

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Miroslav Kokeš



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**POROVNÁNÍ METOD PRO IDENTIFIKACI PORUCH  
VALIVÝCH LOŽISEK**

COMPARISON OF METHODS FOR IDENTIFICATION OF ROLLING BEARING FAILURES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Miroslav Kokeš**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.**

**BRNO 2021**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Miroslav Kokeš

**ID:** 186113

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

## NÁZEV TÉMATU:

### Porovnání metod pro identifikaci poruch valivých ložisek

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je srovnání vybraných metod pro identifikaci poruch valivých ložisek využitelných například v diagnostice točivých strojů a predikci vznikajících poruch u valivých ložisek na základě dat získaných z vibračních snímačů. Vlastní řešení diplomové práce bude spočívat v implementaci metod ve vybraném prostředí, jejich následnému srovnání s ohledem na rychlost výpočtu a nároky na hardwarové prostředky, požadavky na kvalitu naměřených dat, omezení jednotlivých metod, použitelnost pro predikci poruchy, aj. Jednotlivé postupy konzultujte. Konkrétní body zadání:

1. Zpracujte rešerši týkající se diagnostiky poruch valivých ložisek a metod pro identifikaci těchto poruch na základě signálů získaných z vibračních snímačů.
2. Na základě rešerše implementujte vybrané výpočetní metody (například obálková analýza, statistické parametry signálu, frekvenční analýza, aj.) v jednom ze zvolených prostředí LabVIEW, MATLAB, BK Connect.
3. Na reálných (veřejně dostupných) datových sadách, např. z Case Western Reserve University Bearing Data Center, ověřte funkčnost vámi naprogramovaných metod a to jak pro ložiska bez poruchy, tak s poruchou.
4. Srovnajte jednotlivé metody s ohledem na: Rychlost výpočtu a nároky na hardwarové prostředky, požadavky na kvalitu naměřených dat (SNR, vzorkovací kmitočet, šířka pásma, aj.), omezení jednotlivých metod, použitelnost pro predikci poruchy, aj.
5. Na základě výsledků bodu č. 4 zhodnoťte implementované metody.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] RANDALL, Robert B. a Jérôme ANTONI. Rolling element bearing diagnostics—A tutorial. Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. 25(2). 485-520. ISSN 08883270.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 17.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Martin Doseděl

**doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá porovnáním vybraných metod a parametrů pro diagnostiku stavu valivých ložisek. Vybranými statistickými parametry jsou kurtosis, crest faktor a parametr  $K_t$ . Dalšími vybranými metodami jsou obálková analýza, keprální analýza a metoda *ACEP*. Metody jsou implementovány v programu LabVIEW a porovnány na základě odolnosti vůči šumu, rychlosti výpočtu a celkové schopnosti správně identifikovat závady valivých ložisek.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

ložisko, valivé ložisko, crest faktor, kurtosis, parametr  $K_t$ , obálková analýza, keprální analýza, metoda *ACEP*, LabVIEW

## **ABSTRACT**

The aim of this master thesis is the comparison of selected methods and parameters for roller bearings diagnostics. Selected statistical parameters are kurtosis, crest factor, and parameter  $K_t$ . The other selected methods are envelope analysis, cepstral analysis, and *ACEP* method. These methods are implemented in LabVIEW software and compared based on noise resistance, computation speed, and overall capability of identifying roller bearing faults.

## **KEYWORDS**

bearing, roller bearing, crest factor, kurtosis,  $K_t$  parameter, envelope analysis, cepstral analysis, *ACEP*, LabVIEW

KOKEŠ, Miroslav. *Porovnání metod pro identifikaci poruch valivých ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2021, 75 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: [Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení autora:</b>	Bc. Miroslav Kokeš
<b>VUT ID autora:</b>	186113
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2020/21
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Porovnání metod pro identifikaci poruch valivých ložisek

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Stanislavu Klusáčkovi, Ph.D. a Ing. Martinu Dosedělovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	13
<b>1 Technická diagnostika točivých strojů</b>	<b>14</b>
1.1 Vibrační diagnostika	14
1.1.1 Snímače výchylky	15
1.1.2 Snímače rychlosti	15
1.1.3 Snímače zrychlení	15
1.2 Akustická diagnostika	16
1.3 Termovizní diagnostika	17
<b>2 Ložiska</b>	<b>18</b>
2.1 Typy ložisek	18
2.1.1 Kluzná ložiska	18
2.1.2 Valivá ložiska	18
2.1.3 Fluidní ložiska	19
2.1.4 Magnetická ložiska	20
2.2 Závady valivých ložisek	20
2.2.1 Fáze poškození valivých ložisek	21
2.2.2 Ložiskové frekvence	22
2.2.3 Pitting	23
2.2.4 Koroze	23
2.3 Parametry ložisek	23
2.3.1 Rozměry ložisek	24
2.3.2 Únosnost	24
2.3.3 Rychlost otáčení	25
2.3.4 Trvanlivost	25
2.3.5 Provozní teplota	26
2.3.6 Předpětí	26
<b>3 Diagnostické metody</b>	<b>27</b>
3.1 Statistické metody	27
3.1.1 Efektivní hodnota	28
3.1.2 Crest faktor	28
3.1.3 $K(t)$ parametr	29
3.1.4 Kurtosis	30
3.2 Frekvenční metody	31
3.2.1 Frekvenční analýza	31



3.2.2	Obálková analýza . . . . .	32
3.2.3	Kepstrální analýza . . . . .	33
3.3	Rezonanční metody . . . . .	33
3.3.1	Metoda rázových pulzů . . . . .	33
3.3.2	Metoda sledování hodnoty špičkové energie . . . . .	34
3.3.3	Metoda vysokofrekvenční emise . . . . .	35
3.3.4	Metoda Bearing Condition Unit . . . . .	35
3.4	Speciální metody . . . . .	36
3.4.1	Metoda spektrální emise energie . . . . .	36
3.4.2	Metoda analýzy špičkových hodnot . . . . .	37
3.4.3	Metoda ACMT . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Výběr a popis metod</b>	<b>40</b>
4.1	Metody statistického zpracování signálů . . . . .	40
4.2	Metoda obálkové analýzy . . . . .	40
4.2.1	Předzpracování signálu - Pre-processing . . . . .	40
4.2.2	Obálková analýza . . . . .	42
4.3	Metody kepstrální analýzy . . . . .	43
4.4	Metoda Automatic Cepstral editing procedure . . . . .	43
4.4.1	Lifter typu horní propust . . . . .	43
4.4.2	Spektrální subtrakce . . . . .	44
4.4.3	Detekce špiček . . . . .	45
4.4.4	Hřebenový lifter . . . . .	46
4.5	Filtrace signálu metodou cepstrum prewhitening . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Ovládání programu</b>	<b>47</b>
5.1	Nastavení měření . . . . .	47
5.2	Výpočet programu . . . . .	49
5.2.1	Měření výpočetní rychlosti . . . . .	50
5.2.2	Násobička chybových frekvencí a ukládání dat . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Ověření funkčnosti metod</b>	<b>51</b>
6.1	Ložisko bez poruchy . . . . .	51
6.1.1	Statistické parametry . . . . .	51
6.1.2	Spektrální a kepstrální metody . . . . .	52
6.2	Ložisko s poruchou . . . . .	53
6.2.1	Statistické parametry . . . . .	54
6.2.2	Spektrální a kepstrální metody . . . . .	54
6.2.3	Filtrace metodou Cepstrum prewhitening . . . . .	57

<b>7 Srovnání implementovaných metod</b>	<b>59</b>
7.1 Vliv zátěže motoru . . . . .	59
7.2 Rychlost výpočtu . . . . .	60
7.3 Vliv šumu na výpočet . . . . .	60
<b>8 Vyhodnocení implementovaných metod</b>	<b>64</b>
8.1 Vyhodnocení statistických metod . . . . .	64
8.2 Vyhodnocení metod obálkové analýzy . . . . .	64
8.3 Vyhodnocení metody ACEP . . . . .	65
8.4 Vyhodnocení metod Kepstrální analýzy . . . . .	66
<b>Závěr</b>	<b>67</b>
<b>Literatura</b>	<b>69</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>74</b>
<b>A Obsah elektronické přílohy</b>	<b>75</b>

# Seznam obrázků

2.1	Schéma valivého ložiska [22]	19
2.2	Fluidní ložiska [23]	20
2.3	Magnetická ložiska [17]	20
2.4	Rozvoj poškození valivého ložiska [2]	21
2.5	Pitting [24]	23
3.1	Crest faktor [13]	29
3.2	Průběh hodnoty Crest factoru za dobu života ložiska [13]	29
3.3	Rozložení signálu pro dobré a poškozené ložisko [13]	31
3.4	Postup obálkové analýzy [27]	32
3.5	Postup zpracování signálu metody <i>SE</i> [31]	35
3.6	Přípustné hodnoty <i>g<sub>RMS</sub></i> vůči otáčkám stroje [13]	36
3.7	Doporučené hodnoty výstrahy [33]	38
3.8	Hodnota hladiny alarmu poruchy pro ložiska a převodovky na různých otáčkách [33]	38
4.1	Průběh zpracování signálu obálkovou analýzou [37]	41
4.2	Obálková analýza zpracovaná v LabVIEW	41
4.3	Diagram metody <i>CEP</i> . Červená čárkovaná čára označuje část automatické editace signálu [39]	44
4.4	Diagram automatické editace metody <i>ACEP</i> [39]	44
4.5	Diagram spektrální subtrakce [42]	45
5.1	Schématický diagram LabVIEW programu	48
5.2	Uživatelské rozhraní programu LabVIEW	48
5.3	Výběr cest k souborům - <i>Input Settings</i>	49
5.4	Nastavení parametrů metod - <i>additional settings</i>	49
5.5	Nastavení informací o ložisku a měření - <i>Data settings</i>	49
5.6	Volba dat a metod, které mají být provedeny - <i>Start measurement</i>	49
5.7	Měření výpočetní rychlosti programu	50
6.1	Spektrum neupravených dat při měření na DE a nulové zátěži s chybovými frekvencemi DE ložiska	53
6.2	Spektrum neupravených dat při měření na DE a nulové zátěži s chybovými frekvencemi FE ložiska	53
6.3	Spektrum metodou obálkové analýzy LabVIEW při měření na DE a nulové zátěži s chybovými frekvencemi DE ložiska	53
6.4	Obálková analýza ložiska hnacího motoru (DE) metodou LabVIEW, DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE	56
6.5	Spektrum dat ložiska hnacího motoru (DE) metodou <i>ACEP</i> , DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE	57

6.6	Kepstrum dat ložiska hnacího motoru (DE) LabVIEW funkcí, DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE . . . . .	57
6.7	Spektrum neupravených dat ložiska hnacího motoru (DE), DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE . . . . .	58
6.8	Spektrum dat ložiska hnacího motoru (DE) metodou obálkové analýzy LabVIEW + <i>Cepstrum prewhitening</i> , DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE . . . . .	58
7.1	Spektrum neupravených, zašuměných dat ložiska hnacího motoru (DE), DE data + 1,0 šum, závada na vnitřním kroužku ložiska FE . . . . .	62
7.2	Obálková analýza ložiska hnacího motoru (DE), DE data + 1,0 šum, závada na vnitřním kroužku ložiska FE . . . . .	62
8.1	Spektrum neupravených dat ložiska hnacího motoru (DE), FE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE . . . . .	65
8.2	Spektrum dat ložiska hnacího motoru (DE) metodou <i>ACEP</i> , FE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE . . . . .	65

# Seznam tabulek

3.1	Hodnocení stavu ložiska dle parametru $K_t$ [8]	30
3.2	Vyhodnocení numerické $SEE$ , čísla uvedena ve stupnici $SEE$	37
6.1	Hodnoty chybových frekvencí testovaných ložisek	51
6.2	Hodnoty statistických parametrů ložiska bez závady, měření na hnacím motoru (DE)	52
6.3	Hodnoty statistických parametrů ložiska bez závady, měření na ventilátoru (FE)	52
6.4	Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnitřním kroužku, měření ložiska hnacího motoru (DE) - 0,1778 mm	55
6.5	Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnitřním kroužku, měření ložiska ventilátoru (FE) - 0,5334 mm	55
6.6	Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnějším kroužku, měření ložiska hnacího motoru (DE) - 0,1778 mm	55
6.7	Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnějším kroužku, měření ložiska ventilátoru (FE) - 0,5334 mm	55
6.8	Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na kuličce, měření ložiska hnacího motoru (DE) - 0,1778 mm	56
6.9	Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na kuličce, měření ložiska ventilátoru (FE) - 0,5334 mm	56
7.1	Hodnoty statistických parametrů ložiska s vadou na vnějším kroužku, měření na hnacím motoru (DE)	59
7.2	Hodnoty statistických parametrů ložiska s vadou na vnějším kroužku, měření na ventilátoru (FE)	59
7.3	Rychlost výpočtu jednotlivých metod [mm:ss,ms]	60
7.4	Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnitřním kroužku s různou úrovní zašumění signálu, měření ložiska ventilátoru (FE)	61
7.5	Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnitřním kroužku s různou úrovní zašumění signálu, měření ložiska hnacího motoru (DE)	61

# Úvod

Ložisko je důležitá část stroje, která přenáší točivý moment. Včasná identifikace vznikající poruchy ložiska nebo její predikce může výrazně prodloužit životnost stroje, zabránit neplánovaným odstávkám nebo v nejhorším případě nečekanému selhání. Ložisko vykonává svou práci periodicky a změnu jeho stavu lze analyzovat různými diagnostickými metodami a parametry.

Diplomová práce se věnuje srovnání vybraných metod a parametrů pro identifikaci poruch valivých ložisek.

V prvních dvou kapitolách diplomové práce se věnují teorii technické diagnostiky a ložiskům. Ve třetí kapitole je zpracovaná rešerše diagnostických metod pro identifikaci poruch na datech získaných snímači vibrací.

Dle zpracované rešerše byly vybrány výpočetní metody a parametry. Jedná se o statistické parametry kurtosis, parametr  $K_t$  a crest faktor. Frekvenční metody obálkové analýzy, kepstrální analýzy a metodu *Automatic cepstral editing procedure-ACEP*. Všechny metody a jejich implementace v LabVIEW jsou popsány v kapitole 4.

Popis uživatelského rozhraní a obsluhy programu je uveden v kapitole 5. V následujících kapitolách je ověřena funkčnost jednotlivých metod a srovnání a zhodnocení pomocí vibračních dat z veřejně dostupných zdrojů.

# 1 Technická diagnostika točivých strojů

Technická diagnostika se zabývá zjišťováním stavu stroje. Pomocí různých diagnostických metod, které popisují níže se dá zjistit, zda není v ložisku, nějaký z problémů popsaných v následující kapitole. Obecně se diagnostické prostředky dělí na ON-LINE a OFF-LINE. [2]

- ON-LINE diagnostické prostředky jsou takové, které probíhají přímo za provozu stroje. Pokud je stroj pod nepřetržitým monitorováním diagnostickým systémem, nebo se měří periodicky hovoříme o monitorování.
- OFF-LINE diagnostické prostředky je diagnostika na odstaveném zařízení, tedy mimo provoz a v tomto stavu jej není možné testovat za provozních podmínek.

Točivé stroje jsou po spuštění roztočeny na provozní otáčky. Lze tedy říct, že pracují periodicky a můžeme předpokládat, že i ostatní veličiny, jako jsou například vibrace, zvuk (hluk), teplota, jsou rovněž periodické. Ze zjištěných počátečních hodnot, kdy je stroj v pořádku, např. z vlastní frekvence stroje lze určit odchylky, tedy závady na stroji. Úkolem diagnostika je určit zdroj této odchylky/chyby, aby bylo možné ji opravit.

## 1.1 Vibrační diagnostika

Vibrační diagnostika, je jak vyplývá již z názvu, analýza vibrací, které každý točivý stroj produkuje. Všechny vibrace mají zásadní vliv na životnost stroje a jeho komponentů. Z tohoto důvodu je žádoucí všechny vibrace minimalizovat, v optimálním případě zcela odstranit. Tomu předchází nezbytné určení zdrojů těchto vibrací.

Vibrace jsou pohyb tělesa, který lze popsat třemi způsoby. Jedná se o výchylku, rychlost a zrychlení vibrací. Všechny tyto veličiny spolu matematicky souvisí. Z matematického hlediska nezáleží, kterou veličinu budeme měřit. V praxi to samozřejmě neplatí, protože každý snímač má jiné frekvenční a dynamické vlastnosti.

Dynamický rozsah snímače je rozsah amplitud měřené veličiny, který je možné daným snímačem měřit. Snímače vibrací se dělí na dvě základní skupiny, dle typu snímaných vibrací, a to na absolutní nebo relativní. Absolutní snímání vibrací znamená pohyb měřeného bodu vůči pevné soustavě, tedy vůči setrvačné hmotě umístěné uvnitř senzoru. Relativní senzory snímají pohyb vůči zvolenému bodu, např. jiné části stroje. [2][5]

### 1.1.1 Snímače výchylky

Snímačů výchylky existuje celá řada a pracují na různých principech. Jsou například indukční, indukčnostní, odporové, kapacitní, magnetické nebo optické. Každý z těchto snímačů pracuje na svém vlastním fyzikálním principu a má své klady a zápory a své specifické zdroje nejistot. V dnešní době jsou v oboru vibrodiagnostiky nejrozšířenější indukčnostní snímače na bázi vířivých proudů. Tento typ snímače měří vzdálenost mezi koncem senzoru a vodivým povrchem. Snímače výchylky jsou vhodné pro měření menších frekvencí, maximálně 1-2 kHz, kde se obvykle nachází jejich maximum frekvenčního rozsahu.

### 1.1.2 Snímače rychlosti

Pro snímání rychlosti se dlouhou dobu používaly elektrodynamické snímače rychlosti. Tyto snímače využívaly stejnojmenného jevu pohyblivé cívky v magnetickém poli permanentního magnetu. Při pohybu cívky se na ní vlivem magnetického pole indukuje napětí:

$$U = B \cdot l \cdot v \quad [V] \quad (1.1)$$

kde:

B	...	indukce magnetického pole [T]
l	...	délka cívky [m]
v	...	rychlost kmitů [ $m \cdot s^{-1}$ ]

V dnešní době se tyto senzory převážně nahrazují akcelerometrem, jehož výstup je integrován a získá se rychlost. Integrovní obvody jsou již většinou integrovány přímo v senzoru.

### 1.1.3 Snímače zrychlení

V oblasti měření vibrací se uplatňují především piezoelektrické akcelerometry. Ty jsou založeny na stejnojmenném jevu. Jedná se o schopnost krystalu, nejčastěji monokrystalu, generovat elektrický náboj při jeho deformaci. Tyto snímače se vyrábějí klasicky nebo MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) technologií jako piezoelektrické akcelerometry s frekvenčním rozsahem od 10 Hz do 30 kHz. Jednou z velkých předností těchto snímačů v MEMS provedení je jejich velikost. MEMS technologií rovněž mohou být vyrobeny kapacitní akcelerometry určující zrychlení na základě vychýlení setrvačné hmoty obsahující sadu elektrod. Podle směru pohybu se setrvačná hmota přiblíží k druhé sadě elektrod umístěných v pouzdře snímače a tím dojde ke změně kapacity kondenzátorů.



## 1.2 Akustická diagnostika

Každý točivý stoj při chodu do svého okolí vyzařuje mechanické vlnění, respektive zvuk. Ten, stejně jako vibrace, vypovídá o technickém stavu stroje nebo soustrojí podle vyzařovaných frekvencí, které umíme diagnostikovat.

Akustická měření v diagnostice se většinou provádějí pomocí soustavy mikrofonů. Mikrofony převádějí akustický tlak, vzniklý šířící se zvukovou vlnou, na elektrickou veličinu. Podle umístění, rozmístění a počtu mikrofonů se naměřená data vyhodnocují různými metodami, jako např. Beamforming, Akustická holografie, NAH aj. Hlavní akustické veličiny jsou: [5]

- **Akustický tlak** [ $Pa$ ] - přímo měřitelná veličina vznikající v důsledku šíření zvukové vlny v prostředí. Šířením vlny začínají kmitat okolní molekuly, které jsou příčinou malých tlakových změn. Akustický tlak je definován jako rozdíl mezi okamžitou hodnotou tlaku v daném bodě a statickou hodnotou barometrického tlaku.

$$p = \frac{F}{S} \quad (1.2)$$

kde:

p	...	Akustický tlak [Pa]
S	...	Plocha kterou vlna prochází [ $m^2$ ]
F	...	Síla [N]

- **Akustická rychlost** [ $m \cdot s^{-1}$ ] - Rychlost, kterou se částice vzduchu pohybují pod vlivem akustického tlaku kolem své rovnovážné polohy.
- **Akustická intenzita** [ $W \cdot m^{-2}$ ] - střední hodnota zvukové energie, jedná se o energii, která projde za dobu 1 sekundy plochou 1  $m^2$  a je orientovaná ve směru šíření zvuku.

$$I = \frac{P}{S} = \frac{F \cdot v}{S} = p \cdot v \quad (1.3)$$

kde:

I	...	Intenzita zvuku [ $W \cdot m^{-2}$ ]
v	...	Akustická rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]
p	...	Akustický tlak [Pa]
S	...	Plocha kterou vlna prochází [ $m^2$ ]
F	...	Síla [N]
P	...	Výkon zvukového vlnění [W]

- **Akustický výkon** [W]- mechanický výkon, práce, vykonaná za jednotku času, vyjádřená pomocí akustických veličin.

$$W = p \cdot v \cdot S = I \cdot S \quad (1.4)$$

kde:

W	...	Akustický výkon [W]
I	...	Intenzita zvuku [ $W \cdot m^{-2}$ ]
v	...	Akustická rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]
p	...	Akustický tlak [Pa]
S	...	Plocha kterou vlna prochází [ $m^2$ ]

### 1.3 Termovizní diagnostika

Další možností diagnostiky stroje je diagnostika pomocí bezdotykového měření teploty. Při poruše některé z částí točivého stroje dochází nárůstu teploty. Teplo je vyzařováno do okolí ve formě infračerveného záření (760 nm až 1 mm). To se dělí podle vlnové délky na:

- blízké - 0,76 - 3  $\mu m$
- střední - 3 - 6  $\mu m$
- vzdálené - 6 - 15  $\mu m$
- velmi vzdálené - 15 - 1000  $\mu m$

Teplotu měříme nejčastěji pomocí termovizní kamery případně bodově pomocí pyrometru. Senzor kamery je navržen pro snímání infračerveného záření emitujícího zahřátým tělesem. Software kamery vyhodnocuje naměřená data a určuje teplotu. Z údajů o teplotě, například ložiska stroje zle určit, zda dochází k nadměrnému tření, tedy k nárůstu teploty na ložisku, což avizuje přítomnost chyby. [2] [21]

## 2 Ložiska

Ložisko je mechanická součást zařízení, která minimalizuje tření při otáčivém nebo posuvném pohybu. V této práci se primárně budu zabývat valivými ložisky, které přenáší točivý moment.

Ložisko je mechanická součást, která nikdy nebude pracovat samostatně. Jeho primární funkce je snížení tření při přenášení momentu síly. Aby mohlo ložisko správně fungovat, musí být nejprve správně vyrobeno a následně bezchybně uloženo do stroje či soustrojí. V opačném případě ložisko nebude plnit svůj účel, dojde k předčasnému opotřebení a v nejhorším případě k selhání přístroje.

Analýza ložisek a točivých strojů obecně je velice rozsáhlé téma. Točivé stroje je potřeba v praxi analyzovat jako celek, protože každá jeho součást, stupeň volnosti, může přispět do úrovně vibrací (hluky) nebo jiných veličin v závislosti na použité analýze. Ta vyžaduje předchozí zjištění parametrů ložisek a závad na nich se vyskytujících.

### 2.1 Typy ložisek

S ložisky se setkáváme denně, přestože je mnohdy nevidíme, nebo si neuvědomujeme, že jsou součástí využívaného zařízení. Jsou v automobilech, čerpadlech do studny nebo třeba v kolečkách kancelářských židlí. Vyrábí se v různých velikostech od průměru pouhých několika milimetrů až do průměrů několika metrů. Rovněž materiály a typy provedení se výrazně liší. Zvolené konstrukční materiály a konstrukce samotná ovlivňují mechanické vlastnosti a jejich cenu. Na dnešním trhu se můžeme setkat s ložisky vyrobenými jak z kvalitních materiálů, jako například titanu, různých druhů ocelí nebo slitin, ale rovněž z plastů a keramiky. Použité materiály a způsob výroby ložisek jsou úzce spjaty s jejich technickým použitím.

#### 2.1.1 Kluzná ložiska

Kluzná ložiska jsou nejjednoduššími typy ložisek, protože mají pouze dvě mechanické části. Ty jsou od sebe odděleny pouze tenkou vrstvou mazacího oleje. Díky jednoduchosti jejich konstrukce a velké kontaktní ploše mohou tyto ložiska snášet vysoká statická a dynamická zatížení a rovněž umožňují vícesměrový pohyb. Tyto výhody ložiska jsou na úkor nižší použitelné otáčivé rychlosti. [3]

#### 2.1.2 Valivá ložiska

U valivých ložisek přenos síly mezi vnějším a vnitřním kroužkem zprostředkovává valivý element. Na obrázku 2.1 je vidět popis konkrétně kuličkového ložiska. Valivé

ložisko se skládá z vnějšího kroužku, vnitřního kroužku, valivých elementů a může obsahovat klíčku. V klícce jsou umístěny valivé elementy, tedy jsou vzájemně odděleny mezi sebou a nedochází tak k vzájemnému tření mezi sebou. Tvar valivého elementu v ložisku závisí na provozních parametrech ve kterých bude ložisko použito. Mimo nejpoužívanějších kuliček může být použit tvar válečku, soudečku, jehličky nebo kuželíku. Ložiska jsou rovněž vyráběna v jednořadém nebo dvouřadém provedení.



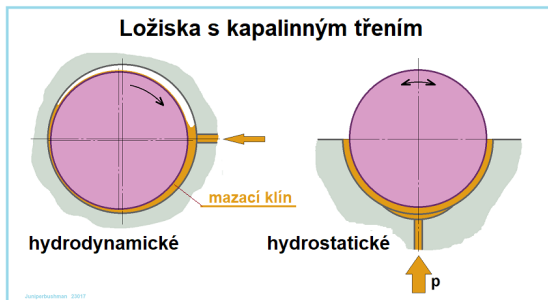
Obr. 2.1: Schéma valivého ložiska [22]

Dle směru působení síly na ložisko je můžeme rozdělit na radiální a axiální. Na axiální ložiska působí zátěž ve směru osy otáčení naopak na radiální ložiska kolmo na osu. Většina radiálních ložisek je schopna zachytávat radiální síly a některé typy axiálních ložisek síly radiální. Zásadní rozdíl však nastává při stanovení únosnosti ložiska. Pro provoz ložiska na vysokých otáčkách se používají ložiska s nízkým třením s bodovým stykem jako např. jednořadá kuličková ložiska. Oproti tomu pro nižší otáčky a vyšší zátěž/únosnost jsou to ložiska s čárkovým resp. přímkovým stykem (soudečková ložiska). [15]

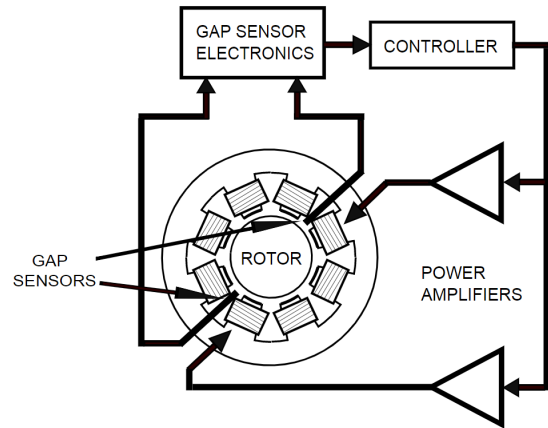
Ve srovnání s kluznými ložisky mají valivá ložiska menší ztráty třením, menší ložiskovou vůli, délku a malou spotřebu maziva. Jejich nevýhodou jsou větší rozměry, zvýšená citlivost na nárazy, hlučnější provoz, požadavky na přesnější a obtížnější montáž.

### 2.1.3 Fluidní ložiska

Fluidní ložiska využívají natlakované nebo rychle se pohybující tekutiny, která nadnáší hřídel. Tento typ ložiska se dělí na hydrostatická a hydrodynamická. Hydrodynamická ložiska využívají rychlosti hřídele k natlakování tekutiny v ložisku, která následně zafixuje hřídel uprostřed ložiska. Naopak u hydrostatického fluidního



Obr. 2.2: Fluidní ložiska [23]



Obr. 2.3: Magnetická ložiska [17]

ložiska toto natlakování probíhá externě za pomoci kompresoru. Vnější a vnitřní kroužek ložiska mají kontakt pouze při roztočení nebo zastavení stroje. V běhu jsou tyto součásti kompletně odděleny kapalinou či plynem, dochází k minimálnímu tření a stroje jsou schopny pracovat na velmi vysokých otáčkách nebo s vysokou přesností. [18]

### 2.1.4 Magnetická ložiska

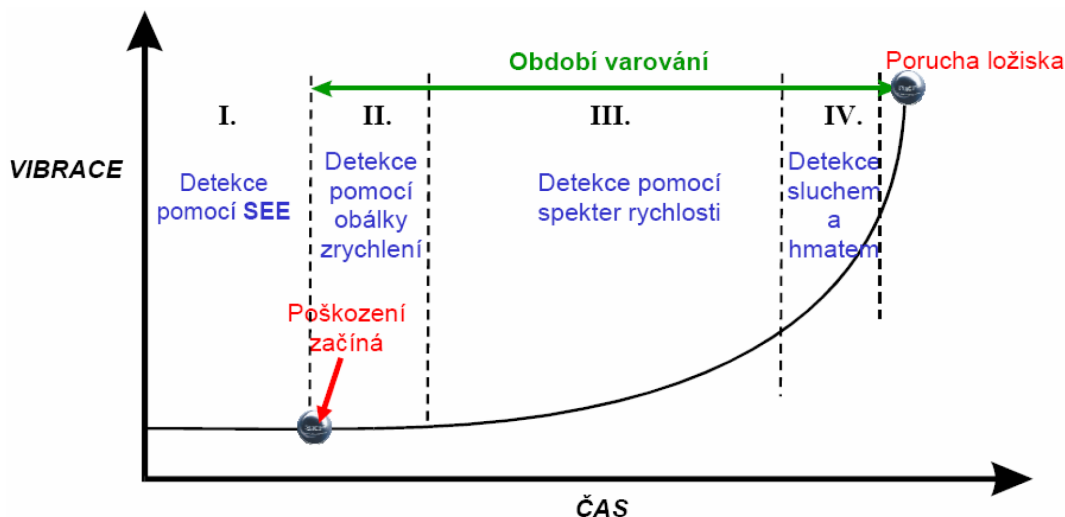
Magnetická ložiska umožňují eliminovat jakýkoliv kontakt s hřídelí. Hřídel je udržována uvnitř ložiska pomocí magnetického pole generovaného permanentním magnetem nebo elektromagnetem. V tomto levitujícím stavu dochází k minimálnímu tření, což umožňuje dosáhnout vyšších otáček s nižšími energetickými ztrátami než u ostatních typů ložisek. U magnetických ložisek není potřeba mazání, zvládají velmi dobře vibrace a jsou schopny pracovat i s malým vyosením hřídele. [17]

## 2.2 Závady valivých ložisek

Valivé ložisko, jakožto mechanická součást sloužící k přenosu síly podléhá degračním procesům. Opotřebením ložiska a jeho konstrukčních částí vede ke zvýšeným akustickým projevům a zvýšení emise vibrací, které je možné měřit. Pravidelná kontrola či monitorování stroje vede ke včasnému varování a prodloužení jeho životnosti.

Před uvedením ložiska do provozu je nezbytné zajištění korektní montáže při které dojde ke správnému uložení ložiska bez jeho poškození. V následných provozních podmínkách mají na ložisko vliv série vnějších vlivů. Prvotní poškození ložiska bývá nejčastěji způsobeno výskytem jiné závady na stroji (nevyváženost, nesouosost, aj.), které na ložisko vyvíjejí nadměrnou zátěž nebo vibrace a přispívají tím k rychlejšímu

opotřebení. Rovněž další faktory jako špatné mazání (nedodržení doporučené viskozity maziva, typu maziva apod.), vliv prostředí (znečištění částicemi a jejich tvrdost, vlhkost), přetížení, údržba aj. mohou způsobit defekt, který se dalším chodem stroje rozšiřuje.



Obr. 2.4: Rozvoj poškození valivého ložiska [2]

### 2.2.1 Fáze poškození valivých ložisek

Postupné zhoršení poškození valivých ložisek lze rozdělit od raného zhoršování až po eventuální katastrofickou poruchu do čtyř fází. Rozvoj poškození je možné pozorovat na obrázku 2.4

#### 1. fáze

Prvotní indikace problémů valivých ložisek nastává v ultrazvukovém frekvenčním pásmu (cca 250 kHz až 350 kHz). Jedná se o poruchy maziva nebo deformace vznikající pod povrchem kovu. Později, na počátku poškození, frekvence klesá do rozmezí přibližně 20 kHz až 60 kHz.

#### 2. fáze

Malé vady v ložisku začínají budit vlastní frekvence komponentů ložiska ve frekvenční oblasti 500 Hz až 2 kHz. Mohou se rovněž projevat rezonance nosných částí ložiska. U konce 2. fáze se na měřených frekvenčních spektrech objevují kolem rezonanční špičky postranní pásma.

### 3. fáze

Ve 3. fázi se objevují frekvence ložiskových závad a jejich harmonické násobky. Se zvětšujícím se poškozením se objevuje více jejich násobků a postranních pásem. Poškození začíná být velmi patrné a je jej možné měřit klasickými akcelerometry.

### 4. fáze

V poslední fázi životnosti ložiska bývá dokonce ovlivňována amplituda otáčkové složky se kterou roste i řada jejich násobků. Jedná se o kritické poškození ložiska, které je možno detekovat sluchem a hmatem.

## 2.2.2 Ložiskové frekvence

Pokud známe všechny parametry ložiska, je z nich možné vypočítat tzv. základní ložiskové frekvence. Z provedené frekvenční analýzy viz kapitola 3.2.1 je možné určit část ložiska na které se vyskytuje vada.

- BPF<sub>I</sub> - závada na vnitřním kroužku

$$BPF_I = \frac{N}{2} \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi \right) \cdot n \quad (2.1)$$

- BPF<sub>O</sub> - závada na vnějším kroužku

$$BPF_O = \frac{N}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi \right) \cdot n = N \cdot FTF \quad (2.2)$$

- BSF - závada na valivém tělísku

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi \right)^2 \right) \cdot n \quad (2.3)$$

- FTF - závada na kleci

$$FTF = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi \right) \cdot n \quad (2.4)$$

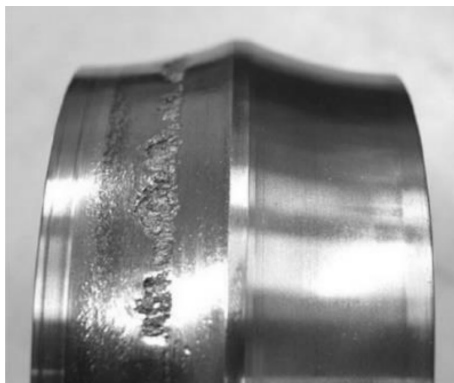
kde:

n	...	otáčky rotoru [Hz]
N	...	počet valivých elementů
$B_d$	...	průměr valivého elementu [mm]
$P_d$	...	roztečný průměr
$\phi$	...	kontaktní úhel

Předchozí vztahy platí v případě, že vnější kroužek ložiska stojí a vnitřní rotuje. V opačném případě se ve vzorcích změni znaménko, mimo vzorce pro výpočet závady na valivém tělísku.

### 2.2.3 Pitting

Typický únavový jev, při kterém dochází k drobení nebo odlupování svrchní vrstvy ložiskových kroužků. Poškození vzniká cyklickým namáháním ložiskových součástí, jedná se o klasickou únavu materiálu. První mikroskopické trhliny vznikají v určité hloubce pod povrchem kontaktních ploch. S pokračujícím namáháním materiálů dochází k jejich zvětšování a spolu s nimi rostou i vibrační projevy. Spektrální analýzou je možné lokalizovat část ložiska na kterém se pitting vyskytuje. Bývá často způsoben přetížením, nedostatečným mazáním nebo jinými provozními vlivy. [15]



Obr. 2.5: Pitting [24]

### 2.2.4 Koroze

Koroze představuje samovolné, postupné rozrušování materiálů způsobené reakcí s okolním prostředím. Na ložiscích se koroze může objevit jednak chybou výroby, kdy ložisko nemá dostatečnou povrchovou úpravu, nebo např. špatným uložením, kdy způsobené vibrace poškodí materiál ložiska a ten je vystaven okolnímu prostředí. Takovému typu koroze se říká bodová nebo štěrbinová koroze. Tehdy dochází jen k lokální oxidaci materiálu v okolí bodu/štěrbiny.

Při prvotní lokalizaci koroze je nezbytné monitorovat další rozšiřování a v případě zhoršujícího stavu ložisko vyměnit. V opačném případě by korozí způsobená únava materiálu mohla způsobit kompletní selhání ložiska např. prasknutí kroužku nebo rozsypaní kuličky.[19] [20]

## 2.3 Parametry ložisek

Parametrů valivých ložisek je mnoho a mohou se lišit dle typů ložisek. Znalost a dodržení těchto parametrů je však nezbytností pro zajištění správného chodu stroje ve kterém je ložisko použito.



V této práci se zaměřuji na diagnostiku závad kluzných a valivých ložisek. Budou zde zmíněny jejich vybrané nejdůležitější parametry. Tyto parametry jsou v dnešní době v převážné míře normovány standardy ISO.

### 2.3.1 Rozměry ložisek

Jedním ze základních parametrů jsou rozměry ložiska. Ty jsou vyráběny podle ISO standardů ISO 199, ISO 492 a ISO 582 pro valivá ložiska a ISO 12240 pro kluzná ložiska. Jednotlivé rozměry mohou být definovány výrobcem v katalogovém listu ložiska uvedením přesností tolerancí výroby nebo zařazením do Tříd tolerancí.

Třída (*Class*) rozděluje toleranci rozměrů ložisek do celkem 6 tříd. Základní třída přesnosti je označována jako *normální*. Společně s třídami 2 až 6, kdy třída 2 je nejvyšší třídou přesnosti, jsou definovány normou ISO. V katalogových listech ložisek se můžeme také setkat s jinými tabulkami tolerancí dle zemí původu ložiska jako např. ABEC na Americkém trhu, DIN na německém a JIS na japonském. [9] [10]

### 2.3.2 Únosnost

Únosnost ložiska, ať se jedná o ložisko kluzné či valivé, závisí na charakteru síly, která na něj působí formou zátěže. Rozlišují se zvláště parametry statické únosnosti, která je platná pro ložiska v klidu a dynamické únosnosti pro ložiska v pohybu.[4] [15]

#### Statická únosnost

Statická únosnost se používá v případě, že ložisko je v klidu. Tzn. že vzájemný rotační pohyb ložiskových součástí je roven nule. U valivých ložisek je statická únosnost  $C_0$  rovna takovému zatížení působící na ložisko, které vyvolá v nejvíce zatíženém stykovém místě ložiska trvalou deformaci o velikosti 0,0001 průměru valivého tělesa. Statické zatížení valivého ložiska je definováno normou ISO 76.

U kluzných ložisek z důvodu absence valivého elementu únosnost závisí na mnoha dalších činitelích. Ty se určují podle toho, v jakých oblastech tření kluzné ložisko pracuje (tření kapalinné, mezní, suché). Obecně tedy pro kluzná ložiska lze konstatovat, že se jedná o maximální přípustné radiální zatížení nepohyblivého ložiska. V případě jeho překročení může dojít k trvalým deformacím kroužků.[11]

#### Dynamická únosnost

Dynamická únosnost  $C$  je definována neproměnným zatížením, tedy silou (tíhou) působící na ložisko, která ložisko teoreticky přenesne na hranici základní trvanlivosti

jednoho miliónu otáček. Tím rozumíme, že pokud budeme na ložisko působit silou dynamické únosnosti stanovenou pro dané ložisko, po milionu otočení se na ložisku objeví poškození. Dynamickou únosností pro valivá ložiska se zabývá norma ISO 281. Obecně se dynamická únosnost používá k výpočtu trvanlivosti ložiska.

### 2.3.3 Rychlost otáčení

Rychlost otáčení ložiska je dalším ze základních a důležitých parametrů pro jeho prvotní výběr. Každé ložisko má svou mezní rychlost, která je dána velikostí, konstrukcí, materiálem, typem maziva aj. Nejdůležitějším faktorem, který omezuje maximální rychlost otáčení ložiska je teplota. Při rostoucích otáčkách dochází k nárůstu tření a tím akumulaci teploty.

Mezní otáčky z důvodu četnosti ovlivňujících faktorů lze stanovit jen přibližně. V případě, že se skutečné otáčky v chodu zařízení přibližují mezním, je nezbytná podrobnější analýza provozních podmínek. [15]

### 2.3.4 Trvanlivost

Trvanlivostí ložiska rozumíme jeho životnost. Jedná o počet otáček nebo dobu chodu v provozních hodinách (při stanovené rychlosti otáčení), které ložisko vykoná, než se začnou projevovat první známky únavy materiálu. Trvanlivost ložiska závisí jak na konstrukci a jakosti výroby, tak na jeho montáži a samotných provozních podmínkách a údržbě.

Výhodou kluzných ložisek s kapalinným třením je, že v teoretické úrovni mají neomezenou trvanlivost. Je to způsobeno skutečností, že mazací vrstva vzájemně odděluje kluzné plochy ložisek. Nedochozí k přímému dotyku a tedy ani k opotřebením.

Valivá ložiska mají trvanlivost úzce spjatou s dynamickou únosností. Je to patrné z výpočtu základní rovnice trvanlivosti, která udává spolehlivost ložiska za milión otáček. [3] [4]

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (2.5)$$

kde:

L	...	základní trvanlivost za milion otáček
C	...	základní dynamická únosnost [N]
P	...	ekvivalentní dynamické zatížení ložiska [N]
p	...	mocnitél: kuličková ložiska $p = 3$ ; válečková, soudečková, jehlová a kuželíková $p = \frac{10}{3}$

### 2.3.5 Provozní teplota

Provozní teplota ložiska je důležitým parametrem především v případě, je-li velmi nízká nebo velmi vysoká. Extrémní teploty mohou mít u ložisek vliv na viskozitu maziva případně na fyzikální vlastnosti materiálu. [3]

Údaje o provozní teplotě, při které výrobce garantuje zanedbatelný vliv na ostatní parametry ložiska, jsou uvedeny v katalogovém listě.

### 2.3.6 Předpětí

Předpětím se u valivých ložisek rozumí, že je na ložisko vyvíjen tlak většinou za pomocí pružiny. Takové provedení může vyrovnávat teplotní roztažnosti nebo zmenšení vibrací. [14] [15]

$$F_0 = k \cdot d \quad (2.6)$$

kde:

$F_0$	...	předpětí [kN]
$k$	...	součinitel - u elektromotorů 0,005 - 0,01, pro tlumení $k = 0,2$
$d$	...	vnitřní průměr ložiska [mm]

## 3 Diagnostické metody

V první kapitole byly zmíněny způsoby diagnostiky poruchy ložisek a rotačních strojů. Nyní zmíním diagnostické metody, které se věnují datům získaných vibrační analýzou.

Snímače vibrací, v převážné většině případů akcelerometry, jsou připevněny v předem připravených měřicích místech stroje se kterými se počítá již při jeho návrhu. Správná instalace senzoru je důležitou součástí diagnostického procesu. Uchycením přidáváme ke snímači další hmotu a pružinu, tvořenou poddajností námi vytvořeného spoje a tedy nesprávné připevnění můžeme zcela znehodnotit naměřená data nebo minimálně omezit použitelný frekvenční rozsah snímače. Senzor může být připevněn magnetem, kdy na stroji jsou hladké broušené plochy pro snadné a hlavně pevné uchycení magnetu. Obecně tento typ uchycení je vhodný pro běžná provozní měření do frekvencí okolo 2 kHz. Pro nejspolehlivější uchycení snímače je montáž senzoru prováděna pomocí šroubu. V takovém případě jsou na stroji předem připravené díry se závitem pro senzor. Díra musí být rovná, čistá, dostatečně hluboká a kolmá k měřenému povrchu. Rovněž je možné použít speciální lepidla, která neovlivní frekvenční rozsah senzoru a plocha pro přilepení musí být vhodně upravena (čistá, zdrsňená). Další možnosti montáže senzoru, jako například oboustrannou lepicí páskou nebo včelím voskem, se v praxi běžně nepoužívají. Způsoby uchycení senzoru podléhají normalizaci (ČSN ISO 5348) podle požadovaného frekvenčního rozsahu měření.

Diagnostika rotačních strojů se v praxi využívá v celém životním cyklu zařízení. Od prvotní instalace, vyhodnocení její správnosti, až po konec jeho životnosti, kdy by taková diagnostika měla zabránit katastrofálnímu selhání zařízení. V ideálním případě dochází k včasnému varování o překročení mezních hodnot ať se tak děje při pravidelné kontrole nebo z kontinuálního monitorování a tím včasnému zásahu technika.

### 3.1 Statistické metody

Statistické metody vyhodnocení diagnostikovaného signálu z ložiska jsou založeny na porovnávání charakteristických vlastností naměřených signálů z akcelerometrů. Z naměřených dat je možné vypočítat parametry jednotlivých statistických metod a na základě jejich výsledků určit aktuální stav ložiska. Předností těchto metod je jednoduchost a nenáročnost výpočtu. Nevýhodou všech statistických metod je nemožnost lokalizace chyby na ložisku, tedy konkrétní určení defektní části ložiska.

### 3.1.1 Efektivní hodnota

Efektivní hodnota ( $RMS$ ), známá rovněž jako Kvadratický průměr ( $\overline{x_{RMS}}$ ), představuje druhou odmocninu aritmetického průměru druhých mocnin naměřených hodnot, tedy odpovídá kvadrátu jejich průměru. Jeho označení  $RMS$  vychází z anglického názvu (root means square). [26]

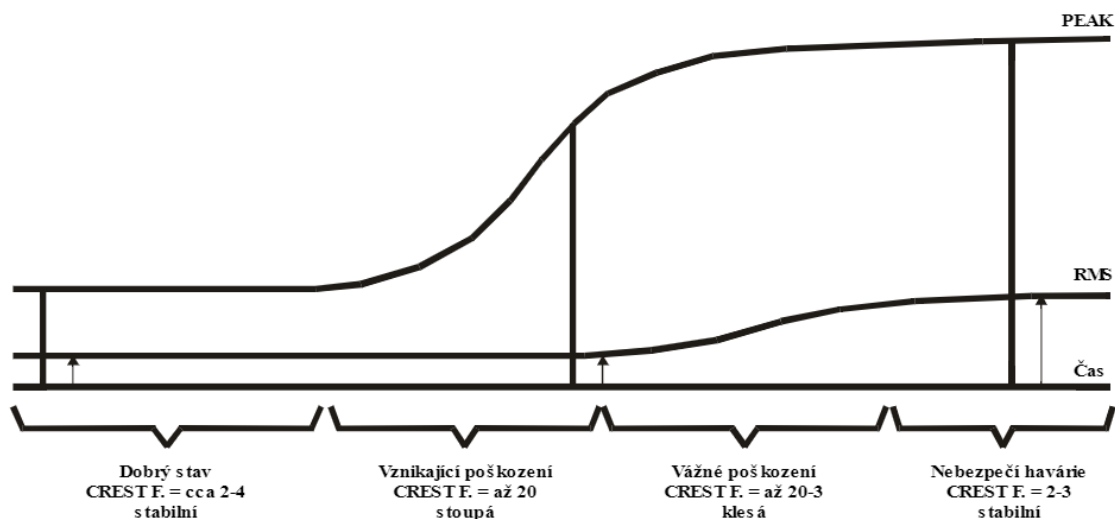
Efektivní hodnota se na každém ložisku mění a je tedy nemožné definovat přesnou hodnotu pro všechna ložiska. Z tohoto důvodu se výpočet  $RMS$  provádí po montáži. Tato hodnota slouží jako reference k dalším prováděným zkouškám. Poměr těchto hodnot dává představu o velikosti poškození. [25]

$$\overline{x_{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (3.1)$$

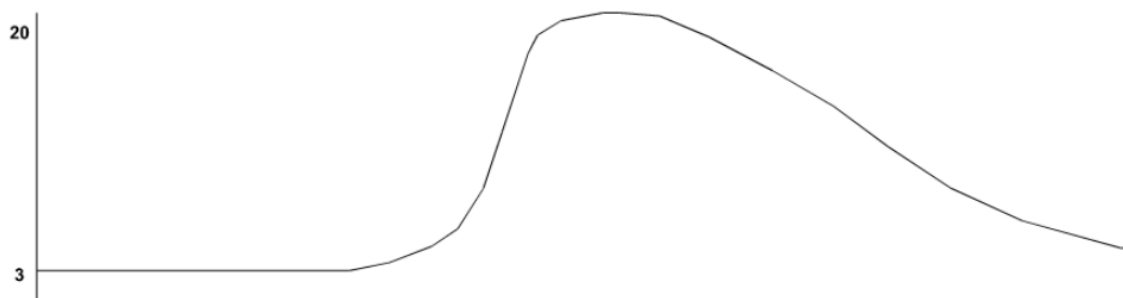
### 3.1.2 Crest faktor

Vyhodnocení pomocí crest faktoru je vhodné pro detekci závad na ložiscích v jejich raných stádiích. Výpočet parametru je založen na poměru mezi špičkovou a efektivní hodnotou viz rovnice 3.2. Tento poměr se vyhodnocuje v časové posloupnosti a to ve frekvenčním rozsahu od 10 Hz do 10 kHz. Výhodou tohoto parametru je včasná reakce na vznik poškození ložiska a nízké náklady z tohoto důvodu je vhodná na detekci poruch mazání ložisek. Nevýhodou je, jak je možné vidět na obrázku 3.2, že číselná hodnota Crest faktoru při rozsáhlém poškození ložiska jeho hodnotě není zásadně odlišná od ložiska v pořádku. Po prvotním poškození viz obrázek 3.1 dochází k nárůstu mechanických rázů a tedy i špiček signálu. Rozvojem poškození dochází k nárůstu efektivní hodnoty měřeného signálu tedy zmenšení hodnoty crest faktoru. Rovněž s rozvíjejícím poškozením ložiska je tato parametr ovlivněn parazitickými zdroji vibrací na stroji, klesá jeho účinnost. [7]

$$K_v = \frac{x_{max}}{x_{RMS}} \quad (3.2)$$



Obr. 3.1: Crest faktor [13]



Obr. 3.2: Průběh hodnoty Crest faktoru za dobu života ložiska [13]

### 3.1.3 $K(t)$ parametr

Parametr  $K_t$  je principem podobný crest faktoru, ale je schopný získat mnohem lepší výsledky. Hodnota parametru  $K_t$  se určí z rovnice 3.3 a vyhodnotí dle tabulky 3.1. Parametr má výhodu, že je spolehlivý, nejsou zjištěny omezení jeho platnosti, není závislý na směru měření a má široké možnosti použití.[6] [8]

$$K(t) = \frac{x_{max}(0) \cdot x_{RMS}(0)}{x_{max}(t) \cdot x_{RMS}(t)} \quad (3.3)$$

kde:

- $x_{max}(0)$  ... špičková hodnota zrychlení v době montáže ložiska
- $x_{max}(t)$  ... špičková hodnota zrychlení v čase t od začátku provozu
- $x_{RMS}(0)$  ... efektivní hodnota zrychlení v době montáže
- $x_{RMS}(t)$  ... efektivní hodnota zrychlení v čase t od začátku provozu

$K(t)$	Stav ložiska
$0,00 < K(t) \leq 0,02$	riziko selhání
$0,02 < K(t) \leq 0,20$	poškozené ložisko
$0,20 < K(t) \leq 1,00$	dobrý stav

Tab. 3.1: Hodnocení stavu ložiska dle parametru  $K_t$  [8]

### 3.1.4 Kurtosis

Kurtosis je statistická metoda počítána dle rovnice 3.4. Vychází ze skutečnosti, že náhodný vibrační signál má Gausovo normální rozdělení a tedy se v něm ani nevyskytují harmonické, ani vysokofrekvenční pravidelné složky. K určení jestli je tato podmínka splněna lze vypočítat parametr šikmost a špičatost signálu. Pro použití ve vibrační analýze se používá špičatost respektive výběrový koeficient špičatosti, protože šikmost je ovlivněna symetrií signálu. Jedná se o poměr čtvrtého ke druhému centrálnímu momentu prvního řádu.

$$Kurtosis = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n) - \bar{x}|^2} - 3 \quad (3.4)$$

kde:

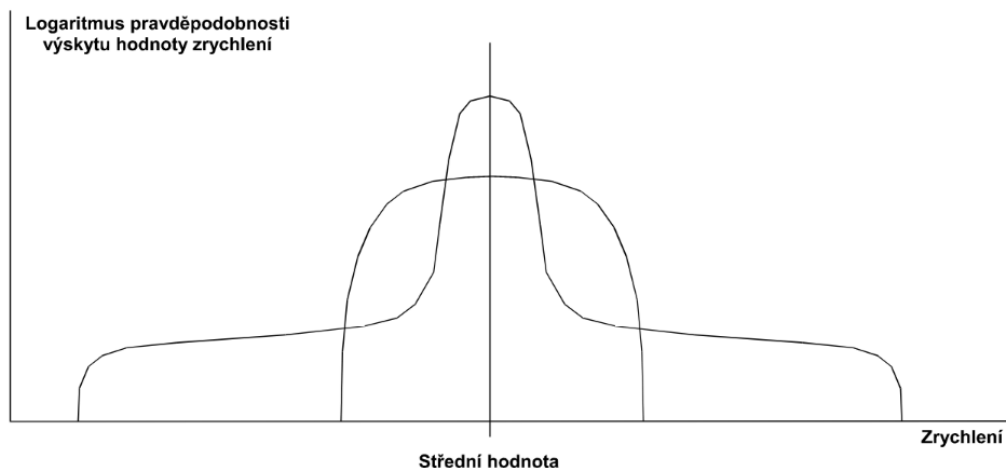
$x$	...	amplituda signálu
$\bar{x}$	...	střední hodnota
$N$	...	počet vzorků signálu $x$
$\mu_4$	...	čtvrtý centrální moment prvního řádu
$\mu_2$	...	druhý centrální moment prvního řádu

Měření probíhá většinou ve frekvenčním rozsahu od 2,5 kHz do 80 kHz bývá rozděleno do pěti frekvenčních pásem. Hodnota faktoru narůstá se vzrůstajícím poškozením ložiska:[7][16]

$K = 3-4$	dobrý stav
$K = 5-8$	prvotní poškození
$K = 9-12$	vážné poškození
$K > 13$	riziko selhání

Měřicí pásma:

Při měření systém  $K$  spoléhá na absolutní hodnoty vibrací. Jedná se o statistický proces založený na rozložení amplitud signálu. Výhodou této metody je, že jí zvládne lehký, tedy snadno přenosný přístroj a tím má širší možnosti k získávání informací o ložiscích. Nevýhodou je časová náročnost a skutečnost, že není vhodná pro všechny typy ložisek jako např. dvouřadá válečková nebo ložiska soudečková.



Obr. 3.3: Rozložení signálu pro dobré a poškozené ložisko [13]

$K1$	2,5 - 5 kHz
$K2$	5 - 10 kHz
$K3$	10 - 20 kHz
$K4$	20 - 40 kHz
$K5$	40 - 80 kHz

## 3.2 Frekvenční metody

### 3.2.1 Frekvenční analýza

Frekvenční analýza v diagnostice rotačních strojů, tedy i ložisek má důležitou roli. Každá součást stroje má jiné vlastní frekvence, u kterých dochází k rozkmitání stroje, které se mohou projevit v jeho celkových vibracích. Ze správně provedené frekvenční analýzy je tedy možné zjistit, kde se na stroji závada nachází. Místo závady na ložisku je možné identifikovat při výskytu ložiskových frekvencí viz kapitola 2.2 a jejich násobků.

Převod signálu do frekvenční oblasti se nejčastěji provádí Fourierovou transformací, která pracuje s premisou, že jakýkoliv periodický signál lze popsat sumou harmonických funkcí různých frekvencí. Fourierova transformace spojitého signálu je definována jako: [2]

$$\mathcal{F}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{j2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

a zpětná Fourierova transformace:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(f)e^{j2\pi ft} dt \quad (3.6)$$

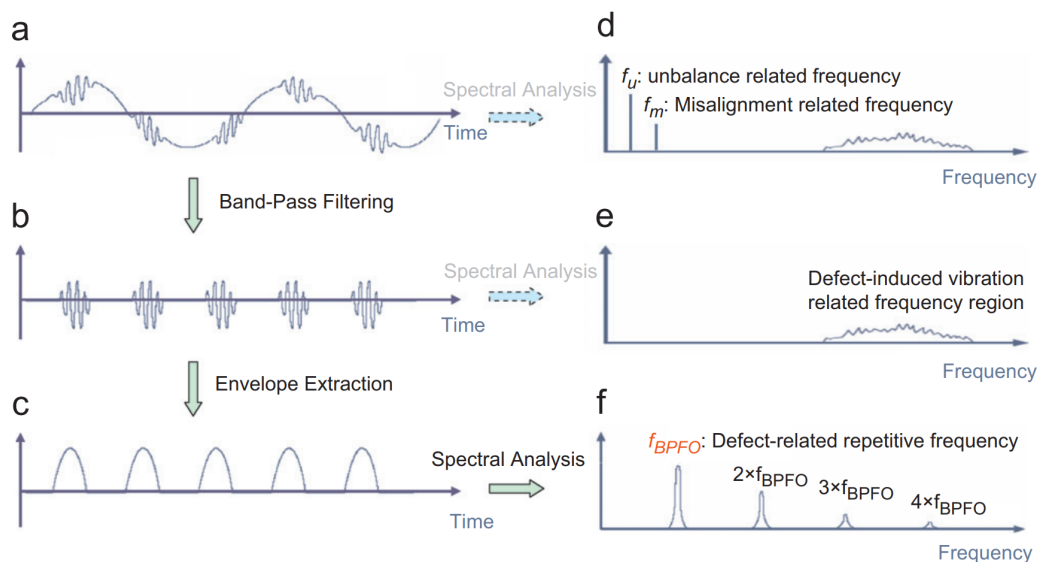
Ze vzorce vyplývá, že pro převod do frekvenční oblasti je potřeba nekonečně dlouhý signál. V reálu to však není možné a proto byly vytvořeny upravené vzorce.



Ty vycházejí ze vzorce pro Fourierovu transformaci, nebo zpětnou Fourierovu transformaci, ale k výpočtu nepotřebují nekonečně dlouhou časovou řadu. Jsou to transformace jako např. Rychlá Fourierova transformace (FFT), krátkodobá Fourierova transformace (STFT) nebo diskkrétní Fourierova transformace (DFT). Nejpoužívanější ze zmíněných úprav pravděpodobně je rychlá Fourierova transformace, která ve spektru vibrací získaných akcelerometrem dokáže vyhledat periodické děje a přiřadí jim příslušné frekvence.

### 3.2.2 Obálková analýza

Obálková analýza je spolehlivou metodou pro určení stavu ložiska. Společně s FFT je možné přesně identifikovat Ložiskové frekvence a tím určit, která část ložiska je poškozena. Cílem obálkové analýzy je odfiltrovat nízkofrekvenční vibrační signály tak, aby se zvýraznily frekvence závady na ložisku. Na data je nejprve aplikován vysokofrekvenční (pásmový) filtr k odstranění nízkofrekvenčních složek signálu způsobených přirozenými frekvencemi stroje. Odfiltrovaný signál nese informaci o rázových pulzech. V dalším kroku dochází k usměrnění signálu a vytvoření obálky za pomoci obálkového filtru. V takto modulovaného signálu je možné provést frekvenční analýzu a tím identifikovat chybové frekvence ložisek. Rovněž se počítá efektivní hodnota obálky, která se rovněž používá jako indikátor zhoršení stavu ložiska při zvýšení poměrů mezi měřeními. [2][5][12]



Obr. 3.4: Postup obálkové analýzy [27]

### 3.2.3 Kepstrální analýza

Kepstrální analýza slouží k vyhledávání a zvýraznění periodických dějů ve frekvenčním spektru. Je vhodná pro případy, kdy systém obsahuje několik nosných frekvencí s namodulovanými bočními pásmy jako například u převodovek. Výsledek kepstrální analýzy dle rovnice 3.7 je výkonové kepstrum v časové oblasti.

Kepstrum (ang. *cepstrum*), pojem vznikl přesmyčkou slova spektrum, označuje celou řadu různě definovaných metod se společným základem v aplikaci Fourierovy transformace na logaritmické spektrum. Jedná se o matematickou metodu, která v časovém průběhu signálu vibrací z akcelerometru hledá periodické děje.

Tato analýza je pomůckou pro lepší orientaci a diagnostiku v naměřeném spektru. Odpovídá výpočtu zpětné Fourierovy transformace logaritmu výkonového spektra:[2]

$$C(\tau) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \log \left| \mathcal{F}\{x(t)\} \right|^2 \right\} = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \log S(f) \right\} \quad (3.7)$$

kde:

$x(t)$ ...	amplituda signálu
$S(f)$ ...	výkonová spektrální hustota signálu $x(t)$
$\mathcal{F}^{-1}$ ...	zpětná Fourierova transformace

## 3.3 Rezonanční metody

Rezonanční metody pracují ve vyšších frekvenčních pásmech, kde se závady na ložiscích projevují již v prvních počátcích poškození. Ke sběru dat se používají speciální akcelerometry nebo akcelerometry s velkým frekvenčním rozsahem.

### 3.3.1 Metoda rázových pulzů

Metoda rázových pulzů (*shock pulse method - SPM*) k diagnostice za základně rázového impulzu, který vzniká při kontaktu dvou vzájemně se pohybujících kovů. Při kontaktu dochází ke dvou vzájemně se propojeným jevům. Nejprve kontakt vyvolá tzv. rázovou vlnu, která se šíří zařízením ve frekvenčním pásmu se střední frekvencí přibližně 36 kHz. Amplituda rázové vlny je závislá na rychlosti nárazu a šíří se kovem od místa vzniku do zbytku stroje. Cestou se vlna rozptyluje drobnými nedokonalostmi materiálu jako například přítomným uhlíkem. Při dalším rozvoji rázu, druhý jev nazýván tzv. vibrační fáze, jsou kovové povrchy stlačovány a vychylovány. Po dosažení maximální výchylky struktura kovu pokračuje několik cyklů v ohýbání dokud nedojde k rozptýlení energie a dojde k ustálení v původní poloze. Frekvence vzniklých vibrací je závislá na tvaru, hmotnosti, tuhosti a tlumení materiálu.

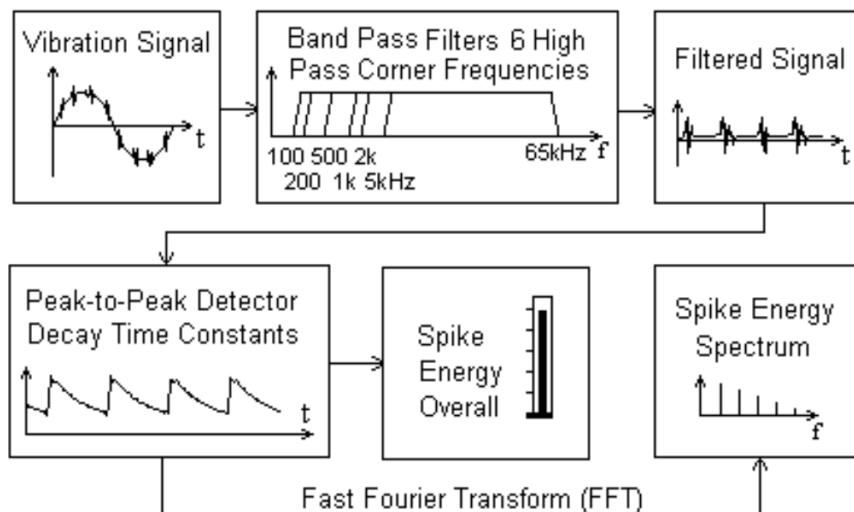
Měření je prováděno speciálním typem akcelerometrů tzv. Tandem-piezo akcelerometr, které jsou speciálně navrženy pro tento typ měření (mohou však být použity jako klasický akcelerometr). Po měření je signál filtrován pásmovým filtrem okolo 36 kHz pro zvýraznění impulzu a následná diskretizace signálu.

Metodu SPM jsou získány dva parametry, které vypovídají o stavu ložiska, jsou to tzv. *Carpet Value* a *Max Value*. *Carpet Value* je v rotujícím ložisku přítomna vždy, protože se jedná hluk v pozadí, který je způsoben kontaktem dvou kovů. Při rozpadu lubrikačního filmu ložiska, počátcích poškození, dochází ke zvýšení kontaktu kovů a zároveň hodnota *Carpet Value*. Vznik poškození ložiska způsobí periodické rázové vlny s vysokou amplitudou, tzv. *Max Value*, které převyšují *Carpet Value*. Aplikací filtračních metod (peak hold signal processing) je možné separovat špičky od *Carpet value* hodnot v pozadí signálu. S rostoucím poškozením narůstá amplituda rovněž této hodnoty. [28][29][30]

### 3.3.2 Metoda sledování hodnoty špičkové energie

Metoda *Spike energy (SE)* byla vyvinuta pro detekci krátkých pulzů vznikajících na valivém ložisku, které generují nárazy vzniklé přechodem valivého elementu ložiska přes mikroskopické nedokonalosti materiálu. *SE* využívá akcelerometr pro detekci energie vibrací na předem definovaném, širokém pásmu frekvencí (až 65 kHz). Mechanické rázy excitují přirozené frekvence akcelerometru stejně jako přirozené frekvence komponentů stroje v tomto širokém frekvenčním pásmu. Tyto rezonanční frekvence fungují jako nosné frekvence, které se modulují s frekvencemi defektu. Intenzita energie dopadu je funkce amplitudy pulzu a rychlosti opakování. Měřený signál je zpracován speciálními filtrovacími a lokalizačními obvody. Velikost signálu je vyjádřena ve speciální jednotce "gSE" (jednotka zrychlení vztažená k velikosti *SE*).

Postup zpracování signálu metodou *SE* je možné vidět na obrázku 3.5. Měřený signál je filtrován pásmovou propustí. Rozsah filtru je možné zvolit od 100 Hz (200 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 5000 Hz) do 65 kHz, což je zároveň horní frekvenční mez *SE* detekce. Důvod filtrace nižších frekvencí je odstranit frekvence vibračních signálů jako např. nevyváženost, nesouosost, aj. Filtrovaný signál prochází detekorem špiček (*Peak-to-Peak detector*), který nejen zadržuje špičkové amplitudy ale rovněž aplikuje pečlivě vybranou časovou konstantu rozpadu. Časová konstanta rozpadu je přímo spojena s maximální frekvencí spektra (*Fmax*) a je automaticky volena instrumentací nebo programem. Výstupní signál z *SE* špičkového detektoru je signál pilového tvaru. Ten je dále zpracováván pro výpočet celkové velikosti *SE* a jejího spektra energie.[31]



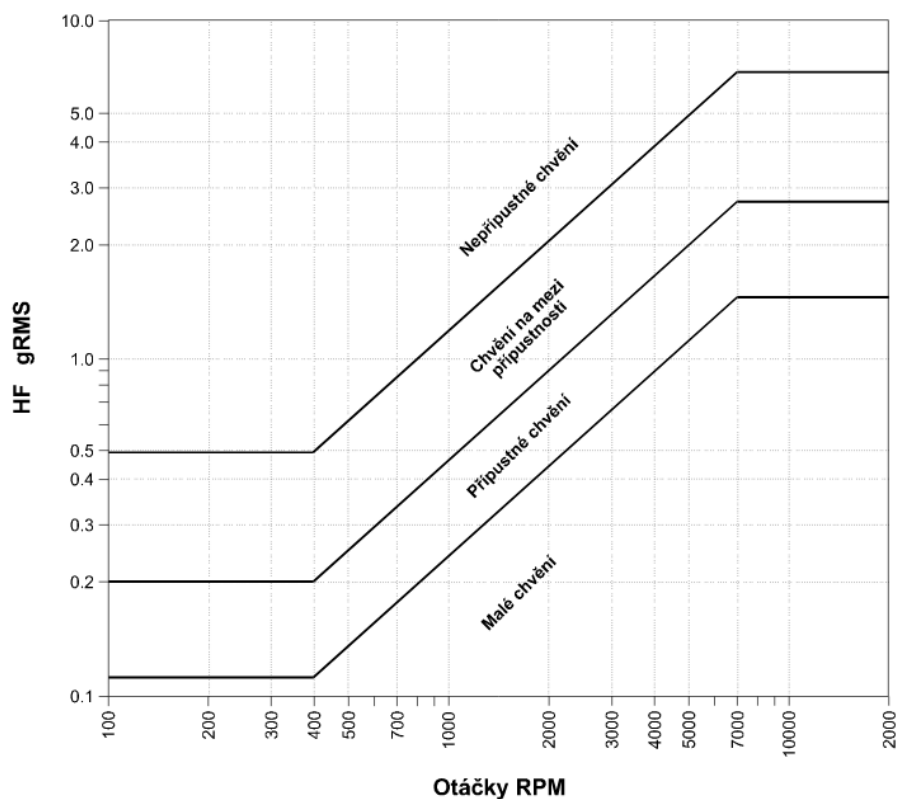
Obr. 3.5: Postup zpracování signálu metody *SE* [31]

### 3.3.3 Metoda vysokofrekvenční emise

Metoda High frequency emission (*HF*), tedy vysokofrekvenční emise, je založena na poznatku, že projevy prvotního poškození ložiska dochází k nárůstu vibrací ve vyšších frekvencích. Je velmi citlivá na poruchy mazání jako například jeho nedostatek nebo znečištění. Parametr *HF* je hodnota vysokofrekvenční energie formou efektivní hodnoty vyjádřená v hodnotě gravitačního zrychlení ( $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ). Hodnoty  $g_{RMS}$  jsou vyhodnocovány dle obrázku 3.6.

### 3.3.4 Metoda Bearing Condition Unit

Bearing Condition Unit (*BCU*) je metoda užívána a patentována společností *Schenck*. Poškozené valivé ložisko generuje rázové impulzy, které ve snímači vyvolává buzení vibrací v rezonanční oblasti (20-40 kHz). Z intenzity generovaných rázů, jejich četností se zjišťuje energetický rozsah šířených vibrací v materiálu a vytváří se tzv. charakteristická veličina stavu valivých ložisek *BCU*. Vyhodnocení povolených mezí se u této metody nedá obecně určit z důvodu specifických vlivů na konkrétní ložisko. K identifikaci stavu ložiska je možné použít porovnání dat s identickým ložiskem, které bylo zabudované na shodném místě a periodicky měřeno v celé jeho životním cyklu. Pokud taková data nejsou k dispozici, použijeme hodnotu *BCU* při instalaci jako referenční a mez poškození ložiska stanovíme na 3-4 násobek referenční hodnoty. [6]



Obr. 3.6: Přípustné hodnoty  $g_{RMS}$  vůči otáčkám stroje [13]

## 3.4 Speciální metody

V této sekci jsou zařezeny speciální metody, které není možné jednoznačně zařadit. Jedná se o metody patentované nebo proprietárně vlastněné společnostmi.

### 3.4.1 Metoda spektrální emise energie

Metoda Spectral Emission Energy (*SEE*) poskytuje brzkou detekci závad ložisek, převodovek aj. Tato metoda je patentována společností SKF. Pracuje na principu akustické emise, která je generována selháním kovů, jejich vzájemným kontaktem nebo dalšími specifickými podmínkami.

K měření akustické emise se používá speciální senzor pro měření ve vysokofrekvenční oblasti (150-500 kHz). Tento typ signálu je považován spíše za vysokofrekvenční zvuk, však vibrace je pro něj běžně užívaný technický termín. Technologie *SEE* je vhodná pro hledání defektů v prvotním stádiu jejich vzniku, kdy se defekt nalézá pod povrchem kovu nebo je mikroskopický a neprojevuje se v měřitelném vibračním spektru.

*SEE* technologie může mít v závislosti na monitorovacím zařízení numerický nebo spektrální výstup (nebo oba). Numerická analýza detekuje defekty v blízkosti

SEE	Stav ložiska
0-3	Žádný zjistitelný problém
3-20	Problém mazání, kontaminace maziva, porucha ložiska s malou zátěží nebo malého ložiska se střední zátěží
20-100	Defekt ložiska nebo znečištění
100+	Vážná závada ložiska

Tab. 3.2: Vyhodnocení numerické *SEE*, čísla uvedena ve stupnici *SEE*

umístěného snímače. Pro tento typ analýzy je nezbytná dokonalá znalost měřeného stroje. Obecně platí, že vyšší hodnoty indikují defekt. V tabulce 3.2 jsou orientační hodnoty pro diagnostiku stroje, ale pouze praxe a zkušenosti jsou schopny určit skutečné hodnoty pro daný stroj.

Spektrální *SEE* analýza je schopná detekovat projevy defektů, které se nemusí zobrazovat na jiných typech analýz. Děje se tomu tak kvůli kombinaci vysokofrekvenčního měření a filtraci všech nízkých frekvencí. Prvotní projevy defektů ložisek v opakujícím se akustickém signálu jsou filtrací zvýrazněny a projevují se jako špičky na násobcích poruchových frekvencí ložiska. Pro měření ložisek to znamená, že bez výskytu špiček na *SEE* spektrech, neexistují ani žádné *SEE* akustické signály. [32]

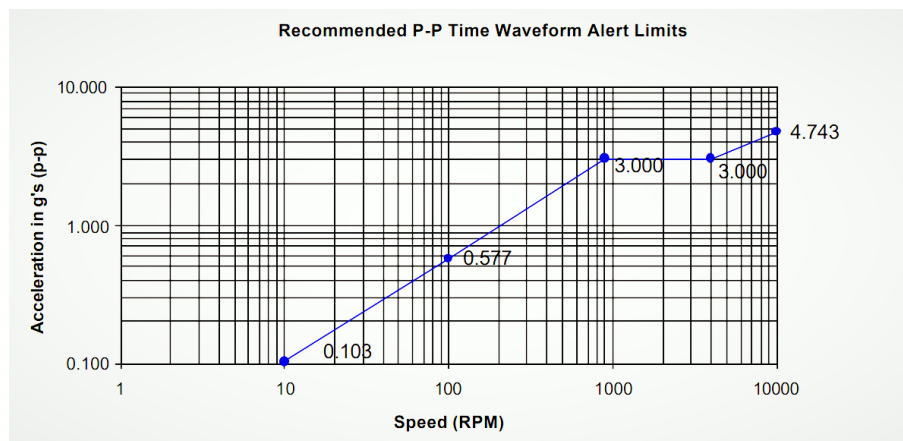
### 3.4.2 Metoda analýzy špičkových hodnot

Metoda *PeakVue*, peak value analysis (analýza špičkových hodnot), vyvinutá firmou Emerson k diagnostice stavu valivých ložisek, rotačních strojů, převodovek aj. Stav ložiska vyhodnocuje na analýze namáhání kovů (*Stress Wave Analysis*), které je způsobeno kontaktem kov na kov a šíří se od jeho vzniku do zbytku stroje.

Měření analogového signálu vibrací stroje je prováděno akcelerometrem. Získaný signál je následně přepočítán na jednotky zrychlení g nebo jednotky rychlosti. Obecně dochází k okamžité filtraci dolní propustí vyššího řádu před digitalizací pro odstranění částí signálu s frekvencemi většími než Nyquistova frekvence, definována jako polovina vzorkovací frekvence. Digitalizovaná data jsou rozdělena do bloků o délce  $2n$ , kde  $n$  je celé číslo. Na takto rozdělená data rotačních strojů je nejčastěji aplikována Fourierova transformace k vytvoření spektra. Spektrální analýza slouží k rozdělení signálu do užitečných periodických složek spjatých s rotační frekvencí stroje. Mimo ni je na bloky dat možné aplikovat auto-korelační analýzu, která slouží k lokalizaci periodických složek v zašuměném signálu.

Pro vyhodnocení stavu ložiska se nejprve používá sledování trendu špičkových hodnot na ložisku. Jsou nastaveny dvě hladiny špičkových hodnot podle provede-

ného statistického měření prováděného individuálně na ložisku. První hladina je pro výstrahu a její doporučené hodnoty jsou vidět na obrázku 3.7. Druhá je hladina poruchy viz obrázek 3.8. Obvykle bývá nastavena jako dvojnásobek hladiny výstrahy. Při jejím překročení dochází k lokalizaci poruchy pomocí spektra *PeakVue*. [33] [34] [35]



Obr. 3.7: Doporučené hodnoty výstrahy [33]

COMPONENT RPM	R.E. BEARING FAULTS		GEAR FAULTS	
	Inner Race, Cage or Rolling Element Fault	Outer Race Fault	Worn or Scored Teeth <sup>1</sup>	Cracked Teeth <sup>4</sup> (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

Obr. 3.8: Hodnota hladiny alarmu poruchy pro ložiska a převodovky na různých otáčkách [33]

### 3.4.3 Metoda ACMT

Metoda *ACMT* (Adash Compressed Measurement Time) je diagnostickou metodou společnosti Adash spol. s.r.o. z Ostravy, která slouží primárně k diagnostice pomalu rotujících strojů. Metoda pracuje na principu měření rázových pulzů vznikajícími poškozením na ložisku. Pro měření a analýzu těchto rázů je nezbytné měřit s dostatečně vysokou frekvencí pro dobré rozlišení dat. Naopak je stroj nutné měřit dostatečně dlouho s ohledem na jeho nízkou rotační frekvenci.

*ACMT* tento konflikt požadavků řeší dvojím vzorkováním signálu. Nejprve je signál navzorkován vysokou frekvencí, aby bylo zajištěno požadované rozlišení signálu. Následně je provedeno převzorkování signálu, frekvencí většinou 1 kHz, spojené s kompresí dat. Při převzorkování dochází k zachování extrémů původního signálu a nedochází ke ztrátě důležitých informací původního signálu. [36]



## 4 Výběr a popis metod

Z metod zmíněných v předchozí kapitole jsem se rozhodl k implementaci statistických metod, obáلكové analýzy a metod na bázi kepsrální analýzy. Jako programové prostředí jsem si zvolil program LabVIEW. Učínil jsem tak z důvodu, že s programem BK Connect nemám zkušenosti a program Matlab, dle mého názoru, LabVIEW nabízí širší možnosti použití.

### 4.1 Metody statistického zpracování signálů

Do programu jsem zahrnul výpočet statistických metod, které nejsou náročné na výpočet a mohou sloužit jako rychlý indikátor přítomnosti závady na ložisku. Hodnota kurtosis a crest faktor mohou identifikovat závady porovnáním vypočtených hodnot s tabulkovými hodnotami. Pro vyhodnocení efektivní hodnoty ( $RMS$ ) a  $K_t$  parametru je potřeba znát referenční hodnoty ložiska z doby instalace, kdy bylo ložisko v pořádku, protože statistické metody vyhodnocují stav ložiska na základě difference hodnot ve dvou časech.

### 4.2 Metoda obáلكové analýzy

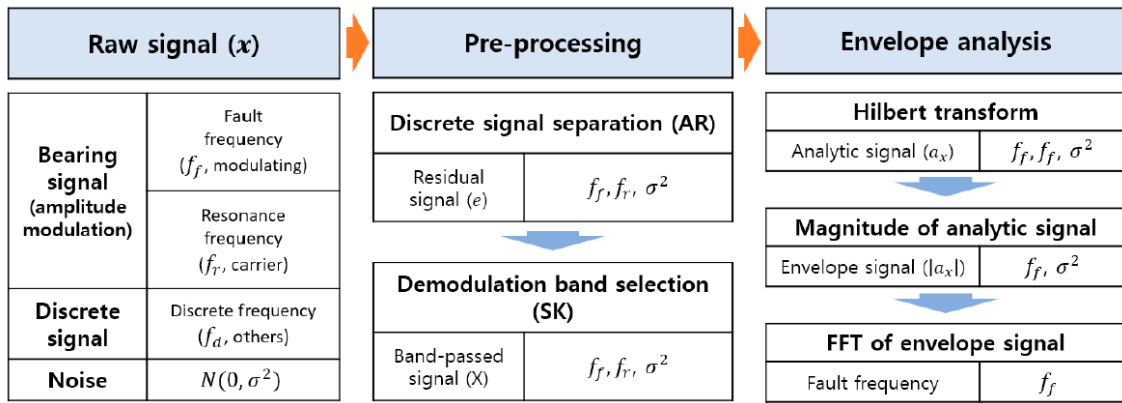
Obecný princip obáلكové analýzy byl popsán v kapitole 3.2.2, kde je uvedeno, že se skládá z filtrace signálu, usměrnění signálu a vytvoření obáلكy. V praxi je spousta možností jak tento postup na signál z akcelerometru aplikovat. Já jsem pro provedení obáلكové analýzy zvolil postup popsáný v článku [37], který je zobrazen na obrázku 4.1. Článek slouží jako tutoriál pro obáلكovou analýzu v programu Matlab. Pro pochopení prováděné obáلكové analýzy jsem vytvořil identický program v prostředí LabVIEW, který je v programu označován jako *Envelope Matlab*. Na jeho základě jsem vytvořil obáلكovou analýzu s pomocí LabVIEW funkcí.

#### 4.2.1 Předzpracování signálu - Pre-processing

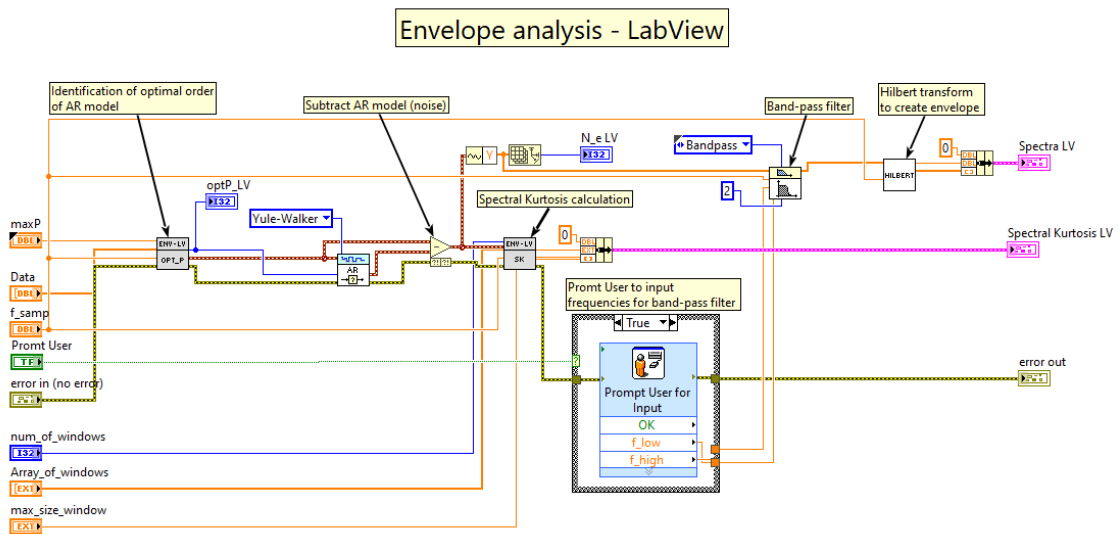
Část zpracování signálu (*pre-processing*) je rozdělena na dvě části. Separaci diskretních signálů a výběr demodulačního pásma.

##### Separace diskretních signálů

Prvním krokem obáلكové analýzy je oddělit nežádoucí diskretní (deterministické) signály z jiných zdrojů vibrací měřeného zařízení. Diskretní signál může být vytvořen za pomoci auto-regresivního ( $AR$ ) modelu. Ten odhaduje aktuální hodnotu časové



Obr. 4.1: Průběh zpracování signálu obálkovou analýzou [37]



Obr. 4.2: Obálková analýza zpracovaná v LabVIEW

série na základě váženého součtu předchozích hodnot. Odečtením AR modelu od dat akcelerometru získáme zbytkový signál  $e$ .

Vytvoření kvalitního  $AR$  modelu výrazně ovlivní další kroky obálkové analýzy, proto je důležité správně zvolit jeho řád  $p$  v závislosti na jeho použití. Pro vyhodnocení stavu ložisek se k určení používá maximální hodnota špičatosti (kurtosis) zbytkového signálu. Určení rozsahu pro výpočet  $p$ , který se orientačně počítá jako podíl vzorkovací frekvence k maximální hodnotě chybové frekvence ložiska, vychází z předpokladu: Řád modelu by neměl být větší než počet dat uvnitř chybového intervalu [37].

## Výběr demodulačního pásma

Druhým krokem předzpracování signálu je výběr demodulačního pásma signálu. To znamená, že je potřeba zvolit frekvenční pásmo zbytkového signálu, které obsahuje rezonanční frekvence. Děje se tak na základě spektrální špičatosti (spectral kurtosis -  $SK$ ).  $SK$  je hodnota špičatosti signálu na každé hodnotě frekvence v časofrekvenčním diagramu (spektrogramu). Při výskytu závady na ložisku se chybové frekvence ložisek modulují na oblast rezonančních frekvencí a v této oblasti se zvyšuje hodnota  $SK$ , která je definována funkcemi krátkodobé Fourierovy transformace (STFT)

$$K(f) = \frac{\langle |S(t, f)|^4 \rangle}{\langle |S(t, f)|^2 \rangle^2} - 2 \quad (4.1)$$

kde  $\langle \cdot \rangle$  je operátor časového průměrování a  $S(t, f)$  je STFT zbytkového signálu.

STFT rozumíme Fourierovu transformaci na konečném časovém intervalu. Tento interval je dán oknem respektive oknovou funkcí, která může svým průběhem dále upravovat interval signálu. Například Hannovo okno délky  $L$  lze matematicky zapsat následovně:

$$w(l) = 0,5 \left[ 1 - \cos \left( 2\pi \frac{l}{L-1} \right) \right], 0 \leq l \leq L-1 \quad (4.2)$$

Výsledky STFT se mohou výrazně lišit v závislosti na délce okna. Okna mají hodnotu mocnin 2 ( $2^4, 2^5, 2^6, \dots$ ), ale je doporučeno stejně jako u určování hodnoty  $maxP$ , aby byla délka okna menší než počet dat uvnitř intervalu. Pro tato okna jsou vypočteny hodnoty  $SK$ , které jsou společně proloženy do grafu, ze kterého je možné identifikovat mezní frekvence pro pásmovou propust. Tuto část není možno plně automatizovat bez aplikace nějaké formy umělé inteligence. Z tohoto důvodu je v mé aplikaci na uživateli, aby na základě grafu  $SK$  zvolil hodnoty mezních frekvencí.

### 4.2.2 Obálková analýza

Signál, který projde předzpracováním signálu, ideálně obsahuje pouze rezonanční (nosné) a chybové (modulované) frekvenční složky. Samotné vytvoření obálky, jak je možné vidět z obrázku 4.1, obsahuje celkem tři kroky.

Nejprve je na signál aplikovaná Hilbertova transformace, označována rovněž jako 90°posunovač fáze, jejíž výsledkem je analytický signál, vyjádřený jako:

$$a_x(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} e^{j\phi_x(t)} = A_x(t) e^{j\phi_x(t)} \quad (4.3)$$

kde  $a_x$  označuje analytický signál složený z reálné části  $x(t)$ , imaginární části  $\hat{x}(t)$ .  $\phi_x(t)$  značí okamžitou fázi signálu a  $A_x$  okamžitou amplitudu signálu.

V dalším kroku dochází k výpočtu magnitudy analytického signálu. Ten je usměrněn a je z něj odstraněn DC offset, odečtením střední hodnoty.

Nakonec je na signál aplikovaná FFT pro získání spektra signálu. Do něj jsou proloženy hodnoty chybových frekvencí měřeného ložiska. Přítomnost špiček signálu na chybových frekvencích ložiska nebo jejich násobcích, značí závadu.[37]

## 4.3 Metody keprální analýzy

Keprální analýza byla popsána již v kapitole 3.2.3 a je definována vzorcem 3.7. Metoda velmi dobře odstraňuje diskrétní (deterministické) signály vzniklé vibracemi stroje a i z tohoto důvodu se mimo samotné analýzy používají metody na bázi kepra pro úpravu, respektive předzpracování signálu před jeho další analýzou.

## 4.4 Metoda Automatic Cepstral editing procedure

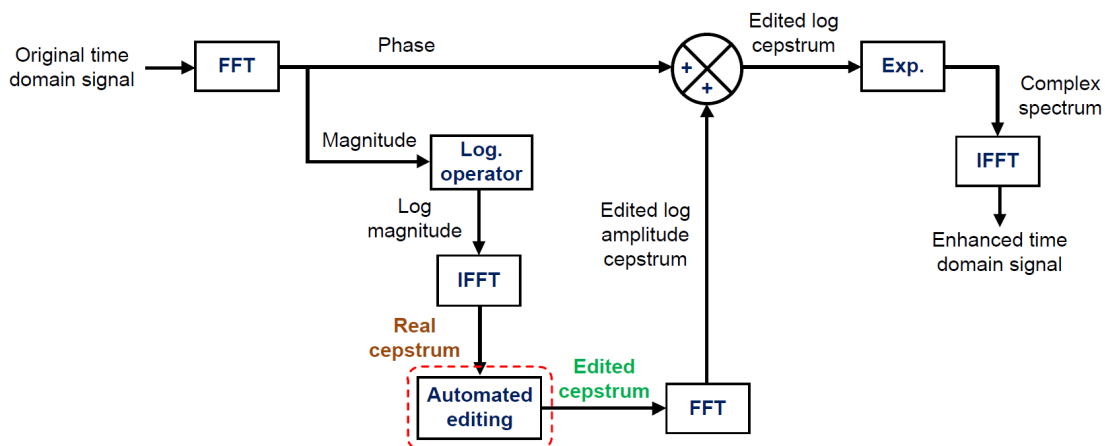
Metoda *Automatic Cepstral editing procedure* - *ACEP* je způsob filtrace diskrétních komponentů z vibračního signálu. Je založena na metodě *Cepstral editing procedure* - *CEP* představené Randallem a Sawalhim [38]. Ta odstraňuje periodické komponenty signálu vibračního signálu editací (liftering) magnitudy reálného kepra na žádaných frekvencích. Na obrázku 4.3 je vidět schématický diagram metody *CEP*, v níž editace signálu byla prováděna manuálně použitím informací o rychlosti otáčení, konfigurací zařízení kterým je například převodový poměr aj. Tento proces je možné automatizovat dle schématu v obrázku 4.4. Dochází k editaci úzkých impulzů s harmonickými reálného kepra, které je nejprve upraveno lifterem typu horní propust. Spektrální subtrahcí (*SS*) jsou zvýrazněny všechny špičky korespondující s diskrétními komponenty. Nakonec podle nalezených špiček je automaticky vytvořen hřebenový lifter.

Důležitou vlastností kepra je jeho symetričnost, kterou dědí z diskrétní Fourierovy transformace (DFT). Z tohoto důvodu u diskrétních signálů kepra je relevantní pouze jeho první polovina z celkové délky signálu. [39][40][41]

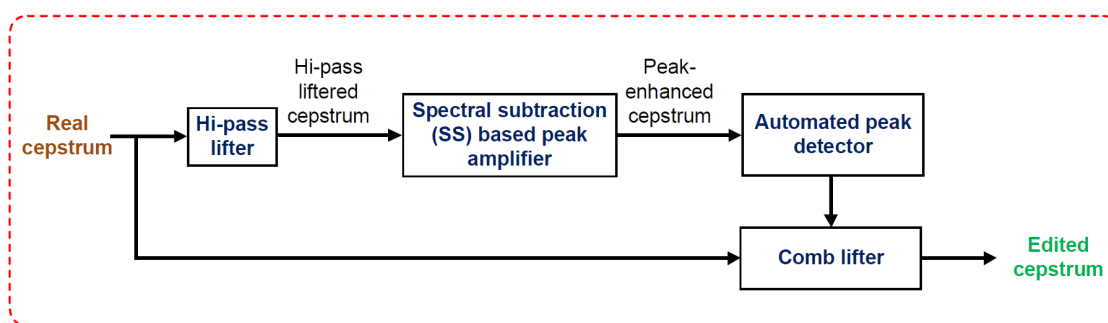
### 4.4.1 Lifter typu horní propust

Lifter typu horní propust je aplikován na reálné keprum proto, aby modální informace zůstala na nízkých hodnotách frekvence. Mezní frekvence  $\tau_c$  lifteru je určena na základě typických rezonančních frekvencí excitovaných rotujícími stroji. Může být nastavena jako:

$$\tau_c = \frac{j}{f_n} \quad (4.4)$$



Obr. 4.3: Diagram metody *CEP*. Červená čárkovaná čára označuje část automatické editace signálu [39]



Obr. 4.4: Diagram automatické editace metody *ACEP* [39]

kde  $j$  označuje celé číslo a  $f_n = 6 \text{ kHz}$ . Index mezní index quefrencie odpovídá  $N_c = \lfloor \tau_c / T_s \rfloor$ , tedy dolů zaokrouhlený poměr mezi mezní frekvencí lifteru a periodě vzorkování. Lifter  $l_H(n)$  je možné matematicky vyjádřit jako:

$$l_H(n) = \begin{cases} 0, & n = 0 : N_c \\ 1, & n = N_c + 1 : \lfloor N/2 \rfloor \end{cases} \quad (4.5)$$

Kepstrum upravené lifterem může být matematicky zapsáno následovně:

$$c_{HL}(n) = c(n) \times l_H(n) \quad (4.6)$$

#### 4.4.2 Spektrální subtrakce

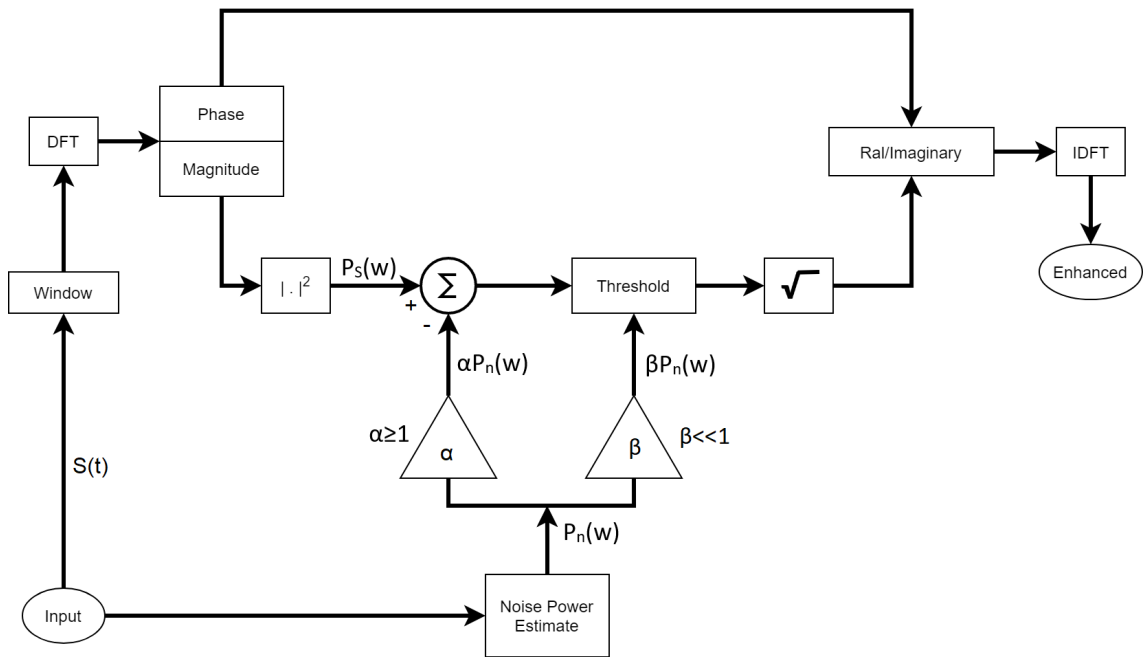
Spektrální subtrakce je technika odstranění šumu signálu, která se používá převážně ve zpracování signálu řeči, respektive mluveného slova. Přes její dobrou schopnost

filtrace a minimální požadavky na výpočetní výkon, metoda se v oblasti monitorování a diagnostiky stavu zařízení nevyužívá. Metoda *SS* funguje za následujících předpokladů: signál a hluk v pozadí nemají společné vazby, hluk pozadí je časově invariantní a spektrum signálu a hluku se liší:[42]

$$D(w) = P_S(w) - \alpha P_n(w) \quad (4.7)$$

$$P'_S(w) = \begin{cases} D(w), & D(w) > \beta P_n(w) \\ \beta P_n(w), & \text{jinak} \end{cases} \quad (4.8)$$

za předpokladu, že  $\alpha \geq 1$  a  $0 < \beta \ll 1$ . Princip spektrální subtrakce je možné vidět na obrázku 4.5.



Obr. 4.5: Diagram spektrální subtrakce [42]

### 4.4.3 Detekce špiček

Po aplikaci spektrální subtrakce je keprstrem umocněno na druhou, aby došlo ke zvýraznění špiček signálu. Je aplikovaná rozhodovací funkce která podle vypočteného prahu  $th$  lokalizuje špičky. Rozhodovací funkci  $d(n)$  a výpočet prahu je možné zapsat takto:

$$d(n) = \begin{cases} 1, & \tilde{c}^2(n) > th \\ 0, & \text{jinak} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$th = E[c_{HL}(n)] + std[c_{HL}(n)] \quad (4.10)$$

kde  $th$  je vypočtený práh,  $E[\cdot]$  označuje očekávanou (střední) hodnotu a  $std$  směrodatnou odchylku signálu. Polohu špiček v kepstru indikuje parametr  $p$  který je získán z rozhodovací funkce  $d(n)$ :

$$p = \{\forall n | d(n) = 1\} \quad (4.11)$$

#### 4.4.4 Hřebenový lifter

Nakonec je generován hřebenový lifter, který podle polohy špiček  $p$  je sestaven následovně:

$$l_c(n) = \begin{cases} 0, & n = p - 2 : p + 2 \\ 1, & jinak \end{cases} \quad (4.12)$$

Výsledné editované kepstrum  $\hat{c}(n)$  je vypočteno vynásobením původního reálného kepstra s hřebenovým lifterem  $l_c(n)$

$$\hat{c}(n) = c(n) \times l_c(n) \quad (4.13)$$

## 4.5 Filtrace signálu metodou cepstrum prewhitening

*Cepstrum prewhitening* je oproti metodě *ACEP* radikálnější s úpravou reálného kepstra. Zjednodušeně, liftrace metodou *ACEP* probíhá jen v místech nalezených špiček respektive nastavením malého počtu vzorků na nulu. *Cepstral prewhiteningem* je vynulováno celé reálné kepstrum mimo hodnoty na nulové quefrekvenci. Jak diskrétní, tak rezonanční frekvence jsou odstraněny z amplitudového spektra. Kepstrum je následně převedeno zpět do časové domény po rekombinaci s fází původní signálu. Výpočet metody lze zapsat takto:

$$x_{CPW}(t) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{F}(x(t))}{|\mathcal{F}(x(t))|} \right\} \quad (4.14)$$

Metoda "vyhladí" spektrum snížením rozdílů mezi přilehlými frekvencemi přidáním váhy všem frekvenčním pásmům s předpokladem, že dojde k zvýraznění rázů v signálu. [41]

## 5 Ovládání programu

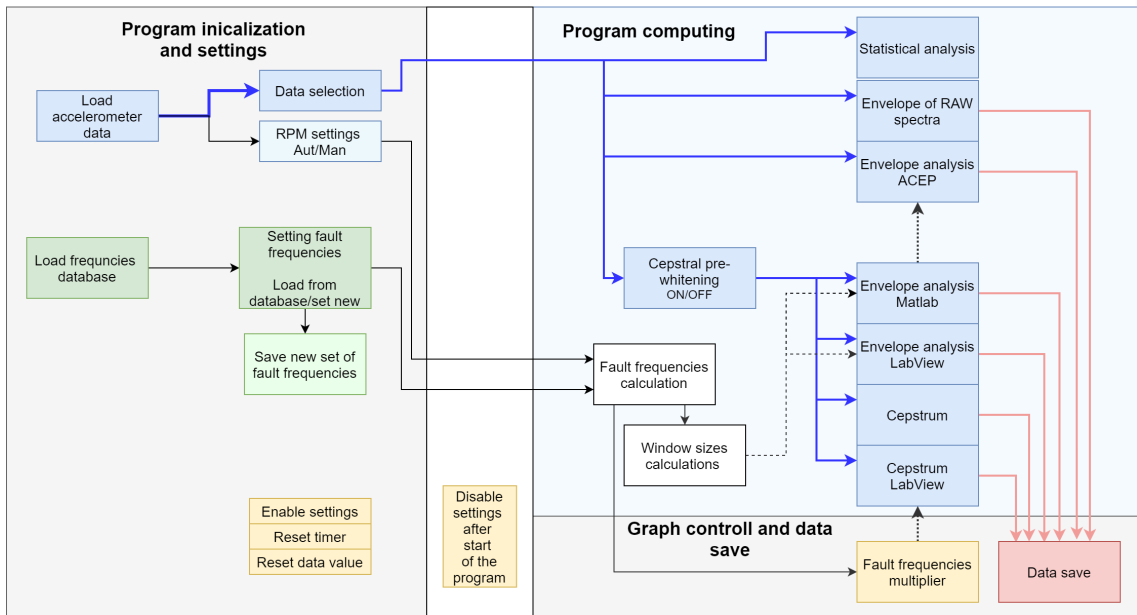
Metody popsané v kapitole 4 byly implementovány v programu LabVIEW. Na obrázku 5.1 je možné vidět schéma vytvořeného programu. Program je pro přehlednost rozdělen do čtyř bloků. V prvním bloku s názvem *Program initialization and settings*, dochází k načítání dat, nastavení a volbě metod, které mají být provedeny a inicializaci počátečních hodnot. Druhý blok, který je vykonán po zahájení výpočtu, obsahuje uzamknutí nastavených hodnot programu. Třetí blok obsahuje výpočet zvolených metod. Čtvrtý blok je označený v diagramu jako *Graph control and data save*. Data chybových frekvencí jsou promítnuta do grafů spektra, respektive cepstra, aby bylo možné diagnostikovat závady ložiska. Součástí bloku je funkce pro ukládání dat pro jejich další použití.

Program je ovládán uživatelským rozhraním, znázorněném na obrázku 5.2. Uživatelské rozhraní je rozděleno do pěti částí. První částí je karta záložek, kterou dochází k nastavení programu. V druhé části označenou *Measurement & bearing info* je doobrazena délka měření použitých dat a hodnoty chybových frekvencí v časové a frekvenční oblasti. Ve třetí části jsou zobrazeny vypočtené hodnoty metod statistické analýzy. Jsou rozděleny do dvou sloupců. V prvním, označeném *Computed*, jsou hodnoty vypočteny naprogramováním vzorce pro výpočet, v druhém použití LabVIEW funkcí pro výpočet. Čtvrtou částí uživatelského rozhraní je karta záložek, obsahující grafy s daty vypočtenými jednotlivými metodami. Poslední částí programu je lišta, na které je umístěn ovladač násobičky chybových frekvencí, ukazatel rychlosti měření jednotlivých metod, tlačítko pro uložení dat z grafu a *stop* tlačítko.

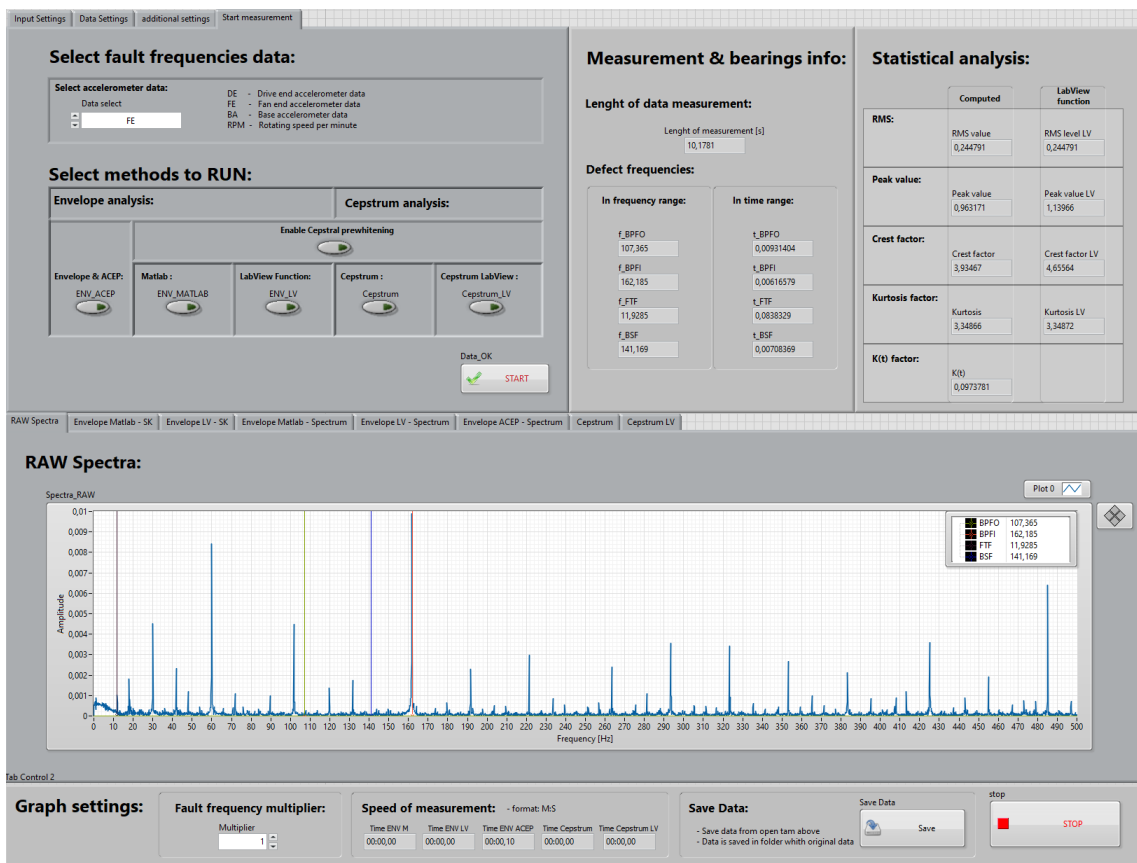
### 5.1 Nastavení měření

Nastavení měření probíhá ve čtyřech záložkách v levém horním rohu uživatelského rozhraní. Záložky je možné vidět na obrázcích 5.3-5.6. V první záložce *Input settings* uživatel zadá cesty k datům z akcelerometru a databázi chybových frekvencí. Následně v záložce *Data settings* dochází k nastavení parametrů měření, respektive rychlosti otáčení hřídele a vzorkovací frekvence a chybovým frekvencím diagnostikovaného ložiska. Zde si uživatel může vybrat z databáze chybových frekvencí nebo výběrem *New Values* zadat nové hodnoty, které je pak možné pojmenovat a přidat do databáze. Hodnotu *RPM* lze načíst automaticky ze souboru dat, za předpokladu, že je hodnota uložena v posledním sloupci dat v druhém řádku (v prvním řádku je název sloupce) nebo manuálně, přepnutím tlačítka. Třetí záložka obsahuje další možnosti nastavení některých metod, například u obáلكové analýzy lze vypnout uživatelské zadávání parametru filtrů, hodnoty efektivní a špičkové hodnoty

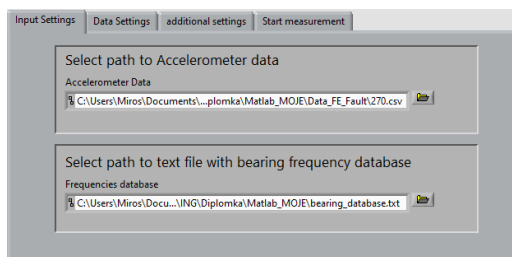




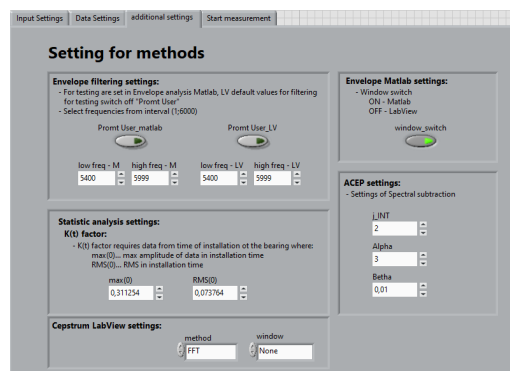
Obr. 5.1: Schématický diagram LabVIEW programu



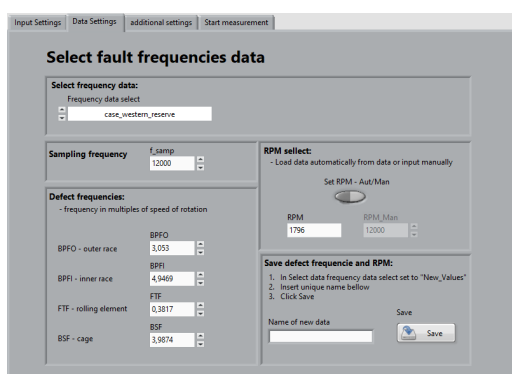
Obr. 5.2: Uživatelské rozhraní programu LabVIEW



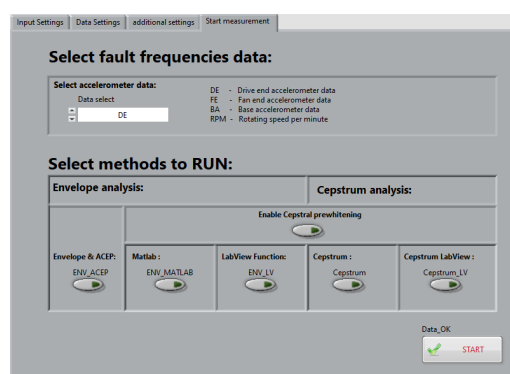
Obr. 5.3: Výběr cest k souborům - *Input Settings*



Obr. 5.4: Nastavení parametrů metod - *additional settings*



Obr. 5.5: Nastavení informací o ložisku



Obr. 5.6: Volba dat a metod, které mají být provedeny - *Start measurement*

v době montáže ložiska pro výpočet  $K_t$  parametru apod. V poslední záložce dochází k výběru dat a výběru metod, které mají být provedeny. Na data pro obálkovou a keprální analýzu může být aplikována metoda *Cepstral prewhitening*. Výpočet zvolených a nastavených metod se spustí stisknutím tlačítka *start*.

Pro zachování zpětné vazby mezi programem a uživatelem jsou nastavené hodnoty v záložkách umístěny v *while* cyklu, který je ukončen právě tlačítkem *start*.

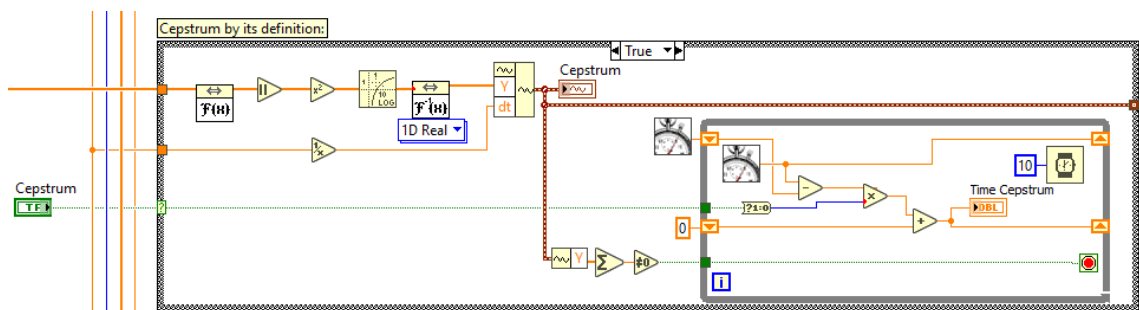
## 5.2 Výpočet programu

Opuštěním *while* cyklu program přechází do výpočetní části. Nastavené hodnoty v záložkách jsou uzamknuty, aby je nebylo možné měnit a bylo jednoznačné, jaké parametry byly pro měření použity. K jejich odemčení dochází při spuštění programu. Jsou vypočteny chybové frekvence, které jsou vztaheny k rychlosti otáčení ložiska, statistických metod a spektra neupravených (*RAW*) dat z akcelerometru. Vytvoření spektra z neupravených dat, stejně jako u obálkové analýzy uvedené v ka-

pitole 4.2.2, slouží k porovnání spekter jednotlivých analýz s originálem. Ostatní metody, jejichž výpočet můžeme zapnout, respektive vypnout, jsou umístěny v *case* cyklech, které jsou ovládány příslušnými spínači. Jednotlivé metody byly popsány v předchozí kapitole (4).

### 5.2.1 Měření výpočetní rychlosti

Měření výpočetní rychlosti metod jsem navrhl tak, že v části nastavování programu hodnoty časovačů a proměnné obsahující vypočtená data jsou vynulovány. Měření času je započato stisknutím tlačítka start, respektive předáním hodnoty *true*, která aktivuje danou metodu. Časovač je zastaven tehdy, kdy suma pole dat je různá od nuly, tedy po dokončení výpočtu. Příklad vyřešení časovače je možné vidět na obrázku 5.7. Výsledné hodnoty jsou zobrazovány v dolní části uživatelského rozhraní.



Obr. 5.7: Měření výpočetní rychlosti programu

### 5.2.2 Násobička chybových frekvencí a ukládání dat

Násobička chybových frekvencí slouží pro lepší identifikaci a orientaci v grafech spektra respektive cepstra. Vypočtené chybové frekvence jsou v grafech vyznačeny a ovladačem v dolní části uživatelského rozhraní mohou být zobrazeny jejich násobky, což pomáhá ke správnému určení závady na ložisku.

Data jednotlivých grafů mohou být uložena do *csv* souboru pro jejich další možné zpracování. Stisknutím tlačítka *Save* jsou uložena data z aktivní záložky s grafy. Soubor je uložen do složky s původními daty akcelerometru. Název se skládá z názvu původního souboru a vybraných dat, metod a časové značky. Tyto informace jsou rovněž v souboru jako první hodnota.

Ovládání grafu a možnost uložení souboru vyžaduje zpětnou vazbu programu. Z toho důvodu jsou tyto dvě části kódu umístěny ve *while* cyklu, který je ukončen tlačítkem *Stop*, umístěným v pravém dolním rohu uživatelského rozhraní, čímž je ukončen celý program.

## 6 Ověření funkčnosti metod

Funkčnost naprogramovaných diagnostických metod jsem realizoval na datových sadách z *Case Western Reserve University* [43], která poskytuje přístup k testovacím datům valivých ložisek. Dostupné soubory, které jsou ve formátu programu Matlab, obsahují hodnoty vibrací z několika měřících bodů na testovací soustavě. Vibrační data byla nasbírána při vzorkovacích frekvencích 12 kHz a 48 kHz se zátěží motoru v rozmezí 0 až 3 koňských sil. Měřící body soustavy se nacházejí na hnacím motoru (*DE - drive end accelerometer data*), poháněném ventilátoru (*FE - fan end accelerometer data*) a na základně testovací soustavy (*BA - base accelerometer data*). Společně s vibračními daty je v souboru hodnota rychlosti otáčení hřídele, při které bylo měření provedeno. Pro použití jsem data v mém programu převedl z formátu programu Matlab (*.mat*) do textového souboru s oddělovači (*.csv*).

Testovaná ložiska byla od společnosti SKF a jednalo se o ložiska s hlubokou drážkou typu 6205-2RS JEM pro hnací motor, respektive 6203-2RS JEM pro ventilátor. Chybové frekvence ložisek jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Poloha ložiska	BPFO [Hz]	BPFI [Hz]	FTF [Hz]	BSF [Hz]
Hnacího motor (DE)	3,5848	5,4152	0,3983	4,7135
Ventilátor (FE)	3,0530	4,9469	0,3817	3,9874

Tab. 6.1: Hodnoty chybových frekvencí testovaných ložisek

### 6.1 Ložisko bez poruchy

Testování metod proběhlo na čtyřech dostupných datových sadách, ve kterých byly měřeny vibrace testovací soustavy s rozdílnou zátěží hnacího motoru v rozmezí 0 až 3 koňských sil.

#### 6.1.1 Statistické parametry

Statistické parametry, vypočtené z dostupných dat, jsou v tabulkách 6.2 a 6.3. Hodnoty z tabulek byly použity jako referenční hodnoty a pro výpočet parametru  $K_t$ . K získání dat jsem použil hodnoty ze sloupce *Computed* na ovládacím panelu, které počítají hodnoty na základě naprogramovaného vzorce a ne LabVIEW funkce.

Hodnoty parametrů crest faktoru se pohybují mezi hodnotami 4 a 5, ojediněle ji překračují na hodnotu 5,58. Z obrázku 3.1 je vidět, že při dobrém stavu ložiska se má crest faktor pohybovat v rozmezí 2 až 4. Jedná se však o přibližné hodnoty a proto vypočtené hodnoty z tabulek budou hodnotami referenčními.

Parametr kurtosis potvrzuje při všech měřeních, že ložisko je v pořádku. Hodnoty ložiska bez závad se mají pohybovat mezi hodnotami 3 a 4, viz kapitola 3.1.4. Naměřené hodnoty nepřekročily hodnotu 3.

Měření na hnacím motoru motoru (DE) - bez závady					
Zátěž motoru [hp]	RPM [ot/min]	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]
0	1797	0,07376	0,31125	4,21960	2,76424
1	1772	0,06635	0,31751	4,78527	2,93062
2	1750	0,06433	0,35924	5,58466	2,92515
3	1730	0,06588	0,28372	4,30632	2,95717

Tab. 6.2: Hodnoty statistických parametrů ložiska bez závady, měření na hnacím motoru (DE)

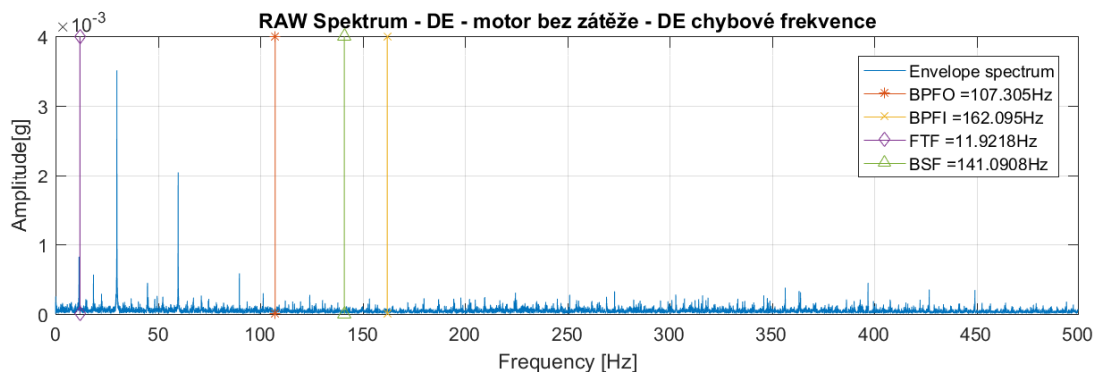
Měření na ventilátoru (FE) - bez závady					
Zátěž motoru [hp]	RPM [ot/min]	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]
0	1797	0,08467	0,35749	4,22201	2,76010
1	1772	0,07472	0,32195	4,30851	2,86828
2	1750	0,07250	0,31168	4,29878	2,86591
3	1730	0,08175	0,38482	4,70727	2,99192

Tab. 6.3: Hodnoty statistických parametrů ložiska bez závady, měření na ventilátoru (FE)

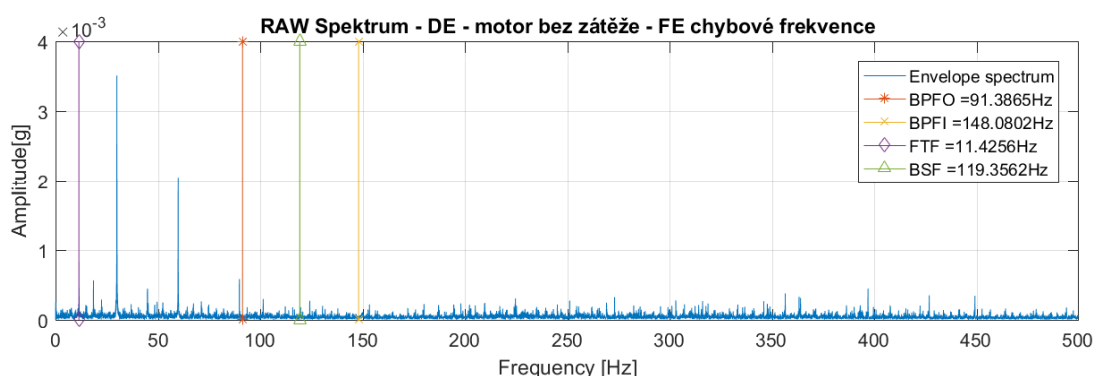
## 6.1.2 Spektrální a keprální metody

Testování všech metod proběhlo dle předpokladů. V žádné z testovaných dat nebyly zřetelné násobky chybových frekvencí ložisek, jak je patrné z grafů 6.1 a 6.2, ve kterých je spektrum vytvořeno z neupravených dat a vyznačenými chybovými frekvencemi.

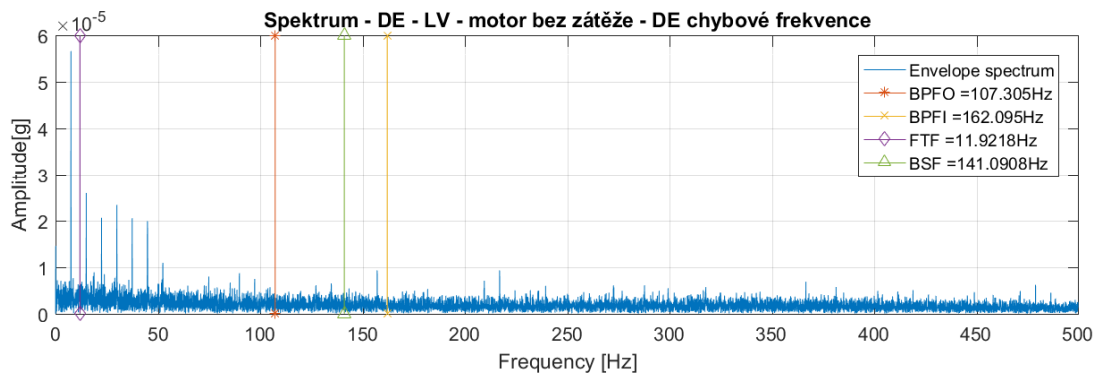
V grafu 6.3 je zobrazeno spektrum obálkové *LabVIEW* analýzy. Špičky amplitud jsou v porovnání se spektrem původních dat (*RAW*) přibližně o dva řády nižší a jejich hodnoty se neshodují s hodnotami chybových frekvencí.



Obr. 6.1: Spektrum neupravených dat při měření na DE a nulové zátěži s chybovými frekvencemi DE ložiska



Obr. 6.2: Spektrum neupravených dat při měření na DE a nulové zátěži s chybovými frekvencemi FE ložiska



Obr. 6.3: Spektrum metodou obálkové analýzy LabVIEW při měření na DE a nulové zátěži s chybovými frekvencemi DE ložiska

## 6.2 Ložisko s poruchou

Dostupných datových sad na stránkách *Case Western Reserve University* je mnoho[43]. Závady ložisek jsou rozděleny dle jejich velikostí 0,1778 mm; 0,3556 mm; 0,5334 mm

a 0,7112 mm s hloubkou 0,2794 mm a místa závady. Pro ověření funkčnosti navržených metod, jsem si zvolil data z ložiska hnacího motoru a ložiska ventilátoru. Pro ložisko hnacího motoru jsem provedl testování při nejmenší závadě (0,1778 mm) na kuličce, vnějším i vnitřním kroužku. Stejně testování jsem provedl na ložisku ventilátoru, kde jsem naopak zvolil největší možnou chybu pro toto ložisko (0,5334 mm). Datové sady ložiska hnacího motoru nabízejí velikost chyby až 0,7112 mm. Jedná se však o ložisko jiného výrobce, které není na stránkách dále specifikováno a neobsahuje měření se závadou na vnějším kroužku, proto jsem je vyřadil z dalšího testování.

### 6.2.1 Statistické parametry

Hodnoty statistických parametrů jsou v tabulkách 6.4 až 6.9. Jako referenční hodnoty parametrů jsem použil hodnoty při nulové zátěži z tabulek 6.2 a 6.3.

U téměř všech statistických parametrů je možné pozorovat hodnoty naznačující zhoršení stavu ložiska. Výjimku tvoří data ložiska hnacího motoru se závadou na kuličce, jak je vidět z tabulky 6.8, která neobsahuje téměř žádné změny oproti hodnotám referenčním. U ostatních výsledků lze konstatovat, že pro korektní vyhodnocení závady je nutné měřit co nejbližší závady, neboť hodnoty měřené v blízkosti ložiska se závadou jsou ji schopny vyhodnotit přesněji.

V tabulce 6.4 jsou například zobrazena data se závadou na vnitřním kroužku ložiska hnacího motoru o velikosti 0,1778 milimetru. Hodnota  $RMS$  se oproti referenční hodnotě  $0,07376 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  zvýšila téměř na čtyřnásobek, obdobně parametr špičkové hodnoty se z 0,31125 zvýšil o více než pětinašobek na 1,73903. Crest faktor se z referenční hodnoty 4,22 zvedl téměř na 6, což dle grafu 3.1 znamená počáteční poškození. V případě, že mezi měřením byl dlouhý časový interval a při dalším měření hodnota pokračovala v klesání, může tato hodnota znamenat vážné poškození. Parametr kurtosis se pohybuje v rozmezí mezi 5 a 8, což značí prvotní poškození ložiska. Rovněž parametr  $K_t$  svou hodnotou v rozsahu mezi 0,02 a 0,20 vyhodnocuje ložisko jako poškozené. Při srovnání prvního a druhého řádku tabulky je patrné, že vzdálenost snímače od závady hraje důležitou roli při detekci závady. Parametr crest faktoru je při měření závady ložiska hnacího motoru na ventilátoru dokonce menší než je jeho referenční hodnota. Obdobně je na tom parametr kurtosis, který se zvýšil jen o hodnotu 0,59. V tomto případě pouze parametr  $K_t$  označuje ložisko jako poškozené.

### 6.2.2 Spektrální a keprální metody

Testování funkčnosti metod proběhlo na stejných datových sadách na kterých byly vypočteny statistické parametry.

Ložisko hnacího motoru (DE) - závada na vnitřním kroužku					
Místo měření	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]	$K_t$ [-]
DE	<b>0,29048</b>	<b>1,73903</b>	<b>5,98667</b>	<b>5,43472</b>	<b>0,04545</b>
FE	0,24479	0,96317	3,93467	3,34866	0,12839

Tab. 6.4: Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnitřním kroužku, měření ložiska hnacího motoru (DE) - 0,1778 mm

Ložisko ventilátoru (FE) - závada na vnitřním kroužku					
Místo měření	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]	$K_t$ [-]
DE	0,20097	1,01679	5,05955	4,64626	0,11236
FE	0,32267	2,25753	6,99642	7,09281	0,04155

Tab. 6.5: Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnitřním kroužku, měření ložiska ventilátoru (FE) - 0,5334 mm

Ložisko hnacího motoru (DE) - závada na vnějším kroužku					
Místo měření	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]	$K_t$ [-]
DE	0,66951	3,63043	5,42255	7,64943	0,00945
FE	0,25669	1,10535	4,30615	3,57262	0,10669

Tab. 6.6: Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnějším kroužku, měření ložiska hnacího motoru (DE) - 0,1778 mm

Ložisko ventilátoru (FE) - závada na vnějším kroužku					
Místo měření	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]	$K_t$ [-]
DE	0,37644	1,99714	5,30532	5,86785	0,03053
FE	0,82459	5,79660	7,02967	8,78506	0,00633

Tab. 6.7: Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnějším kroužku, měření ložiska ventilátoru (FE) - 0,5334 mm

### Obálková analýza

Naprogramované metody obálkové analýzy, znázorněné v grafu 6.4, dokáží korektně identifikovat závadu na ložisku. V tomto konkrétním případě se jedná o závadu vnitřního kroužku ložiska hnacího motoru. Stejně jako u statistických parametrů jsem



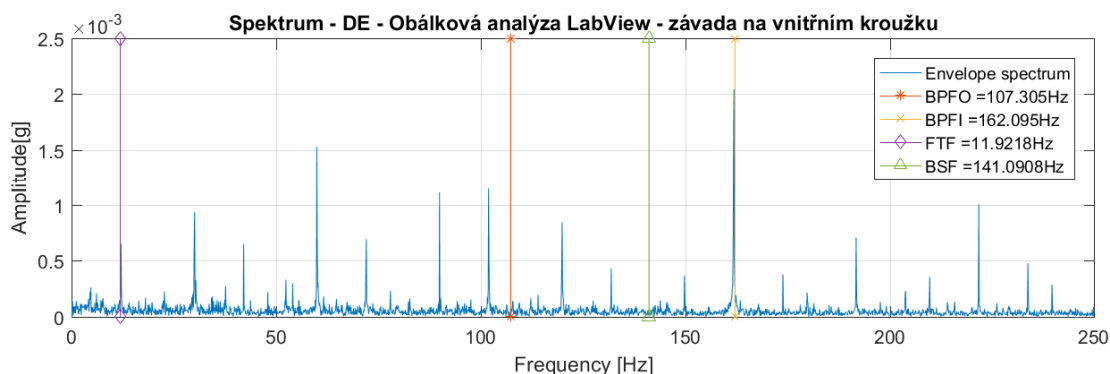
Ložisko hnacího motoru (DE) - závada kuličky					
Místo měření	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]	$K_t$ [-]
DE	0,13923	0,60393	4,33756	2,98472	0,27304
FE	0,11064	0,46536	4,20591	2,76572	0,44592

Tab. 6.8: Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na kuličce, měření ložiska hnacího motoru (DE) - 0,1778 mm

Ložisko ventilátoru (FE) - závada kuličky					
Místo měření	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]	$K_t$ [-]
DE	0,10030	0,77603	7,73749	3,47079	0,29498
FE	0,14900	2,47189	16,58970	21,11480	0,08219

Tab. 6.9: Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na kuličce, měření ložiska ventilátoru (FE) - 0,5334 mm

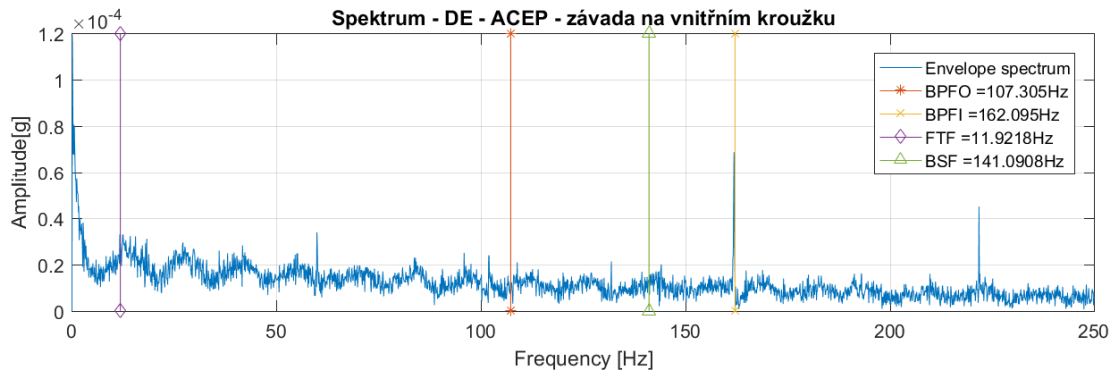
použil data získaná při nulové zátěži motoru. Z grafu spektrální kurtosis jsem vybral hodnoty pásmového filtru v rozsahu 5700 Hz až 5999 Hz. Ve spektru je jasně zřetelná špička v hodnotě chybové frekvence vnitřního kroužku  $BPFI = 162,095 \text{ Hz}$



Obr. 6.4: Obálková analýza ložiska hnacího motoru (DE) metodou LabVIEW, DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE

## Metoda ACEP

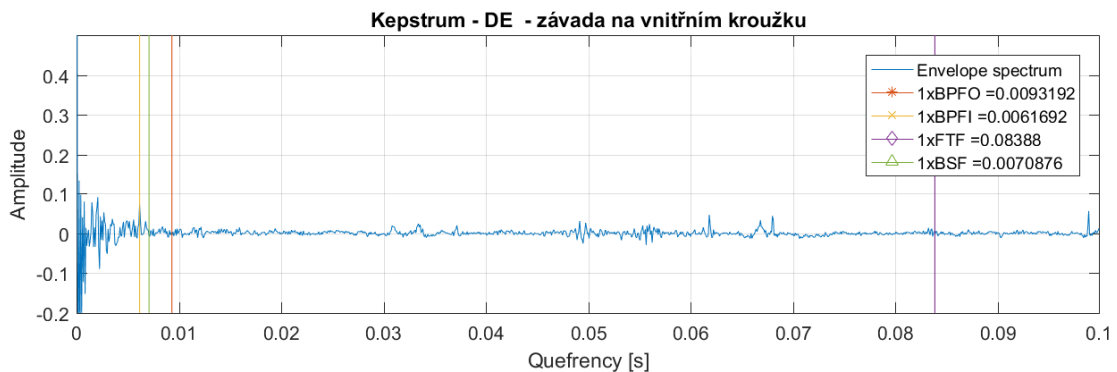
Metoda *ACEP* je na rozdíl od obálkové analýzy plně automatizovaná a tedy nevyžaduje žádný uživatelský vstup. Její výstup poskytuje informace pro přesnou identifikaci závady, jak je možné vidět na obrázku 6.5.



Obr. 6.5: Spektrum dat ložiska hnacího motoru (DE) metodou *ACEP*, DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE

### Kepstrální analýza

Identifikace závady na ložisku pomocí kepstrální analýzy je složitější než v předešlých případech, ale je možná. V grafu 6.6 je na první pohled zřejmá závada, jak tomu bylo u předešlých metod. Při bližším zkoumání si můžeme všimnout, že hodnota chybové frekvence *BPFI* se vyskytuje v quefrenční oblasti, včetně jejích násobků (5x, 6x, 8x, 9x, aj.).



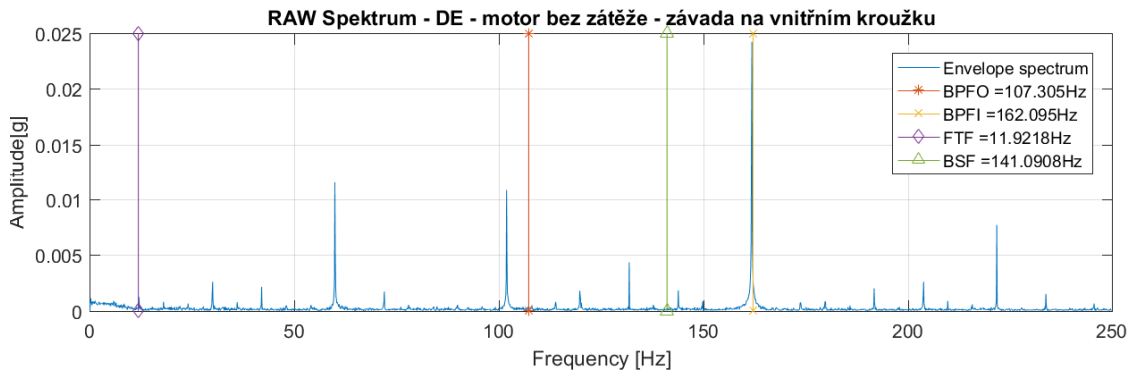
Obr. 6.6: Kepstrum dat ložiska hnacího motoru (DE) LabVIEW funkcí, DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE

### 6.2.3 Filtrace metodou Cepstrum prewhitening

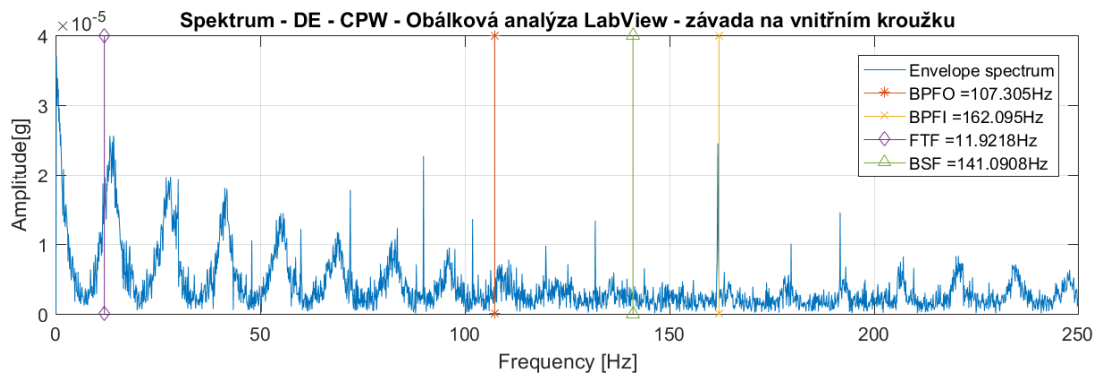
Filtraci vstupních dat metodou *cepstrum prewhitening* je možné použít pouze na metody obálkové a kepstrální analýzy, nikoli *ACEP* a statistické metody. U obálkové analýzy se ukázalo, že takto provedená filtrace dat nezlepší výsledky, ale naopak je zhorší. O tom se můžeme přesvědčit při porovnání grafů 6.7 a 6.8. V grafu 6.7

je obálka neupraveného spektra dat. Je z něj jasně identifikovatelná závada na vnitřním kroužku ložiska. Při aplikaci filtrace je chyba sice rozpoznatelná, ale filtrací dochází k snížení hodnot o několik řádů a zaniká v okolním šumu.

Kepstrální analýza, která principiálně slouží pro zvýraznění periodických dějů ve frekvenční oblasti, po aplikaci tohoto typu filtrace přestává fungovat. Přítomné periodické děje jsou filtrací odstraněny a v důsledku se v kepstru neobjeví žádné špičky indikující závadu na ložisku. Z tohoto důvodu jsem se dále se soustředil na metody bez aplikace *cepstrum prewhiteningu*.



Obr. 6.7: Spektrum neupravených dat ložiska hnacího motoru (DE), DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE



Obr. 6.8: Spektrum dat ložiska hnacího motoru (DE) metodou obálkové analýzy LabVIEW + *Cepstrum prewhitening*, DE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE

## 7 Srovnání implementovaných metod

Implementované výpočetní metody a parametry jsem srovnával na základě výsledků z veřejně dostupných dat z *Case Western University Bearing Data Center*. [43]

### 7.1 Vliv zátěže motoru

Dostupné datové sady byly pořízeny v rozsahu od nulové zátěže motoru po zátěž o velikosti odpovídající třem koňským silám. Pro otestování, zda na diagnostické metody má zatížení motoru vliv, jsem zvolil data obsahující závadu vnějšího kroužku na ložisku hnacího motoru. Výsledky měření byly shodné, jak je uvedeno v tabulkách 7.1 a 7.2 s výsledky statistických parametrů. Hodnoty statistických parametrů se zásadně nemění, stejně jako dosažené výsledky ostatních diagnostických metod. Na základě získaných dat lze konstatovat, že zátěž motoru za normálních podmínek neovlivní výsledky měření.

Měření na hnacím motoru motoru (DE) - závada na vnějším kroužku ložiska DE					
Zátěž motoru [hp]	RPM [ot/min]	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]
0	0,66951	3,63043	5,42255	7,64943	0,00945
1	0,59195	3,11226	5,25766	7,59499	0,01463
2	0,56799	3,10129	5,46017	7,91275	0,01303
3	0,58040	3,23611	5,57571	7,96375	0,01222

Tab. 7.1: Hodnoty statistických parametrů ložiska s vadou na vnějším kroužku, měření na hnacím motoru (DE)

Měření na hnacím motoru motoru (DE) - závada na vnějším kroužku ložiska DE					
Zátěž motoru [hp]	RPM [ot/min]	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]
0	0,25669	1,10535	4,30615	3,57262	0,10669
1	0,25842	1,06672	4,12778	3,44679	0,10986
2	0,22659	1,04987	4,63342	3,72020	0,09651
3	0,25736	1,22615	4,76438	3,67185	0,09594

Tab. 7.2: Hodnoty statistických parametrů ložiska s vadou na vnějším kroužku, měření na ventilátoru (FE)

## 7.2 Rychlost výpočtu

Rychlost výpočtu je úzce svázána s dostupným výpočetním výkonem. V tabulce 7.3 jsou vidět dosažené výpočetní časy. Pro porovnání jsem zvolil data s různě dlouhou hodnotou záznamu. Počty vzorků přibližně odpovídají času záznamu dat délky 10, 20 a 40 sekund při vzorkovací frekvenci 12 kHz.

Obálková analýza vytvořená podle kódu z programu Matlab se ukázala být velmi pomalá. Příčinou délky výpočtů je, že program LabVIEW nezvládá některé výpočetní operace, jako například násobení matic rozdílných velikostí. Proto musí být tyto operace prováděny v cyklech, které výrazně zpomalují výpočet. Úpravou obálkové analýzy a použitím výpočetních funkcí programu LabVIEW jsem dosáhl mnohem lepších výsledků. Rychlost výpočtu se pohybuje přibližně od 5 sekund a roste úměrně s počtem vzorků. Metoda *ACEP* dosahuje velmi rychlého výpočtu nepřesahující dvě sekundy při téměř půl milionů vzorků. Ještě lépe jsou na tom metody keprstrální analýzy, které jsou nejrychlejší.

Přesné určení rychlosti výpočtu statistických parametrů jsem do své práce nezahrnul. Vypočtení statistických parametrů se současně dostupným výpočetním výkonem počítačů, mikrokontrolérů a jiných zařízení je časově zanedbatelné.

Rychlost výpočtu jednotlivých metod					
Počet vzorků	Obálková analýza		ACEP	Kepstrální analýza	
	Matlab	LabVIEW		Výpočet	LabVIEW
122137	01:43,36	00:04,85	00:00,15	00:00,02	00:00,05
243938	14:31,00	00:08,71	00:00,39	00:00,04	00:00,10
483903	27:57,91	00:18,05	00:01,86	00:00,53	00:01,03

Tab. 7.3: Rychlost výpočtu jednotlivých metod [mm:ss,ms]

## 7.3 Vliv šumu na výpočet

Kvalita dat může zásadně ovlivnit kvalitu diagnostického procesu. Pro porovnání, jak si jednotlivé metody poradí s zašuměnými daty z akcelerometru, byly data uměle vytvořeny. Pro testování jsem použil data ventilátoru s vadou na vnitřním kroužku. K nim byl přidán šum programem LabVIEW, konkrétně funkcí *Gaussian White Noise VI* s amplitudami ve škále 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 a 1,0. Výsledky byly stejně jako původní soubor exportovány na devět desetinných míst.

Vliv šumu na statistické parametry je vidět v tabulkách 7.4 a 7.5. Hodnoty  $RMS$  a špičkové hodnoty logicky rostou se zvyšujícím zašuměním dat. Výsledkem je, že parametr  $K_t$  se zvyšujícím se šumem klesá a tím upozorňuje na závadu na ložisku. Z tabulky 7.4 je zřetelné, že parametr  $K_t$  zůstává stejný do přidaného šumu s amplitudou 0,10. Parametr kurtosis zůstává přibližně stejný pouze do hodnoty přidaného šumu s amplitudou 0,05. Vyhodnocení parametru crest faktoru je obtížnější. Z tabulky 7.5 je možné konstatovat, že pro naše testování crest faktoru je maximální možná amplituda šumu rovna 0,10.

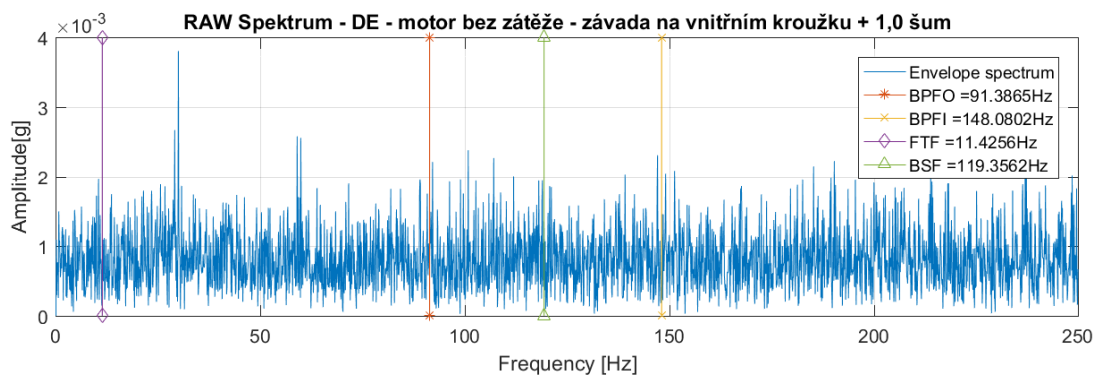
Vliv šumu na statistické metody - závada ložiska ventilátoru - Měření na FE					
Zašumění signálu	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]	$K_t$ [-]
0,00	0,32267	2,25753	6,99642	7,09281	0,04155
+0,01	0,32284	2,27446	7,04521	7,08728	0,04122
+0,02	0,32333	2,27088	7,02348	7,05973	0,04123
+0,05	0,32649	2,28252	6,99105	6,93856	0,04062
+0,10	0,33770	2,10522	6,23395	6,36501	0,04258
+0,20	0,37917	2,45051	6,46288	5,18490	0,03258
+0,50	0,59595	3,22577	5,41279	3,37094	0,01575
+1,00	1,04784	4,55417	4,34638	3,05204	0,00634

Tab. 7.4: Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnitřním kroužku s různou úrovní zašumění signálu, měření ložiska ventilátoru (FE)

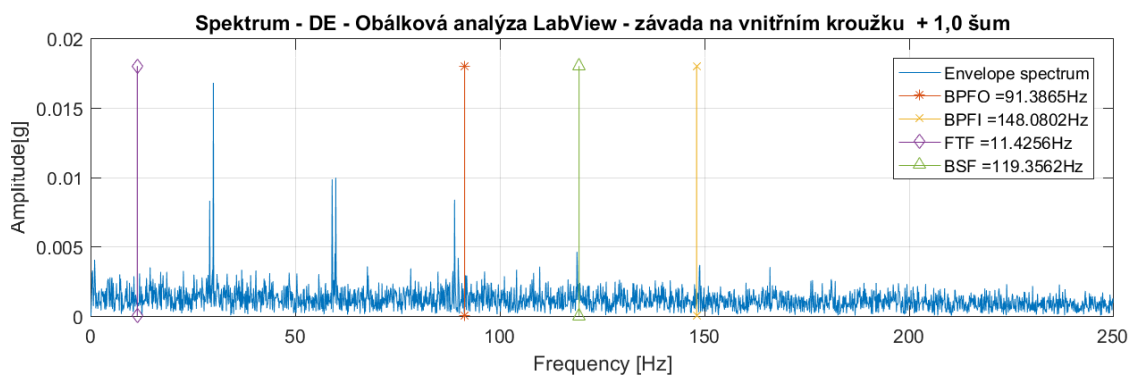
Vliv šumu na statistické metody - závada ložiska ventilátoru - Měření na DE					
Zašumění signálu	RMS [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Špičková hodnota [-]	Crest faktor [-]	Kurtosis [-]	$K_t$ [-]
0,00	0,20097	1,01679	5,05955	4,64626	0,11236
+0,01	0,20119	1,01763	5,05810	4,63640	0,11214
+0,02	0,20206	1,01650	5,03067	4,62589	0,11178
+0,05	0,20695	1,04092	5,02978	4,45673	0,10658
+0,10	0,22477	1,17791	5,24061	4,02321	0,08672
+0,20	0,28337	1,32347	4,67039	3,41217	0,06122
+0,50	0,54137	2,24727	4,56755	2,99821	0,01715
+1,00	1,01728	4,37533	4,30103	3,01530	0,00516

Tab. 7.5: Hodnoty statistických parametrů ložiska se závadou na vnitřním kroužku s různou úrovní zašumění signálu, měření ložiska hnacího motoru (DE)

Na rozdíl od statistických metod, umístění snímače, respektive vzdálenost od závadného ložiska, při testování nehrálo zásadní roli v jejich funkci. Jako nejodolnější metodou vůči šumu se ukázaly být metody obávkové analýzy. V grafu 7.1 můžeme vidět, že závada vnitřního kroužku ložiska ventilátoru je v neupraveném spektru, při měření na hnacím motoru a přidání šumu s amplitudou 1,0, neidentifikovatelná. Metodou obávkové analýzy v programu LabVIEW byl získán graf 7.2. Jako mezní frekvence pásmového filtru jsem použil hodnoty  $3200\text{Hz}$  a  $3600\text{Hz}$ . Graf není jednoznačný, ale vyskytující se špičky v okolí chybových frekvencí  $BPFI$  a  $BSF$  ložiska ventilátoru naznačují přítomnost závady. V reálné aplikaci by přítomnost i takto malých špiček mohla vézt k dalšímu testování a včasné identifikaci závady.



Obr. 7.1: Spektrum neupravených, zašuměných dat ložiska hnacího motoru (DE), DE data + 1,0 šum, závada na vnitřním kroužku ložiska FE



Obr. 7.2: Obávková analýza ložiska hnacího motoru (DE), DE data + 1,0 šum, závada na vnitřním kroužku ložiska FE

Přestože obávková analýza se při správném nastavení pásmového filtru ukázala jako nejodolnější vůči šumu, při testování dat jsem pozoroval, že při hodnotách šumu s amplitudou v rozmezí 0,1 a 0,5 se spektra neupravených dat a spekter obávkové analýzy hodně podobají. To mě vede k závěru, že metoda při mém testování

je použitelná do přidaných amplitud šumu s hodnotou 0,1 při měření přímo na vadném ložisku. Při měření v jiné části přístroje, v našem případě na druhém ložisku, bych nepřekračoval 0,05.

Metoda *ACEP* se díky své filtraci ukázala být spolehlivá do amplitud šumu o velikosti 0,2, ale jen při měření na ložisku se závadou. Měření mimo něj se ukázalo být spolehlivé pouze do přidané amplitudy o velikosti 0,05.

Přidaný šum má nejhorší vliv na metody keprální analýzy, kde identifikace závady v quefrenční oblasti není snadná v ideálních podmínkách. Při zvyšujícím se šumu nad amplitudu 0,02 začínají zanikat některé násobky chybových quefrencí a metoda se stává nespolehlivou.



## 8 Vyhodnocení implementovaných metod

### 8.1 Vyhodnocení statistických metod

Výsledky statistických metod ukázaly, že pro jejich korektní fungování je nezbytné použití dat naměřených co nejlíže defektní součástky. Metody jsou při průběžném měření schopny včas upozornit vznikající závady, které by mohly potenciálně vézt k poškození stroje.

Jako hlavní přednost těchto metod bych uvedl schopnost detekce závad při minimálním výpočetním výkonu. Metody jsou zároveň relativně dobře odolné vůči šumu jak bylo popsáno v kapitole 7.3.

Nevýhodou těchto metod je, že pro správnou interpretaci výsledků, v případě parametru  $K_t$  přímo pro výpočet, je důležité znát referenční hodnoty pořízené nejlépe ihned po instalaci ložiska. Další nevýhodou je fakt, že nedokáží lokalizovat zdroj závady.

Ze statistických parametrů bych jako nejlepší indikátor závady považoval parametr  $K_t$ . Při prováděných měřeních si dle mého názoru vedl nejlépe a upozorňoval na přítomnost závady i v případech, kdy ostatní parametry ne. Příklad můžeme vidět v druhém řádku tabulky 6.4.

### 8.2 Vyhodnocení metod obávkové analýzy

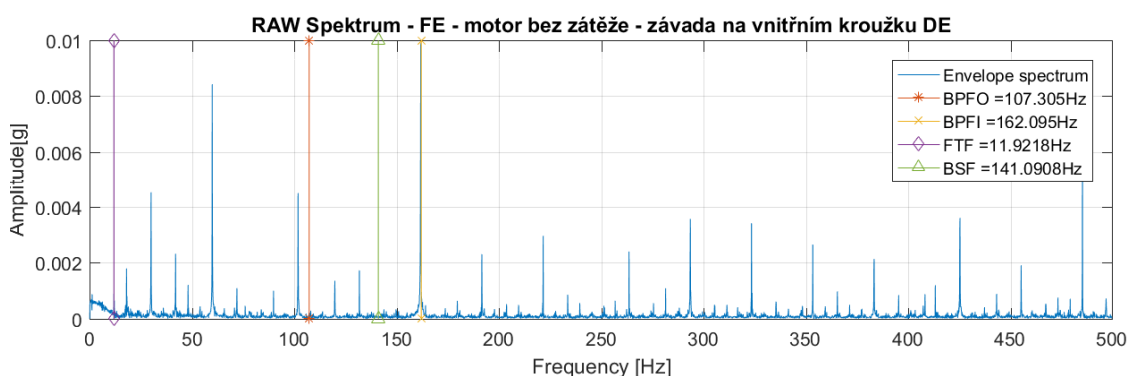
Výsledky zpracovaných dat obávkovými analýzami potvrdily, že se jedná o spolehlivou metodu určení stavu ložiska. Obě zpracované metody si v určování závad ložisek vedly identicky. Obávková analýza přepracovaná z programu Matlab je ale velmi pomalá a pro praktické používání zcela nepoužitelná, viz kapitola 7.2. Obávková analýza v programu LabVIEW je ve srovnání s ostatními metodami pomalejší a tedy i náročnější. Výsledky z tabulky 7.3 však dokazují, že metoda je použitelná při zachování střídmeho počtu vzorků vstupních dat.

Obávková analýza v porovnání s ostatními metodami nejlépe zvládla zašumění vstupního signálu. Mezi její hlavní nedostatky bych mimo délky výpočtu zahrnul to, že metoda není plně automatizovaná. Nutnost manuálního zadávání mezních hodnot pásmového filtru zpomaluje diagnostický proces. Zároveň je diagnostický proces ovlivněn schopnostmi a zkušenostmi technika provádějícího analýzu.

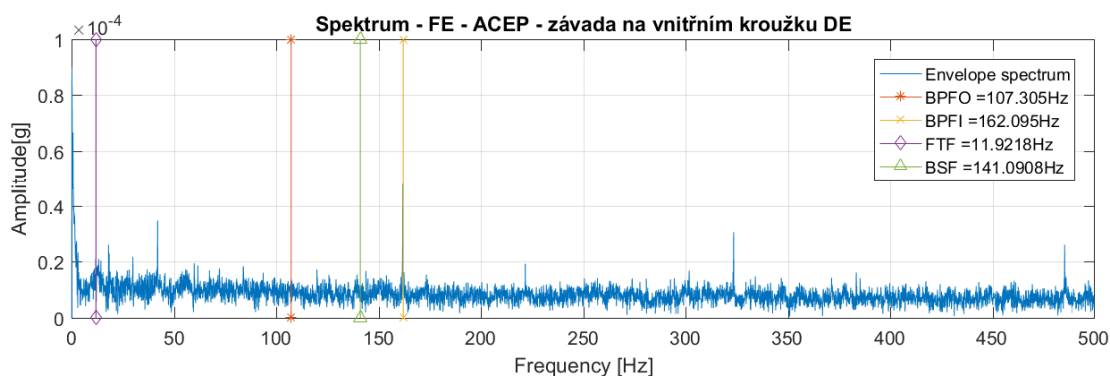
## 8.3 Vyhodnocení metody ACEP

Metoda *ACEP* si při testování, dle mého názoru, vedla nejlépe ze všech porovnávaných metod. Její dobré filtrační vlastnosti dokáží separovat opakující se chybové frekvence ložisek. Tyto vlastnosti je možné vidět při porovnání grafu neupraveného spektra signálu 8.1 a výsledného spektra metody *ACEP* v grafu 8.2. Ve výsledném grafu jsou rovněž vidět opakující se násobky chybové frekvence *BPFI* korektně určující závadu vnitřního kroužku.

Výpočet metody je velmi rychlý (viz tabulka 7.3) a metoda je obstojně odolná vůči zašumění signálu. Při vyšších hodnotách amplitudy přidaného šumu se ukázalo, že záleží na vzdálenosti bodu měření od závady, respektive zdroje vibrací (viz kapitola 7.3).



Obr. 8.1: Spektrum neupravených dat ložiska hnacího motoru (DE), FE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE



Obr. 8.2: Spektrum dat ložiska hnacího motoru (DE) metodou *ACEP*, FE data, závada na vnitřním kroužku ložiska DE

## 8.4 Vyhodnocení metod Kepstrální analýzy

Metody kepstrální analýzy si z hlediska zpracování dat vedly stejně. Rychlosti výpočtu byly nejrychlejší z porovnávaných metod. Překvapivě úplně nejrychlejší byla metoda kepstrální analýzy zpracovaná dle jejího vzorce (3.7) a ne LabVIEW analýzou (viz tabulka 7.3). Tato metoda se ukázala jako nejméně odolná vůči přidanému šumu, kdy pro korektní určení závady mohla být přidaná maximální hodnota šumu s amplitudou 0,02, což je horší než u statistických parametrů.

Identifikace závady na ložisku metodou kepstrální analýzy se ukázala být jako nejsložitější. Myslím si, že tato metoda v porovnání s ostatními metodami vyžaduje nejvíce zkušeností a důkladnější zkoumání výsledků kepra.

# Závěr

Cílem diplomové práce bylo implementovat a vzájemně porovnat vybrané metody diagnostiky valivých ložisek. Práce popisuje aktuálně používané diagnostické metody, které slouží k včasné identifikaci vznikajících poruch ložisek, která může výrazně prodloužit jejich životnost. Vybrané metody byly zpracovány, aby se zjistilo jak je náročná jejich implementace, jaké jsou kladeny požadavky na používaná data a jejich výpočetní výkon.

Na začátku diplomové práce jsem vypracoval rešerši týkající se diagnostiky poruch valivých ložisek a metod pro jejich identifikaci. Identifikace proběhla na základě signálů ze snímačů vibrací, viz kapitola 3.

Z rešerše jsem vybral diagnostické metody a parametry, které jsem detailně popsal v kapitole 4. Jednalo se o statistické parametry kurtosis, parametr  $K_t$  a crest faktor. Dalšími vybranými metodami byla obálková analýza, kepstrální analýza a metoda *ACEP*. Pro data obálkové a kepstrální analýzy jsem naprogramoval volitelnou filtraci pomocí metody *cepstral prewhitening*. Vybrané metody jsem implementoval v programu LabVIEW a výsledný program byl popsán v kapitole 5.

Na veřejně dostupných vibračních datech z Case Western Reserve University [43] jsem ověřil funkčnost jednotlivých metod. Testovací soustava pro získání dat se skládá z ložisek hnacího motoru (*DE*) a ventilátoru (*FE*). Data obsahují vždy závadu pouze jednoho ložiska, ale obsahují vibrační data obou ložisek.

Výsledky potvrdily, že naprogramované metody jsou funkční a dokáží identifikovat závady na valivém ložisku. Při testování se ukázalo, že filtrování vstupních dat metodou *cepstral prewhitening* zhoršuje funkčnost metod (viz 6.2.3) a z tohoto důvodu jsem ji dále nepoužíval.

Statické parametry se z výsledků měření ukázaly jako užitečné detektory závad. Jsou nenáročné na výpočetní výkon a jejich interpretace je snadná. Nevýhodou je, že k jejich správnému vyhodnocení je důležité znát referenční hodnoty a nejsou schopny lokalizovat závadu. Při měření jsem rovněž zjistil, že pro správné vyhodnocení dat je důležité měřit přímo na defektním ložisku (viz 6.2.1). Z výsledků testování se jako nejspolehlivější statistický parametr prokázal parametr  $K_t$ .

Metoda obálkové analýzy je v programu zpracována ve dvou verzích. Nejprve jsem vytvořil verzi označenou jako „Matlab“, která byla vypracovaná podle článku [37]. Takto vytvořená metoda se však v programu LabVIEW ukázala jako velmi pomalá, proto byla přepracována s použitím LabVIEW funkcí. Obě metody generovaly shodné výsledky se značným rozdílem v čase výpočtu a v nárocích na výpočetní výkon (viz 7.2). Obálková analýza se ukázala jako nejodolnější metoda vůči zašuměnému signálu (viz 7.3). Velkou nevýhodou této analýzy je, že není plně automatizovaná. Pro její správnou funkci je nutný vstup technika, který zadá mezní frekvence

pásmového filtru na základě vypočtených hodnot v grafu *spektrální kurtosis*.

Metoda *Automatic cepstral editing procedure - ACEP* se z výsledků testování ukázala být nejlepší. Její dobré filtrační vlastnosti jsou schopny odstranit mnoho z jinak přítomných špiček spektra a tím usnadnit identifikaci závady. Metoda *ACEP* není odolná vůči zašumění signálu jako obálková analýza (viz 7.3), ale je mnohem rychlejší (viz 7.2).

Kepstrální analýzu jsem, stejně jako obálkovou, vytvořil ve dvou verzích. V první verzi jsem použil k naprogramování vzorec kepstrální analýzy, ve druhé jsem použil funkci programu LabVIEW. Výsledky zpracovaných dat obou verzí byly totožné s malým rozdílem v rychlosti výpočtu (viz. 7.2). Překvapivě LabVIEW funkce se ukázala být pomalejší. Identifikace závad na ložisku z grafů kepstra je složitější než spekter ostatních metod a vyžaduje podrobnější zkoumání. Metody kepstrální analýzy bych označil jako nejméně použitelné z testovaných metod. Přestože se jedná o nejrychlejší metody (viz 7.2), převažují jejich nevýhody, kterými je špatná odolnost proti šumu (viz 7.3) a špatná čitelnost kepstra.

# Literatura

- [1] KOKEŠ, Miroslav. *Diagnostika rotačních strojů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-12]. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Stanislav Klusáček.
- [2] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [3] VINŠ, Jindřich. *Kluzná ložiska. 2. přeprac. vyd.* Praha: SNTL, 1971.
- [4] FRÖHLICH, Jan a kolektiv pracovníků. *Valivá ložiska*. Třetí vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [5] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA*. Ostrava, 2012. Učební text. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [6] NĚMEČEK, Pavel a Elias TOMEH. *Vibrační diagnostika základních závad strojů*. Liberec, 2010. Učební text. Technická univerzita v Liberci.
- [7] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej: teorie a praktyka*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [8] ZUTH, Daniel a František VOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *Autonoma: časopis pro automatizační techniku*. 2010, 16(1), 5. ISSN 1210-9592.
- [9] *Valivá ložiska* [online firemní dokumentace]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.coroll.cz/clanky-loziska-nsk.html>
- [10] *Valivá ložiska* [online firemní dokumentace]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: [https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000\\_1-CS\\_tcm\\_54-121486.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf)
- [11] *Kluzná ložiska* [online firemní dokumentace]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: [https://www.dimensor.cz/editor/image/eshop\\_menu/dbf\\_file\\_3.pdf](https://www.dimensor.cz/editor/image/eshop_menu/dbf_file_3.pdf)
- [12] *Spectrum Analysis: The key features of analysis spectra* [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: [https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968024acef-CM5118-EN-Spectrum-Analysis\\_tcm\\_12-113997.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968024acef-CM5118-EN-Spectrum-Analysis_tcm_12-113997.pdf)

- [13] SGLUNDA, Radomír RNDr. *Diagnostika stavu valivých ložisek* [online]. , 5 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/141086-Diagnostika-stavu-valivych-lozisek.html>
- [14] *Bearing preload* [online firemní dokumentace]. s. 1-7 [cit. 2020-12-23]. Dostupné z: [https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968065f1f4-Bearing-preload\\_tcm\\_12-299896.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968065f1f4-Bearing-preload_tcm_12-299896.pdf)
- [15] *Pro konstruktéry. ZKL* [online]. [cit. 2020-12-22]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/1-predmluva>
- [16] Kurtosis. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-12-25]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kurtosis>
- [17] Magnetic bearing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-12-25]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_bearing](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_bearing)
- [18] Fluid bearing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-12-25]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fluid\\_bearing](https://en.wikipedia.org/wiki/Fluid_bearing)
- [19] Corrosion. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-12-25]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Corrosion>
- [20] Understanding Industrial Bearing Failure and the Causes of Bearing Corrosion. *Hartford Technologies Blog* [online]. 15-6-2017, , 2 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://resources.hartfordtechnologies.com/blog/industrial-bearing-failure-and-the-causes-of-bearing-corrosion>
- [21] KLUSÁČEK, PH.D., Ing. Stanislav. *MMTD Termovizní diagnostika: termografie , měření pomocí termokamer*. MMTD 2019/2020: 6. přednáška. FEKT, VUT Brno.
- [22] Jaký je rozdíl mezi různými druhy ložisek? *E-konstruktor* [online]. 19.10.2015 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-ruznymi-druhy-lozisek>
- [23] Kluzné ložisko.: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kluzn%C3%A9\\_lo%C5%BEisko](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kluzn%C3%A9_lo%C5%BEisko)

- [24] Vaculka, Miroslav, Nohal, Libor, Vosynek, Petr. (2018). *Case study of multiaxial criteria for rolling contact fatigue of bearing steels*. MATEC Web of Conferences. 165. 22017. 10.1051/mateconf/201816522017. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/325363456\\_Case\\_study\\_of\\_multiaxial\\_criteria\\_for\\_rolling\\_contact\\_fatigue\\_of\\_bearing\\_steels/stats](https://www.researchgate.net/publication/325363456_Case_study_of_multiaxial_criteria_for_rolling_contact_fatigue_of_bearing_steels/stats)
- [25] DOSEDĚL, Martin. A COMPARISON OF METHODS FOR THE BEARING STATE EVALUATION. In: *Proceedings of the 25th Conference STUDENT EEICT 2019*. Brno Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019, s. 591-595. ISBN 978-80-214-5735-5. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/186741/591\\_eeict2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/186741/591_eeict2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [26] Kvadratický průměr.: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kvadratick%C3%BD\\_pr%C5%AFm%C4%9Br](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kvadratick%C3%BD_pr%C5%AFm%C4%9Br)
- YAN, Ruqiang a Robert X. GAO. Multi-scale enveloping spectrogram for vibration analysis in bearing defect diagnosis. *Tribology International*. 2009, 42(2), 293-302. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.06.013>
- [27] YAN, Ruqiang a Robert X. GAO. *Multi-scale enveloping spectrogram for vibration analysis in bearing defect diagnosis* *Tribology International*. 2009, 42(2), 293-302. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.06.013>
- [28] HE, Y., M. HU, K. FENG a Z. JIANG. *Bearing Condition Evaluation Based on the Shock Pulse Method and Principal Resonance Analysis* *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021, 70, 1-12. ISSN 1557-9662. Dostupné z: doi:[10.1109/TIM.2021.3050679](https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3050679)
- [29] What is Shock Pulse Method? <https://reliabilityweb.com/> Miami, FL [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://reliabilityweb.com/articles/entry/what\\_is\\_shock\\_pulse\\_method](https://reliabilityweb.com/articles/entry/what_is_shock_pulse_method)
- [30] Vibration Sensors and Accessories <https://www.pruftechnik.com/com/> [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.pruftechnik.com/com/Products-and-Services/Condition-Monitoring-Systems/Online-Condition-Monitoring/Sensors-Accessories/Vibration-Sensors-and-Accessories/>



- [31] XU, Ming. *SPIKE ENERGY MEASUREMENT AND CASE HISTORIES* Rockwell Automation, Integrated Condition Monitoring, Westerville, Ohio, 2006, , 15. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/SPIKE-ENERGY-MEASUREMENT-AND-CASE-HISTORIES/544328416668297c04991c2deea7cfc10c52b7c1>
- [32] Vibration Diagnostic Guide. *SKF Reliability Systems* [online firemní dokumentace] , 31.[cit. 2021-5-12] Dostupné z: <http://edge.rit.edu/edge/P14453/public/Research/SKF%20VibrationGuide.pdf>
- [33] ROBINSON, J. a Ken PIETY. *PeakVue analysis, New methodology for bearing fault detection* [online]. 1996/11/01, 30. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/247126316\\_PeakVue\\_analysis\\_New\\_methodology\\_for\\_bearing\\_fault\\_detection](https://www.researchgate.net/publication/247126316_PeakVue_analysis_New_methodology_for_bearing_fault_detection)  
PeakVue Analysis for Antifriction Bearing Fault Detection [online]. In: . 2017 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-peakvue-analysis-for-antifriction-bearing-fault-detection-ams-en-39106.pdf>
- [34] *PeakVue Analysis for Antifriction Bearing Fault Detection* [online]. In: . 2017 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-peakvue-analysis-for-antifriction-bearing-fault-detection-ams-en-39106.pdf>
- [35] *The Evolution of PeakVue™ Processing – PeakVue Plus Analytics* [online]. In: . 2019 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-evolution-of-peakvue-processing-%E2%80%93-93-peakvue-plus-analytics-ams-en-5407996.pdf>
- [36] KIM, Seokgoo, Dawn AN a Joo-Ho CHOI. *Adash* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/>
- [37] *Diagnostics 101: A Tutorial for Fault Diagnostics of Rolling Element Bearing Using Envelope Analysis in MATLAB*: Applied Sciences. 2020/10/19, 10, 7302. Dostupné z: [doi:10.3390/app10207302](https://doi.org/10.3390/app10207302)
- [38] RANDALL, Robert B. a Nader SAWALHI. *Cepstral Removal of Periodic Spectral Components from Time Signals. Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations* Proceedings of the Third International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations CMMNO 2013. s. 313-324. ISBN 978-3-642-39348-8.

- [39] OMPUSUNGGU, Agusmian. *Automated cepstral editing procedure (ACEP) as a signal pre-processing in vibration-based bearing fault diagnostics* [online]. 2015/10/20. 12. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/283085134\\_Automated\\_cepstral\\_editing\\_procedure\\_ACEP\\_as\\_a\\_signal\\_pre-processing\\_in\\_vibration-based\\_bearing\\_fault\\_diagnostics](https://www.researchgate.net/publication/283085134_Automated_cepstral_editing_procedure_ACEP_as_a_signal_pre-processing_in_vibration-based_bearing_fault_diagnostics)
- [40] OMPUSUNGGU, Agusmian a Theodor BARTIC. *Automated cepstral editing procedure (ACEP) for removing discrete components from vibration signals* [online]. 2015/06/09. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/278025968\\_Automated\\_cepstral\\_editing\\_procedure\\_ACEP\\_for\\_removing\\_discrete\\_components\\_from\\_vibration\\_signals](https://www.researchgate.net/publication/278025968_Automated_cepstral_editing_procedure_ACEP_for_removing_discrete_components_from_vibration_signals)
- [41] PEETERS, Cédric, Patrick GUILLAUME a Jan HELSEN. *A comparison of cepstral editing methods as signal pre-processing techniques for vibration-based bearing fault detection*. [2017, 91, 354-381. ISSN 0888-3270. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327016305593>
- [42] M. Berouti, R. Schwartz and J. Makhoul. *Enhancement of speech corrupted by acoustic noise* ICASSP '79. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1979, pp. 208-211, doi: 10.1109/ICASSP.1979.1170788
- [43] *Case Western Reserve University Bearing Data Center* [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/home>

# Seznam příloh

A Obsah elektronické přílohy

75

# A Obsah elektronické přílohy

```
/.....kořenový adresář přiloženého archivu
├── LabVIEW-installer....Složka s instalačními soubory LabVIEW pro exe aplikaci
│   ├── Volume
│   │   ├── bin
│   │   │   └── ...
│   │   ├── license
│   │   │   └── ...
│   │   ├── supportfiles
│   │   │   └── ...
│   │   ├── Bearing-diagnostics-inst.exe.....Instalační aplikace
│   │   ├── Bearing-diagnostics-inst.ini
│   │   └── nidist.id
├── bearing_database.txt.....Databáze chybových frekvencí ložisek
├── Bearing_diagnostics.exe.....Diagnostická aplikace
├── DP_Kokes_Porovnaní_metod_pro_identifikaci_poruch_valivých_ložisek.pdf
└── LVASPT_TFA.dll.....LabVIEW knihovna
```