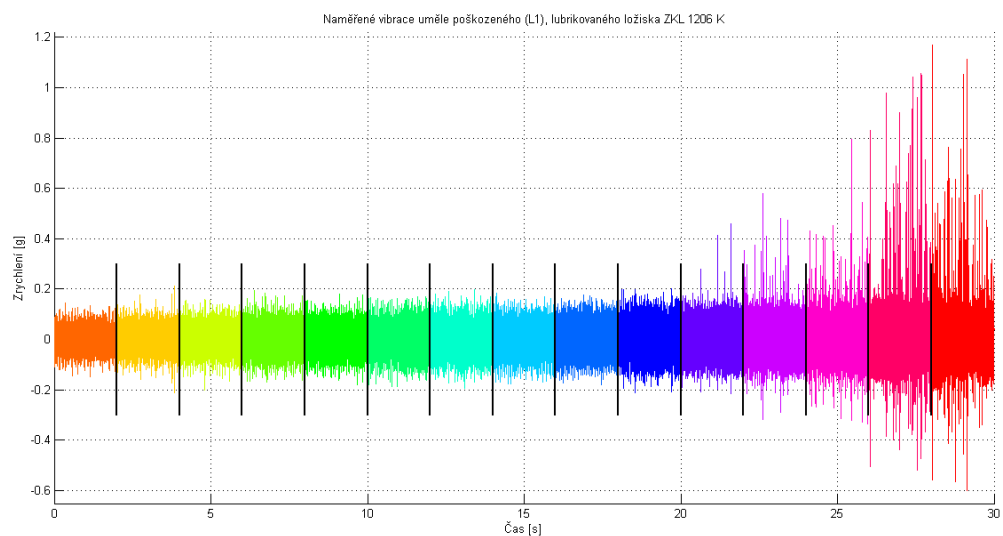


8.25: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 6(a)

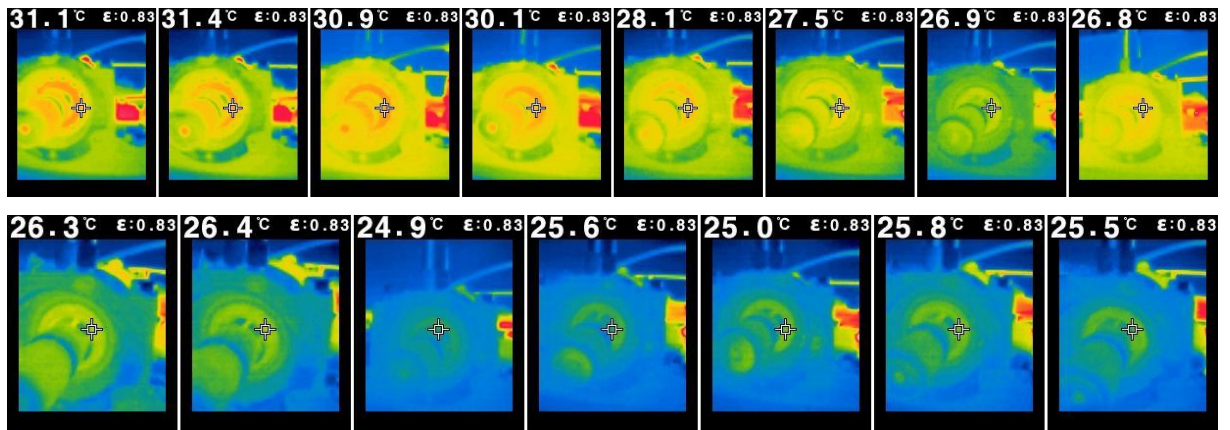


8.26: Tepelné přizpůsobení měření č. 6(a)

Poškození vnějšího kroužku L1, lubrikované ložisko s tepelným přizpůsobením (Stupnice2)

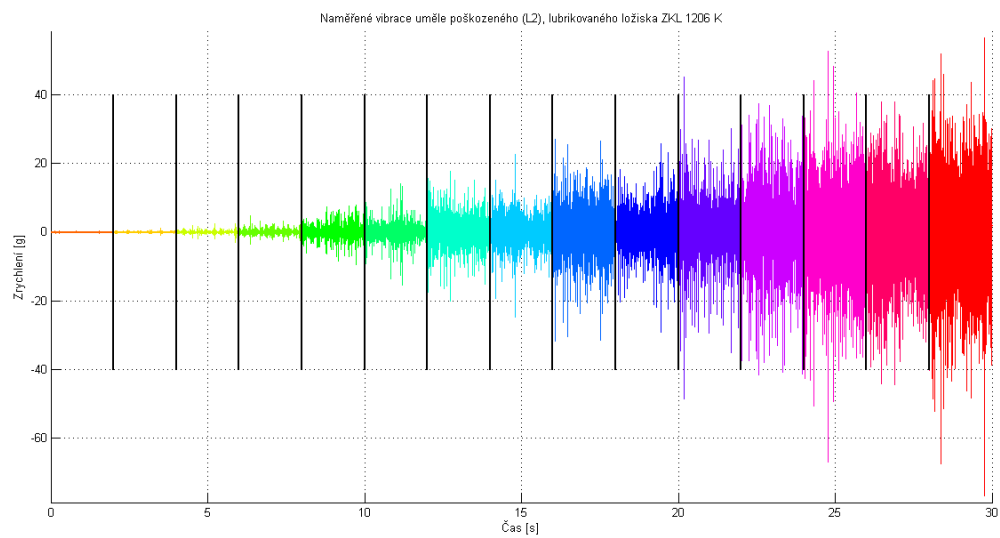


8.27: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 6(b)

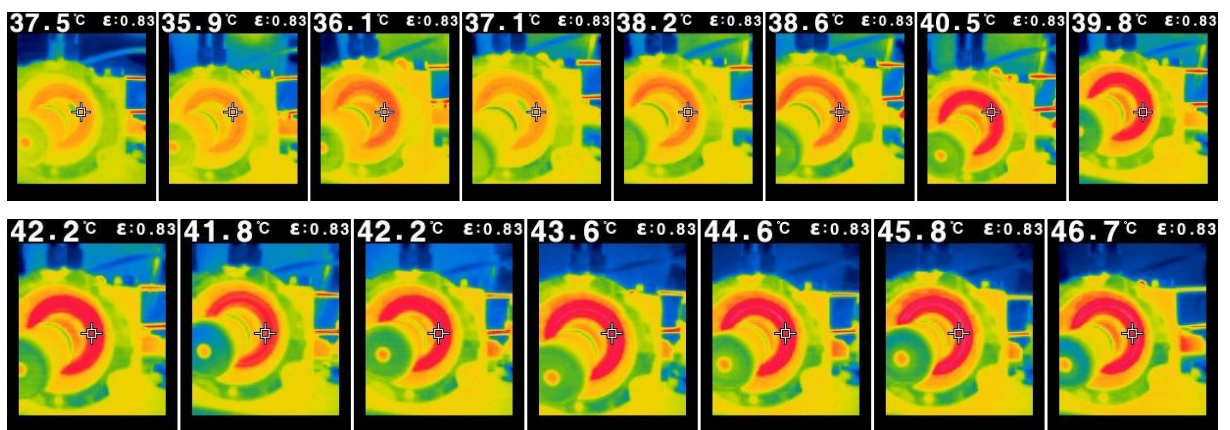


8.28: Tepelné přizpůsobení měření č. 6(b)

Poškození vnějšího kroužku L2, lubrikované ložisko s tepelným přizpůsobením (Stupnice1)

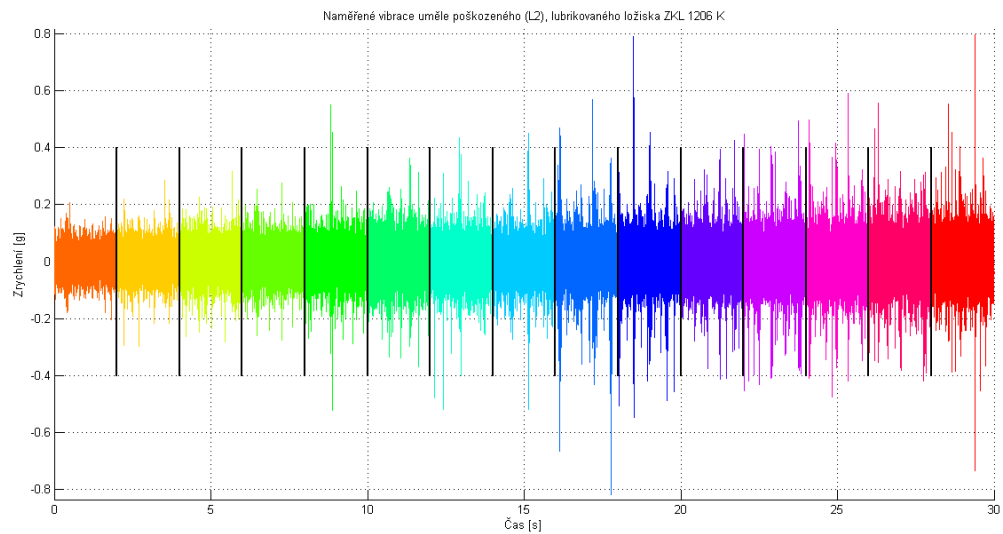


8.29: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 7(a)

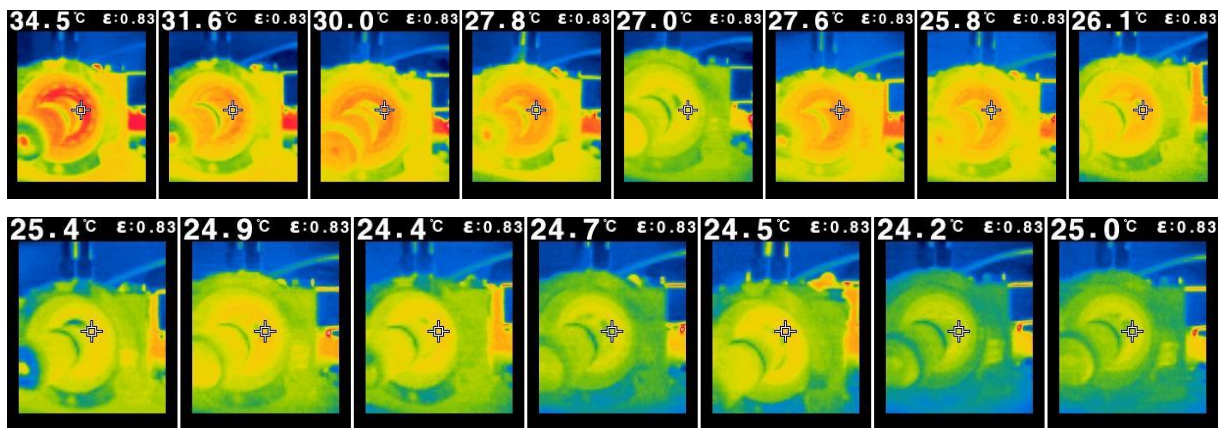


8.30: Tepelné přizpůsobení měření č. 7(a)

Poškození vnějšího kroužku L2, lubrikované ložisko s tepelným přizpůsobením (Stupnice2)



8.31: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 7(b)



8.32: Tepelné přizpůsobení měření č. 7(b)

Zhodnocení provedeného měření

Uměle poškozená ložiska emitují vibrace s danou úrovní dle svého poškození. Pro případ poškození L0 lze nalézt v naměřeném signálu maximální špičkové hodnoty cca. 20 g, u poškození L1 cca. 120g a u poškození L2 cca. 60 g. Pro poškození L1 dochází vlivem saturace použitého akcelerometru k ořezávání maximálních špičkových hodnot.

Tepelné přizpůsobování odpovídá lubrikovaným ložiskům, ale pro případ poškození L2 (poškození valivých elementů) dochází ke zvýšení pracovní teploty testovaného ložiska na cca. 46 °C. Toto navýšení teploty je způsobeno větším třením mezi valivými elementy a kluznými drahami ložiska.

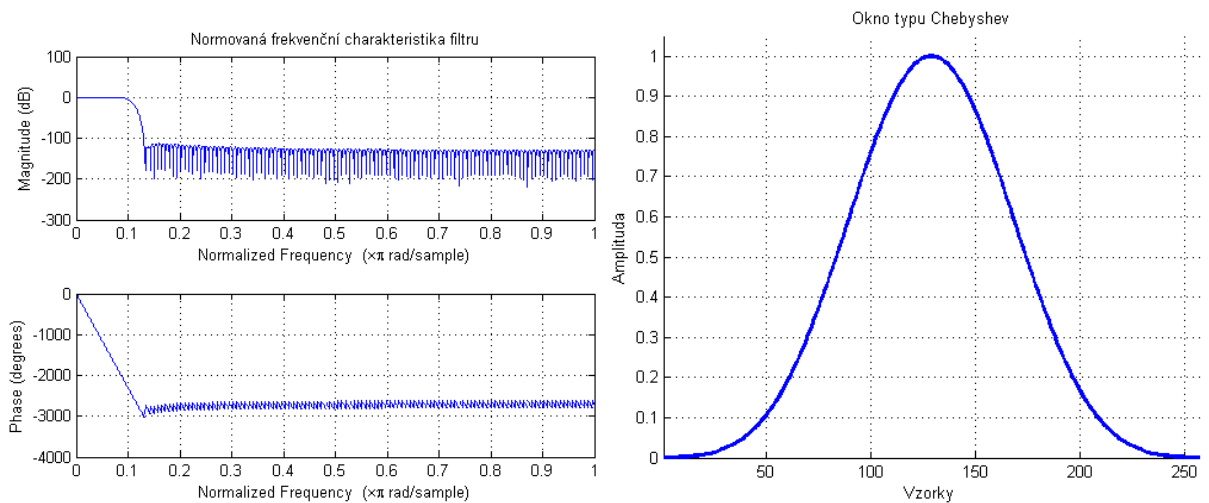
9 Výpovědní schopnosti použitých metod

Naměřený vibrační signál bude použit pro získání výpovědních schopností jednotlivých diagnostických metod. Každá z diagnostických metod popisuje stav testovaného ložiska prostřednictvím své charakteristické veličiny. Uvedeme hodnoty charakteristických veličin a doplňující vlastnosti naprogramovaných metod v programovém prostředí Matlab.

9.1 Činitel výkmitu (Crest – factor)

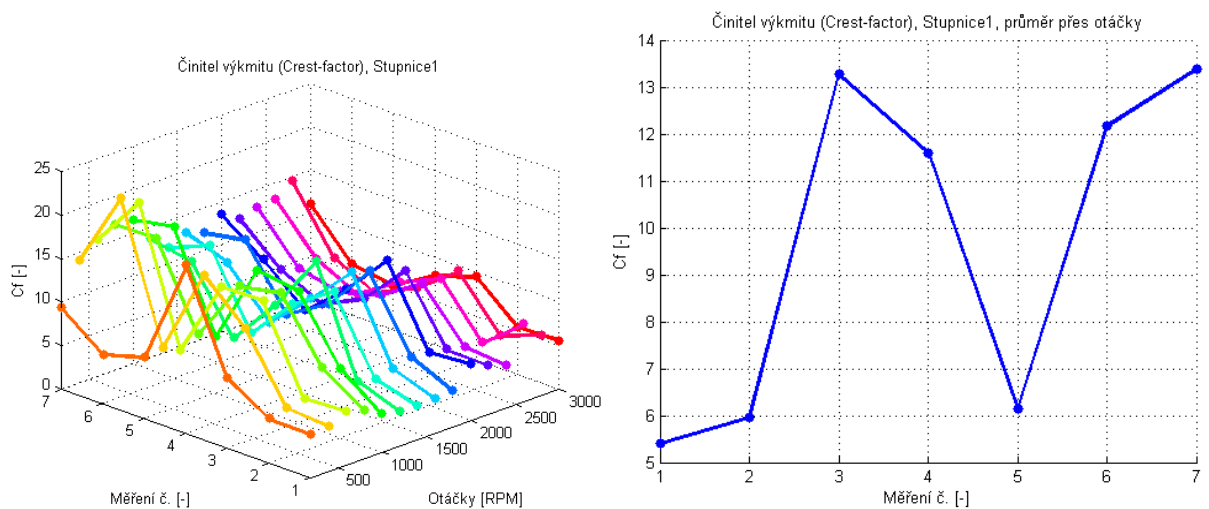
Bude provedena diagnostika stavu testovaných ložisek s daným poškozením pomocí metody Činitele výkmitu popsané v kapitole 5.1.1. Metoda používá ve své struktuře pásmovou filtraci naměřeného signálu. Analýzu dat provedeme pro obě stupnice měřených otáček. Použijeme FIR filtr typu pásmová propust řádu 256 s oknem typu Chebyshev. [10]

Frekvenční charakteristika filtru a tvar použitého okna



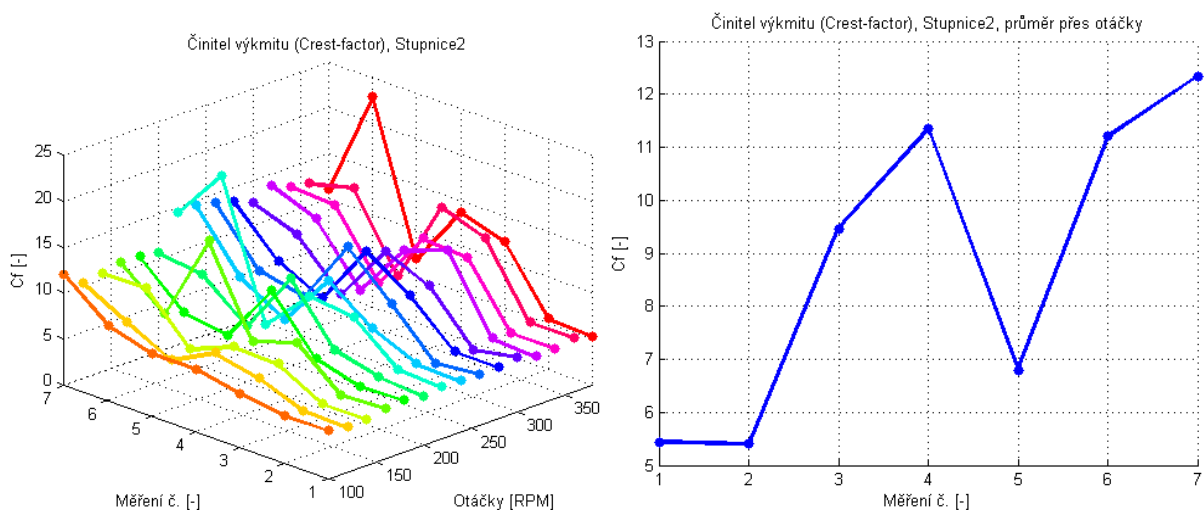
9.1: Frekvenční charakteristika pásmové propusti s použitým oknem

Činitel výkmitu, Stupnice1



9.2: Činitel výkmitu Stupnice1 s průměrem přes nastavené otáčky

Činitel výkmitu, Stupnice2



9.3: Činitel výkmitu Stupnice2 s průměrem přes nastavené otáčky

Zobrazené 3D grafy popisují vývoj charakteristické veličiny činitele výkmitu C_f pro určitou hodnotu nastavených otáček a jsou od sebe odlišeny barevnou škálou.

Zhodnocení diagnostické metody

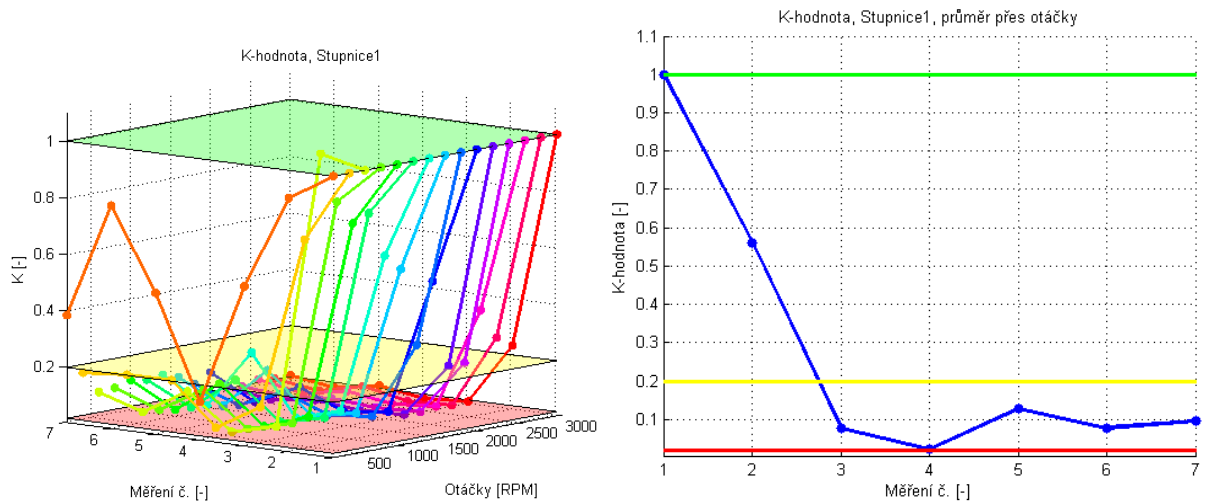
Diagnostická metoda Činitele výkmitu popisuje statistické vlastnosti měřených vibrací při daných otáčkách a úrovně poškození jednotlivých ložisek. Metoda zpracovává naměřený vibrační signál celkové délky 1 minuta. Průměrné hodnoty charakteristické veličiny C_f odpovídají skutečným úrovním poškození použitých testovaných ložisek. Nejvyšší hodnotu C_f nalezneme pro případ Stupnice1 u měření č. 3, 7 (Opotřebené lubrikované ložisko, Uměle poškozené ložisko L2 – valivé elementy) a pro Stupnici2 u měření č. 4, 7 (Opotřebené suché ložisko, Uměle poškozené ložisko L2 – valivé elementy).

9.2 K-hodnota

Bude provedena diagnostika stavu testovaných valivých ložisek s daným poškozením pomocí metody K-hodnota popsané v kapitole 5.1.2. Metoda používá ve své struktuře pásmovou filtraci naměřeného signálu stejným způsobem (FIR filtr, stejného řádu a stejného typu okna), jako byla popsána v metodě Činitele výkmitu. Výstupem metody je charakteristická veličina K , která se následně porovnává s hladinami popisujícími aktuální poškození ložiska. [10]

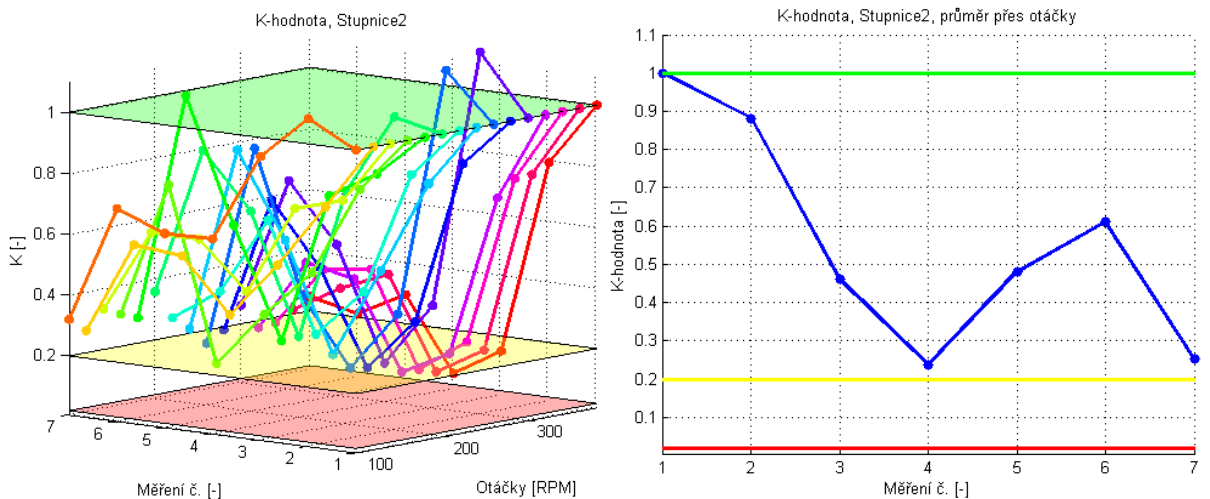
Opět se jedná o statistickou metodu diagnostiky stavu valivého ložiska, tj. během výpočtu se zpracovává celý měřený úsek vibračního signálu délky 1 minuta. V tomto případě také provedeme průměrování získaných charakteristických veličin během jednotlivých měření přes nastavované otáčky se Stupnicí1 a Stupnicí2. Vypočítané hodnoty charakteristické veličiny pro dané otáčky ložiska a použité testované ložisko vykreslíme do 3D grafu. Jednotlivé průběhy mezi sebou odlišíme pomocí barevné škály.

K-hodnota, Stupnice1



9.4: K-hodnota Stupnice1 s průměrem přes nastavené otáčky

K-hodnota, Stupnice2



9.5: K-hodnota Stupnice2 s průměrováním přes nastavené otáčky

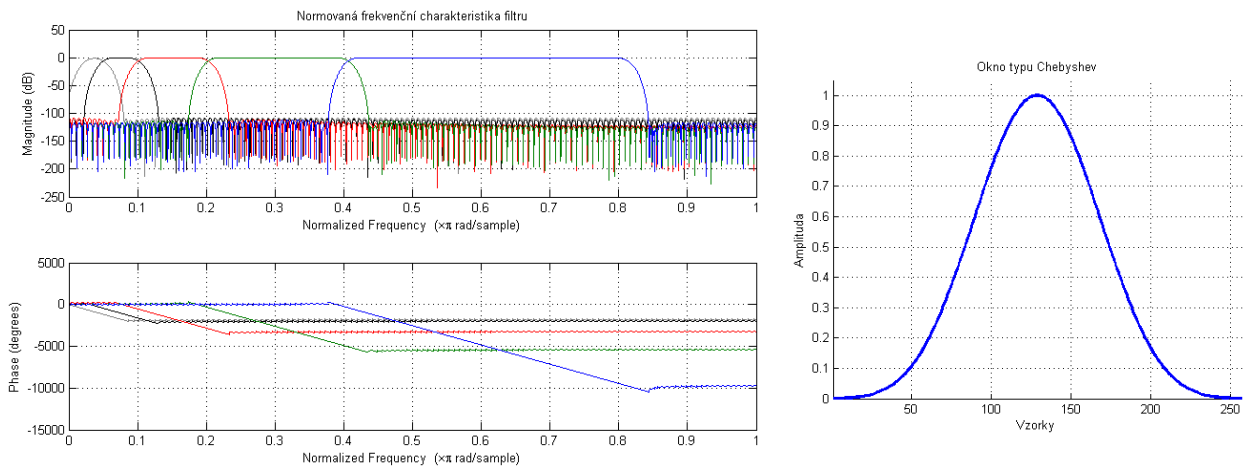
Zhodnocení diagnostické metody

Ze zobrazených grafů je názorně vidět vypovídací schopnost metody K-hodnoty. Většina použitých ložisek měřených se Stupnicí1 byla klasifikována jako poškozená, ale způsobilá k dalšímu provozu, jako velmi poškozené ložisko bylo klasifikováno měření č. 4 (Opotřeбенé suché ložisko). Použitá ložiska měřená se Stupnicí2 byla klasifikována do stavu způsobilé k trvalému provozu. V obou případech použitých stupnic nastavovaných otáček získává nejmenší K-hodnotu měření č. 4. Už z těchto zobrazených výsledků lze konstatovat, že se metoda K-hodnoty hodí pouze pro orientační odhad stavu testovaného ložiska.

9.3 Kurtosis

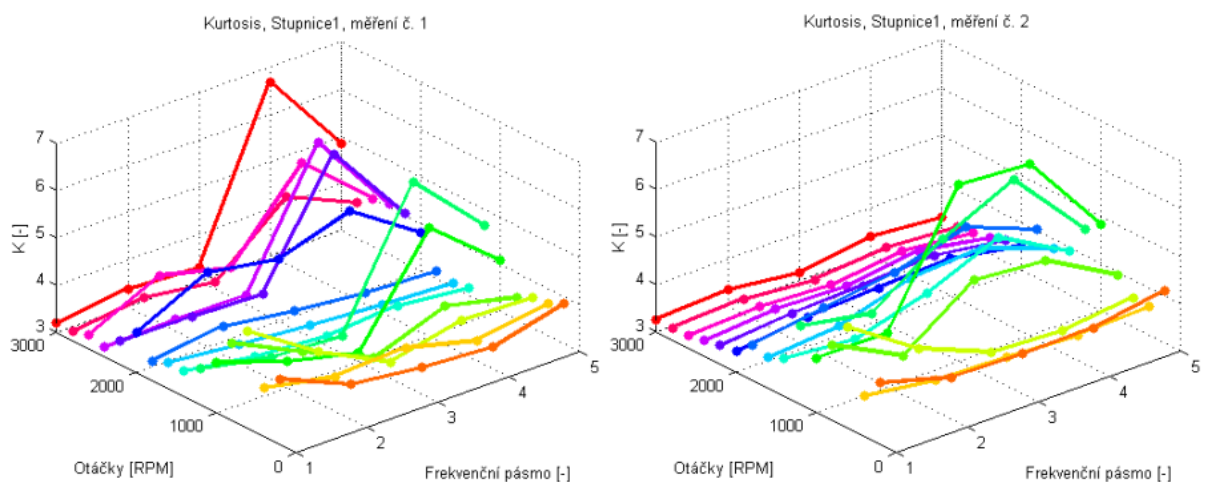
Bude provedena diagnostika stavu testovaných valivých ložisek s daným poškozením pomocí metody Kurtosis popsané v kapitole 5.1.3. Metoda je založena na výpočtu čtvrtého momentu naměřeného, předem filtrovaného signálu. Filtrace je prováděna pomocí FIR pásmových propustí určité šířky a frekvence. Frekvenční charakteristiky použitých filtrů vykreslíme do společného grafu. Jelikož se jedná o statistickou diagnostickou metodu, opět bude zpracováván celý naměřený signál tj. 1 minutu záznamu při daných otáčkách ložiska. Aktuální stav testovaného ložiska se posuzuje pomocí tvaru grafu, vzniklého z vypočítaných hodnot Kurtosis parametru pro daná frekvenční pásma. [10]

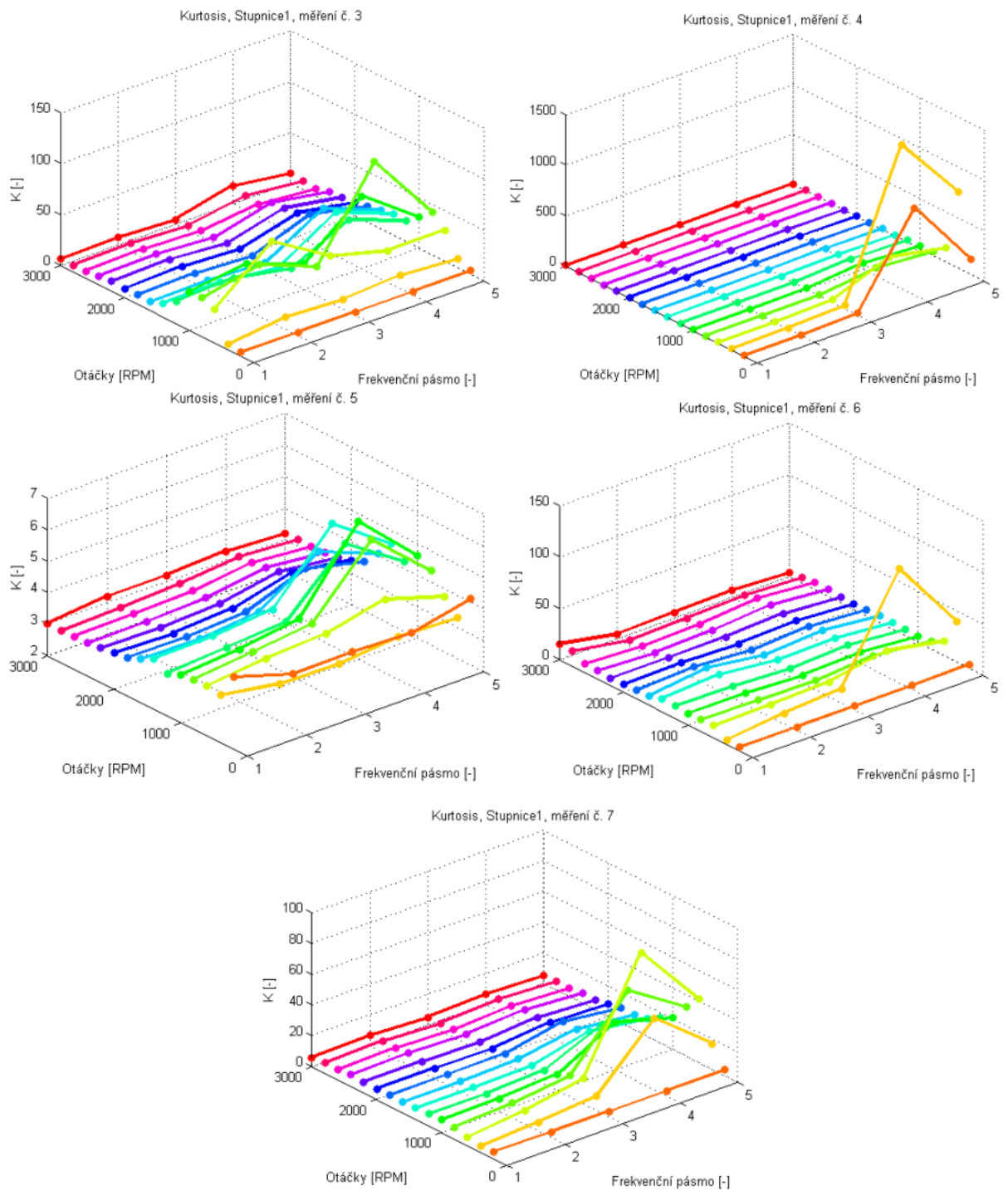
Frekvenční charakteristika použitých FIR filtrů a tvar použitého okna



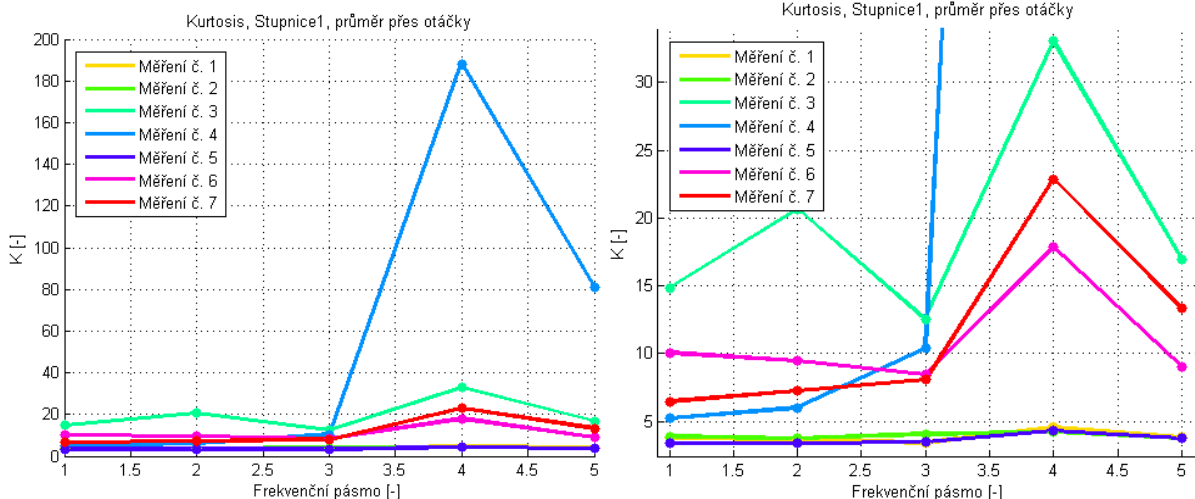
9.6. Frekvenční charakteristika použitých FIR filtrů s aplikovaným oknem typu Chebyshev

Kurtosis, Stupnice1





9.7: Kurtosis Stupnice1 ,měření č. 1-7



9.8: Průběh Kurtosis pro jednotlivá měření, Stupnice1, průměr přes otáčky

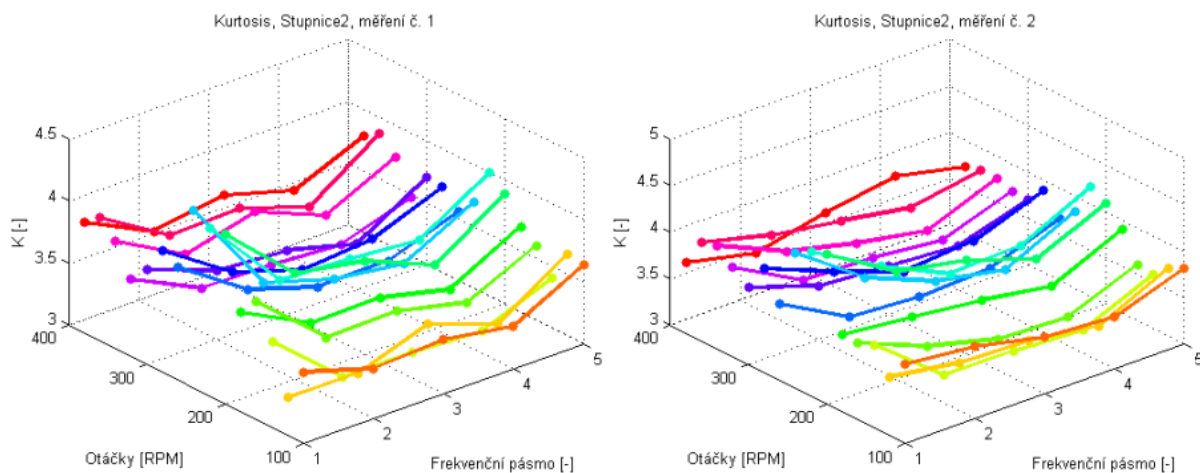
Zhodnocení výsledků Kurtosis, Stupnice1

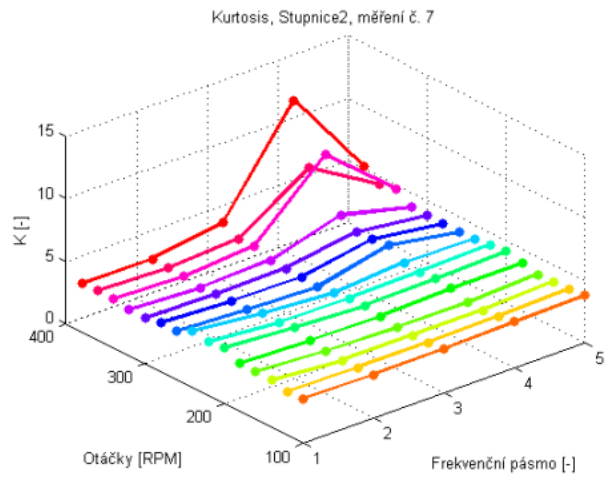
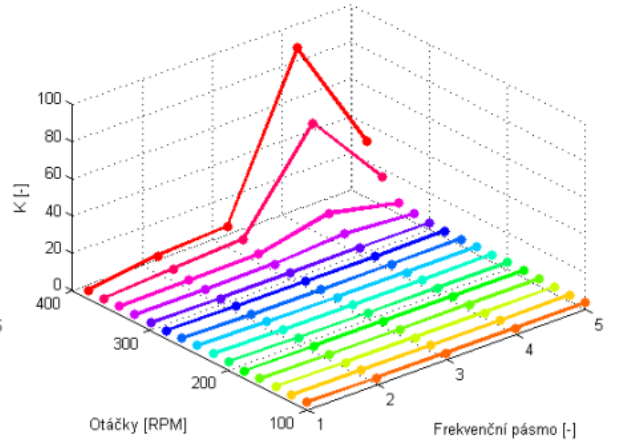
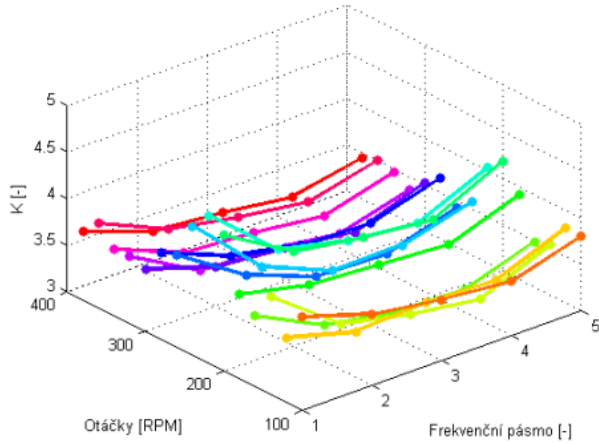
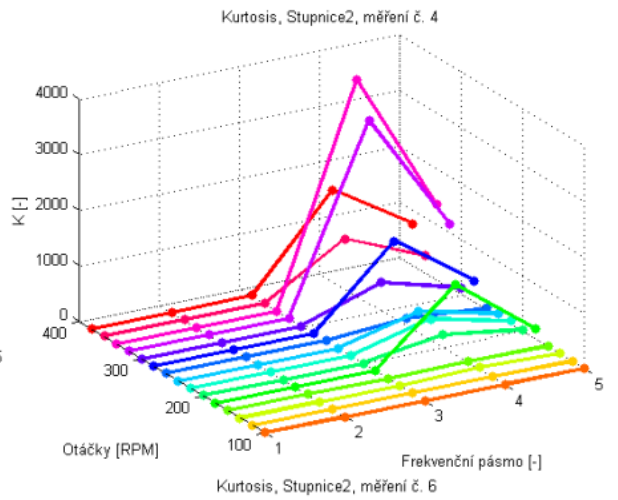
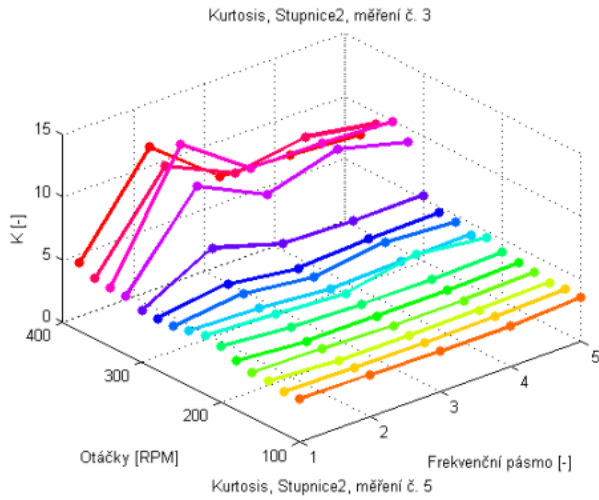
Pokud se zaměříme na výsledné průběhy parametru Kurtosis pro daná frekvenční pásma zjistíme, že je tento parametr velmi závislý na otáčkách ložiska, při kterých byly vibrace měřeny. Tento fakt popisují zobrazené 3D grafy jednotlivých měření. Po zprůměrování parametru Kurtosis přes nastavené otáčky lze stanovit aktuální stav testovaných ložisek.

- Měření č. 1 nepoškozené
- Měření č. 2 nepoškozené
- Měření č. 3 poškození s velkým plošným rozsahem
- Měření č. 4 velké poškození s rizikem havárie
- Měření č. 5 nepoškozené
- Měření č. 6 poškození s velkým plošným rozsahem
- Měření č. 7 poškození s velkým plošným rozsahem

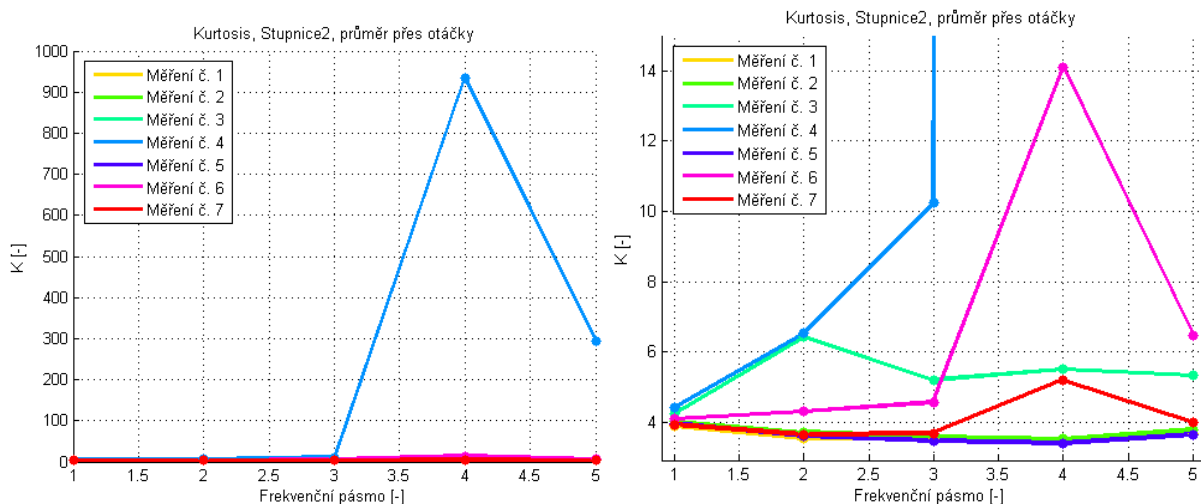
Výpovědní schopnost metody Kurtosis je uspokojivá. Tvar výsledných (zprůměrovaných) průběhů Kurtosis parametrů nakonec odpovídají úrovním poškození testovaných ložisek.

Kurtosis, Stupnice2





9.9: Kurtosis Stupnice2 ,měření č. 1-7



9.10: Průběh Kurtosis pro jednotlivá měření, Stupnice2, průměr přes otáčky

Zhodnocení výsledků Kurtosis, Stupnice2

Zobrazené 3D grafy popisují průběh parametru Kurtosis v závislosti na měřených otáčkách. Rozdíly těchto průběhů při různých otáčkách již nejsou tak veliké, ale stále se zde vyskytují. Tato skutečnost může být způsobena nižší amplitudou měřeného signálu a menší úrovní nežádoucího šumu, který vzniká především při vysokých otáčkách. Pomocí zprůměrovaných hodnot parametru Kurtosis patřících určitému měření můžeme odhadnout aktuální stav testovaných ložisek.

- Měření č. 1 nepoškozené
- Měření č. 2 nepoškozené
- Měření č. 3 začínající poškození
- Měření č. 4 velké poškození s rizikem havárie
- Měření č. 5 nepoškozené
- Měření č. 6 poškození s velkým plošným rozsahem
- Měření č. 7 začínající poškození

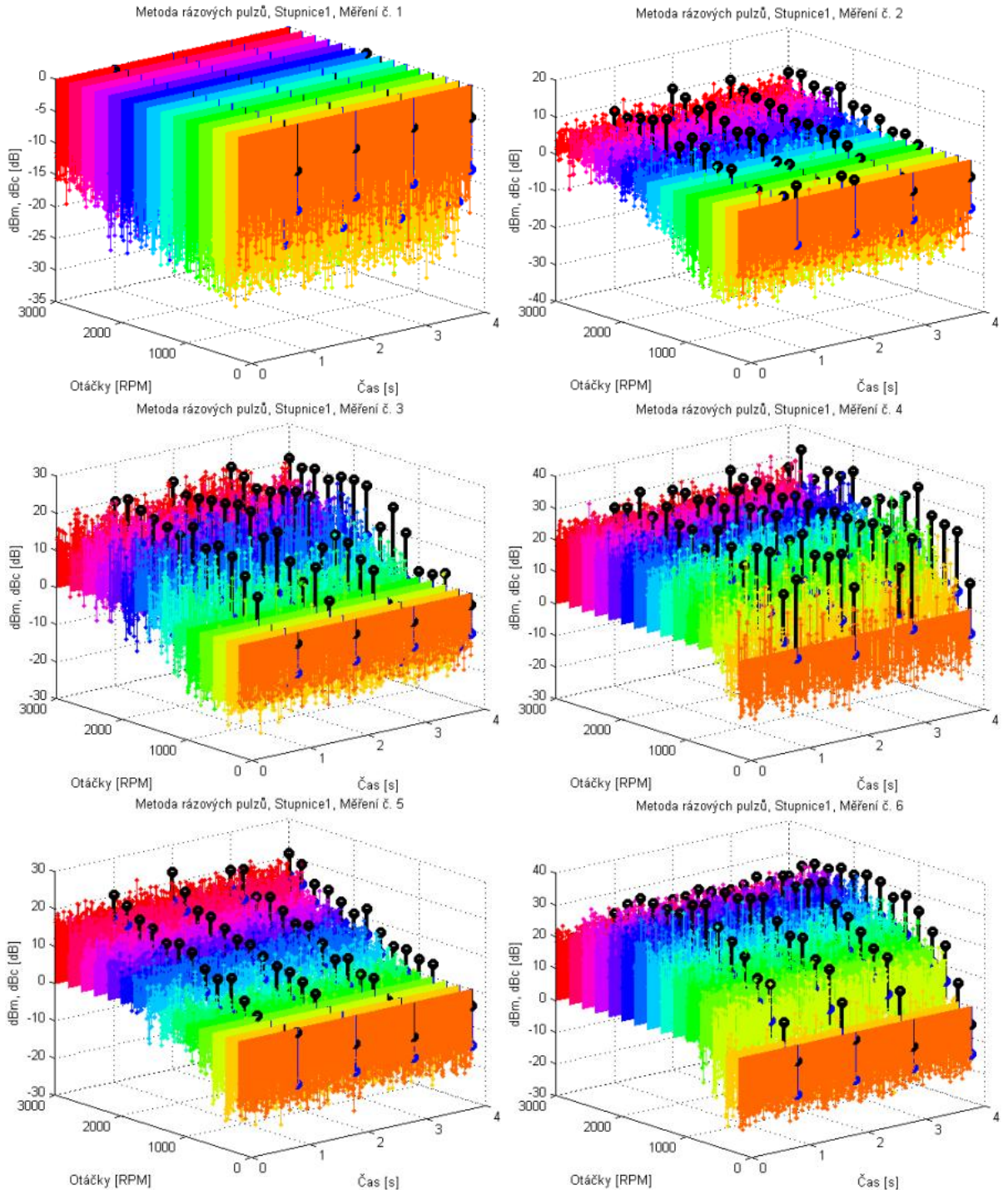
Výpovědní schopnost Kurtosis metody je i v tomto případě uspokojivá, získaný popis stavu testovaných ložisek odpovídá jejich skutečnému (poškozenému stavu). Opět musíme poznamenat, že je tato metoda velmi citlivá na nastavené otáčky ložiska.

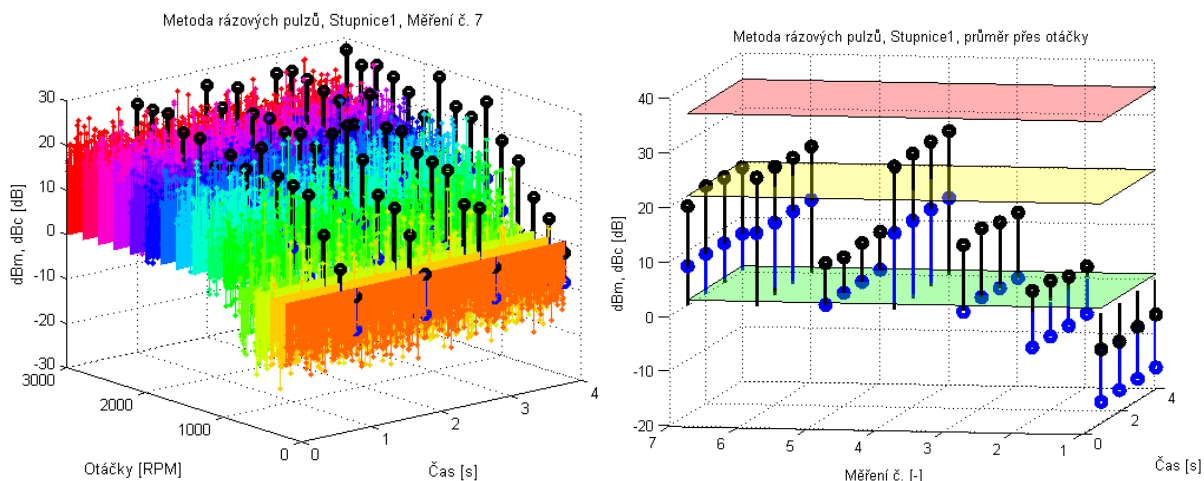
9.4 Metoda rázových pulzů-SPM

Bude provedena diagnostika stavu testovaných valivých ložisek s daným poškozením pomocí Metody rázových pulzů popsané v kapitole 5.2.1. Metoda využívá rezonančních vlastností použitého snímače vibrací. Pro potřeby úzkopásmové filtrace naměřeného signálu použijeme IIR filtr typu pásmová propust. [10] Metoda rázových pulzů pracuje s celým záznamem naměřených vibrací, který si dělí do jednosekundových úseků, ve kterých probíhá hlavní výpočet. Pro názornou demonstraci správné funkce této metody vykreslíme pouze výstupní zpracovaný signál délky 4 s.

Metoda pracuje se dvěma charakteristickými veličinami $dBm, dBc [dB]$, které budou zobrazeny ve 3D grafech špičkami s modrou (dBm) a černou (dBc) barvou. Bude provedeno průměrování charakteristických veličin přes měřené otáčky.

Metoda rázových pulzů, Stupnice1





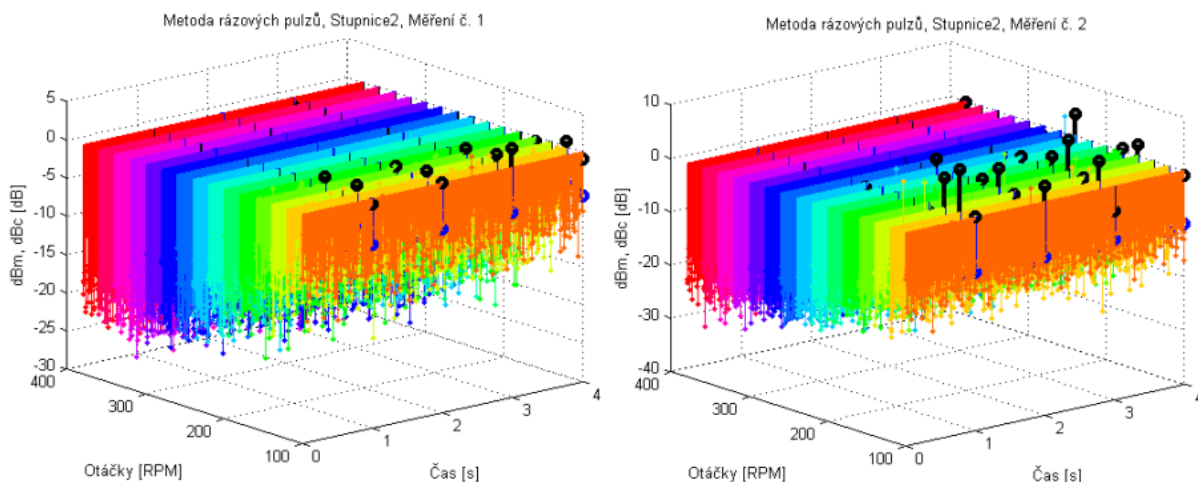
9.11: Metoda rázových pulzů Stupnice1 ,měření č. 1-7 s průměrováním přes otáčky

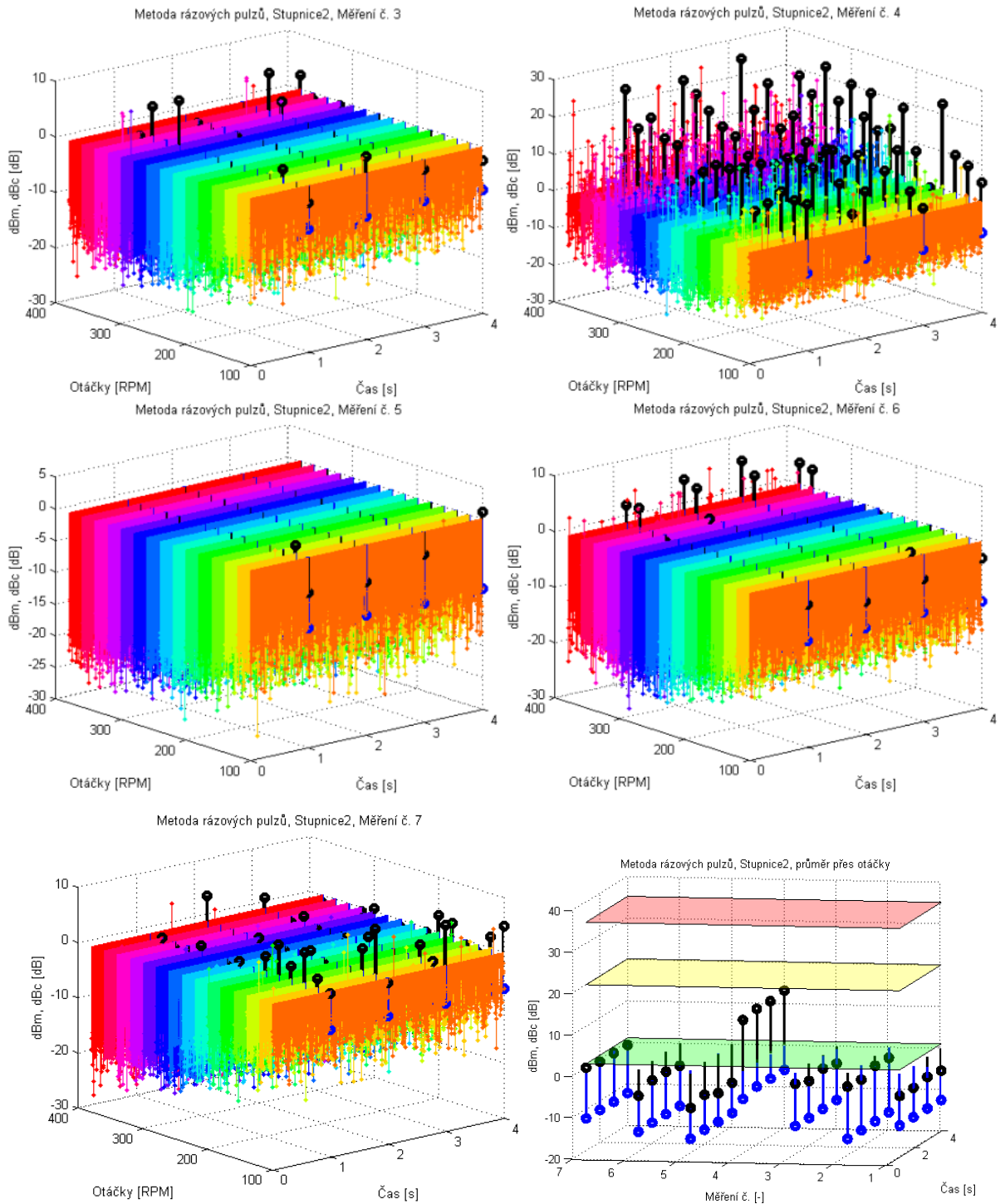
Zhodnocení Metody rázových pulzů, Stupnice1

Zobrazené 3D grafy popisují chování Metody rázových pulzů, takto implementovaná metoda je velmi citlivá na nízkou úroveň vibračního signálu což se projevuje generováním záporných impulzů. Tyto záporné impulzy lze tedy chápat jako velmi nízkou úroveň opotřebení testovaného ložiska. Nízká úroveň vibračního signálu je spjata s nízkou otáčkovou frekvencí ložiska. Na posledním grafu je zobrazen výstup Metody rázových pulzů pro výsledné zprůměrované hodnoty přes nastavené otáčky ložiska.

Testovaná ložiska, tj. měření č. 4, 6, 7 lze klasifikovat jako poškozená a schopná pouze krátkodobého provozu. Ostatní ložiska lze klasifikovat jako nepoškozená a schopná dlouhodobého provozu.

Metoda rázových pulzů, Stupnice2





9.12: Metoda rázových pulzů Stupnice2 ,měření č. 1-7 s průměrováním přes otáčky

Zhodnocení Metody rázových pulzů, Stupnice2

Pokud se zaměříme na průběhy zobrazených 3D grafů dospějeme k závěru, že Metoda rázových pulzů není vhodná pro diagnostiku ložisek při nízkých provozních otáčkách. Hodnoty charakteristických veličin se ve většině případů nacházejí v záporných hodnotách.

Tento fakt také popisují zprůměrované hodnoty $dBm, dBc [dB]$, většina z nich se nachází v záporných hodnotách, tudíž se jejich stav jeví jako nepoškozený a schopný dlouhodobého provozu. Jediná smysluplná klasifikace stavu ložiska je měření č. 4, tj. nepoškozený a schopný dlouhodobého provozu.

9.5 Obálková analýza

Bude provedena diagnostika stavu testovaných valivých ložisek s daným poškozením pomocí metody Obálkové analýzy v kapitole 5.3.1. Metoda je založena na sledování poruchových frekvencí v obálkovém spektru naměřeného signálu. Jedná se o diagnostickou metodu pracující ve frekvenční oblasti měřeného signálu. Poruchové frekvence valivých částí ložiska vypočítáme dle vzorců v kapitole 3.4.1. Hodnoty vypočítaných poruchových frekvencí jsou zaznamenány v následujících tabulkách.

Poruchové frekvence valivých částí ložiska, Stupnice1

Otáčky [RPM]	FTF [Hz]	BPFO [Hz]	BPFI [Hz]	BSF [Hz]
200	1,38	19,31	27,36	18,60
400	2,76	38,62	54,71	37,19
600	4,14	57,93	82,07	55,79
800	5,52	77,24	109,42	74,39
1000	6,90	96,55	136,78	92,99
1200	8,28	115,87	164,13	111,58
1400	9,66	135,18	191,49	130,18
1600	11,03	154,49	218,84	148,78
1800	12,41	173,80	246,20	167,37
2000	13,79	193,11	273,56	185,97
2200	15,17	212,42	300,91	204,57
2400	16,55	231,73	328,27	223,17
2600	17,93	251,04	355,62	241,76
2800	19,31	270,35	382,98	260,36
3000	20,69	289,67	410,33	278,96

Poruchové frekvence valivých částí ložiska, Stupnice2

Otáčky [RPM]	FTF [Hz]	BPFO [Hz]	BPFI [Hz]	BSF [Hz]
100	0,69	9,66	13,68	9,30
120	0,83	11,59	16,41	11,16
140	0,97	13,52	19,15	13,02
160	1,10	15,45	21,88	14,88
180	1,24	17,38	24,62	16,74
200	1,38	19,31	27,36	18,60
220	1,52	21,24	30,09	20,46
240	1,66	23,17	32,83	22,32
260	1,79	25,10	35,56	24,18
280	1,93	27,03	38,30	26,04
300	2,07	28,97	41,03	27,90
320	2,21	30,90	43,77	29,76
340	2,34	32,83	46,50	31,62
360	2,48	34,76	49,24	33,47
380	2,62	36,69	51,98	35,33

Amplitudová spektra obávkového signálu budou vykreslena do společných 3D grafů, ve kterých budou zvýrazněny nalezené amplitudy poruchových frekvencí. Poruchové frekvence testovaného ložiska budou hledány v okolí teoretických hodnot poruchových frekvencí. Šířku tohoto okolí lze definovat takto:

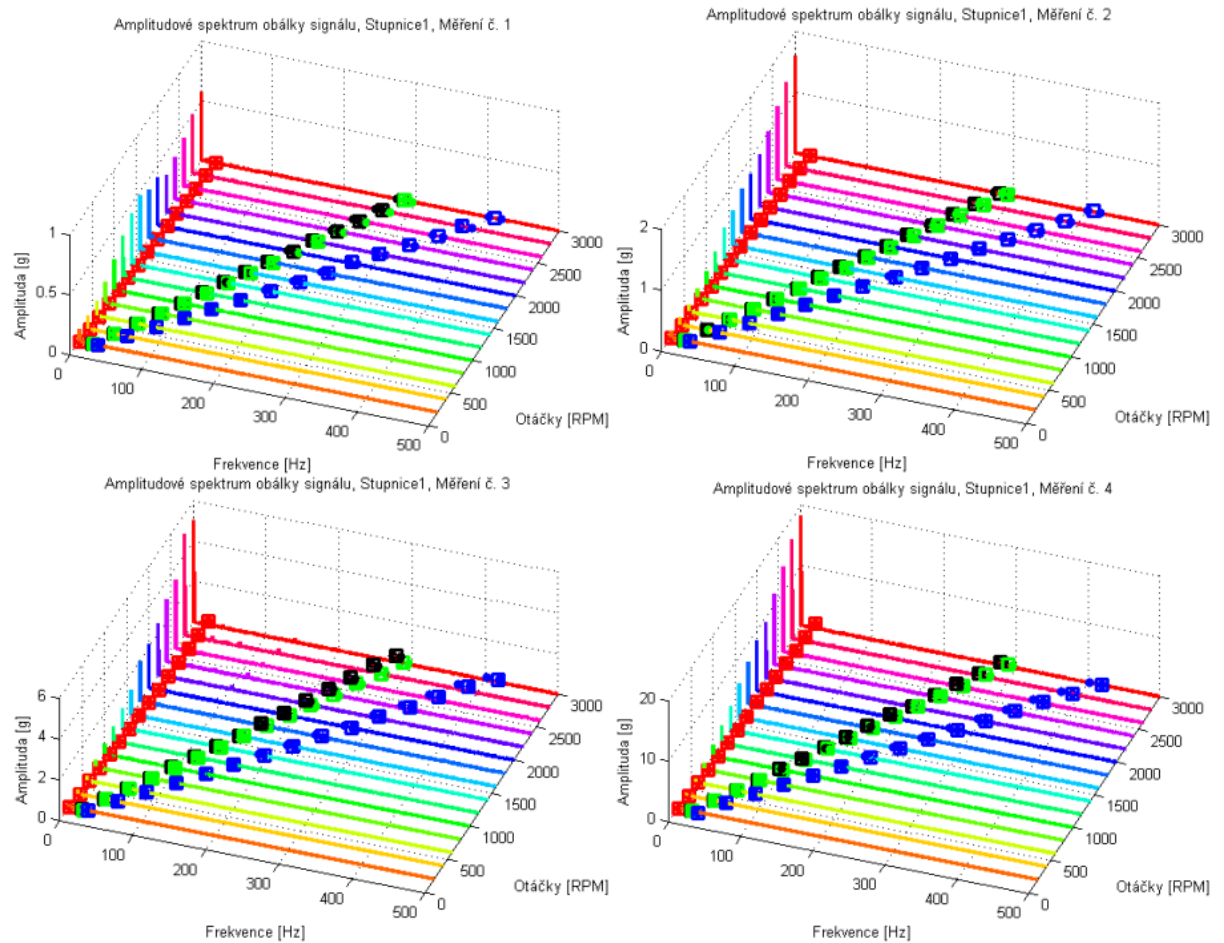
$$Pásmo = f_{porucha} \pm 2\%(f_{porucha})$$

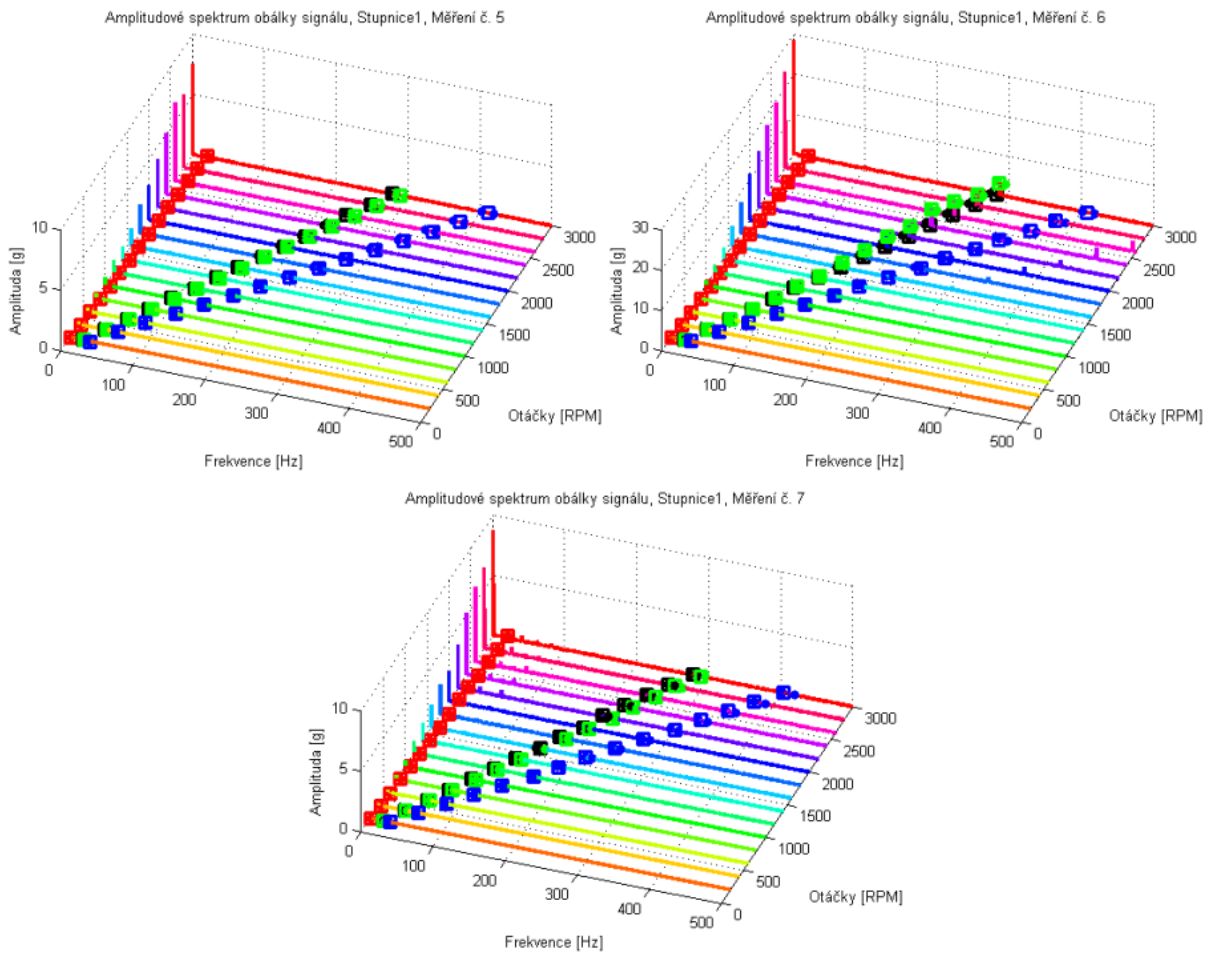
Jelikož je amplitudové spektrum obávkového signálu periodické stačí vykreslit spektrum pro případ Stupnice1 do 500 Hz a při Stupnici2 do 60 Hz. Poruchové frekvence jsou ve 3D grafech zvýrazněny těmito barvami.

- | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------|
| • Poruchy ložiskové klece | Poruchová frekvence 1 | červená |
| • Poruchy vnějšího kroužku | Poruchová frekvence 2 | zelená |
| • Poruchy vnitřního kroužku | Poruchová frekvence 3 | modrá |
| • Poruchy valivých elementů | Poruchová frekvence 4 | černá |

Pořadí poruchových frekvencí je předem dané z důvodu přehlednosti zobrazených grafů vypočítaných průměrných hodnot amplitud poruchových frekvencí přes nastavené otáčky.

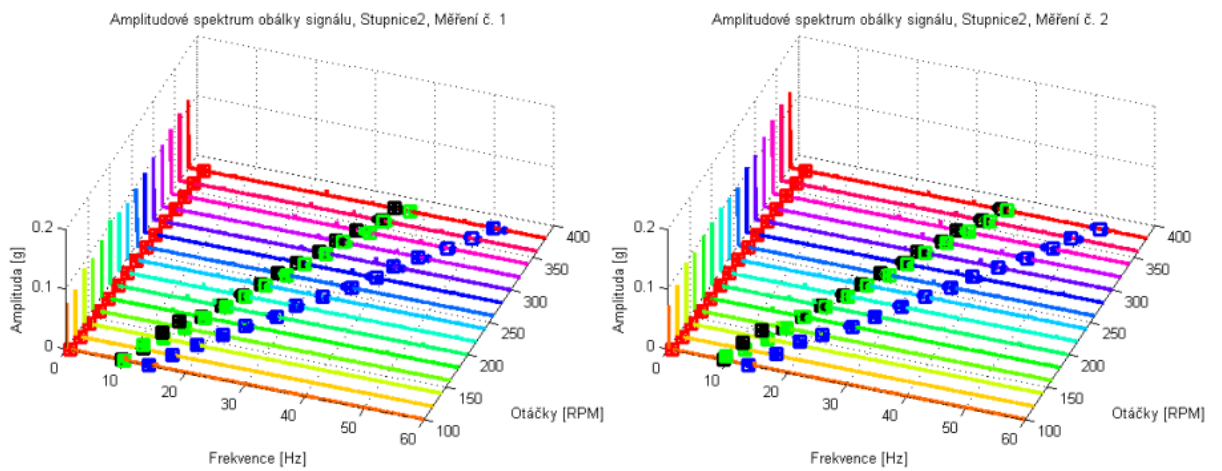
Obávková analýza, Stupnice1

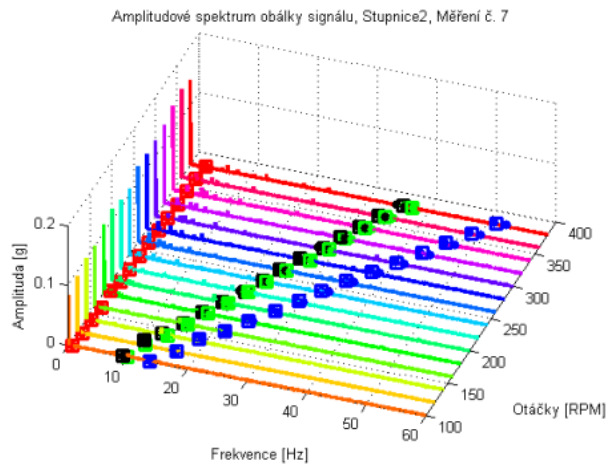
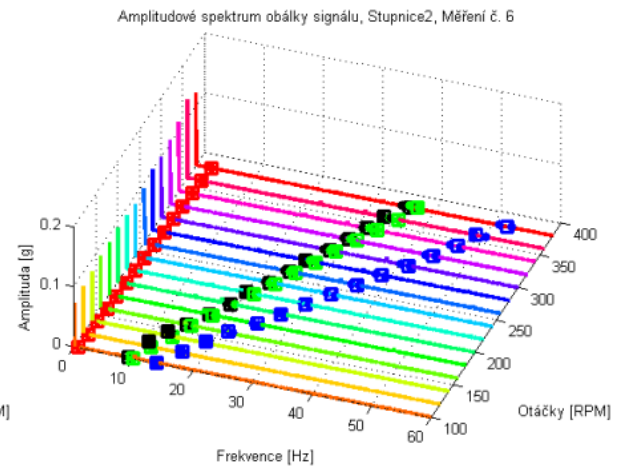
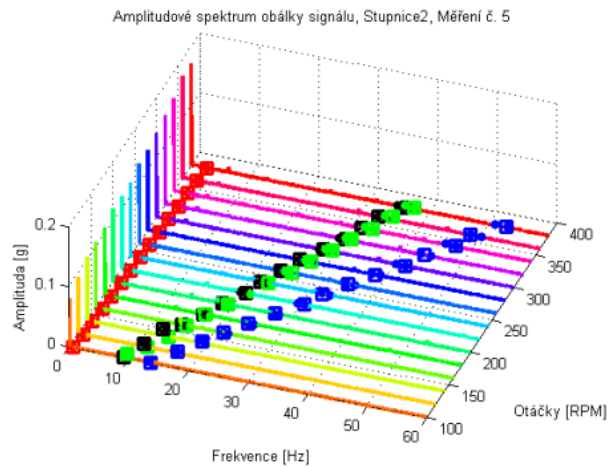
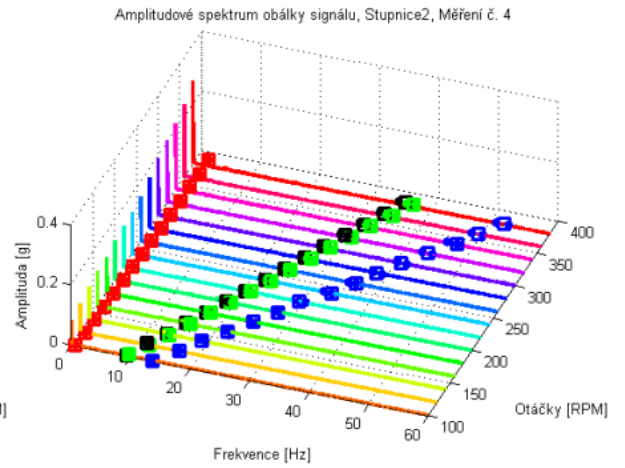
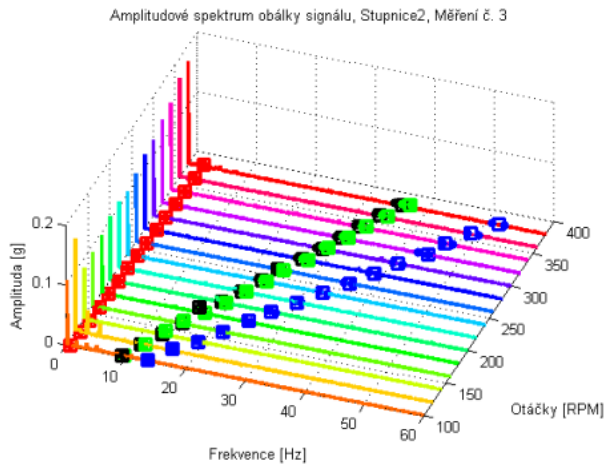




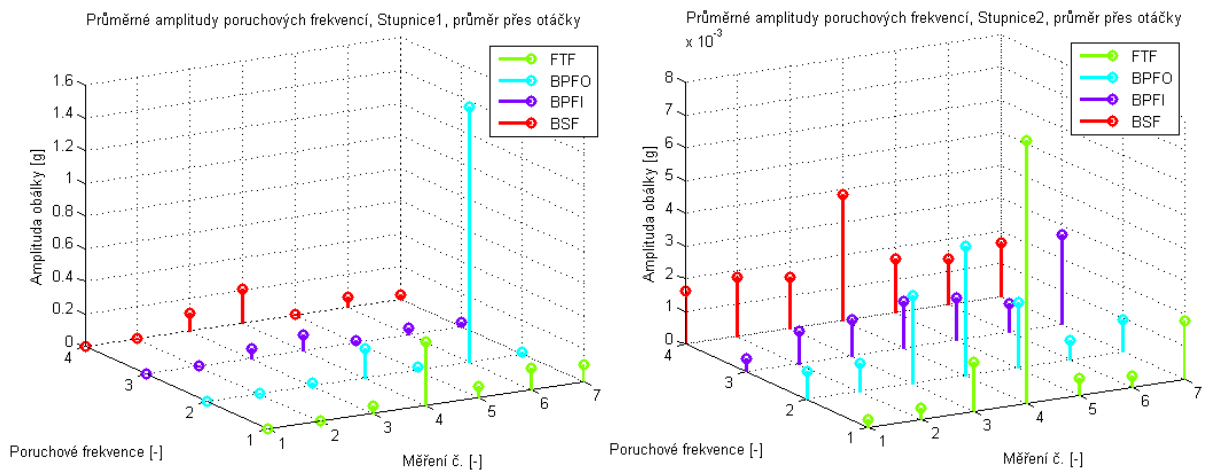
9.13: Obálková analýza Stupnice1 ,měření č. 1-7

Obálková analýza, Stupnice2





9.14: Obálková analýza Stupnice2, měření č. 1-7



9.15: Průměrné hodnoty amplitud poruchových frekvencí (přes otáčky)

Zhodnocení výsledků Obálkové analýzy

Průměrné hodnoty amplitud poruchových frekvencí nejlépe popisují aktuální stav testovaného ložiska. Pokud se zaměříme na měření se Stupnicí1 zjistíme, že amplitudy poruchových frekvencí odpovídají skutečnému poškození testovaného ložiska. Maximální rozlišení amplituda poruchové frekvence/působící porucha lze nalézt u měření č. 4, 6. U měření se Stupnicí2 jsou velikosti průměrných amplitud poruchových frekvencí méně odlišné, ale opět se projevuje správný charakter popisu dané poruchy testovaného ložiska. Obálková analýza nezahrnuje meze, které by umožnily klasifikovat stav ložiska do nějaké z poruchových hladin. Touto metodou lze pouze určit, jaká možná porucha v ložisku nastala tj. kde najít poruchu (poškození) ložiska. Obálková analýza neumožňuje stanovit úroveň lubrikace testovaného ložiska.

9.6 Kepstrální analýza

Bude provedena diagnostika stavu testovaných valivých ložisek s daným poškozením pomocí metody Kepstrální analýzy v kapitole 5.3.2. Opět se jedná o diagnostickou metodu pracující ve frekvenční oblasti. Metoda je založena na hledání amplitudových převýšení poruchových kvefrencí ve vypočítaném kepstru. Hodnoty kvefrence dle působící poruchy testovaného ložiska při určitých otáčkách ložiska jsou popsány v následujících tabulkách.

Vypočítaná kepstra naměřeného vibračního signálu budou vykreslena do společných 3D grafů, ve kterých budou zvýrazněny nalezené amplitudy poruchových kvefrencí. Poruchové kvefrence testovaného ložiska budou hledány stejným způsobem jako u Obálkové analýzy.

$$Pásmo = q_{porucha} \pm 5\%(q_{porucha})$$

Pro Stupnicí1 vykreslíme kepstrum maximální délky 0,8 s a pro Stupnicí2 kepstrum s maximální délkou 1,6 s.

Nalezené poruchové kvefrencie budou zobrazeny v kepstru pomocí těchto barev

- Poruchy ložiskové klece Poruchová kvefrencie 1 červená
- Poruchy vnějšího kroužku Poruchová kvefrencie 2 zelená
- Poruchy vnitřního kroužku Poruchová kvefrencie 3 modrá
- Poruchy valivých elementů Poruchová kvefrencie 4 černá

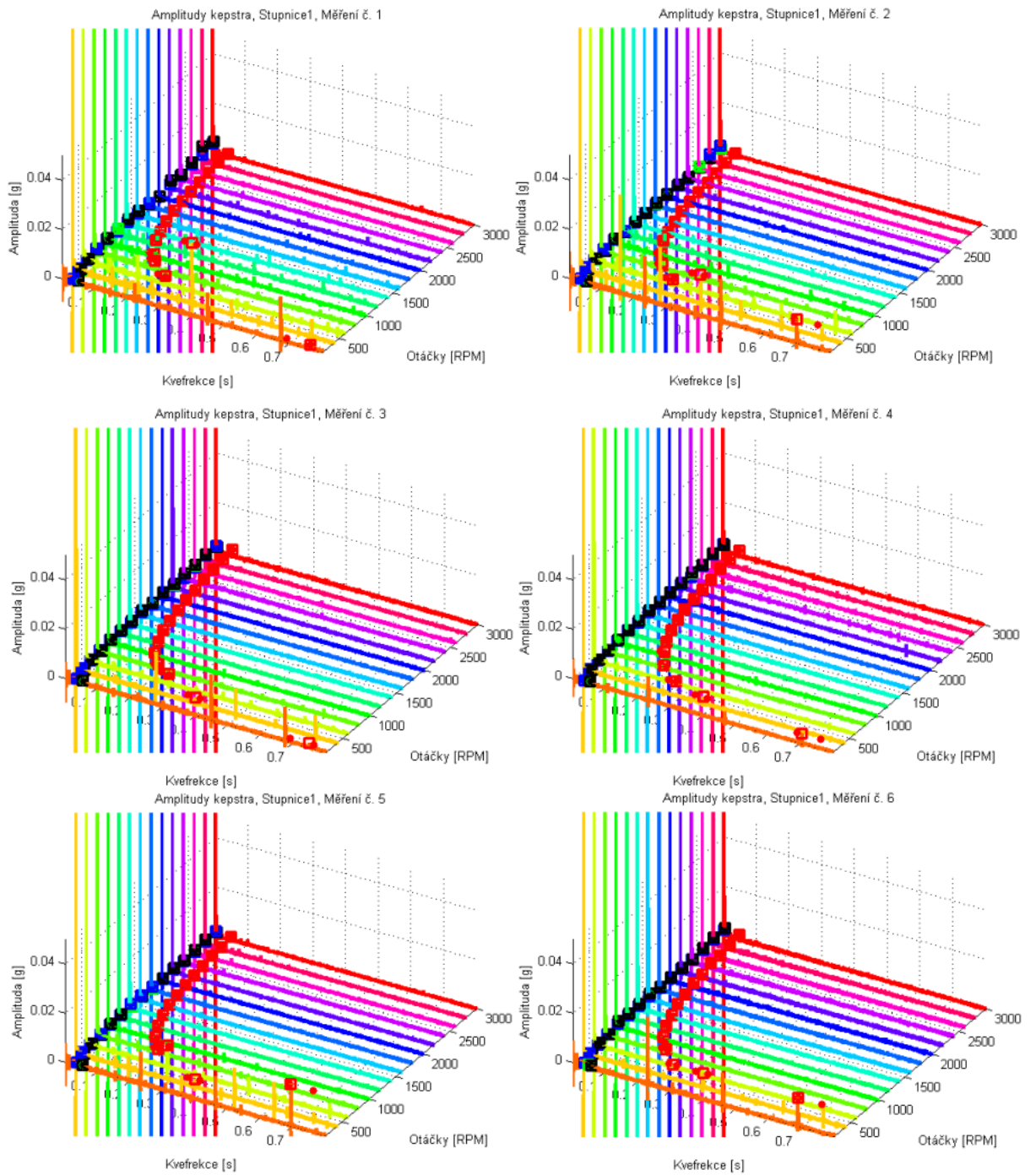
Poruchové kvefrencie, Stupnice1

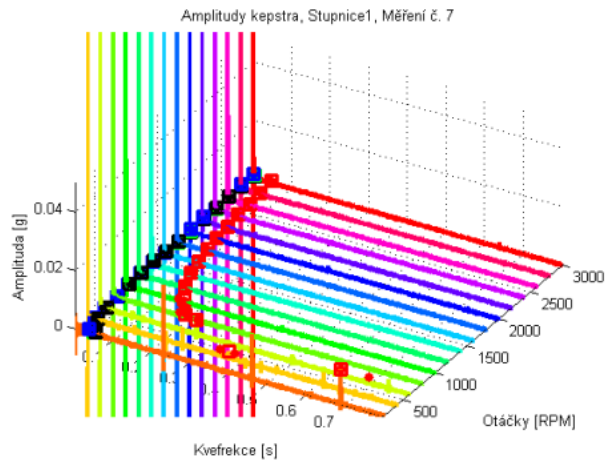
Otáčky [RPM]	FTQ [s]	BPQO [s]	BPQI [s]	BSQ [s]
200	0,7246	0,0518	0,0365	0,0538
400	0,3623	0,0259	0,0183	0,0269
600	0,2415	0,0173	0,0122	0,0179
800	0,1812	0,0129	0,0091	0,0134
1000	0,1449	0,0104	0,0073	0,0108
1200	0,1208	0,0086	0,0061	0,0090
1400	0,1035	0,0074	0,0052	0,0077
1600	0,0907	0,0065	0,0046	0,0067
1800	0,0806	0,0058	0,0041	0,0060
2000	0,0725	0,0052	0,0037	0,0054
2200	0,0659	0,0047	0,0033	0,0049
2400	0,0604	0,0043	0,0030	0,0045
2600	0,0558	0,0040	0,0028	0,0041
2800	0,0518	0,0037	0,0026	0,0038
3000	0,0483	0,0035	0,0024	0,0036

Poruchové kvefrencie, Stupnice2

Otáčky [RPM]	FTQ [s]	BPQO [s]	BPQI [s]	BSQ [s]
100	1,4493	0,1035	0,0731	0,1075
120	1,2048	0,0863	0,0609	0,0896
140	1,0309	0,0740	0,0522	0,0768
160	0,9091	0,0647	0,0457	0,0672
180	0,8065	0,0575	0,0406	0,0597
200	0,7246	0,0518	0,0365	0,0538
220	0,6579	0,0471	0,0332	0,0489
240	0,6024	0,0432	0,0305	0,0448
260	0,5587	0,0398	0,0281	0,0414
280	0,5181	0,0370	0,0261	0,0384
300	0,4831	0,0345	0,0244	0,0358
320	0,4525	0,0324	0,0228	0,0336
340	0,4274	0,0305	0,0215	0,0316
360	0,4032	0,0288	0,0203	0,0299
380	0,3817	0,0273	0,0192	0,0283

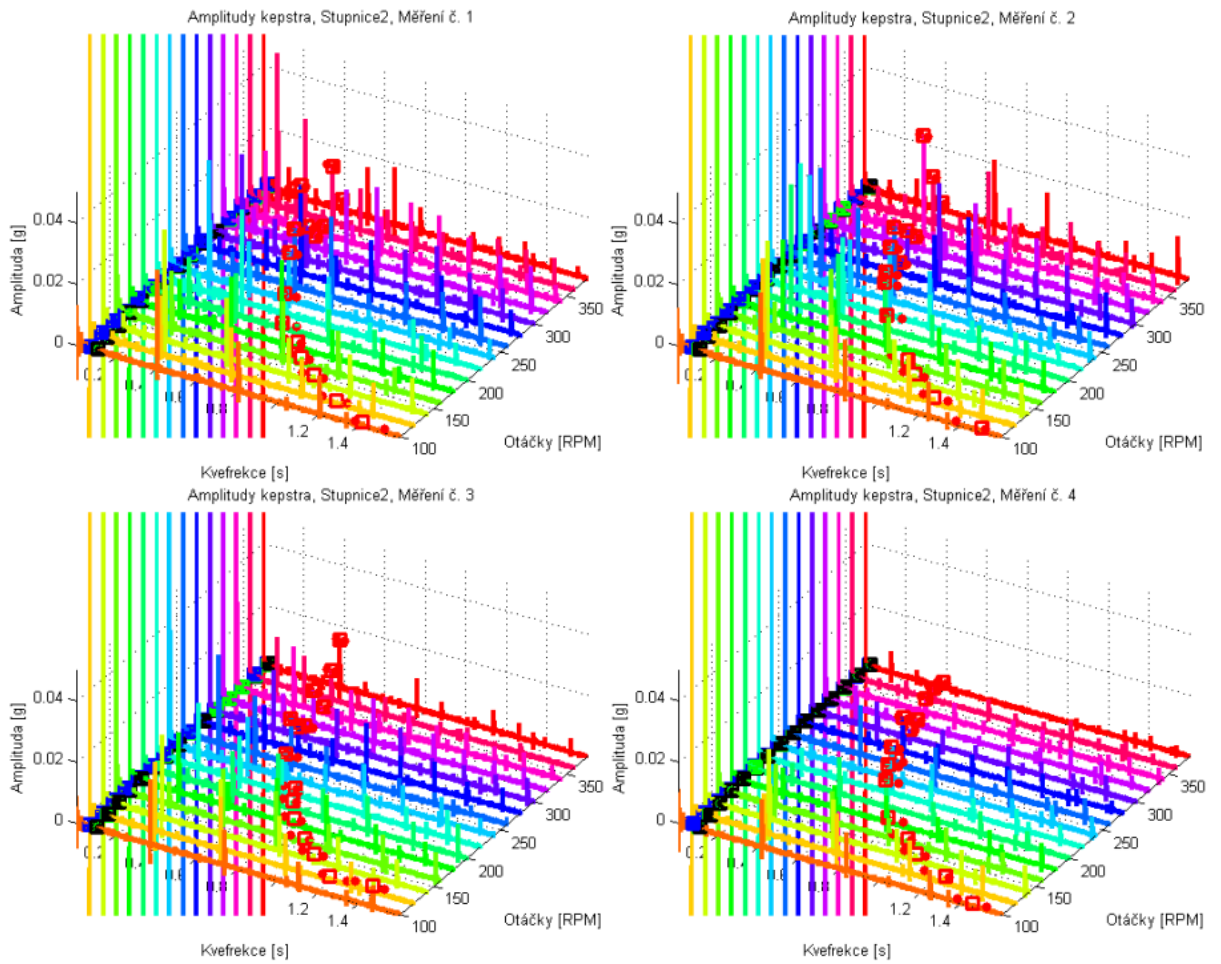
Kepstrální analýza, Stupnice1

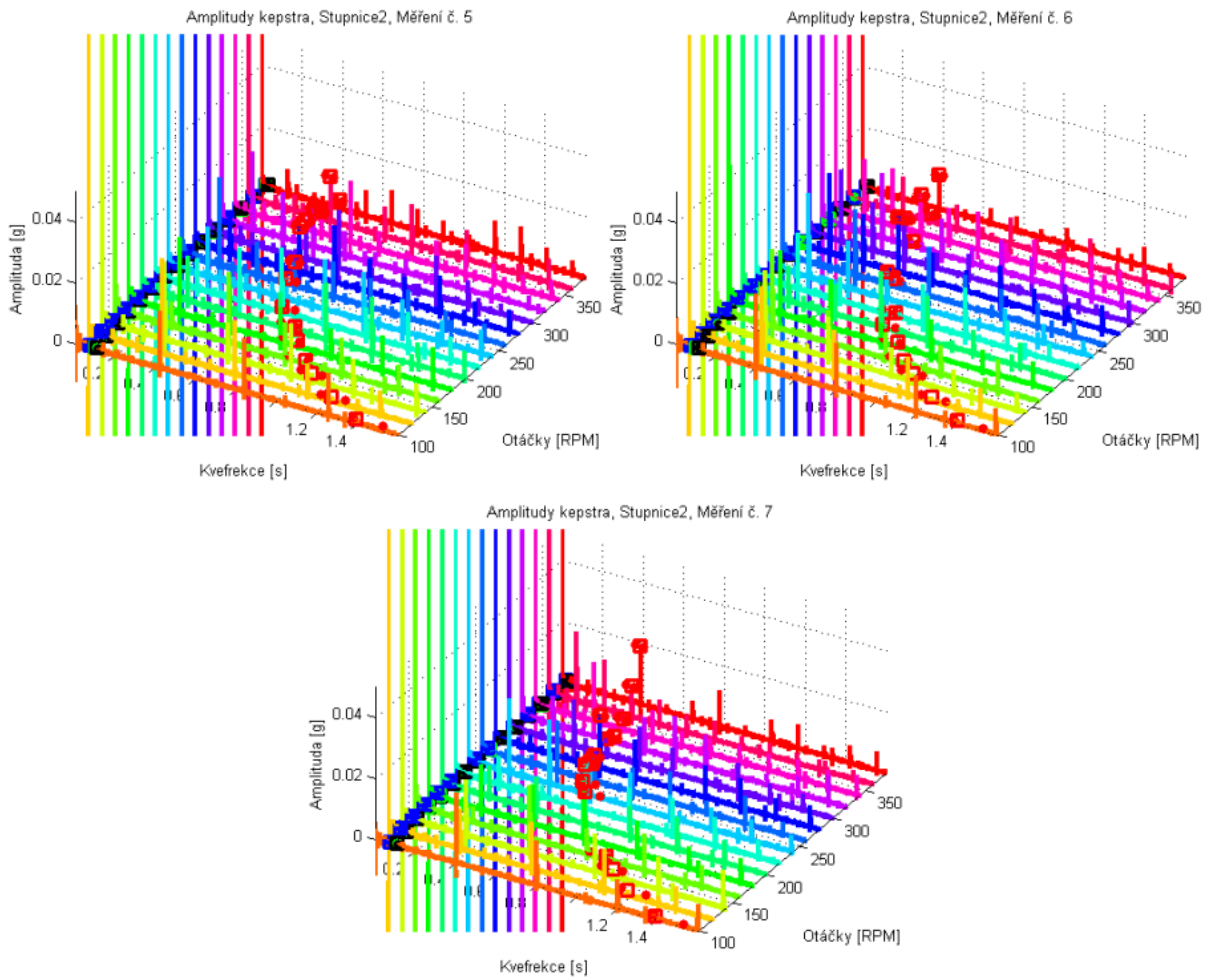




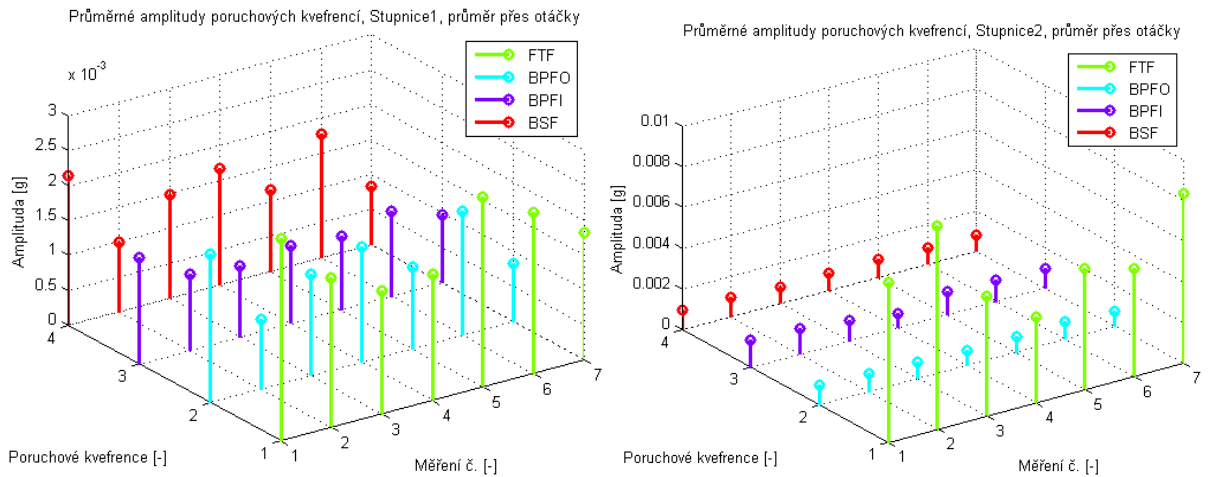
9.16: Kepstrální analýza Stupnice1 ,měření č. 1-7

Kepstrální analýza, Stupnice2





9.17: Kepstrální analýza Stupnice2 ,měření č. 1-7



9.18: Průměrné hodnoty amplitud poruchových kvfrencí (přes otáčky)

Zhodnocení výsledků Kepstrální analýzy

Ze zobrazených vypočítaných výsledků Kepstrální analýzy je velice obtížné stanovit aktuální stav testovaného ložiska. Hodnoty amplitud kepstra odpovídající poruchovým kvfrencím jsou velmi nepatrné, tudíž je velmi složité správně odhadnout stav testovaného ložiska.

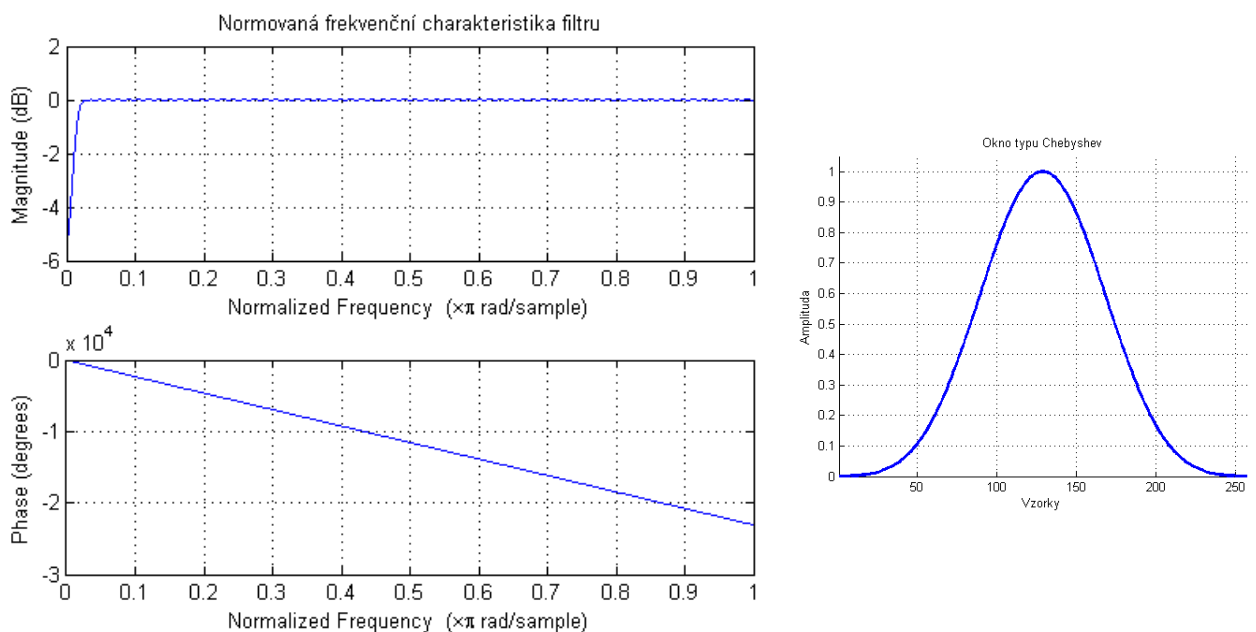
Provedli jsme průměrování amplitudových převýšení kepra na daných poruchových kvefrencích. Pomocí těchto zprůměrovaných hodnoty není možné určit typ poškození ložiska. Díky těmto výsledkům lze konstatovat, že Kepstrální analýza není vhodným nástrojem pro určování aktuálního stavu testovaných ložisek.

9.7 ACMT

Bude provedena diagnostika stavu testovaných valivých ložisek s daným poškozením pomocí metody ACMT v kapitole 6.1. Metoda ACMT firmy ADASH pouze zpracovává naměřený vibrační signál s vysokou frekvencí vzorkování se snahou nejlépe zobrazit měřené špičkové hodnoty generované mechanickými rázovými pulzy vznikajícími v místě poškození testovaného ložiska. Získané špičkové hodnoty nejlépe popisují aktuální stav ložiska. Metoda ACMT bude implementována do programového prostředí Matlab/Simulink.

Pro ověření správné funkce implementované metody bude provedena validace porovnávací metodou (charakteristická veličina, statistické vlastnosti) pomocí naměřených vibračních dat se Stupnicí2. Stav testovaného ložiska určíme pomocí průměrné hodnoty maximálních výkmitů Peak to Peak (charakteristická veličina je složena z minimální a maximální hodnoty výkmitu Nula-Peak) v kompletní délce vibračního záznamu při daných otáčkách ložiska. Pro určení stavu testovaného ložiska použijeme naměřené vibrační signály se Stupnicí1 a Stupnicí2.

Metoda ACMT využívá pro odstranění nízkých frekvencí (především otáčkové frekvence ložiska) z naměřeného vibračního signálu filtr typu horní propust. V programovém prostředí Matlab tuto filtraci zrealizujeme pomocí FIR filtru horní propusti s řádem 256 a oknem typu Chebyshev. Frekvenční charakteristika a tvar okna je popsán následujícími grafy. [10]



9.19: Frekvenční charakteristika použitého filtru, tvar Chebyshev okna

Parametry metody ACMT jsou zvoleny konstantní pro všechna provedená měření. Takto zvolné parametry budou použity v implementované metodě ACMT v programovém prostředí Matlab.

- $f_{min} = 500 \text{ Hz}$
- *Vzorkování* = 1024 Hz
- *Počet vzorků* = 1024

9.7.1 Validace ACMT

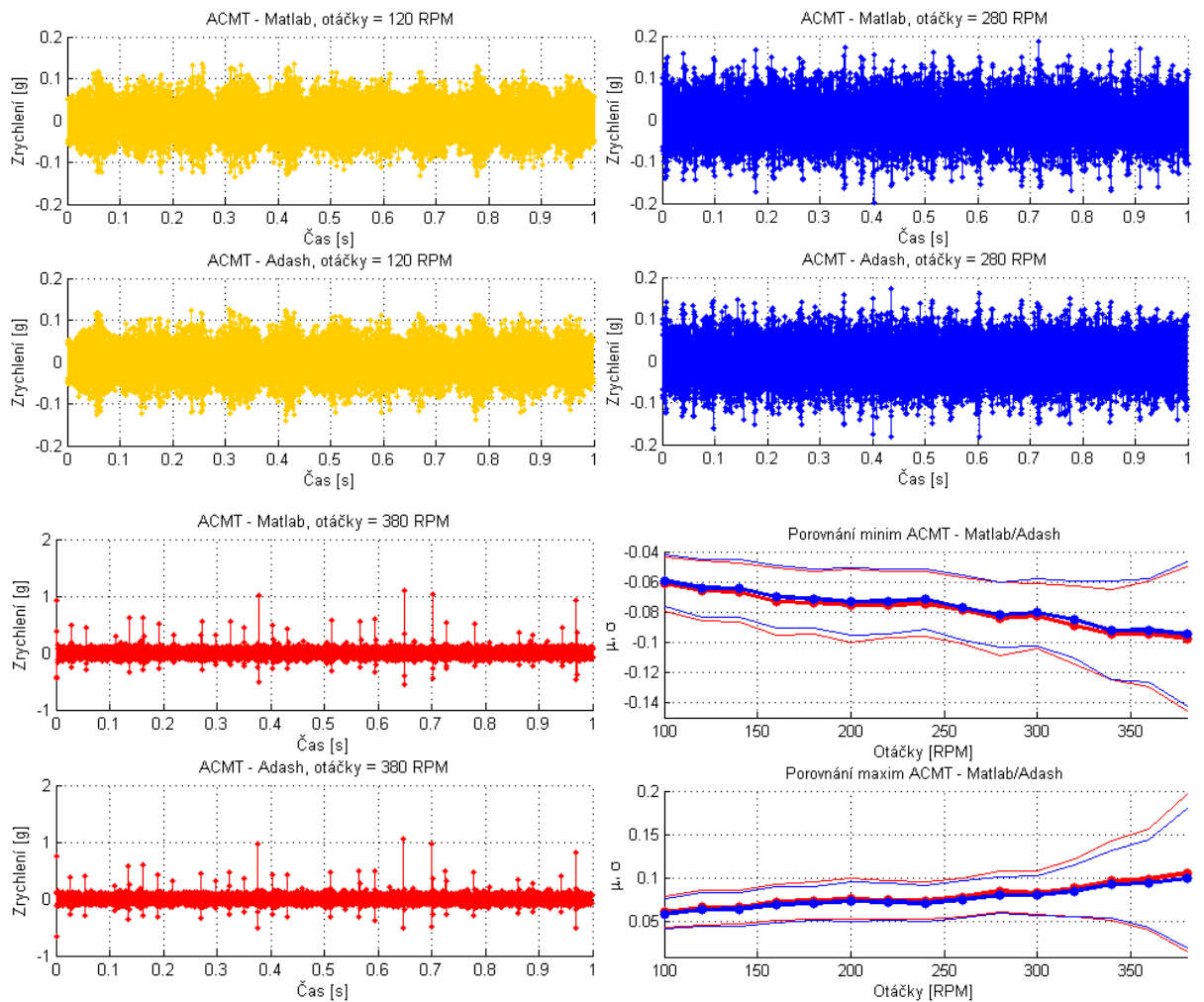
Validace metody ACMT bude provedena nejprve srovnávací metodou. Analyzátor ADASH Va4Pro umožňuje v módu Analyzer načíst již naměřený časový záznam vibrací a provést výpočet metody ACMT off-line. [4] Po provedení výpočtu lze výsledný záznam charakteristické veličiny ACMT exportovat do formátu CSV a následně zpracovat v Matlabu. Porovnání vypočítaných charakteristických veličin provedeme pro naměřená data se Stupnicí2 a použijeme měření č. 6 (Umělé poškozený vnější kroužek ložiska L1). Budou uvedeny tři příklady (různé otáčky ložiska) porovnání vypočítaných charakteristických veličin ACMT. Metoda ACMT je prioritně určena pro diagnostiku stavu valivých ložisek pomaloběžných strojů.

Dalším možným způsobem, jak provést validaci metody ACMT je použít statistické vlastnosti získaných charakteristických veličin tj. střední hodnoty a směrodatné odchylky. Tyto dvě hodnoty jsou vypočítány z charakteristických veličin získaných aplikací metody ACMT (Matlab/Adash) na naměřený vibrační signál délky 1 s (poslední sekunda naměřeného záznamu) při různých otáčkách ložiska. Střední hodnoty μ se svými směrodatnými odchylkami σ vykreslíme do grafu ve formátu $\mu \pm \sigma$ pro dané otáčky. Statistický test bude proveden zvlášť pro minima a maxima vypočítaných charakteristických veličin.

Postup validace ACMT

- 1) Naměření vibračního signálu pomocí akcelerometru při různých otáčkách ložiska.
- 2) Export naměřeného signálu do formátu WAV.
- 3) Výpočet ACMT v analyzátoru + export charakteristických veličin do formátu CSV.
- 4) Načtení naměřených dat (WAV) do Matlabu a přepočítání na skutečné hodnoty zrychlení.
- 5) Načtení charakteristických veličin ve formátu CSV do Matlabu.
- 6) Porovnání výsledků metod pomocí vykreslení vypočítaných charakteristických veličin do společného grafu.
- 7) Porovnání statistických vlastností vypočítaných charakteristických veličin.

Validace ACMT porovnávací metodou a statistickými vlastnostmi



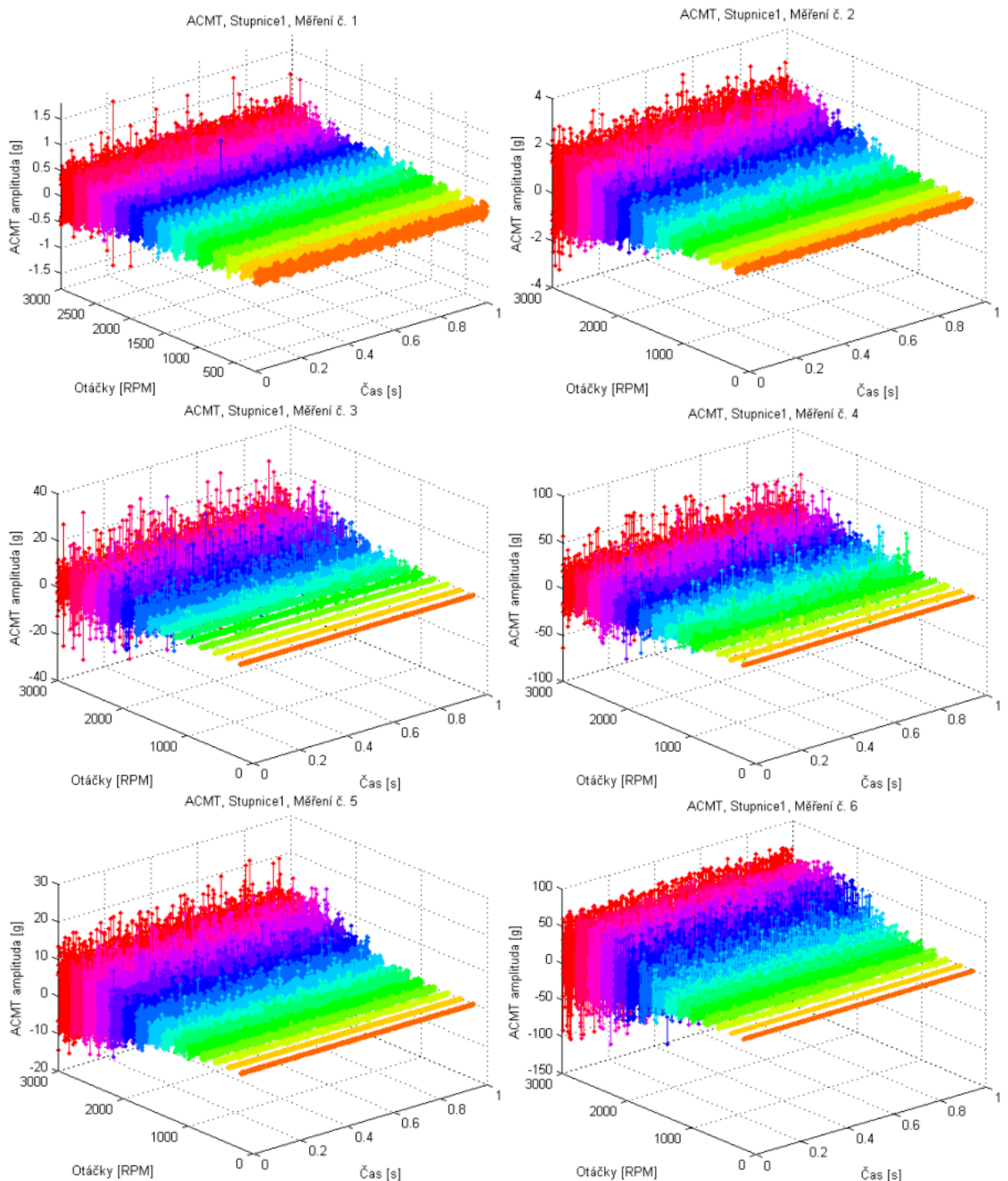
9.20: Tři příklady porovnání průběhů ACMT a statistické porovnání

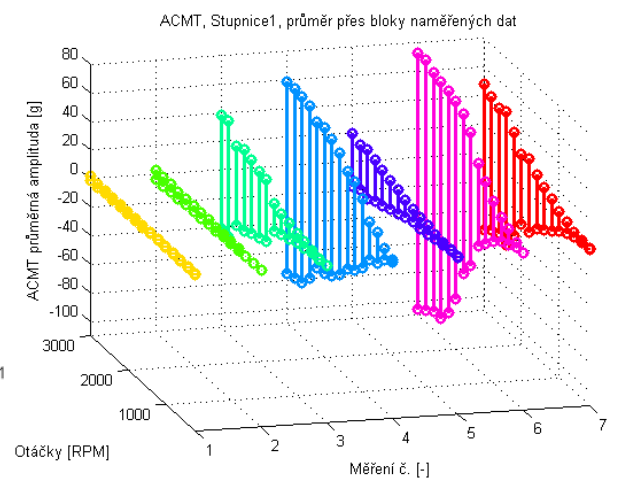
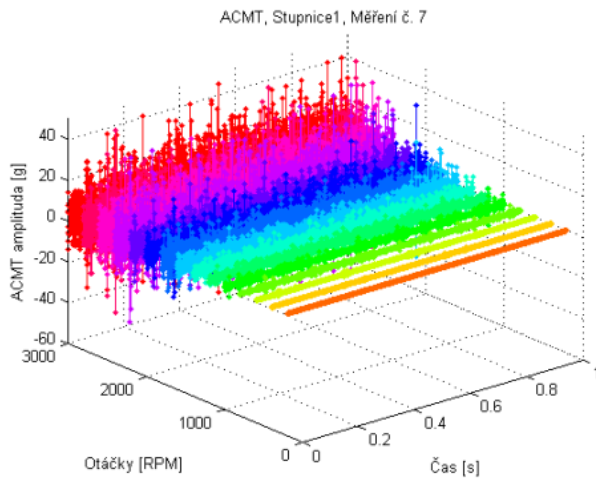
Zobrazené grafy popisují zpracovaný vibrační časový signál délky 1 s. Amplitudy charakteristických veličin si odpovídají, až na drobné odchylky způsobené zaokrouhlováním během výpočtu. Pro lepší věrohodnost implementované metody v Matlabu jsme provedli porovnání statistických vlastností charakteristických veličin, tj. graf vpravo dole. Modrou silnou čarou je zobrazena průměrná (střední) hodnota μ vypočítaných minim a maxim charakteristické veličiny, slabou modrou čarou je zobrazeno pásmo směrodatné odchylky $\mu \pm \sigma$. Červenou čarou jsou zobrazeny stejné vlastnosti vypočítaných charakteristických veličin v analyzátoru ADASH VA4Pro. Středné hodnoty a směrodatné odchylky byly vypočítány pomocí funkcí v Matlabu. Střední hodnoty se směrodatnými odchylkami jsou si pro oba případy velmi blízké. Správná funkce implementované metody ACMT v Matlabu je tedy potvrzena.

9.7.2 Diagnostika pomocí ACMT

Pro diagnostiku stavu testovaných valivých ložisek bude použita metoda ACMT implementovaná v Matlabu. Do společných 3D grafů vykreslíme vypočítané charakteristické veličiny v závislosti na otáčkách ložiska (Stupnice1, Stupnice2). Pro přehlednost vykreslíme pouze poslední sekundu vypočítaného záznamu charakteristické veličiny. Pro finální vyhodnocení stavu ložiska použijeme průměrné maximální Peak to Peak hodnoty vypočítaných charakteristických veličin v úsecích délky odpovídající nastavené hodnotě *počet vzorků* přes kompletní délku naměřeného signálu (60 s) při daných otáčkách ložiska.

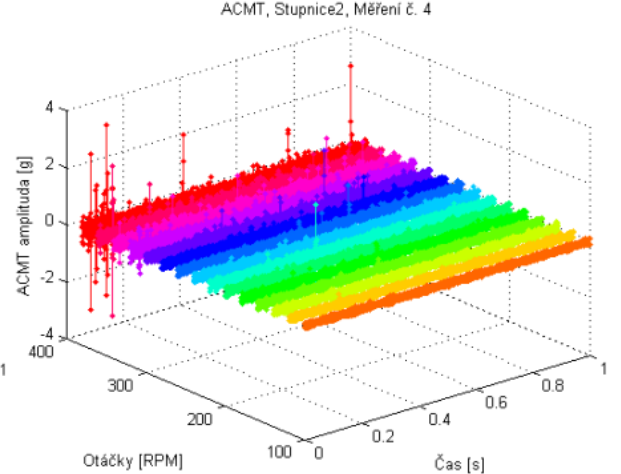
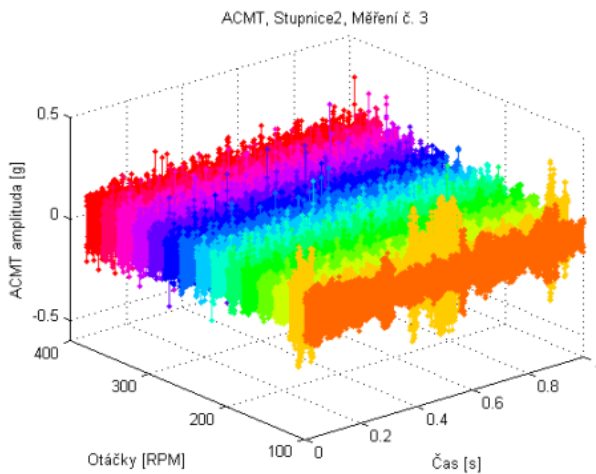
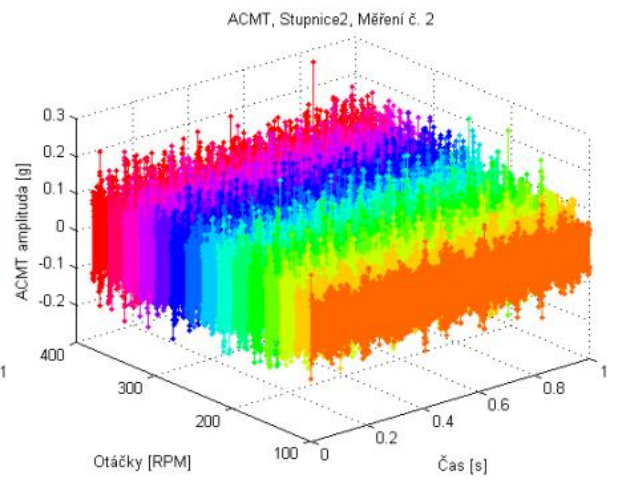
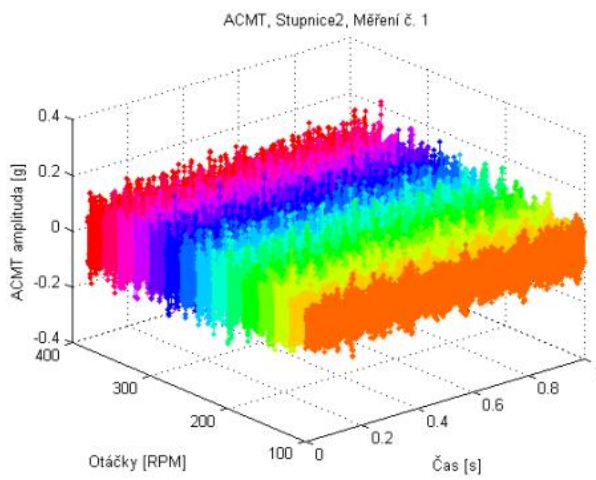
ACMT, Stupnice1

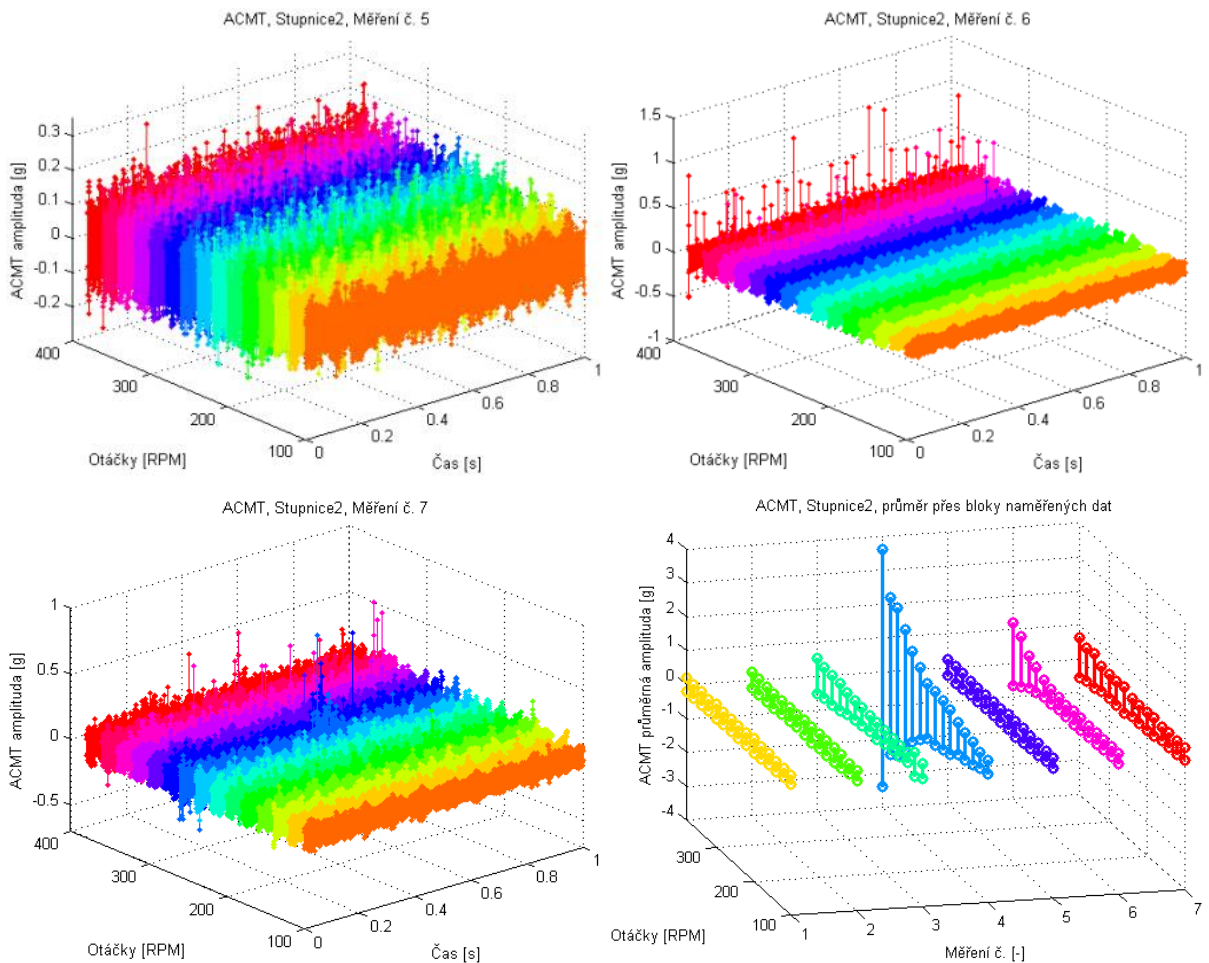




9.21: Charakteristické veličiny ACMT s průměry pro jednotlivá měření, Stupnice1

ACMT, Stupnice2





9.22 Charakteristické veličiny ACMT s průměry pro jednotlivá měření, Stupnice2

Zhodnocení výsledků metody ACMT

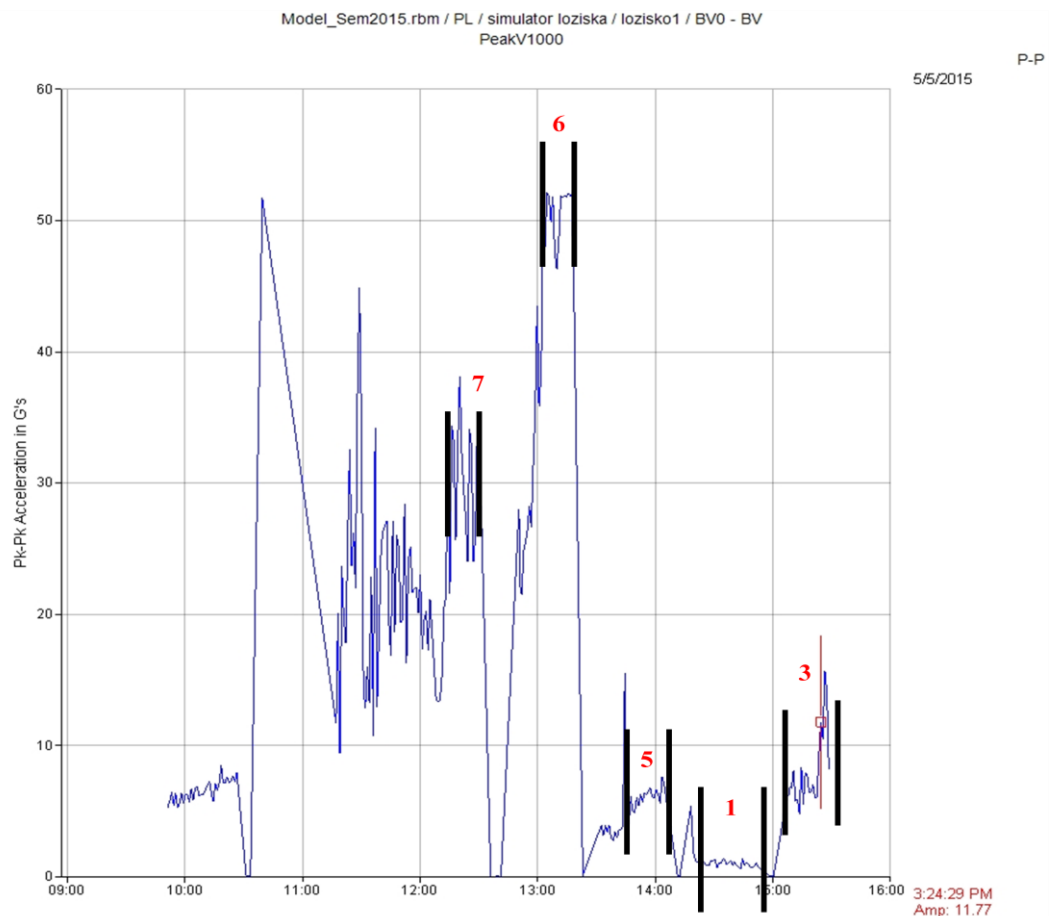
Diagnostická metoda ACMT je nástrojem umožňujícím lépe zobrazit rázové pulzy vznikající odvalováním valivých částí přes vzniklou poruchu ložiska. Přesněji tato metoda nachází uplatnění při diagnostice pomaluběžných strojů, avšak ve své podstatě nezahrnuje meze umožňující klasifikovat aktuální stav testovaného ložiska. Aktuální stav lze posoudit pouze pomocí detekovaných maximálních hodnot Peak to Peak, viz zobrazené grafy průměrů maximálního výkmitu přes celou délku naměřených dat (maximální výkmitu počítány v blocích dané délky) při určitých otáčkách ložiska. Pokud se zaměříme na tyto grafy, zjistíme, že pro měření se Stupnicí1 dochází k největšímu výkmitu při měření č. 6 (Umělé poškození vnějšího kroužku L1) a pro měření se Stupnicí2 se jedná o měření č. 4 (Opatřebené suché ložisko). V obou případech měření (Stupnice1,2) se jedná o nejvíce poškozená ložiska.

9.8 PeakVue

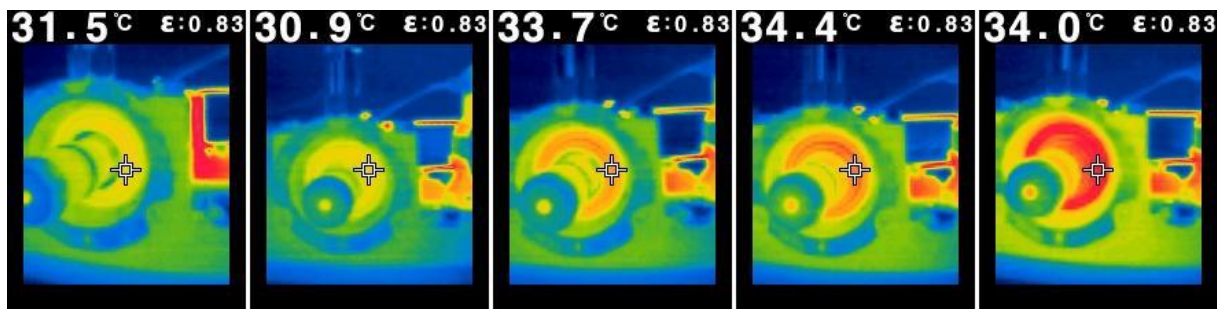
Bude provedena diagnostika stavu testovaných valivých ložisek s daným poškozením pomocí metody PeakVue v kapitole 6.2. Popsaný algoritmus metody je implementován v programovém prostředí Matlab. Správnost implementace potvrdíme validací podobně jako u metody ACMT. Měření vibrací pomocí analyzátoru EMERSON CSI 2600 je velmi časově náročné. Celý měřicí systém je určen pro dlouhodobé sledování kondice valivých ložisek (zubových převodovek) rotačních strojů. Validaci správně implementované metody PeakVue v Matlabu bude provedena opět srovnávací metodou. Během veškerého měření a výpočtu charakteristické veličiny budou nastaveny vždy stejné parametry metody PeakVue tímto způsobem.

- Maximální frekvence $F_{max} = 1000 \text{ Hz}$
- Spodní hranice HP filtru $F_{low} = 1000 \text{ Hz}$
- Počet vzorků (délka okna) $okno = 1 \text{ s } (F_{vz})$

Pro účely validace implementované metody v Matlabu a samotné diagnostiky stavu testovaných valivých ložisek jsou použity výsledky jednoho dlouhodobého měření tj. měření vibrací pěti testovaných ložisek při konstantních otáčkách 1600 RPM. Výsledky tohoto měření, doplněné o snímky tepelného přizpůsobení jsou zobrazeny níže. Černými čarami jsou vymezeny úseky použitelného měření. Úseky jsou dále označeny červenými čísly dle příslušnosti k danému měření.



9.23: Naměřená charakteristické veličiny analyzátozem EMERSON CSI 2600



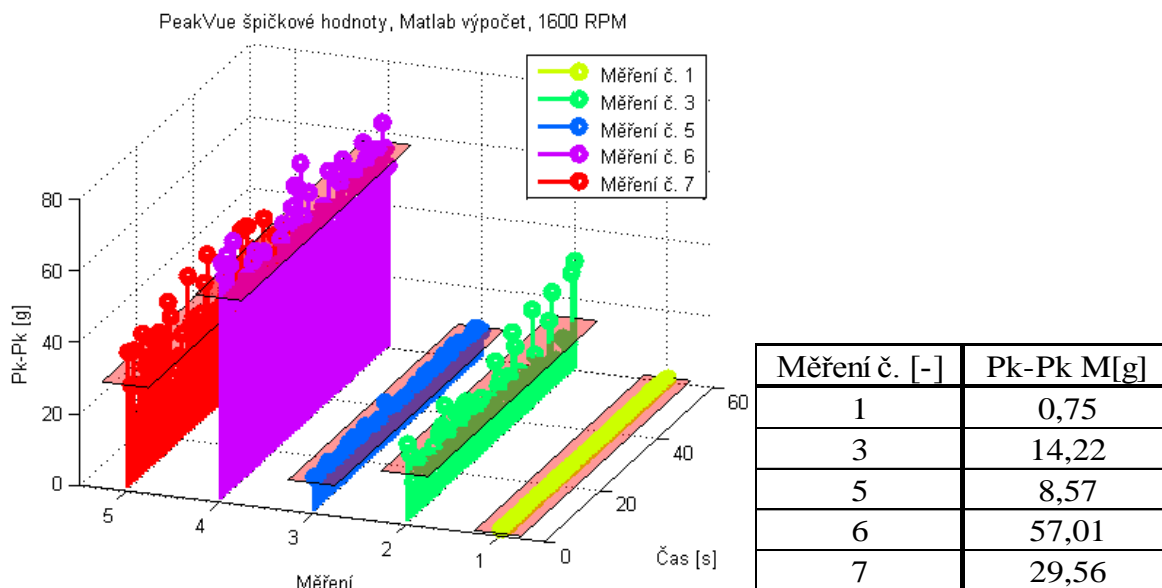
9.24: Tepelné přizpůsobení během měření

9.8.1 Validace PeakVue

Validace implementované metody PeakVue v Matlabu bude provedena grafickým porovnáním získaných charakteristických veličin (špičkových hodnot) z měření testovaných ložisek pomocí analyzátoru EMERSON CSI 2600. Naměřené (průměrné) hodnoty charakteristických veličin testovaných ložisek jsou zaznamenány v následující tabulce.

Měření č. [-]	Pk-Pk [g]
1	1,12
3	11,77
5	6,61
6	51,91
7	31,05

Průběh charakteristické veličiny vypočítané Matlabem s průměrnými hodnotami



9.25: Charakteristické veličiny a jejich průměry (Matlab)

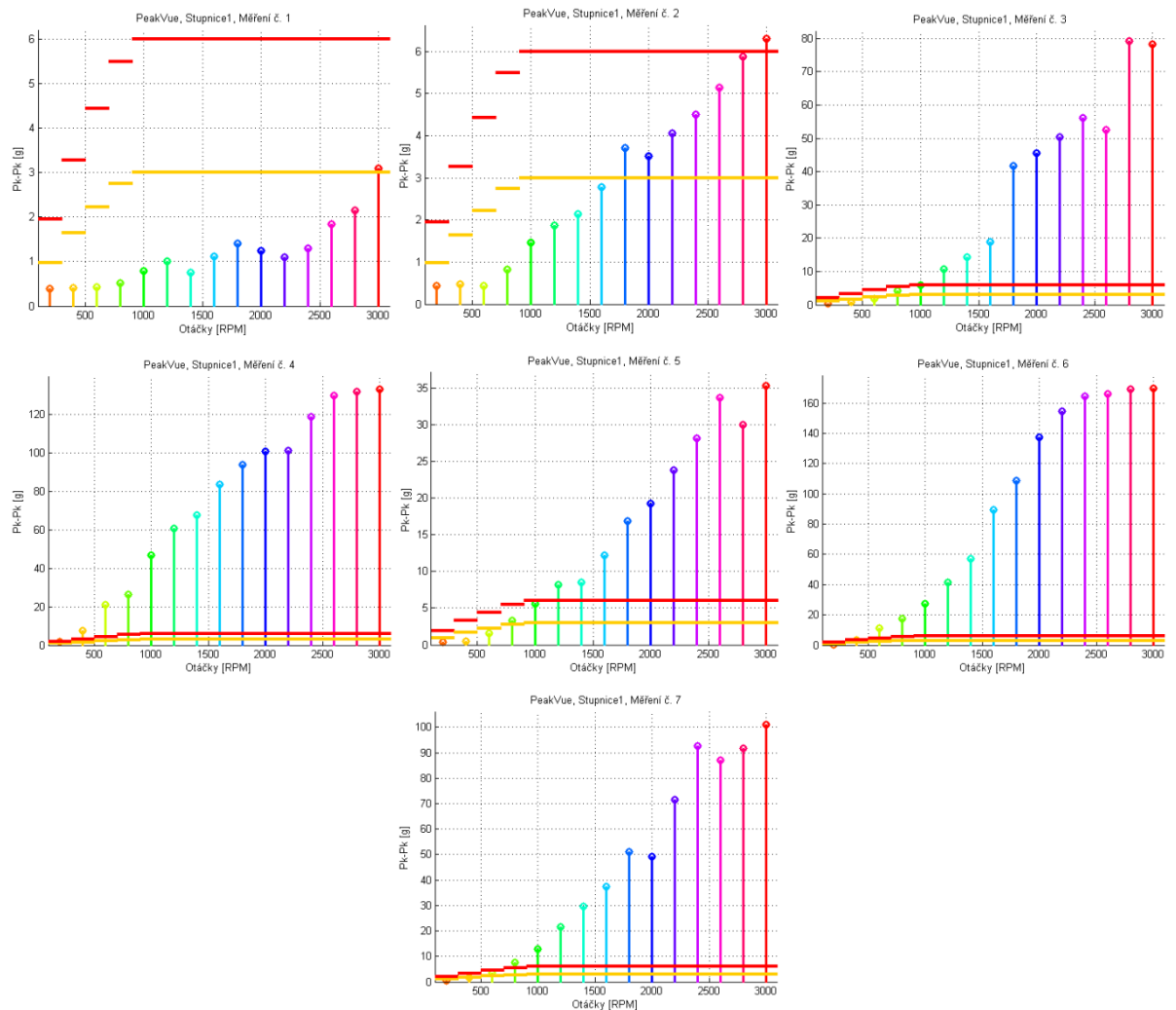
Zhodnocení validace metody PeakVue

Vlivem velkého rozptylu charakteristické veličiny (špičkové hodnoty) dochází k odchylce naměřených a vypočítaných středních hodnot veličiny Pk-Pk. Pokud bude uvažovaný rozptyl akceptován, lze implementovanou metodu PeakVue v Matlabu považovat za autentickou a věrohodnou pro další určování stavu testovaných ložisek.

9.8.2 Diagnostika pomocí PeakVue

Validace implementované metody do Matlabu proběhla úspěšně, proto lze pomocí výpočtu charakteristické veličiny určit stav testovaného ložiska. Testování bude provedeno pro měření se Stupnicí1 a Stupnicí2, hranice klasifikující aktuální stav ložiska budou přepočítávány vzhledem k měřeným otáčkám ložiska. Vykreslíme průměrné hodnoty charakteristických veličin naměřených vibrací s délkou 1 minuta pro dané otáčky ložiska.

PeakVue, Stupnice1

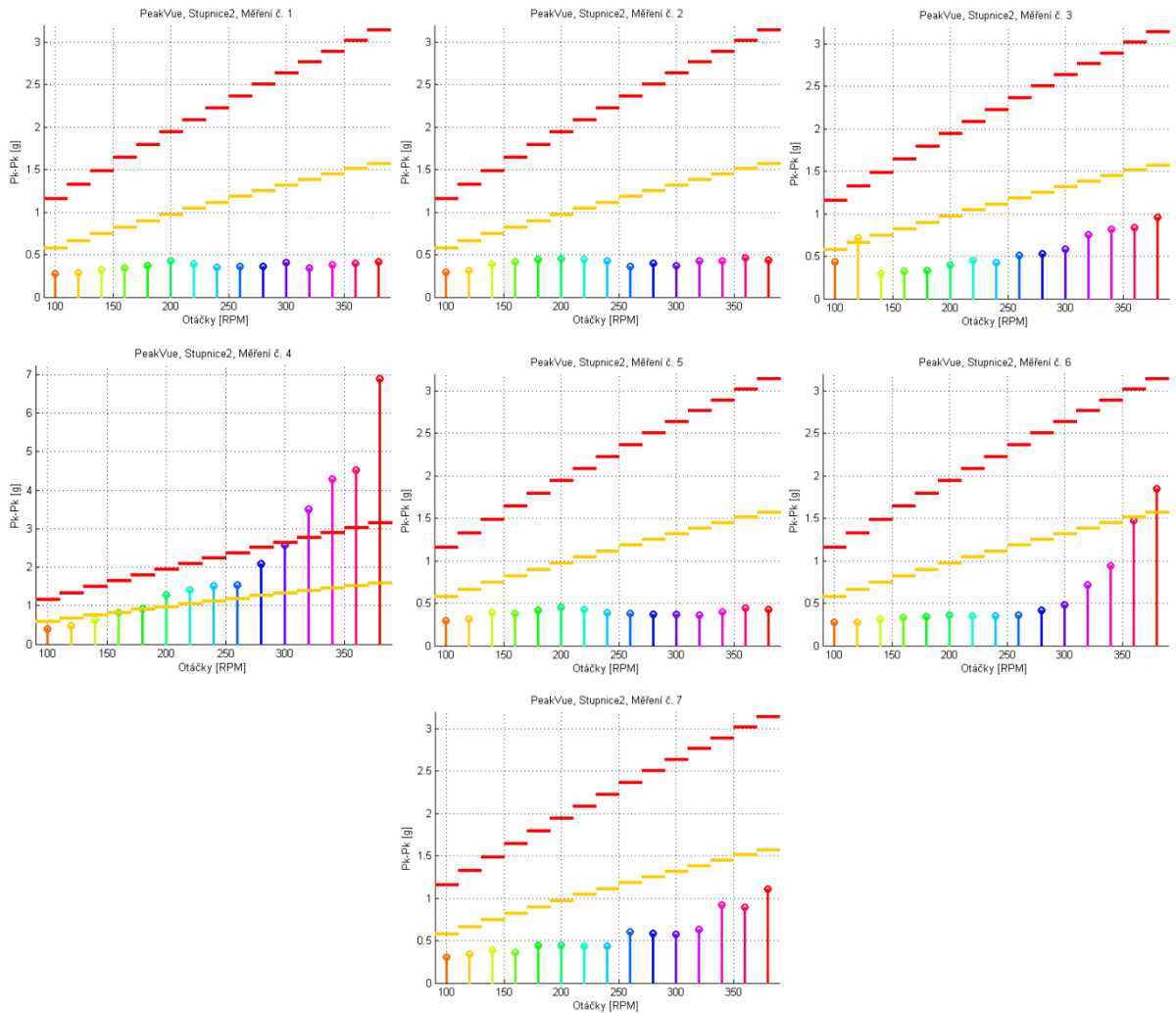


9.26: PeakVue, Stupnice1

Zhodnocení výsledků PeakVue, Stupnice1

Červenou čarou je zobrazena hodnota alarmu poruchy testovaného ložiska, oranžovou barvou je zobrazena výstraha. Tyto hodnoty jsou vypočítány pro dané nastavené otáčky testovaného ložiska. Ze zobrazených grafů je názorně vidět, že pouze měření č. 1 (Nové lubrikované ložisko) převyšuje pouze úroveň výstrahy. Ve všech ostatních případech měření testovaných ložisek dochází k překonání hladin alarmu poruchy ložiska. K překonávání hladiny alarmu poruchy dochází nejčastěji u měření s otáčkami nad 1200 RPM.

PeakVue, Stupnice2



9.27: PeakVue, Stupnice2

Zhodnocení výsledků PeakVue, Stupnice2

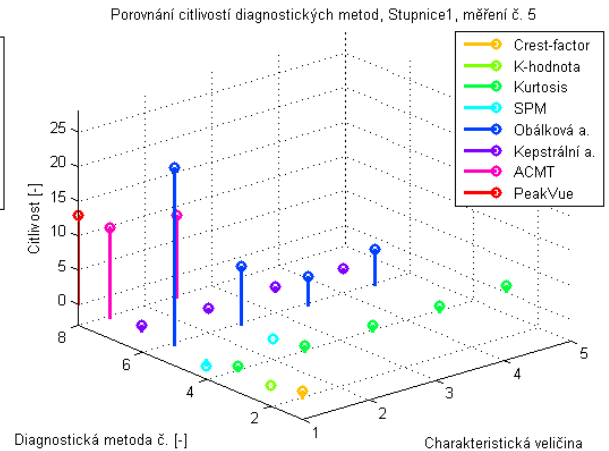
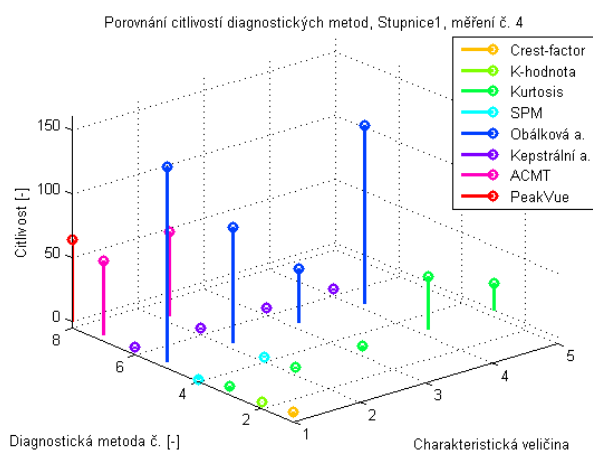
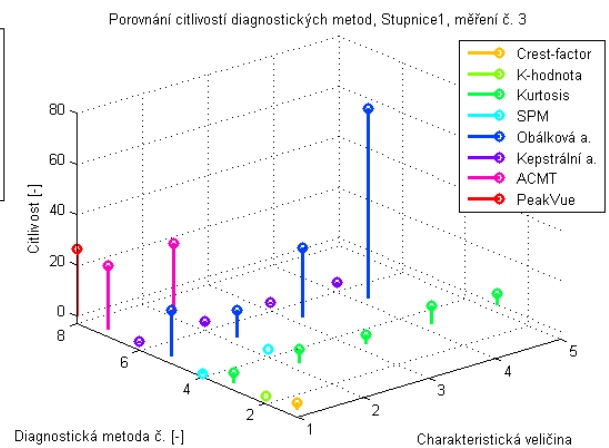
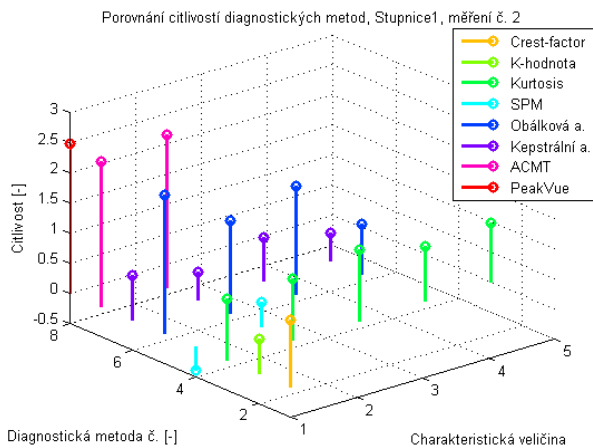
Úrovně alarmů jsou zobrazeny stejným způsobem jako u výsledků měření se Stupnicí1 (červená čára – alarm poruchy, oranžová čára – výstraha). Ze zobrazených grafů je názorně vidět, že pouze v jednom případě dochází k překonání úrovně alarmu poruchy tj. měření č. 4 (Opatřené suché ložisko). U měření č. 6 dochází k překonání úrovně výstrahy. Ve všech ostatních případech měření testovaných ložisek nedochází ani k překonání úrovně výstrahy. Díky těmto výsledkům lze dospět závěru, že metoda PeakVue není vhodná k diagnostice stavu pomaluběžných strojů.

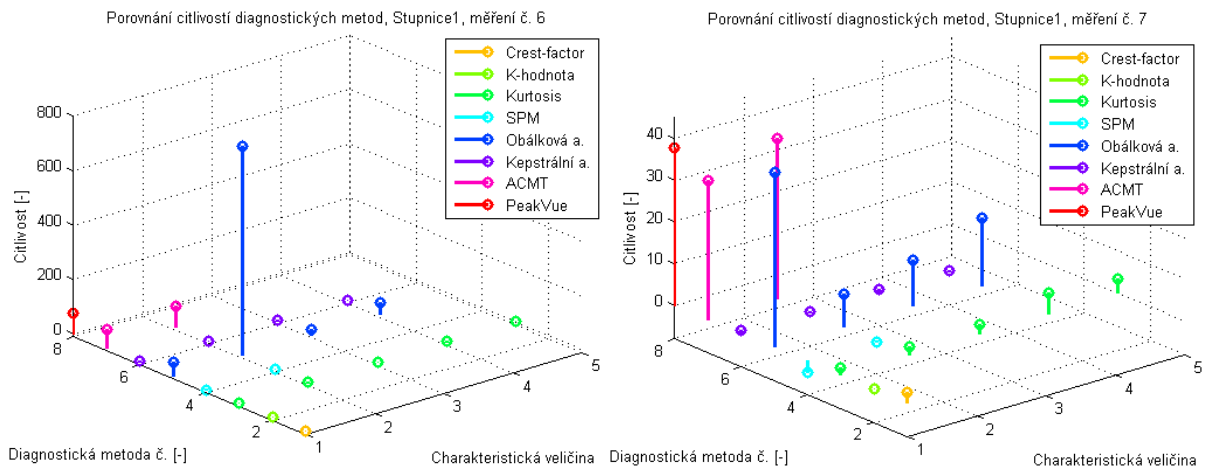
10 Porovnání výpovědních schopností diagnostických metod

V této kapitole bude provedeno finální porovnání výpovědních schopností použitých diagnostických metod. Každá z těchto metod popisuje stav testovaného ložiska pomocí své charakteristické veličiny. Cílem je určit nejcitlivější diagnostickou metodu pro určitou úroveň poškození testovaného ložiska. Citlivost diagnostických metod je definována jako podíl vypočítané charakteristické veličiny testovaného (opotřebeného, poškozeného) ložiska ku charakteristické veličině nového lubrikovaného ložiska. Jelikož bylo měření vibračního signálu prováděno po určitou dobu a při určitých otáčkách ložiska, provedeme průměrování charakteristických veličin přes délku naměřených dat a otáčky. Vypočítané citlivostní hodnoty vykreslíme do společného 3D grafu a graficky porovnáme. Zmíněné citlivosti diagnostických metod vypočítáme pro měření se Stupnicí1 a Stupnicí2 zvlášť.

Porovnání použitých diagnostických metod provedeme citlivostním způsobem z důvodu větší věrohodnosti získaných výsledků, tj. citlivost dané metody na působící poruchu ložiska je výraznější než samotné překročení charakteristické veličiny přes klasifikační úroveň. Dalším důvodem je absence klasifikačních úrovní u některých diagnostických metod např. ACMT, Obálková analýza, Kepstrální analýza.

Porovnání, Stupnice1





10.1: Porovnání diagnostickým metod, Stupnice1

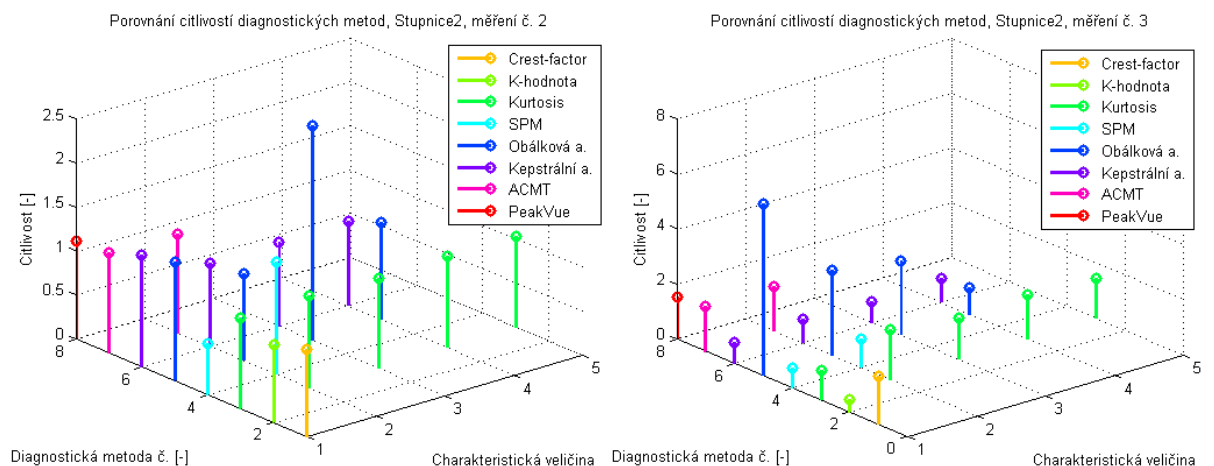
Zhodnocení zobrazených výsledků, Stupnice1

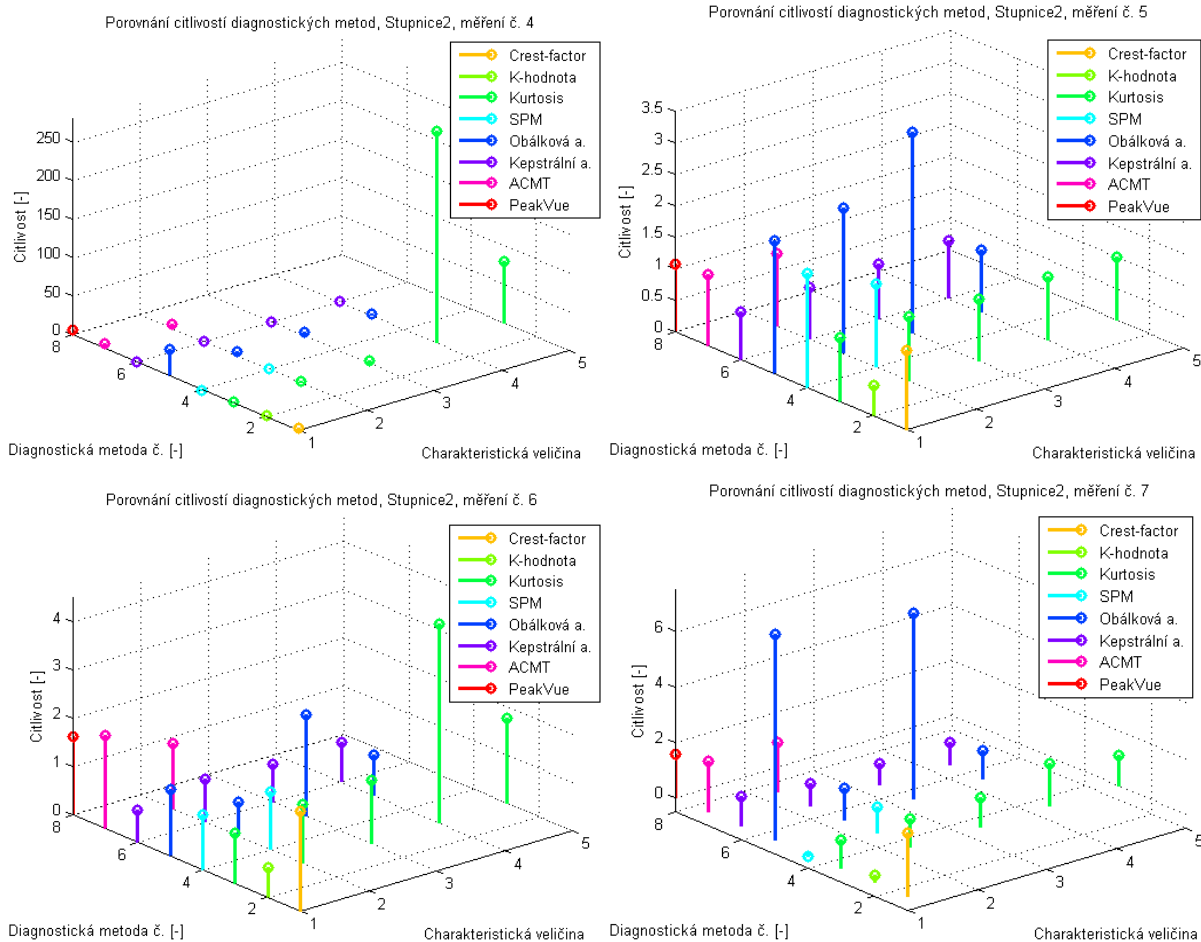
Podle zobrazených grafů citlivostí diagnostických metod na poškození ložiska lze určit, která z použitých metod je vhodná pro danou úroveň poškození testovaného ložiska. Metoda s největší citlivostí je nejlepším adeptem volby. Výsledky porovnání citlivostí lze prezentovat takto.

- Měření č. 2 ACMT
- Měření č. 3 Obálková analýza – porucha valivých elementů
- Měření č. 4 Obálková analýza – porucha klece a valivých elementů
- Měření č. 5 Obálková analýza – porucha klece
- Měření č. 6 Obálková analýza – porucha vnějšího kroužku
- Měření č. 7 Obálková analýza – porucha klece

Obálková analýza v tomto případě (Stupnice1) nejlepší volbou, jedná se o nejcitlivější diagnostickou metodu pracující ve frekvenční oblasti. Její výhodou je možnost určení typu poškození testovaného ložiska. Možnou alternativní metodou (následuje po Obálkové analýze) je metoda ACMT a PeakVue, jejichž citlivosti jsou také vysoké.

Porovnání, Stupnice2





10.2: Porovnání diagnostických metod, Stupnice2

Zhodnocení zobrazených výsledků, Stupnice2

Podle zobrazených grafů citlivostí diagnostických metod na poškození ložiska lze určit, která z použitých metod je vhodná pro danou úroveň poškození testovaného ložiska. Metoda s největší citlivostí je nejlepším adeptem volby. Výsledky porovnání citlivostí lze prezentovat takto.

- Měření č. 2 Obálková analýza – porucha vnitřního kroužku
- Měření č. 3 Obálková analýza – porucha klece
- Měření č. 4 Kurtosis
- Měření č. 5 Obálková analýza – porucha vnitřního kroužku
- Měření č. 6 Kurtosis
- Měření č. 7 Obálková analýza – porucha klece

V tomto případě se ukázala metoda Obálkové analýzy jako nejcitlivější, tudíž nejlepší volba diagnostické metody. Rozdíly citlivostí oproti ostatním metodám však nejsou tak velké jako v předchozím případě (Stupnice1). Větší citlivost zde získávají metody Číselník výkmitu (Crest-factor), ACMT, PeakVue.

11 Závěr

Cílem této práce bylo popsat základní druhy ložisek rotačních strojů se zaměřením na valivá ložiska. Detailně jsme popsali rozdělení valivých ložisek dle konstrukčního provedení. Zaměřili jsme se na druhy vznikajících poruch valivých ložisek a jejich časo-frekvenční vlastností. Tyto charakteristické poruchy jsou zkoumány disciplínou nazývanou bezdemontážní diagnostika. Úkolem bezdemontážní diagnostiky je určit aktuální kondici testovaného ložiska. Celá tato práce se týkala aplikací principů bezdemontážní diagnostiky na naměřená experimentální data.

Seznámili jsme se s průmyslově používanými diagnostickými metodami a určili jsme jejich algoritmickou strukturu. Pro potřeby finálního porovnání výpovědních schopností jsme popsané metody implementovali do programového prostředí Matlab. V některých případech bylo velmi složité správně implementovat principy diagnostických metod. Pro určení stavu testovaných valivých ložisek jsme použili diagnostické metody rozdílného charakteru a jejich výsledky následně porovnali.

Výpovědní schopnosti popsaných diagnostických metod byly určeny na základě experimentálního měření pomocí zapůjčeného testovacího standu firmou PROFESS. Detailně bylo popsáno konstrukční provedení zmíněného testovacího standu. Vibrační signály byly získány použitím popsaných valivých ložisek určitou úrovní poškození. Úkolem implementovaných diagnostických metod bylo zpětně určit poškození testovaných ložisek. Ve většině případů se nám povedlo úroveň poškození ložisek potvrdit. Dále jsme vypočítali citlivost diagnostických metod na působící poruchu valivých ložisek. Tato citlivost slouží k určení nejlepší diagnostické metody. Nejcitlivější metodou se stala Obálková analýza pracující na frekvenčním zpracování naměřeného signálu.

Cílem této práce bylo také porovnat dvě diagnostické metody ACMT a PeakVue prostřednictvím jejich výpovědních schopností. Už během analýzy těchto metod byly zjištěny podobné principy výpočtu charakteristických veličin. Obě dvě metody pracují se špičkovými hodnotami upraveného vibračního signálu. Metoda ACMT slouží k lepšímu zobrazení vznikající rázů poškozeného ložiska pomaloběžných strojů, jedná se tedy spíše o způsob zpracování signálu. Metoda PeakVue je určena pro dlouhodobé sledování kondice rotačních strojů, proto je její struktura mnohem složitější a náročnější na pochopení. Tato metoda však obsahuje klasifikační úroveň poškození testovaného ložiska, tudíž má lepší výpovědní schopnosti.

12 Literatura

1. **Beneš Š., Tomeh E.** *Metody diagnostiky valivých ložisek*. Liberec : VŠST, 1991.
2. *Optimum PeakVue Measurement Setup*. **Management, Emerson Process**. 2007.
3. **ADASH**. *ACMT - ADASH Compressed Time, Aplikační list*. Ostrava.
4. **ADASH**. *Návod k obsluze, Adash 4400 VA4Pro*. Ostrava.
5. **EMERSON**. *PeakVue Analysis for Antifriction Bearing Fault Detection*. Emerson Process Management, 2011.
6. **ZKL, Ground**. *Valivá ložiska*. Brno : ZKL Bearings CZ, a.s., 2013.
7. **Liška, Jindřich**. *Metody diagnostiky velkých ložisek v časové a frekvenční oblasti*. Plzeň : ZČU, 2005. Diplomová práce.
8. **Pavel, Navrátil**. *Vibrodiagnostika ložisek*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2009. Bakalářská práce.
9. **Liška, Jindřich**. *Zpracování signálu, vibrace a kmitání*. Plzeň : ZČU, 2012. Přednášky z předmětu KKY/MS1.
10. **Psutka, Josef**. *Filtrace a zpracování signálu*. Plzeň : ZČU, 2014. Přednášky k předmětu KKY/ZSI.
11. **Groups, Broad Band Vibration Criteria for Specific Machine**. *ISO 10816-1*.
12. **Kreidl, J.** *Diagnostické systémy*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1995.
13. **Gregor, Radoslav**. *Analýza časových řad s využitím Fourierovy transformace a Kepstrální analýzy*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2012. Diplomová práce.

13 Seznam obrázků

2.1: Příklad kluzného, valivého a magnetického ložiska	8
3.1: Příklad valivého ložiska	9
3.2: Konstrukční typy valivých ložisek	9
3.3: Stykový úhel radiálních ložisek	10
3.4: Stykový úhel axiálních ložisek	10
3.5: Konstrukce valivého ložiska	10
3.6: Geometrie valivého ložiska	11
3.7: Emisní okno valivého ložiska	13
3.8: Poškození klece ložiska v čase a spektru	15
3.9: Poškození valivých elementů	15
3.10: Poruchy vnějšího kroužku ložiska	15
3.11: Poruchy vnitřního kroužku ložiska	16
3.12: Poškození vnitřního kroužku a Pitting vnějšího kroužku	16
3.13: Poškození valivé kuličky a poškození klece ložiska	16
4.1: Schema diagnostického systému	17
4.2: Model absolutního senzoru kmitavého pohybu	18
4.3: Příklad frekvenční charakteristiky akcelerometrů	19
4.4: Příklad akcelerometrů firmy Wilcoxon	19
4.5: Posuzování absolutních vibrací normou VDI 2056/ISO 10816	20
5.1: Metoda činitele výkmitu	24
5.2: Hodnocení stavu ložiska	24
5.3: Příklad časového průběhu $K(t)$ parametru	25
5.4: Hodnocení stavu valivého ložiska [1]	25
5.5: Hodnocení stavu valivého ložiska	26
5.6: Technika dB_{mdBc}	28
5.7: Stav ložiska pomocí SPM	28
5.8: Měřicí řetězec Obálkové analýzy	29
5.9: Příklad výstupu metody Obálkové analýzy	29
5.10: Měřicí řetězec Obálkové analýzy s normováním a využitím Hilbertovy transformace	29
5.11: Měřicí řetězec Kepstrální analýzy	30
6.1: Měřicí řetězec ACMT	31
6.2: Příklad navzorkovaného signálu bez použití ACMT	31
6.3: Použití ACMT pro stejný případ kmitavého signálu	31
6.4: Rázové impulzy modulované nosnou frekvencí rotoru	31
6.5: Odfiltrovaná nosná frekvence rotoru a zachycené rázy	32
6.6: Měřicí řetězec analýzy špičkových hodnot	33
6.7: Možnosti připevnění a umístění akcelerometru	33
6.8: Příklady vhodného nastavení parametrů PeakVue metody	34
6.9: Příklady použití filtrů PeakVue metody	34
6.10: Příklad trendu PeakVue stavu valivého ložiska	34
6.11: Doporučené hodnoty výstrahy pro měření špičkové hodnoty při dané rychlosti otáčení	35
6.12: Poruchové hodnoty valivých ložisek a převodovek podle otáček stroje	36
7.1: Nové ložisko ZKL 1206 K	37
7.2: Poškozené ložisko 8FL3 111206	38
7.3: Uměle poškozené ložisko L0	39
7.4: Uměle poškozené ložisko L1	39
7.5: Uměle poškozené ložisko L2	40
7.6: Použitý akcelerometr	41

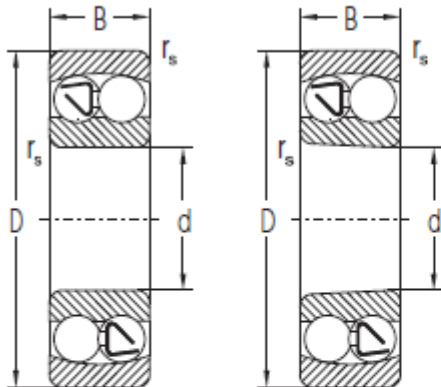
7.7: Frekvenční charakteristika a závislost odchylky na teplotě použitého akcelerometru.....	41
7.8: Analyzátor ADASH s příslušenstvím	42
7.9: Analyzátor EMERSON s příslušenstvím.....	42
7.10: Testovací zařízení	43
7.11: Detailní pohled na testovací stand	44
7.12: Frekvenční měnič ABB a laserový snímač fázové značky	44
8.1: Měření teploty testovacího standu za provozu	45
8.2: Měření teploty testovacího standu po uvedení do klidu.....	46
8.3: Příklad naměřeného vibračního signálu pomocí VA4 Recorderu.....	47
8.4: Porovnání úprav naměřeného signálu.	48
8.5: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 1(a).....	50
8.6: Tepelné přizpůsobení měření č. 1(a).....	50
8.7: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 1(b)	51
8.8: Tepelné přizpůsobení měření č. 1(b)	51
8.9: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 2(a).....	51
8.10: Tepelné přizpůsobení měření č. 2(a).....	52
8.11: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 2(b).....	52
8.12: Tepelné přizpůsobení měření č. 2(b)	52
8.13: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 3(a).....	53
8.14: Tepelné přizpůsobení měření č. 3(a).....	53
8.15: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 3(b).....	54
8.16: Tepelné přizpůsobení měření č. 3(b)	54
8.17: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 4(a).....	54
8.18: Tepelné přizpůsobení měření č. 4(a).....	55
8.19: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 4(b).....	55
8.20: Tepelné přizpůsobení měření č. 4(b)	55
8.21: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 5(a).....	56
8.22: Tepelné přizpůsobení měření č. 5(a).....	57
8.23: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 5(b).....	57
8.24: Tepelné přizpůsobení měření č. 5(b)	57
8.25: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 6(a).....	58
8.26: Tepelné přizpůsobení měření č. 6(a).....	58
8.27: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 6(b).....	58
8.28: Tepelné přizpůsobení měření č. 6(b)	59
8.29: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 7(a).....	59
8.30: Tepelné přizpůsobení měření č. 7(a).....	59
8.31: Orientační záznam naměřených vibrací, měření č. 7(b).....	60
8.32: Tepelné přizpůsobení měření č. 7(b)	60
9.1: Frekvenční charakteristika pásmové propusti s použitým oknem.....	61
9.2: Činitel výkmitu Stupnice1 s průměrem přes nastavené otáčky.....	61
9.3: Činitel výkmitu Stupnice2 s průměrem přes nastavené otáčky.....	62
9.4: K-hodnota Stupnice1 s průměrem přes nastavené otáčky.....	63
9.5: K-hodnota Stupnice2 s průměrováním přes nastavené otáčky.....	63
9.6: Frekvenční charakteristika použitých FIR filtrů s aplikovaným oknem typu Chebyshev.....	64
9.7: Kurtosis Stupnice1 ,měření č. 1-7.....	65
9.8: Průběh Kurtosis pro jednotlivá měření, Stupnice1, průměr přes otáčky	66
9.9: Kurtosis Stupnice2 ,měření č. 1-7	67
9.10: Průběh Kurtosis pro jednotlivá měření, Stupnice2, průměr přes otáčky	68
9.11: Metoda rázových pulzů Stupnice1 ,měření č. 1-7 s průměrováním přes otáčky.....	70
9.12: Metoda rázových pulzů Stupnice2 ,měření č. 1-7 s průměrováním přes otáčky	71
9.13: Obálková analýza Stupnice1 ,měření č. 1-7.....	74
9.14: Obálková analýza Stupnice2, měření č. 1-7.....	75
9.15: Průměrné hodnoty amplitud poruchových frekvencí (přes otáčky)	76

9.16: Kepstrální analýza Stupnice1 ,měření č. 1-7.....	79
9.17: Kepstrální analýza Stupnice2 ,měření č. 1-7.....	80
9.18: Průměrné hodnoty amplitud poruchových kvefrecí (přes otáčky)	80
9.19: Frekvenční charakteristika použitého filtru, tvar Chebyshev okna	81
9.20: Tři příklady porovnání průběhů ACMT a statistické porovnání.....	83
9.21: Charakteristické veličiny ACMT s průměry pro jednotlivá měření, Stupnice1	85
9.22 Charakteristické veličiny ACMT s průměry pro jednotlivá měření, Stupnice2	86
9.23: Naměřená charakteristické veličiny analyzátoem EMERSON CSI 2600.....	87
9.24: Tepelné přizpůsobení během měření	88
9.25: Charakteristické veličiny a jejich průměry (Matlab)	88
9.26: PeakVue, Stupnice1	89
9.27: PeakVue, Stupnice2	90
10.1: Porovnání diagnostickým metod, Stupnice1	92
10.2: Porovnání diagnostických metod, Stupnice2	93

14 Přílohy

14.1 Katalogový list použitého ložiska ZKL 1206 K

Dvouřadá naklápěcí kulíčková ložiska
 $d = 10$ až 60 mm



K

Rozměry					Základní únosnost		Mezní únavové zatížení P_u	Mezní frekvence otáčení pro mazání		Označení ložiska	
d	D	B	$B_1^{(1)}$	r_s	dynamická C_r	statická C_{or}		plastickým mazivem	olejem	s válcovou dírou	s kuželovou dírou
mm					kN		kN	min ⁻¹			
10	30	14		0,6	7,28	1,58	0,07	25000	30000	2200	
12	32	10		0,6	5,59	1,26	0,06	24000	28000	1201	
15	35	11		0,6	7,41	1,74	0,08	21000	25000	1202	
	35	14		0,6	7,61	1,81	0,08	21000	25000	2202	
17	40	12		0,6	7,93	2,03	0,09	17000	20000	1203	1203K
20	47	14		1,0	9,95	2,66	0,12	14000	17000	1204	1204K
25	52	15		1,0	12,10	3,35	0,15	12600	15000	1205	1205K
	52	18		1,0	12,40	3,48	0,16	12600	15000	2205	2205K
	62	24		1,1	24,20	6,56	0,30	10000	12000	2305TNGN	2305KTNGN
30	62	16		1,0	15,60	4,73	0,22	11000	13000	1206	1206K
	62	20		1,0	15,30	4,55	0,21	11000	13000	2206	2206K
	72	19		1,1	21,20	6,31	0,29	9400	11000	1306	1306K
	72	27		1,1	31,20	8,74	0,40	8400	10000	2306	2306K
35	72	17		1,1	15,90	5,11	0,23	9400	11000	1207	1207K
	72	23		1,1	21,60	6,68	0,30	9400	11000	2207	2207K
40	80	18		1,1	19,00	6,56	0,30	7900	9400	1208	1208K
	90	23		1,5	29,60	9,81	0,45	7100	8400	1308	1308K
	90	33		1,5	44,90	13,30	0,60	6700	7900	2308	2308K
45	85	19		1,1	21,60	7,36	0,33	7500	8900	1209	1209K
	85	23		1,1	23,40	8,10	0,37	7500	8900	2209	2209K
	100	25		1,5	37,70	12,80	0,58	6300	7500	1309	1309K
	100	36		1,5	54,00	16,50	0,75	6000	7100	2309	2309K
50	90	20		1,1	22,90	8,10	0,37	7100	8400	1210	1210K
	90	23		1,1	23,40	8,41	0,38	7100	8400	2210	2210K
	110	27		2,0	43,60	14,10	0,64	5600	6700	1310	1310K
55	100	21		1,5	26,50	10,00	0,45	6300	7500	1211	1211K
	100	25		1,5	26,50	10,00	0,45	6300	7500	2211	2211K
60	110	22		1,5	30,20	11,70	0,53	5600	6700	1212	1212K
	110	28		1,5	33,80	12,60	0,57	5600	6700	2212	2212K
	130	31		2,0	57,20	20,70	0,94	4700	5600	1312	1312K

14.2 Katalogový list použitého akcelerometru

AC102 Series

Multi-Purpose Accelerometer, Top Exit Connector/Cable, 100 mV/g

SECTION 1 - VIBRATION SENSORS
Accelerometers

Actual Product Size Shown
CE

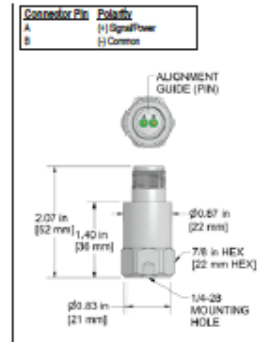


Product Features

CTC's Most Popular Sensor!
High Performance in a Low Cost Sensor

- Standard 2 Pin MIL Connection
- Perfect for Thousands of Applications
- Affordably Priced, Hermetically Sealed Sensors

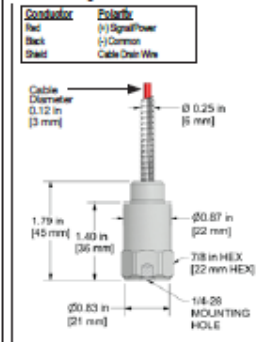
AC102-1A 2 Pin Connector



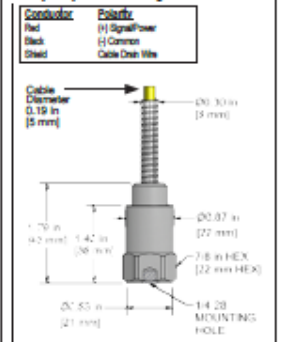
AC102-2C Integral Cable



AC102-3C Armored Integral Cable



AC102-6C Heavy Duty Armored Integral Cable



Specifications	Standard	Metric
Part Number	AC102	M/AC102
Sensitivity ($\pm 10\%$)	100 mV/g	
Frequency Response ($\pm 3\text{dB}$)	30-900,000 CPM	0.5-15000 Hz
Frequency Response ($\pm 10\%$)	120-600,000 CPM	2.0-10000 Hz
Dynamic Range	± 50 g, peak	
Electrical		
Settling Time	< 2.5 seconds	
Voltage Source (IEPE)	18-30 VDC	
Constant Current Excitation	2-10 mA	
Spectral Noise @ 10 Hz	14 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	
Spectral Noise @ 100 Hz	2.3 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	
Spectral Noise @ 1000 Hz	2 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	
Output Impedance	< 100 ohm	
Bias Output Voltage	10-14 VDC	
Case Isolation	$> 10^8$ ohm	

Specifications	Standard	Metric
Environmental		
Temperature Range	-58 to 250°F	-50 to 121°C
Maximum Shock Protection	5,000 g, peak	
Electromagnetic Sensitivity	CE	
Sealing	IP68	
Submersible Depth (AC102-2C/3C)	200 ft.	60 m
Physical		
Sensing Element	PZT Ceramic	
Sensing Structure	Shear Mode	
Weight	3.2 oz	90 grams
Case Material	316L Stainless Steel	
Mounting	1/4-28	
Connector (non-integral)	2 Pin MIL-C-5015	
Resonant Frequency	1,380,000 CPM	23000 Hz
Mounting Torque	2 to 5 ft. lbs.	2.7 to 6.8 Nm
Mounting Hardware	1/4-28 Stud	M6x1 Adapter Stud
Calibration Certificate	CA10	

Ordering Information

Standard	AC102-1A (1/4-28 Stud)	AC102-2C - / (1/4-28 Stud)	AC102-3C - / (1/4-28 Stud)	AC102-6C - / (1/4-28 Stud)
		length in feet (termination)	length in feet (termination)	length in feet (termination)
Metric	M/AC102-1A (M6x1 Adapter Stud)	M/AC102-2C - / (M6x1 Adapter Stud)	M/AC102-3C - / (M6x1 Adapter Stud)	M/AC102-6C - / (M6x1 Adapter Stud)
		length in meters (termination)	length in meters (termination)	length in meters (termination)

Cable Termination Options: E F L Z

Backed by our Unconditional Lifetime Warranty

www.otonline.com

Page 4

