



**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ  
ČVUT V PRAZE**

Diplomová práce

## **Detekce poruch ložisek**

*Bc. Ondřej Lahoda*

Katedra radioelektroniky

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Sovka, CSc.

21. května 2021

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lahoda** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **434981**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Studijní obor: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Detekce poruch ložisek**

Název diplomové práce anglicky:

**Bearing Fault Detection**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou analýzy vibrací se zaměřením na detekci vad ložisek, typy závad a určení jejich frekvencí v závislosti na otáčkové frekvenci
2. Navrhněte vhodný algoritmus pro generování modelových signálů typických závad ložisek a vytvořte příslušnou databázi signálů
3. Prostudujte postupy a metody používané pro analýzu vibrací a detekci vad ložisek a vyberte vhodná kritéria pro posouzení účinnosti detekce závady
4. Vyberte referenční metodu pro ověření signálů databáze a její výsledky porovnejte alespoň s jednou konkurenční metodou

Seznam doporučené literatury:

1. Kičák, M.: Návrh databáze pro měření stavu ložisek zabíhacích válců. Diplomová práce, FEL ČVUT, Praha 2018
2. McInerney, S. A. Dai, Y.: Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection. IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 46, NO. 1, February 2003
3. Randall, R.B., Antoni, J.: Rolling element bearing diagnostics—A tutorial. Mechanical Systems and Signal Processing 25(2011), 485–520

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Ing. Pavel Sovka, CSc., katedra teorie obvodů FEL**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **16.09.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2022**

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Sovka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

---

## Poděkování

Na prvním místě chci poděkovat vedoucímu této práce panu prof. Ing. Pavlovi Sovkovi, CSc. za odborné rady, jeho vzácný čas, systematičnost a dodanou motivaci k soustavné práci. Poděkování patří také mé rodině a blízkým za nekonečnou podporu v průběhu studií a za zázemí, které mi poskytují.

---

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 21. května 2021

.....

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

© 2021 Ondřej Lahoda. Všechna práva vyhrazena.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.*

### **Odkaz na tuto práci**

Lahoda, Ondřej. *Detekce poruch ložisek*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2021.

# Abstrakt

---

Práce pojednává o detekci vad ložisek se zaměřením na valivá kuličková ložiska. Diagnostika je založena na frekvenční analýze signálů vibrací ložiska. Nejprve jsou představeny typické závady ložisek a popis jejich charakteristických poruchových frekvencí. Za účelem získání parametrů reálných signálů je provedena analýza vzorové databáze. Ze získaných parametrů a z rozměrů 4 vybraných ložisek jsou modelovány signály typických závad. Hlavním výstupem práce je vytvořená databáze generovaných signálů. Součástí databáze jsou výsledky její analýzy pomocí metody difference a druhé, referenční metody analýzy kurtogramem. Princip obou metod je v práci představen a výsledky analýzy vygenerované databáze slouží k ověření charakteru vygenerovaných signálů.

**Klíčová slova** Detekce vad, ložisko, spektrální špičatost, kurtogram.

---

# Abstract

The text is about bearing fault detection. Diagnosis is based on frequency analysis of vibration signals. At first, typical bearing faults are presented with description of their characteristic fault frequencies. Analysis of available measurements of fault signals is done for the purpose of obtaining real signal parameters. Models of typical bearing fault signals are constructed for 4 chosen bearing types. The main output of this thesis is generated database of typical fault signals for given types of bearings. Graphical output from analysis of generated database is included as its part. The principles of two general methods of analysis are presented and their results serve for assessment of the generated database.

**Keywords** Fault detection, bearing, spectral kurtosis, kurtogram

---

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Prediktivní údržba a diagnostika</b>	<b>3</b>
1.1 Vibrodiagnostika . . . . .	3
1.2 Druhy ložisek . . . . .	3
1.3 Charakteristické vady ložiska . . . . .	5
1.4 Princip diagnostiky . . . . .	6
1.5 Historie analýzy . . . . .	6
1.6 Statistické metody . . . . .	6
<b>2 Typické vady valivých ložisek</b>	<b>8</b>
2.1 Vada vnitřního kroužku . . . . .	9
2.2 Vada vnějšího kroužku . . . . .	9
2.3 Vada kuličky . . . . .	10
<b>3 Analýza reálných signálů</b>	<b>11</b>
3.1 Časová konstanta . . . . .	11
3.2 Amplitudová modulace . . . . .	13
3.3 Rušení signálu a nevyváha . . . . .	14
<b>4 Modelované signály</b>	<b>15</b>
4.1 Model tlumeného kmitání . . . . .	15
4.2 Hmotnost kuličky . . . . .	16
4.3 Průběh jednoho nárazu . . . . .	17
4.4 Prokluz . . . . .	19
4.5 Dvojitý náraz . . . . .	20
4.6 Šum a nevyváhy . . . . .	21
<b>5 Databáze</b>	<b>22</b>
5.1 Vývojový diagram . . . . .	22

5.2	Typ ložiska . . . . .	23
5.3	Parametry vady ložiska . . . . .	24
5.4	Relativní tlumení a rezonanční frekvence . . . . .	24
5.5	Výstupní signál . . . . .	25
<b>6</b>	<b>Metoda difference a frekvenční analýzy obálky</b>	<b>26</b>
6.1	Diference . . . . .	27
6.2	Špičatost . . . . .	27
6.3	Mediánová filtrace . . . . .	27
6.4	Implementace metody v prostředí Matlab® . . . . .	28
6.5	Frekvenční analýza . . . . .	30
<b>7</b>	<b>Kurtogram</b>	<b>31</b>
7.1	Spektrální špičatost . . . . .	32
7.2	Frekvenční rozlišení . . . . .	32
7.3	Funkce kurtogramu v prostředí Matlab® . . . . .	32
7.4	Filtrace . . . . .	34
7.5	Návrh filtru . . . . .	34
7.6	Hilbertova transformace a výpočet obálky . . . . .	36
<b>8</b>	<b>Analýza modelované databáze</b>	<b>38</b>
8.1	Hodnoty poruchových frekvencí . . . . .	39
8.2	Detekce závady . . . . .	39
8.3	Porovnání spektra s hodnotami poruchové frekvence . . . . .	41
8.4	Frekvenční charakteristika filtrace a difference . . . . .	43
8.5	Nevhodný návrh . . . . .	45
8.6	Analýza vzorových a specifických signálů . . . . .	46
	<b>Závěr</b>	<b>47</b>
	<b>Literatura</b>	<b>49</b>
	<b>A Seznam použitých zkratk</b>	<b>52</b>
	<b>B Obrázky</b>	<b>53</b>
	<b>C Obsah příloženého CD</b>	<b>59</b>



---

## Seznam obrázků

1.1	Časový průběh vibrací . . . . .	4
2.1	Ložisko . . . . .	9
3.1	Analýza časové konstanty . . . . .	12
3.2	Interpolace LS . . . . .	13
4.1	Poloha pólů . . . . .	16
4.2	Impulsní odezva modelované vady . . . . .	18
4.3	Model dvojitého nárazu a nevyváhy . . . . .	20
4.4	Signál + šum . . . . .	21
5.1	Generátor signálů . . . . .	22
5.2	Diagram vytvořené databáze . . . . .	25
6.1	Diagram analýzy - diference . . . . .	26
6.2	Závislost špičatosti na řádu diference . . . . .	28
6.3	Spektrum diferencovaného signálu . . . . .	30
7.1	Diagram kurtogramu . . . . .	31
7.2	Kurtogram . . . . .	33
7.3	Řád filtru Butterworth . . . . .	35
7.4	Obálka - Hilbertova transformace . . . . .	37
8.1	Obálkové spektrum - Hilbert . . . . .	40
8.2	Spektrum - odhad poruchy . . . . .	42
8.3	Porovnání filtrace a diference SNR 60 dB . . . . .	43
8.4	Porovnání filtrace a diference SNR 10 dB . . . . .	44
8.5	Nevhodný návrh filtru a diference . . . . .	45
B.1	Spektrum - diference Koyo 1205 . . . . .	54
B.2	Spektrum - kurtogram Koyo 1205 . . . . .	55

B.3	Spektrum - diference SKF 6024 . . . . .	56
B.4	Spektrum - kurtogram SKF 608 . . . . .	57
B.5	Spektrum - diference NICE . . . . .	58

---

# Seznam tabulek

4.1	Analyzované parametry . . . . .	17
5.1	Rozměry ložisek . . . . .	23
5.2	Rezonanční frekvence . . . . .	24
5.3	Označení signálů . . . . .	25
6.1	Kód - výpočet obálky difference . . . . .	29
7.1	Kód - kurtogram . . . . .	33
7.2	Kód - Butterworth . . . . .	35
7.3	Kód - obálka Hilbertovy transformace . . . . .	36
8.1	Poruchové frekvence jednotlivých typů ložisek . . . . .	39
8.2	Kód - findpeaks . . . . .	39

---

# Úvod

Tato práce představuje vytvoření a analýzu signálů typických vad ložisek za účelem detekce poruchy. Analyzované signály reprezentují vibrace stroje a detekce poruch ložisek tak spadá do oboru vibrodiagnostiky. Vibrodiagnostika a prediktivní údržba je v současnosti cenný nástroj při automatizované výrobě a údržbě strojů. Efektivní metody diagnostiky zajišťují snížení nákladů v souvislosti s opravami poruch nebo minimalizaci preventivní výměny součástí. Jedna z velmi namáhaných a často poruchových součástí strojů je ložisko. Práce se zaměřuje pouze na popis problematiky valivých ložisek. Hlavním cílem je vytvoření databáze signálů typických vad ložisek s dostatečným počtem různorodých signálů a možnosti nastavení jejich parametrů. Pro vytvoření databáze je nutná základní znalost principu a využití valivých ložisek v praxi. Z popisu údržby a diagnostiky stavu ložisek jsou stanoveny hlavní příčiny závad ložisek a příčiny vzniku prasklin jejich materiálu. Typický jev přítomnosti praskliny materiálu ložiska je generování vibrací impulzního charakteru, které vede ke zvýšení hluku stroje a následně k možné poruše. Možnost analýzy těchto impulzních signálů je motivací k vytvoření modelových signálů a jejich následného zpracování.

Prasklina valivého ložiska se může objevit na jednom z jeho třech hlavních komponentů: vnitřním kroužku, vnějším kroužku nebo kuličce. Z popisu otáčení ložiska a jeho částí lze odvodit základní frekvence se kterou se opakují pulzy závady na dané součástce ložiska. Tyto typické závady ložiska jsou uvedeny v kapitole 2. Detekce těchto frekvencí ve spektru měřeného signálu je základní myšlenka lokalizace a detekce vad představené v této práci.

Modelování signálů je založeno na vytvoření pulzů generovaných prasklinou v ložisku. Tyto pulzy mají svůj rezonanční kmitočet. Ve zjednodušeném lineárním modelu závisí rezonanční frekvence kmitání převážně na hmotnosti kuličky ložiska a materiálu. Model kmitání je také silně utlumen. Pro účely modelování lze uvažovat exponenciální obálku útlumu s danou časovou konstantou. Pro získání parametrů modelovaných signálů je provedena analýza

---

reálné databáze naměřených dat v kapitole 3. Výsledky této analýzy zajišťují opodstatnění volby parametrů signálů a jejich význam v reálné praxi.

Vytvořené pulzy závady jsou v modelu signálu periodicky opakovány s charakteristickou frekvencí závady, tento parametr definuje 3 určené typy závady. Modelování signálu je popsáno v kapitole 4. Průběh modelovaného signálu je upraven v několika krocích odpovídajícím jevům reálných signálů. Jedním z jevů je prokluz ložiska nebo jev dvojitého nárazu kuličky o prasklinu. K modelovaným signálům je přičten deterministický signál nevývahy a šum.

Pro generování databáze jsou vybrány 4 typy ložisek, které svým rozměrem a konstrukcí definují parametry poruchových signálů. Pro každý typ ložiska obsahuje databáze 3 typy závady ložiska a čistý signál bez závady, případně variace závady s dvojitým nárazem kuličky. Databáze signálů je popsána v kapitole 5.

Na databázi těchto signálů je provedena další analýza referenční metodou kurtogramu [1] s optimální filtrací (kapitola 7) a porovnána s další metodou detekce vad Nadera Sawalhiho [2] (kapitola 6) založené na postupné diferenci a frekvenční analýze obálky.

V poslední kapitole 8 jsou prezentovány výsledky analýzy vybraných metod na vytvořené databázi a zhodnocena účinnost metod dle zvolených kritérií.

# Prediktivní údržba a diagnostika

## 1.1 Vibrodiagnostika

Pro bezproblémový průběh automatizované výroby a funkčnosti mechanických strojů je zásadní diagnostika jejich stavu. Efektivní detekce poruchy je velmi cenným nástrojem a motivací pro vývoj technologie. Cílem detekce je také lokalizace místa poruchy, která umožní výměnu nejmenší možné součástky stroje a zajistí tak maximální úsporu provozu. Včasné zachycení prvotních jevů poruchy je základem predikce životnosti součástek. Predikce umožňuje vhodné plánování údržby měřeného stroje.

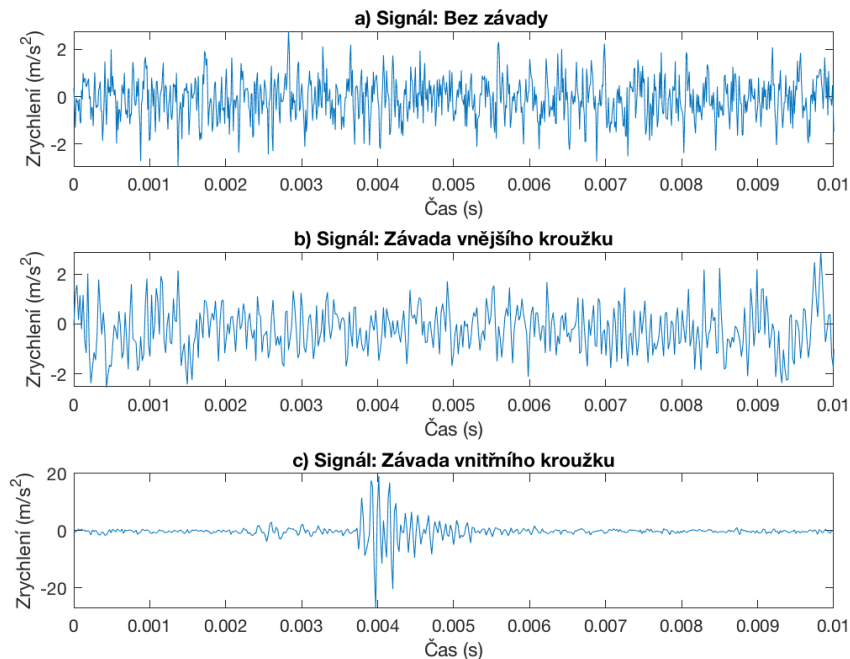
Základní příčinou poruchy mnoha mechanických strojů je dle [3] závada ložiska. Detekce takové závady je možná zpracováním signálu vibrací měřeného stroje a jeho frekvenční analýza. Vibrace jsou nejčastěji měřeny akcelerometrem a změřený signál reprezentuje vývoj zrychlení v čase. Data mohou být dále integrována, aby odpovídala rychlosti, případně okamžité výchylce vibrací. Na obrázku 1.1 jsou vykresleny časové průběhy 3 surových signálů z dále zpracované databáze reálných dat [4] naměřených pro kuličkové ložisko. Jako úvod do problematiky diagnostiky ložisek následuje stručný přehled jejich různých typů.

## 1.2 Druhy ložisek

Ložisko slouží k uložení otočných prvků stroje do jeho pevné části. Převádí axiální a radiální síly kruhového pohybu na zbylé části stroje s cílem co nejmenších ztrát. Konstrukce ložiska se dělí na několik skupin:

- **Kluzná ložiska**

Kluzná ložiska jsou konstrukčně základním typem. Síla je přenášena přes styčnou plochu kluzného elementu ložiska a okrajových kroužků. Snížení třecích sil je dosaženo mazáním. Podle typu mazání ložiska ka-



Obrázek 1.1: Časový průběh vibrací

palinou nebo plynem dále dělíme tato ložiska na **hydrodynamická** a **aerodynamická** [5].

- **Valivá ložiska**

Valivá ložiska obsahují rotující element nejčastěji ve formě kuličky nebo válečku. Jejich konstrukce snižuje plochu kontaktu a třecí síly rotačního pohybu. Třecí síly jsou dále sníženy vhodným mazivem ložiska. Výběr vhodného maziva ložiska je samostatná strojírenská disciplína. Mazivo musí splňovat provozní nároky, zejména provozní teplotu a rychlost otáčení. Musí také odolat pracovnímu tlaku. Základní typy maziva jsou **olej** a **tuhé plastické mazivo** [6].

- **Magnetická ložiska**

Tato ložiska fungují na principu magnetické levitace. Mají schopnost udržet rotující součástku stroje bez kontaktu s pevnou částí. Vykazují tedy velmi malé tření a téměř nulové mechanické opotřebení. Jejich složitý návrh a konstrukce dedikuje tato ložiska pouze pro specifické účely. Jejich konstrukce může být pasivní nebo aktivní (elektricky řízené magnetické pole).

Díky příznivému poměru nízkého tření a vhodné konstrukce jsou velmi často využívána valivá ložiska. Kuličková valivá ložiska mají na každém elementu pouze jeden styčný bod. Díky tomu vykazují menší třecí síly než valivá ložiska válcová. Vhodná jsou tedy k použití při vyšších rychlostech otáčení. Při větší zátěži se styčný bod deformuje v eliptický kontakt. Pro aplikace na strojích s vysokou zátěží jsou tedy vhodnější válcová (soudková) ložiska.

Valivá ložiska se dále dělí dle hlavního směru síly, kterou přenáší, na:

- **Axiální**  
Síla směřuje podél osy otáčení
- **Radiální**  
Síla směřuje kolmo na směr otáčení
- **Kombinace**  
Ložiska kombinující zátěž v obou směrech síly (kuželová, kuličková s kosoúhlým stykem).

### 1.3 Charakteristické vady ložiska

Vady ložiska jsou převážně materiálového charakteru. Ložiska mají výrobcem stanovenou trvanlivost ve smyslu počtu otáček, které vykoná jeden kroužek vůči druhému, dokud se neobjeví první příznaky únavy materiálu [7]. Trvanlivost lze také vyjádřit počtem pracovních hodin nebo počtem ujetých kilometrů v případě ložisek dopravních prostředků. Provozní interval ložiska může být při pečlivé údržbě překročen. Při nesprávné montáži, nedodržení provozních podmínek nebo špatném mazání (nedostatečném i přílišném) může dojít k poruše ložiska v kratším čase než je garantovaná životnost. Pro bezporuchový chod stroje je tedy monitoring a diagnostika jeho stavu zásadní. Typické závady, které valivá ložiska vykazují, jsou následující:

- Odloupávání povrchu (pitting) způsobené nehomogenitou v materiálu
- Prohlubeniny a otlaky
- Rýhy tvořené průchodem elektrického proudu
- Koroze
- Kavitace



## 1.4 Princip diagnostiky

Pokud dojde ke kontaktu styčných bodů (ploch) ložiska v místě poruchy, vada působí jako impulz, který vybudí vysokofrekvenční rezonanci v celém stroji. Tento impulz se opakuje periodicky s frekvencí otáčení vadného elementu ložiska (frekvence popsány v kapitole 2). Různé frekvence lze rozlišit pro vadu na vnitřním a vnějším kroužku ložiska a dále pro vadu na samotné kuličce. Základem diagnostiky lokalizace vady ložiska je vhodná filtrace signálu pro oddělení dané rezonanční frekvence. Filtrem lze potlačit ostatní vibrace stroje a analyzovat pouze poruchové signály. Po filtraci lze demodulovat obálku signálu a vypočítat obávkové spektrum, ve kterém se detekují frekvence jednotlivých poruch [8].

## 1.5 Historie analýzy

Princip obávkové analýzy byl využíván od 70. let 20. století při analogovém zpracování vibrací například ve firmě Boeing [3]. Původní motivací pro obávkovou analýzu signálu bylo posunutí vysokofrekvenčních rezonančních kmitočtů do základního pásma poruchových signálů pro dostatečné rozlišení frekvenční analýzy pomocí Fourierovy transformace.

Další vývoj diagnostiky vad ložisek posunulo digitální zpracování signálu s růstem výpočetní kapacity pro frekvenční analýzu. Bylo vyvinuto několik metod návrhu vhodné centrální frekvence a šířky pásma filtrace k následné demodulaci a obávkové analýze. Některé metody navrhuje jednoduché hledání špičky ve spektru signálu vibrací. Další metoda diagnostiky je porovnání energie signálu v různých frekvenčních pásmech. Zásadní změna energie v pásmu vyšších frekvencí (v řádu kHz) indikuje přítomnost vady. Tato metoda ale vyžaduje znalost referenčních signálů ložisek v bezporuchovém stavu.

Dle [3] jsou průlomové metody diagnostiky, které využívají analýzu spektrální špičatosti. Vysokou špičatost vykazují signály impulzního charakteru, proto je vhodným kritériem pro detekci poruchových signálů ložisek. Zobrazením špičatosti pomocí Kurtogramu [1] lze analyzovat různá frekvenční pásma a navrhnout vhodný filtr.

## 1.6 Statistické metody

Jedním z pokročilých přístupů k detekci ložisek je statistické zpracování signálů a rozpoznávání vzorů poruch (pattern recognition). Přehled těchto metod je dostupný v [9]. Statistické zpracování signálů má z pravidla dvě části. První část je trénování modelu na známých datech a teprve v druhé části lze na natrénovaném modelu rozpoznávat neznámé signály. Jednou z těchto metod je grafické zpracování pomocí skrytých markovových modelů (HMM - Hidden Markov Model), hojně užívané pro rozpoznávání řeči nebo rukopisu.

Dle [10] dosahují výsledky zpracování HMM lepších výsledků detekce vady oproti nejrozšířenejší metodě analýzy pomocí kurtogramu. Výhodou statistických modelů je následná automatická detekce a určení závady. Základním problémem je ale krok trénování dat a jejich dostupnost.

Další možností statistického zpracování detekce poruch je zpracování výstupních hodnot základních postupů obecné detekce závady pro určení přesného typu závady a její lokalizace. V [11] je základní analýza pomocí vlnkové transformace dále hodnocena na natrénovaném modelu GMM (Gaussian Mixture Model) pro určení typu závady ložiska a její lokalizace.

Z principu statistického zpracování vyplývá nutnost získání dat pro konkrétní druh ložiska, u kterého probíhá detekce vad. Tvorba vhodně namodelované databáze může nahradit nutnost měření trénovacích dat pro vybrané ložisko [3] a značně snížit cenu a časovou náročnost měření.

---

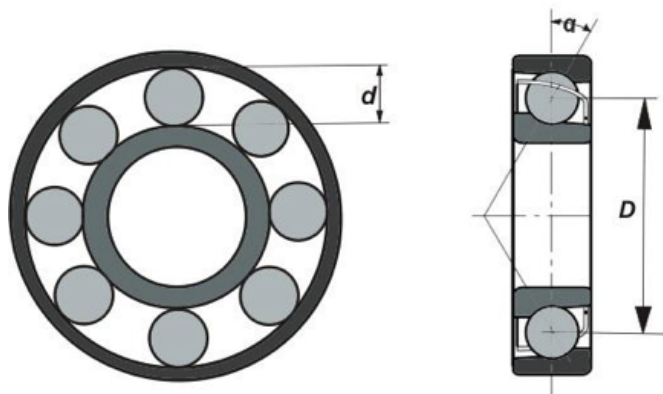
## Typické vady valivých ložisek

V implementaci této práce jsou modelována data pro kuličková valivá ložiska. Typická konstrukce tohoto ložiska je na obrázku 2.1. Kromě rozdílných průměrů vnitřního a vnějšího kroužku je základním parametrem konstrukce každého modelu ložiska počet vnitřních kuliček. Dalším prvkem, který ovlivňuje naměřené signály, je typ montáže ložiska. Jsou dvě typické možnosti montáže:

- Pevný vnitřní kroužek a otočný vnější (kolo na pevné ose)
- Pevný vnější kroužek a otočný vnitřní (hřídel převodovky)

Na životnost ložiska má vliv mnoho faktorů. Prasklina ložiska může vzniknout v závislosti na výrobním procesu nebo přetěžováním ložiska v provozu [12]. Podle výskytu materiálové praskliny dělíme závady na následující skupiny [6]:

- Vada vnitřního kroužku
- Vada vnějšího kroužku
- Vada kuličky



Obrázek 2.1: Rozměry kuličkového ložiska [13]

## 2.1 Vada vnitřního kroužku

Detekovanou vadou vnitřního kroužku je prasklina materiálu na vnější straně vnitřního kroužku ložiska. Tato vada generuje frekvenci *BPFI* (Ball pass frequency inner race), která je dána vztahem 2.1. Frekvenci *BPFI* určuje především vlastní frekvence otáčení ložiska  $f_r$  a rozměr ložiska.  $D$  je průměr ložiska měřený od středu kuliček,  $n$  je počet kuliček,  $d$  je jejich průměr a  $\alpha$  je kontaktní úhel dle obrázku 2.1.

$$BPFI = \frac{n f_r}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad [\text{Hz}] \quad (2.1)$$

## 2.2 Vada vnějšího kroužku

Další forma závady ložiska je prasklina materiálu na vnitřní straně vnějšího kroužku ložiska. Tato vada budí frekvenci *BPFO* (Ball pass frequency outer race) ze vztahu 2.2. Frekvence *BPFO* je dána stejnou hodnotou frekvence otáčení ložiska  $f_r$  a rozměrem ložiska jako ve vztahu 2.1. Při porovnání těchto dvou rovnic je patrné, že *BPFO* bude mít vždy pro dané ložisko menší hodnotu než *BPFI*.

$$BPFO = \frac{n f_r}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad [\text{Hz}] \quad (2.2)$$

## 2.3 Vada kuličky

Pokud je vada materiálu přímo na kuličce ložiska, impulzy nárazů této štěrbině mají frekvenci  $BSF$  (Ball spin frequency) dle vztahu 2.4. Tento signál je dále amplitudově modulován základní frekvencí otáčení soustavy všech kuliček (tzv. klecí) v ložisku  $FTF$  (Fundamental train frequency).

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad [\text{Hz}] \quad (2.3)$$

$$BSF = \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right) \quad [\text{Hz}] \quad (2.4)$$

## Analýza reálných signálů

Pro základní analýzu reálných naměřených dat byla použita databáze Machinery Failure Prevention Data [4]. Databáze obsahuje 20 sad signálů naměřených na testovacím zařízení ložisek a 3 další signály přímo z industriální praxe. Hlavní výhodou této databáze je dostupnost dostatečného popisu dat. Díky popisu dat není nutné vady identifikovat, ale signály mohou sloužit pro získání potřebných parametrů následného modelování syntetických signálů.

### 3.1 Časová konstanta

Obálka impulzů poruchových signálů je exponenciálně tlumená s časovou konstantou  $\tau$ . Pro případ diskrétního signálu s počtem vzorků  $N$ :

$$x = e^{-n/\tau}, \text{ kde } n \in \{0, 1, 2, \dots, N - 1\}. \quad (3.1)$$

Pro modelování syntetických signálů je potřeba ověřit zvolenou hodnotu této časové konstanty. Detekované špičky reálných signálů je třeba proložit křivkou. K proložení je zvolena metoda nejmenších čtverců na zlogaritmovaná data:

$$y = \ln(x) = -\frac{n}{\tau} = kn \Rightarrow \tau = -\frac{1}{k} \quad (3.2)$$

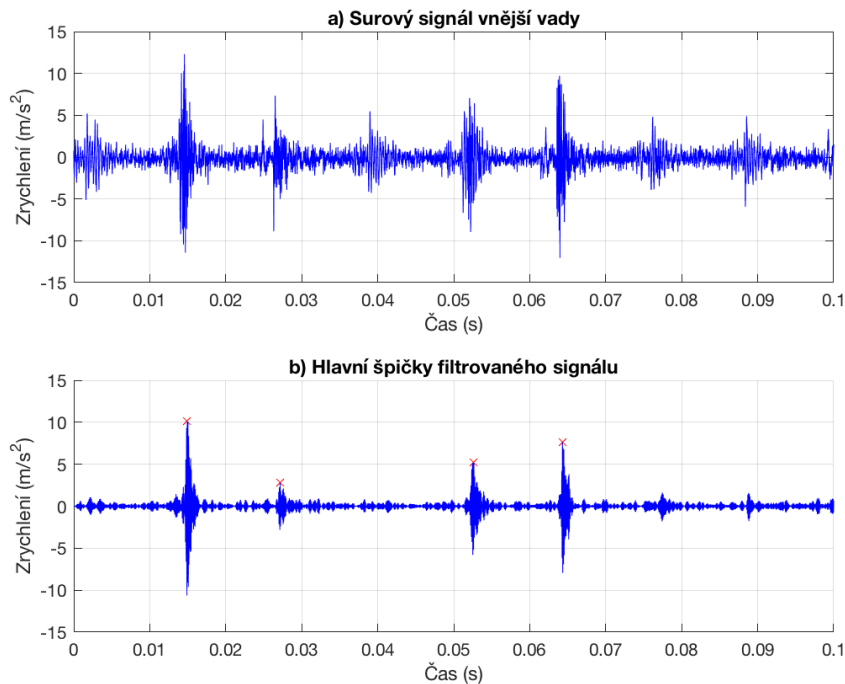
Odhad  $\hat{k}$  získáme lineární regresí dat:  $z_n = kn + q$  pomocí zvolené metody nejmenších čtverců (Least squares) [14]:

$$\begin{bmatrix} \sum y_n n \\ \sum y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum n^2 & \sum n \\ \sum n & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{k} \\ \hat{q} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Nebo v maticovém zápisu:

$$\mathbf{r}_y = \mathbf{A}\mathbf{w} \Rightarrow \mathbf{w} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{r}_y$$

Následná analýza signálů z databáze MFPT je zvolena pomocí metody kurtogramu a optimální filtrace. Tato metoda je dále popsána v kapitole 7.

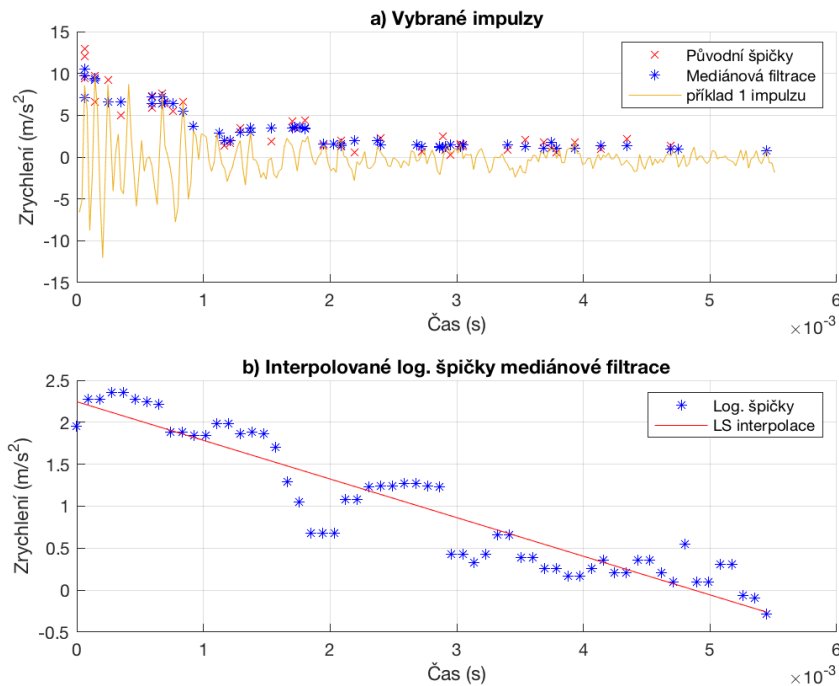


Obrázek 3.1: Analýza časové konstanty

Základem metody je návrh optimálního filtru v pásmu maximální špičatosti signálu pro zvýraznění impulzů poruchových signálů na obr. 3.1 (a). Výsledkem filtrace je signál průběhu lokalizovaných vad na obrázku 3.1 (b).

Na filtrovaném signálu jsou detekovány hlavní špičky impulzů. Signál je rozdělen na krátké úseky poklesu energie těchto impulzů o délce do 60 ms viz obrázek 3.2 (a). Pro dostatek dat k následnému zpracování je zkombinováno alespoň 10 detekovaných špiček. V těchto segmentech jsou opět detekovány lokální špičky poklesu. Hodnoty špiček jsou upraveny pro použitou metodu nejmenších čtverců v následujících krocích. Data jsou normována ke svému maximu. Dalším krokem je mediánová filtrace řádu 5, která vyhladí průběh poklesu amplitudy impulzů. Posledním krokem je zlogaritmování těchto dat pro proložení přímkou. Na takto získaná data je aplikován výše uvedený algoritmus metody nejmenších čtverců a data jsou proložena přímkou (obrázek 3.2 (b)). Celkový proces určení časové konstanty má tedy následující kroky:

1. Filtrace signálu
2. Detekce hlavních impulzů
3. Výběr segmentů



Obrázek 3.2: Analýza časové konstanty pomocí LS

4. Mediánová filtrace
5. Logaritmus dat
6. Proložení přímkou metodou nejmenších čtverců
7. Získání směrnice přímky  $\hat{k}$

Z takto získané směrnice přímky určíme ze vztahu 3.2 hodnotu časové konstanty exponenciální obálky  $\tau$ . Pro uvedený průběh signálu (obrázek 3.1) `OuterRaceFault_vload_7.mat` z databáze MFPT je určena časová konstanta  $\tau = 0.49152$  ms. Tímto způsobem je ověřena hodnota konstanty z [2]  $\tau = 0.5$  ms, která je dále použita pro modelování databáze.

## 3.2 Amplitudová modulace

Základním rozdílem při porovnání signálů s vadou vnějšího a vnitřního kroužku je přítomnost amplitudové modulace v jednom ze signálů. Dle [15] je takto amplitudově modulovaný signál kroužku, který se otáčí vůči pevné části měřeného systému. Frekvence amplitudové modulace odpovídá fundamentální



frekvenci otáčení vnitřního kroužku (hřídel) nebo vnějšího kroužku (kolo)  $f_r$ . Stejně tak je amplitudově modulovaný signál vady na samotné kuličce  $BSF$ , který je modulovaný frekvencí otáčení klece kuliček  $FTF$ . Tento koncept platí pro umístění měřících senzorů na statické části měřeného systému. Amplitudová modulace se projeví ve výsledném obálkovém spektru analyzovaných signálů jako postranní spektrální čáry kolem nosné frekvence poruchy ( $BPFO/BPFI$ ).

### 3.3 Rušení signálu a nevyvaha

Jeden z prvních kroků analýzy poruchových signálů je zvýraznění signálu odpovídajícímu impulzům vady a odfiltrování maskujících signálů a potlačení šumu. V analyzovaném signálu jsou přítomny nežádoucí složky deterministické i náhodné. Typický deterministický maskující signál je způsoben nevyvahou rotujícího elementu. Nevyvaha je nežádoucí jev rotoru, který se projevuje pokud těžiště tělesa leží mimo osu jeho otáčení. Rotor se snaží otočit kolem osy svého těžiště, ale v tom mu zabraňují ložiska se svou vlastní osou otáčení. V ložisku tak působí odstředivá síla, která generuje vibrace a následně může přispět k poškození ložiska či nadměrnému hluku. Nevyvaha se obvykle projevuje zesílením prvních násobků harmonické frekvence otáčení rotoru  $f_r$  [16], tedy na nízkých kmitočtech.

V měřeném signálu je přítomný nedeterministický náhodný šum, který má typicky charakter bílého šumu [2]. Energie signálu bez poruchy je ovlivněna především odstupem signálu od šumu (SNR). Při vysokém SNR je většina energie bezporuchového signálu v nízkých kmitočtech v oblasti frekvencí otáčení hřídele (respektive kola) stroje. Při výskytu poruchy se začne zvyšovat energie signálu v pásmu frekvencí rezonančního kmitočtu závady.

## Modelované signály

Modelované signály této práce jsou tvořeny jako diskretní systém a celá databáze pracuje s tímto předpokladem při následném zpracování a analýze.

### 4.1 Model tlumeného kmitání

Model tlumeného kmitání vychází z lineární diferenciální rovnice 2. řádu s konstantními parametry dle [17].

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_0\dot{y}(t) + \omega_0^2y(t) = u(t) \quad (4.1)$$

Kde  $\omega_0$  je přirozená frekvence kmitů a  $\zeta$  je relativní tlumení systému. Pro modelování průběhu tlumení impulsů vybuzených vadou ložiska vychází model z **podkritického tlumení** systému, pro které je  $\zeta < 1$  a řešení charakteristické rovnice příslušné k DR má dva komplexně sdružené kořeny:

$$s_{1,2} = \sigma_p \pm j\omega_p \quad (4.2)$$

Kde  $\omega_p$  je frekvence tlumených kmitů a  $\sigma_p$  je míra tlumení těchto kmitů, které lze určit z časové konstanty reálných signálů  $\tau$  nebo z relativního tlumení  $\zeta$  a frekvence vlastních kmitů  $\omega_0$ :

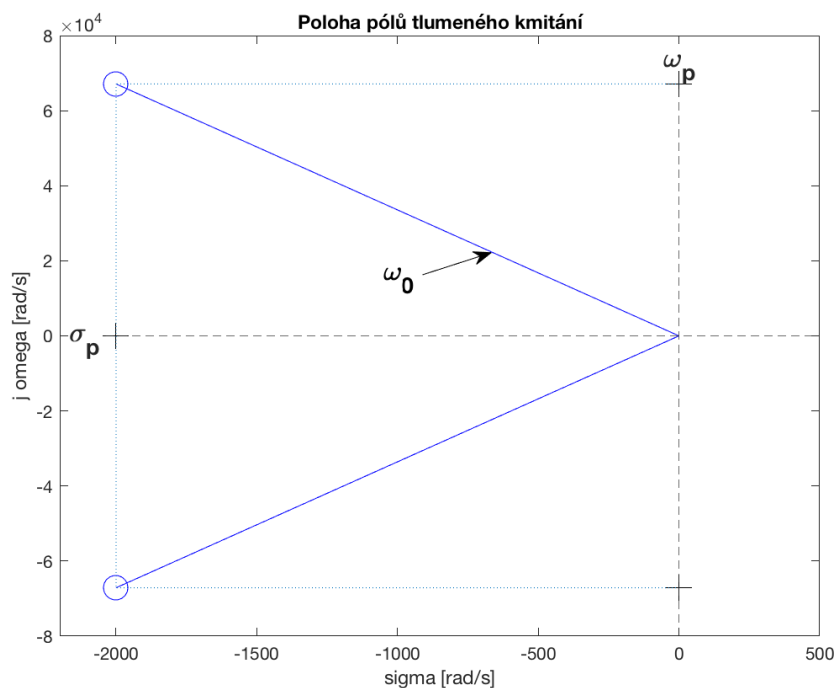
$$\begin{aligned} \sigma_p &= -\frac{1}{\tau} & [\text{rad/s}] \\ \sigma_p &= \zeta\omega_0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Frekvence tlumených kmitů  $\omega_p$  je dána Pythagorovou větou z obrázku 4.1 jako:

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - \sigma_p^2} \quad [\text{rad/s}] \quad (4.4)$$

Z úhlové frekvence tlumených kmitů pak jednoduše vyjádříme vysoko-frekvenční složku  $f_c$  modelovaného signálu v Hz jako:

$$f_c = \frac{\omega_p}{2\pi} \quad [\text{Hz}] \quad (4.5)$$



Obrázek 4.1: Poloha pólu ložiska NICE z databáze MFPT.

Impulzní odezvu jednoho nárazu kuličky do vady v materiálu, případně doteku praskliny na kuličce s jedním z kroužků, lze zjednodušeně modelovat vztahem 4.6 a je vykreslena na obrázku 4.2.

$$h(t) = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\sigma_p t} \sin(\omega_p t) \quad (4.6)$$

pro  $t \geq 0$ .

## 4.2 Hmotnost kuličky

Přirozenou frekvenci kmitů  $\omega_0$  modelovaného kmitání lze určit také vztahem vycházejícím z hmotnosti kmitajícího tělesa  $m$  a konstanty tuhosti kmitajícího systému  $k$ :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [\text{rad/s}] \quad (4.7)$$

Hodnota konstanty tuhosti  $k$  je určena z analýzy reálných dat již zmíněné databáze MFPT [4] a ověřena dle postupu v simulaci Nadera Sawalhiho [18].

Tabulka 4.1: Analyzované parametry

	MFPT dataset	Sawalhi simulace
$f_c$	10 681 Hz	15 000 Hz
$m$	7 g	11.9 g
$k$	$3.1525 \times 10^7 \text{N/m}$	$1.0542 \times 10^8 \text{N/m}$

Hodnoty hmotnosti, konstanty tuhosti a odpovídající frekvenci tlumených kmitů pro oba případy jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Pro výrobu kuličkových ložisek je nejčastěji používaný materiál nerezová ocel. Parametry použitého materiálu jsou dané normou ISO 683-17 [19]. Pro výpočty fyzikálního modelu ložiska je brána hodnota hustoty oceli:  $\rho = 7850 \text{ kg m}^{-3}$  [20]. Výpočet hmotnosti  $m$  je proveden dle jednoduchého vztahu hustoty  $\rho$  a objemu  $V$ :

$$\begin{aligned} m &= \rho V \quad [\text{kg}] \\ V &= \frac{4}{3}\pi d^3 \quad [\text{m}^3] \end{aligned} \quad (4.8)$$

Kde  $d$  je průměr kuličky a  $V$  její objem. Výpočet hmotnosti kuličky byl potvrzen dle dostupného údaje o hmotnosti kuličky a ostatních rozměrů měřeného ložiska z [21]. Totožný model ložiska 6024 firmy SKF je jedním z modelovaných rozměrů v databázi. Uvedená hodnota hmotnosti tohoto ložiska z [21] je  $m = 2040 \text{ mg}$  a vypočtená hodnota je  $m = 2100 \text{ mg}$ .

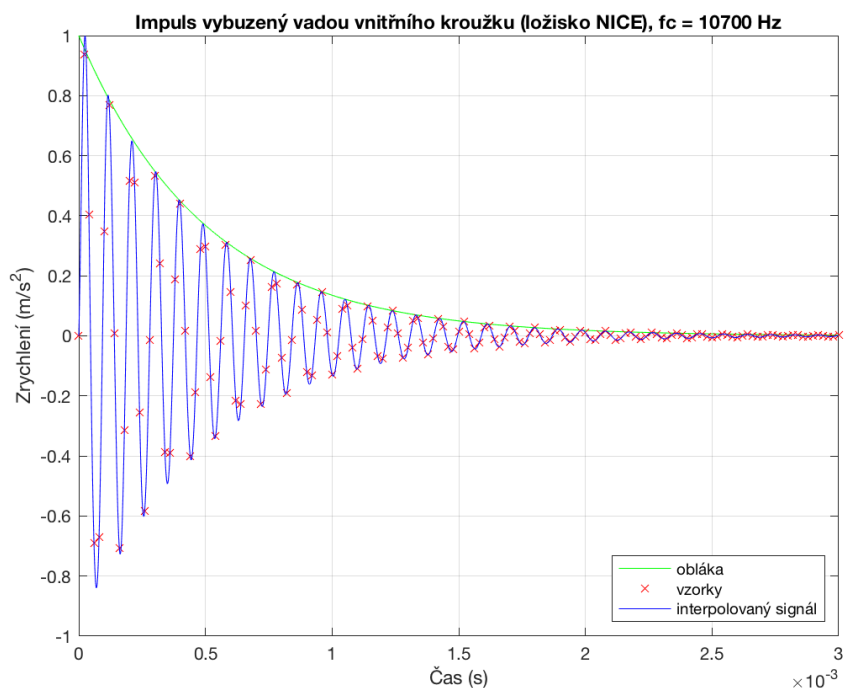
### 4.3 Průběh jednoho nárazu

Časový průběh jednoho nárazu kuličky ložiska a vady vnitřního kroužku je na obrázku 4.2. Tento ilustrovaný impuls je modelován pro ložisko firmy NICE, odpovídající databázi MFPT [4]. Z hmotnosti kuličky ložiska  $m$  a analyzované konstanty tuhosti  $k$  (uvedených v tabulce 4.1) je zpětně dopočítána rezonanční frekvence kmitů  $f_c$  postupným dosazováním do vztahů 4.3 až 4.5.

Délka jednoho impulsu musí odpovídat periodě modelované vady a její frekvenci ze vztahů 2.1 až 2.4. Při dané vzorkovací frekvenci  $f_s$  je počet vzorků  $N$  délky pulsů jednotlivých závad vypočten následovně:

$$\begin{aligned} N &= f_s/BPFI, \\ N &= f_s/BPFO, \\ N &= f_s/(2 \times BSF) \end{aligned}$$

Dělení 2 pro výpočet počtu vzorků délky pulzu praskliny na kuličce vychází z předpokladu, že kulička během jednoho otočení narazí jak do vnějšího, tak do vnitřního kroužku a frekvence pulzů se tak zdvojnásobí, počet vzorků periody se tedy zkrátí.

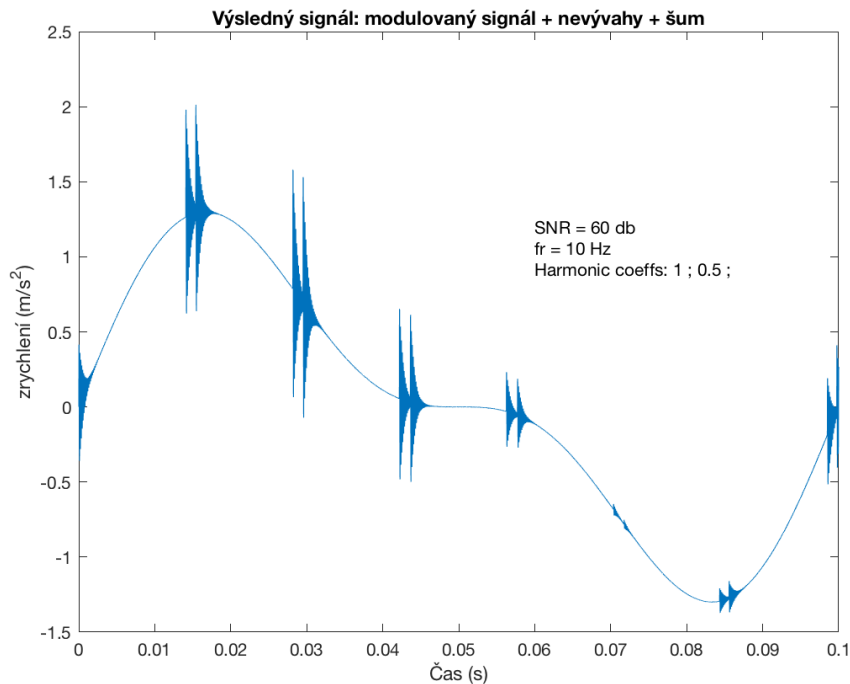


Obrázek 4.2: Impulsní odezva modelované vady

Vzorkovací frekvence modelovaných signálů  $f_s = 50$  kHz je zvolena tak, aby splňovala vzorkovací teorém pro navzorkování vysokofrekvenční rezonance typicky v rozmezí 10 - 20 kHz. Je tedy zvolen alespoň dvojnásobek této maximální frekvence s dostatečnou rezervou. Z hodnoty  $\tau$  získaných analýzou a vypočtenou délkou impulsu  $N$  nastává problém při vykreslení průběhu jednoho impulsu. Vygenerované vzorky věrně reprezentují impulsní odezvu ze vztahu 4.6, ale grafické proložení křivkou zkresluje jejich ideální průběh. Generované vzorky musí být interpolovány s násobně vyšším počtem vzorků, aby byl zachycen reálný průběh tlumeného kmitání. V případě obrázku 4.2 i obrázků následné databáze jsou proloženy expanzním faktorem  $K = 25$ . Délka interpolovaného pulsu ve vzorcích odpovídá  $Nk = KN$ . Pro následné zpracování je ale použit původní signál s vzorkovacím kmitočtem  $f_s$  a odpovídající délkou pulsu  $N$ . Pro modelování signálů jsou tyto segmenty pulzů skládány následovně za sebe.

## 4.4 Prokluz

Základní perioda impulzů závady je dána ze vztahů pro *BPFO*, *BPFI*, *BSF* uvedených v kapitole 2. Opakování modelovaných pulzů není ale dokonale periodické. Vlivem mechanického prokluzu dochází k náhodné časové variaci mezi pulzy. Časová variace vzorků je známý jev z analogově - digitálního převodu signálů nejčastěji označována jako *jitter*. V [3] jsou uvedeny dva modely prokluzu valivých ložisek. První model má náhodný prokluz kolem známé průměrné periody pulzu. Druhý, doporučený model, má jako náhodnou veličinu definovaný rozestup pulzů bez paměti v čase. V [2] je pro prokluz použita hodnota 2 % z počtu vzorků periody pulzů.

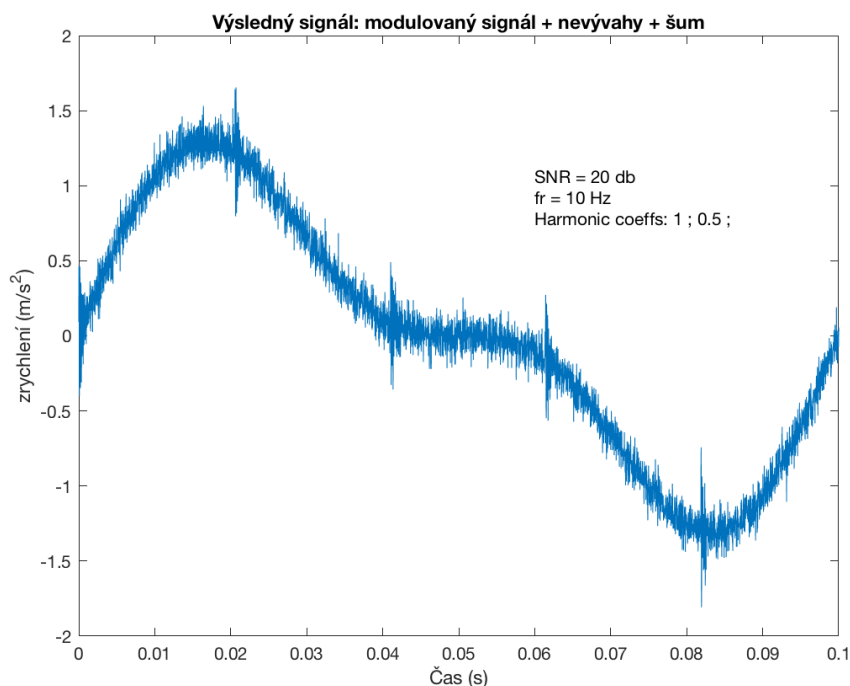


Obrázek 4.3: Model dvojitého nárazu a nevývahy

## 4.5 Dvojitý náraz

Dle modelu v [18] lze v reálných signálech detekovat jev dvojitého nárazu v krátkém časovém rozmezí od základních nárazů, které mají periodu dané vady. Tento dvojitý náraz lze detekovat u ložisek s prasklinou většího rozměru vzhledem k velikosti kuličky ložiska. Kulička ložiska poté při kontaktu s prasklinou kroužku do praskliny zapadne. Vybudí tak první impulz při kontaktu s počáteční hranou praskliny a druhý impulz při kontaktu s koncovou hranou praskliny. Časový interval mezi těmito dvěma nárazy je dán šířkou praskliny. V [18] je měřená prasklina široká 0.8 mm a rozestup dvojitého nárazu modelován s hodnotou 1.3 ms.

Model dvojitého nárazu se ze svého principu průchodu kuličky projeví převážně u vady vnitřního a vnějšího kroužku a pouze při dostatečně široké prasklině. Na obrázku 4.3 je vykreslen průběh signálu modelu dvojitého nárazu ložiska Koyo 1205 odpovídající simulaci v [18].



Obrázek 4.4: Výsledný signál včetně nevývahy a šumu

## 4.6 Šum a nevývahy

Na obrázku 4.4 je průběh jedné periody otáčení hřídele o frekvenci  $f_r = 10$  Hz výsledného modelovaného signálu. Vygenerovaný signál opakovaných tlumených impulzů závady je sečten se signálem nevývahy vycházejícího z otáčkové frekvence hřídele  $f_r$ . Tvar průběhu základní periody otáčky lze ovlivňovat koeficienty harmonických násobků otáčení  $f_r$ . Pro vyobrazený signál a následné signály databáze jsou tyto koeficienty nastaveny na  $a_1 = 1$  a  $a_2 = 0.5$  vycházejících z hodnot určených v [18].

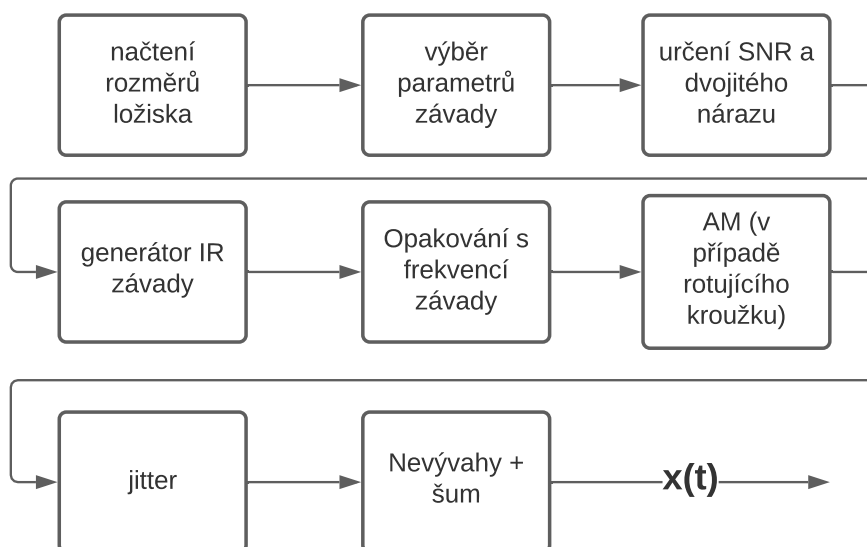
Aditivní šum je generován jako gaussovský bílý šum (AWGN) a jeho úroveň je nastavena s daným SNR v dB vzhledem k výkonu signálu závady včetně nevývah.



# Databáze

## 5.1 Vývojový diagram

Databáze signálů je tvořena několika kroky, které vycházejí z předešlé analýzy reálných signálů a nutných parametrů generovaného signálu závady. Dílčí části generátoru signálů jsou znázorněny na vývojovém diagramu (obrázek 5.1).



Obrázek 5.1: Vývojový diagram generátoru signálů

Tabulka 5.1: Rozměry ložisek

ložisko	<b>Koyo 1205</b>	<b>NICE</b>	<b>SKF 6024</b>	<b>SKF 608</b>
$d$ (průměr kuličky) [mm]	7.12	6.0	3.9690	4
$D$ (průměr ložiska) [mm]	38.50	31.6	17.2535	15
$n$ (počet kuliček)	12	8	8	7
$f_r$ [Hz]	10	25	25	50
rotující kroužek	vnitřní	vnitřní	vnitřní	vnější

## 5.2 Typ ložiska

Základním atributem parametrů chybových signálů je typ ložiska, na kterém jsou signály měřeny. Pro tvorbu databáze byly vybrány 4 typy ložisek s ohledem na jejich využití v praxi, dostupnost naměřených dat pro porovnání výsledků a rozdíly v konstrukci jednotlivých typů. Jedná se o typy ložisek:

- **Koyo 1205** - ložisko ze simulace Nadeera Sawalhiho [18]
- **NICE** - ložisko z databáze MFPT [4]
- **SKF 6024** - ložisko z měření útlumu [21]
- **SKF 608** - běžné kuličkové ložisko

Každé ložisko má definované své konstrukční parametry v příslušném `.mat` souboru. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1. Každé ložisko má také přiřazenou typickou hodnotu frekvence otáčení své hřídele respektive kola  $f_r$  uvedené v tabulce 5.1. Tato hodnota je **konstantní** a výsledný průběh signálů databáze je **stacionární**. Volba konstantních otáček definuje vhodné metody následné analýzy a zásadně odlišuje princip modelování a zpracování dat oproti nestacionárnímu průběhu otáček a změny základní periody impulzů detekovaných vad.

Základem generátoru signálu je načtení definovaných rozměrů vybraných 4 ložisek z připravených souborů:

- `Mathwork_NICE.mat`
- `Sawalhi_Koyo_1205.mat`
- `SKF_6024.mat`
- `SKF_608.mat`

Z těchto souborů jsou dostupné hodnoty z tabulky 5.1 pro  $d$ ,  $D$ ,  $n$ ,  $f_r$ , a hodnotu `rot_race`, ve které je nastaven typ závady, u kterého probíhá amplitudová modulace vzhledem k rotujícímu kroužku ložiska.

### 5.3 Parametry vady ložiska

Dalším krokem generátoru signálů je nastavení parametrů závady a výstupního signálu. Pro kompletní databázi včetně čistých signálů bez závady jsou na výběr 4 možnosti nastavení závady na: *BPFI*, *BPFO*, *BSF* a *NO\_F*, kde poslední typ závadu negeneruje a modeluje pouze signál nevývah s aditivním šumem systému.

Dalším parametrem generátoru je nastavení úrovně SNR v dB a vypnutí/zapnutí dvojitého nárazu. V případě zapnutí dvojitého nárazu je nastavena hodnota šířky praskliny na  $w = 0.8$  mm s odpovídajícím časem  $t_{imp} = 1.3$  ms dle [18]. Dvojitý náraz je tedy generován pouze pro odpovídající ložisko **Koyo 1205** z této simulace, ale parametry dvojitého nárazu mohou být nastaveny dle potřebného měření.

Z načtených rozměrů a definovaných materiálových a analyzovaných hodnot jsou z kapitoly 4 vypočteny parametry modelu tlumeného kmitání impulzní odezvy závady. Z analyzovaných hodnot je pevně zvolena časová konstanta exponenciální obálky  $\tau = 0.0005$  s a konstanta tuhosti  $k = 3.1525 \times 10^7$  N/m. Z rozdílných hodnot hmotnosti kuličky pro různé typy ložisek vyjde odpovídající rozdílná rezonanční frekvence  $f_c$  tlumených impulzů závady. Kontrolní hodnotou vypočtených parametrů modelu kmitání je hodnota relativního tlumení  $\zeta$ .

### 5.4 Relativní tlumení a rezonanční frekvence

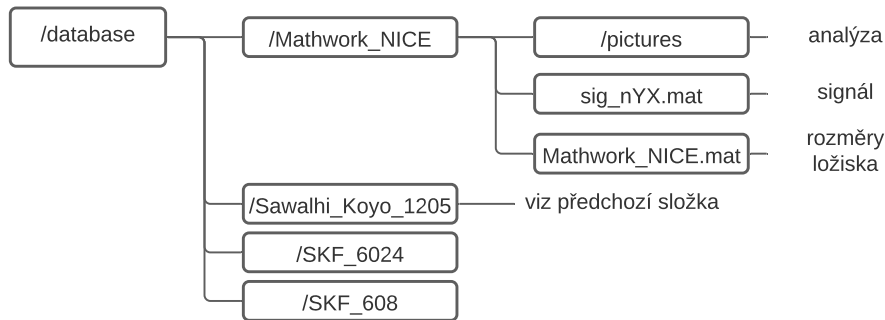
Hodnota relativního tlumení  $\zeta$  je vyjádřena ze vztahu 4.3 z modelu tlumeného kmitání:

$$\zeta = \frac{\sigma_p}{\omega_0} \quad [-] \quad (5.1)$$

Hodnota relativního tlumení je přímo spjata s vygenerovanou rezonanční frekvencí. Nastavením limitu relativního tlumení lze získat spodní a horní mez rezonanční frekvence, díky kterým je zajištěno dodržení vzorkovacího teorému z horní strany a omezené vysokofrekvenční pásmo výskytu signálu vady od spodní hranice. Z analýzy útlumu v [18] a [21] jsou typické hodnoty útlumu právě v rozsahu 2 -5 %. Ověřením těchto limitů pro dané modely ložisek jsou dodrženy intervaly rezonančních frekvencí dle tabulky 5.2.

Tabulka 5.2: Rezonanční frekvence

	$\zeta$ [%]	$f_c$ [Hz]
spodní mez $f_c$	5	6400
horní mez $f_c$	2	15900



Obrázek 5.2: Diagram vytvořené databáze

Tabulka 5.3: Označení signálů

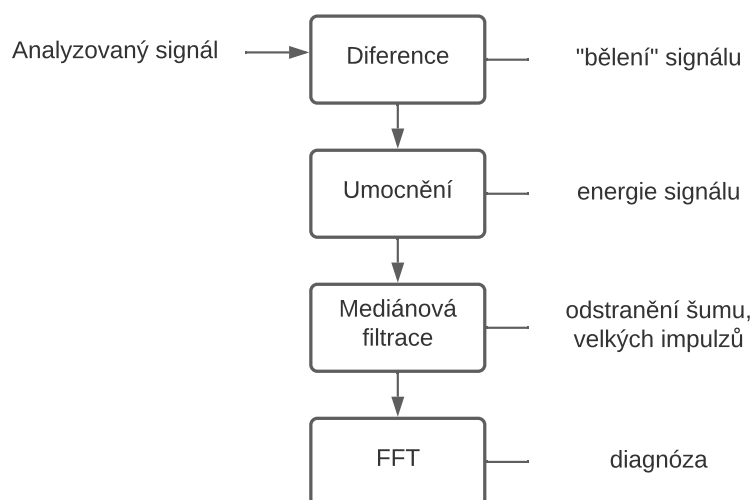
Y	SNR	X	typ závady
0	6 dB	1	BPFI
1	10 dB	2	BPFO
2	20 dB	3	BSF
4	40 dB	4	bez závady
6	60 dB	5	BPFI dvojitý náraz
		6	BPFO dvojitý náraz

## 5.5 Výstupní signál

Struktura vytvořené databáze je popsána na blokovém diagramu obrázku 5.2. Databáze obsahuje 4 složky jednotlivých typů ložisek. V každé složce jsou poté `.mat` soubory jednotlivých signálů. Každý signál má označení `sig_nYX.mat`, kde  $Y$  a  $X$  označuje číslování signálu uvedené v tabulce 5.3.  $Y$  vyjadřuje hodnotu SNR generovaného signálu a  $X$  udává pořadí signálu v dané dekádě SNR pro jednotlivé závady a variace nastavení (dvojitý náraz). Pro každé ložisko je ve složce přidán adresář `/pictures`, ve kterém jsou výsledky následné analýzy vybraných signálů z kapitoly 8.

## Metoda difference a frekvenční analýzy obálky

Jednou z vybraných metod, která se zásadně liší od výpočetně náročných a složitějších algoritmů, je metoda využívající diferenci signálu a mediánovou filtraci autora Nadera Sawahliho [2]. Jejím cílem je návrh univerzální metody detekce vad ložiska, která není signálově závislá nebo rozdílná pro různé typy ložisek. K vůli postupnému zavedení pojmů je tato metoda popsána jako první a dále porovnána s referenční metodou kurtogramu. Na obrázku 6.1 je blokové schéma zpracování signálu závady. Základní princip této metody je difference signálu a následná analýza frekvenční obálky.



Obrázek 6.1: Diagram analýzy pomocí difference a mediánové filtrace

## 6.1 Diference

Prvním krokem této univerzální metody je diference signálu. Diference diskrétního signálu je jednoduchý algoritmus odečtení předchozího vzorku od stávajícího dle vztahu 6.1. Pro signál o délce  $N$  je výsledek po prvním řádu diference o délce  $N - 1$ .

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1}, \quad i = 2, \dots, N. \quad (6.1)$$

Proces diference signálu zvýrazní diskontinuity ve smyslu přítomných impulzů v signálu. Diferenci lze považovat za filtr typu horní propust, která tlumí nízké kmitočty. Opakováním diference, tedy zvyšováním jejího řádu, se zvyšuje spodní hranice propustného pásma a zvětšuje útlum nízkých kmitočtů. Pro optimální zpracování měřeného signálu je zapotřebí určit vhodný řád diference, který zvýrazní maximální impulzní charakter signálu. Jako míra impulzního charakteru signálu slouží výpočet špičatosti diferencovaného signálu.

## 6.2 Špičatost

Špičatost signálu (kurtosis) je dána poměrem 4. centrálního momentu signálu  $\mu_4$  a rozptylu signálu umocněného na druhou.

$$kurt = \frac{\mu_4}{\sigma^4} = \frac{\mu_4}{\text{var}(X)^2} \quad (6.2)$$

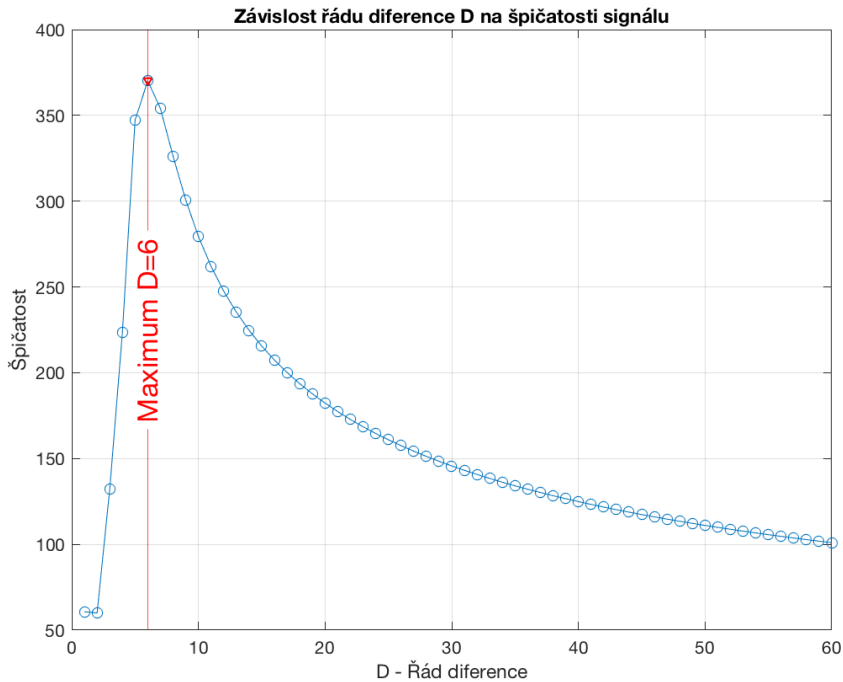
Jejího hodnota vyjadřuje míru impulzního charakteru měřených dat. Hodnota špičatosti normálního rozdělení je rovna 0, a proto se pro normování špičatosti vůči normálnímu rozdělení obvykle od výsledné hodnoty odečítá 3. Následný vztah 6.3 obsahuje tuto korekci a vyjadřuje špičatost diskrétního signálu  $x_n$  s počtem vzorků  $N$  a střední hodnotou  $\mu_x$ :

$$kurt = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu_x)^4}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N ((x_n - \mu_x)^2)^2} - 3 \quad (6.3)$$

Pro určení maximální špičatosti v závislosti na řádu diference signálu je pro analyzovaný signál porovnána hodnota špičatosti každého řádu do řádu  $D_{top} = 60$ . Průběh špičatosti vybraného signálu ložiska **Koyo 1205 sig\_n62.mat** je na obrázku 6.2. Jedná se o signál s vysokým SNR 60 dB a s vadou vnějšího kroužku. Pro tento signál je určen optimální řád diference  $D_{max} = 6$ .

## 6.3 Mediánová filtrace

Po kroku diference s optimálním řádem je signál v absolutní hodnotě umocněn pro získání obálky. Pro následnou detekci vady je potřeba vyfiltrovat nežádoucí vysokofrekvenční obsah. Z předpokladu přítomnosti pulsů vygenerovaných



Obrázek 6.2: Určení maxima špičatosti pro různé řády difference

závadou je místo filtrace dolní propustí vhodné použít mediánový filtr, který svým principem taktéž tlumí vysoké frekvence.

Mediánový filtr o zvolené délce  $N$  obvykle liché hodnoty (3,5,7 atd.) nahrazuje v daném segmentu střední hodnotu mediánem hodnot okolí a délce  $N$ . To vede k útlumu frekvencí vyšších než je hodnota  $f_s/N$ , kde  $f_s$  je vzorkovací frekvence. Z charakteristiky závad z kapitoly 2 je patrné, že rozestup ve spektru bude mít bližší frekvence  $BPFI$  oproti  $BPFO$ . Pro detekci prvních 10 harmonických násobků frekvence závad je zvolená optimální délka mediánového filtru vypočtena z následujícího vztahu 6.4 [2]:

$$N = \frac{f_s}{10BPFI} \quad (6.4)$$

## 6.4 Implementace metody v prostředí Matlab®

Pro analýzu databáze v prostředí Matlab® je obálka signálu postupně získána v několika krocích. Vstupní data proměnné `signal` jsou frekvenčně upravena funkcí difference `diff` s navrženým řádem  $D_{max}$ . Z výstupu difference

je vypočtena absolutní hodnota a její druhá mocnina je dále filtrována mediánovým filtrem `medfilt1` o délce  $N$  ze vztahu 6.4.

Hlavní předností této metody je poměrně jednoduchý princip bez nutnosti znalosti detailní teorie a velmi jednoduchý návrh algoritmu dostupný v [2]. Základní bod analýzy je proveden následujícím kódem, kde proměnná `signal` jsou data analyzovaného signálu, `D_max` je řád diference určený z maximální špičatosti signálu a  $N$  je délka mediánového filtru:

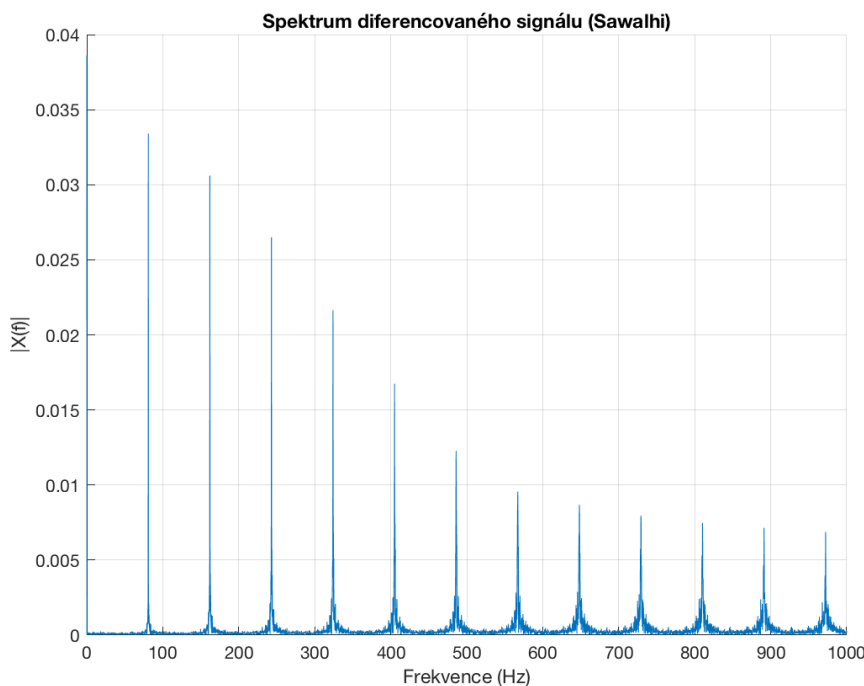
```
envelope = (medfilt1(abs(diff(signal,D_max)).^2,N));
```

Kód 6.1: Příklad výpočtu obálky v prostředí Matlab funkcí `diff`



## 6.5 Frekvenční analýza

Z obálky signálu z předchozího kroku je pomocí diskrétní Fourierovy transformace vypočteno spektrum signálu. Průběh typického spektra závady vnějšího kroužku je na obrázku 6.3. Ve spektru se v případě poruchy objeví špičky impulzů, které generuje závada. První hodnota detekované špičky by měla ležet na charakteristické frekvenci dané závady ( $BPFI$ ,  $BPFO$ ,  $BSF$ ) a následující špičky jsou její harmonické násobky. Rozmístění špiček pulzů závady ve spektru je tedy ekvidistantní. Ve spektru se také projeví, pokud je signál závady amplitudově modulovaný. Okolo hlavní špičky pulzu závady jsou zrcadlena postranní pásma modulačního signálu otáčení ložiska  $f_r$ . V případě závady přímo na kuličce s její charakteristickou frekvencí  $BSF$  se ve spektru objeví sudé násobky této frekvence. Důvodem sudých násobků je dvojitý náraz praskliny kuličky na vnitřní i vnější kroužek během jednoho otočení ložiska. Signál praskliny kuličky je amplitudově modulovaný frekvencí otáčení klece ložiska  $FTF$ .

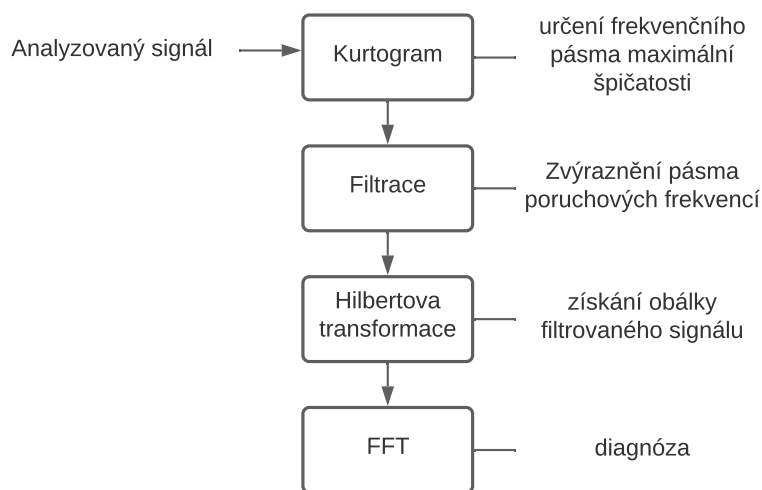


Obrázek 6.3: Spektrum diferencovaného signálu (`sig_n62.mat` ložiska **NICE**)

Výsledky analýzy generované databáze jsou uvedeny v další kapitole 8. Tato univerzální metoda je porovnána s následující, v současnosti velmi používanou a citovanou metodou analýzy pomocí kurtogramu.

## Kurtogram

Referenční metodou k porovnání vyhodnocení modelovaných signálů je zvolena metoda kurtogramu [1] s následnou optimální filtrací s navrženými parametry kurtogramem. Jedná se o velmi citlivou metodu pro detekci pulsů, které generují závady ložiska. Kurtogram určuje průběh závislosti špičatosti na časově frekvenčním rozdělení zvolených úrovní. Tak lze nalézt centrální frekvenci špičatosti  $f_c$  s maximální špičatostí a šířku pásma  $BW$ , ve kterém se nachází maximum. Z těchto parametrů je navržen optimální filtr pro odstranění rušení signálu. Následuje podrobnější popis jednotlivých kroků metody a jejích principů.



Obrázek 7.1: Diagram metody kurtogramu

## 7.1 Spektrální špičatost

Pro popis kurtogramu je třeba zavést pojem spektrální špičatosti dle vztahu 7.1. Globální špičatost signálu z předešlého vztahu 6.3 může být rozdělena v závislosti na frekvenci pomocí STFT (Short time Fourier Transform). Výpočet spektrální špičatosti je analogický k výpočtu výkonového spektra PSD (Power Spectral Density). STFT vypočítá lokální Fourierovu transformaci v čase  $t$  na signálu o délce zvoleného okna. Délka okna udává jak časové, tak frekvenční rozlišení. Časový vývoj výkonového spektra se nazývá spektrogram a jeho průměrování v čase  $\langle |X(t, f)|^2 \rangle$  je celkové PSD signálu (operátor  $\langle \cdot \rangle$  značí průměrování v čase). Analogicky lze ze statistiky 4. řádu vypočítat pomocí STFT spektrální špičatost z komplexní obálky  $X(t, f)$  vztahem 7.1 [3].

$$K(f) = \frac{\langle |X(t, f)|^4 \rangle}{\langle |X(t, f)|^2 \rangle^2} - 2 \quad (7.1)$$

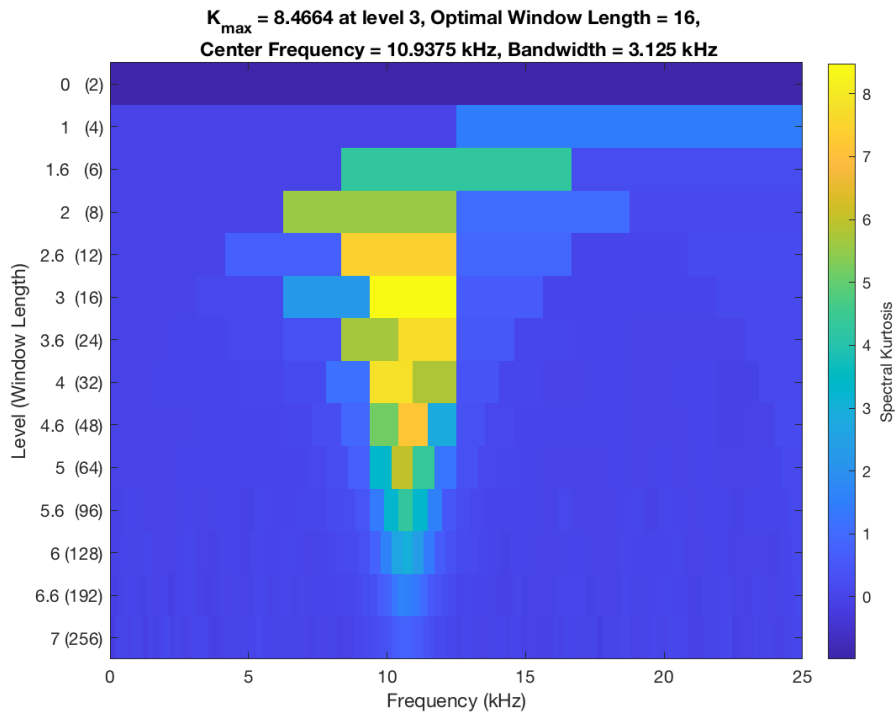
Odečtení hodnoty 2 pro normování odpovídá výpočtu špičatosti z komplexní obálky signálu.

## 7.2 Frekvenční rozlišení

Kurtogram vznikl jako řešení problému STFT (Short time Fourier Transform), která má z principu svého výpočtu vždy nepoměr v rozlišení časové a frekvenční domény. Volba délky okna STFT určuje její frekvenční nebo časové rozlišení na úkor druhého. Obdobně vlnková transformace pokrývá pouze vybrané kombinace délky okna a frekvenčního pásma. Výpočet spektrální špičatosti je závislý na délce okna, kterým segmentujeme analyzovaný signál. Kurtogram proto signál segmentuje vhodným systematickým krokem rozvětvené banky filtrů až do nastavené úrovně (viz obr. 7.2). Základní binární větvení stromu banky filtrů je doplněné o třetinooktávová pásma pro optimální pokrytí frekvenčního rozlišení. Na ose x kurtogramu je frekvence v intervalu  $\langle 0, fs/2 \rangle$  Hz. Na ose y rostoucí šířka pásma od zvolené úrovně kurtogramu až po šířku pásma celého intervalu signálu  $\langle 0, fs/2 \rangle$ . Pro každý blok je vypočtena spektrální špičatost signálu dle vztahu 7.1 a vynesena do grafu úrovní tónem barvy. Nejteplejší tón (žlutá barva) vyznačuje maximum špičatosti v daném segmentu. Výstupem kurtogramu je navržená centrální frekvence pásma  $f_c$  a jeho šířka  $BW$  (respektive délka okna  $WC$ ) pro následnou optimální filtraci.

## 7.3 Funkce kurtogramu v prostředí Matlab®

Kurtogram je od verze R2018a implementován jako funkce `kurtogram` v prostředí Matlab®. Vstupem kurtogramu je analyzovaný signál `signal`



Obrázek 7.2: Kurtogram signálu sig\_n22.mat ložiska NICE

o vzorkovací frekvenci ( $f_s = 50$  kHz) a požadovaná úroveň rozkladu (level = 7).

```
[KGRAM, F, W, fc, WC, BW] = kurtogram(signal, fs, level);
```

Kód 7.1: Příklad použití funkce kurtogram

Výstupem kurtogramu jsou proměnné:

- KGRAM - matice hodnot spektrální špičatosti
- F frekvenční vektor
- W vektor délky okna
- fc centrální frekvence maxima špičatosti
- WC délka okna maxima špičatosti
- BW šířka pásma maxima špičatosti

Kurtogram vstupního signálu ložiska **NICE sig\_n22.mat** s výše uvedenými parametry  $fs = 50$  kHz a  $level = 7$  je vykreslen na obrázku 7.2. Jedná se o typický průběh špičatosti zašuměného poruchového signálu generovaného s hodnotou  $SNR = 20$  dB. Kurtogram navrhuje parametry optimálního filtru k potlačení přítomného šumu případně nevývah nebo jiných maskujících signálů.

Dalším krokem metody je návrh vhodné filtrace analyzovaného signálu.

## 7.4 Filtrace

Analýzou signálu pomocí kurtogramu získáme znalost frekvenčního pásma, ve kterém se nachází impulzní signál vybuzený závadou ložiska. Následující krok analýzy signálu je optimální filtrace určeného pásma frekvencí. Z nároků na minimální zvlnění průběhu filtru jak v propustném, tak v potlačeném pásmu, vede na výběr IIR filtru typu Butterworth. Podrobnější analýza výběru vhodného filtru je dostupná v [22]. Přenosová funkce IIR filtru je obecně vyjádřena vztahem 7.2.

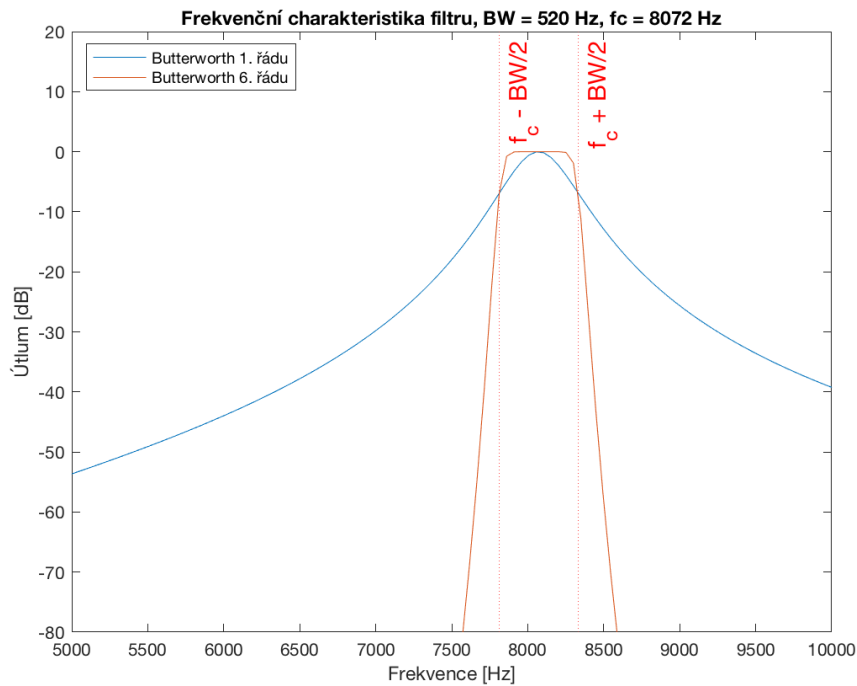
$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^P b_i z^{-i}}{1 + \sum_{j=1}^Q a_j z^{-j}} \quad (7.2)$$

Kde  $b_i$  jsou koeficienty nul a  $a_j$  jsou koeficienty pólů filtru. Hodnota  $P$  a  $Q$  je dána typem a řádem navrženého filtru. Řád filtru určuje útlum nepropustného pásma a strmost filtru. Vyšší řád filtru má nevýhodu výpočetní náročnosti. Nízký řád filtru nemá naopak pro požadovanou šířku pásma vyrovnaný průběh v propustném pásmu. Na obrázku 7.3 jsou porovnány frekvenční charakteristiky zvoleného filtru typu Butterworth řádu 1 a 6. Filtr je navržen pro jedny z typických hodnot získaných kurtogramem pro centrální frekvenci  $f_c = 8072$  Hz a šířku pásma  $BW = 520$  Hz. Tyto hodnoty navrhl kurtogram při analýze silně zašuměného signálu **sig\_n02.mat** ložiska **Koyo 1205**.

Z vyznačeného propustného pásma na obrázku 7.3 je patrný nevhodný průběh filtru 1. řádu a vyrovnané propustné pásmo pro řád filtru  $N = 6$  s řádově větším útlumem v nepropustném pásmu.

## 7.5 Návrh filtru

Filtr typu Butterworth je navržen pomocí funkce **butter** dostupné v prostředí Matlab. Vstupními parametry návrhu je řád filtru  $N$  a vektor mezních frekvencí propustného pásma  $f_1$  a  $f_2$ . Frekvence jsou vyjádřeny vydělením hodnotou  $fs/2$  v hodnotách normalizované frekvence v rozsahu  $(0,1)$  [rad/s]. Hodnota mezních frekvencí je získána z návrhu kurtogramem jako hodnota



Obrázek 7.3: Porovnání řádu filtru Butterworth

centrální frekvence  $f_c \pm$  polovina šířky pásma  $BW$  určené kurtogramem, viz vztahy 7.3. Získané koeficienty filtru  $[b, a]$  jsou společně s proměnnou `signal` vstupem do funkce `filter`. Výsledný signál `y_filtered` obsahuje zvýrazněné pásmo frekvencí s maximální špičatostí a je vhodný pro následnou frekvenční analýzu závady.

$$\begin{aligned} f_1 &= f_c - BW/2 \\ f_2 &= f_c + BW/2 \end{aligned} \quad [\text{Hz}] \quad (7.3)$$

```
[b,a] = butter(N,[f1 f2]/(fs/2));
y_filtered = filter(signal,b,a);
```

Kód 7.2: Příklad návrhu filtru funkcí `butter`

## 7.6 Hilbertova transformace a výpočet obálky

Frekvenční analýza filtrovaného signálu je provedena pomocí Fourierovy transformace obálky pomocí FFT (Fast Fourier Transform). Obálku signálu lze získat různými metodami (např. lfiltrací kepra [23]). Dle [24] je pro následnou analýzu zvolena obálka získaná Hilbertovou transformací. Hilbertova transformace je účinný analytický krok lineárního operátoru. Transformace je definována následujícím vztahem 7.4 jako konvoluce signálu  $s(t)$  s výrazem  $\frac{1}{\pi t}$  [25].

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{\pi} (s(t) * \frac{1}{t}) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (7.4)$$

Hilbertova transformace má zásadní vliv na spektrum signálu. Její vyjádření ve frekvenční oblasti je dle vztahu 7.5. Hilbertova transformace zavádí fázový posun kladné části spektra o  $-\frac{\pi}{2}$  a záporné části spektra o  $+\frac{\pi}{2}$ .

$$\mathcal{F}(\mathcal{H}(u))(\omega) = -j \operatorname{sgn}(\omega) \cdot \mathcal{F}(u)(\omega) \quad (7.5)$$

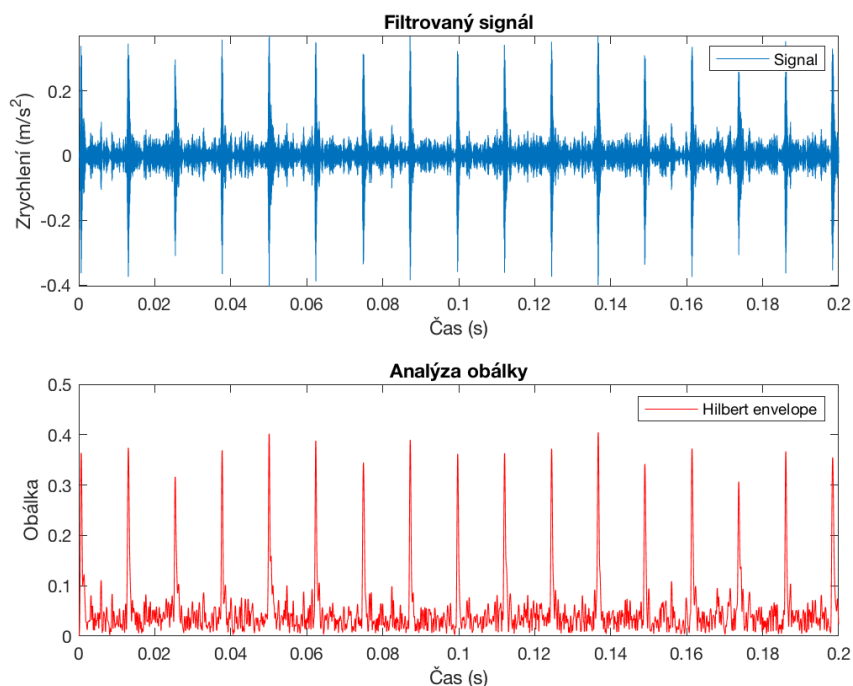
Těmito kroky HT formuje komplexní signál s jednostranným spektrem  $z(t) = s(t) + j\hat{s}(t)$ , který je komplexní obálkou původního signálu. Absolutní hodnota signálu  $z(t)$  je poté reálná okamžitá obálka, ze které lze vypočítat obáلكové spektrum pomocí FFT.

Hilbertovu transformaci lze numericky aproximovat. Pro získání obálky `envelope` filtrovaného signálu `y_filtered` je v postupu analýzy použita dostupná funkce Matlabu `hilbert.m`. Z jejího komplexního výstupu je vypočtena absolutní hodnota a obálka je dále vyhlazena mediánovým filtrem `medfilt1()` o délce  $M = 5$ .

```
envelope = medfilt1(abs(hilbert(y_filtered)),M);
```

Kód 7.3: Příklad výpočtu obálky v prostředí Matlab funkcí `hilbert`

## 7.6. Hilbertova transformace a výpočet obálky



Obrázek 7.4: Časový průběh signálu `sig_n22.mat` ložiska **NICE** a jeho obálky

Na obrázku 7.4 je porovnán časový průběh vybraného signálu `sig_n22.mat` ložiska **NICE** s obálkou získanou Hilbertovou transformací.

Z takto získané obálky je vypočtena diskrétní Fourierova transformace pro následnou frekvenční analýzu signálů závad. Na obrázku 8.1 je ilustrováno typické spektrum poruchového signálu analyzovaného metodou kurtogramu. Další výsledky frekvenční analýzy databáze jsou v následující kapitole 8.



---

## Analýza modelované databáze

Pro ověření charakteru signálů databáze vytvořené v kapitole 5 a principů metod popsaných v kapitolách 6 a 7 jsou v této kapitole prezentovány výsledky detekce závad vygenerovaných signálů. Načtením libovolného signálu databáze `sig_nYX.mat` získáme následující proměnné:

- `signal` - vektor generovaných dat signálu
- `SNR` - hodnotu odstupu signálu od šumu [dB]
- `n` - počet kuliček analyzovaného ložiska [-]
- `fs` - vzorkovací frekvenci [Hz]
- `fr` - základní frekvenci otáčení [Hz]
- `fc` - rezonanční frekvenci pulzů závady [Hz]
- `d` - průměr kuličky [m]
- `D` - průměr ložiska (kulička - kulička) [m]
- `BPFI` - teoretická frekvence závady vnitřního kroužku [Hz]
- `BPFO` - teoretická frekvence závady vnějšího kroužku [Hz]
- `BSF` - teoretická frekvence závady kuličky [Hz]
- `FTF` - teoretická frekvence klece kuliček [Hz]
- `amps` - vektor koeficientů harmonických frekvencí nevývahy
- `contact_angle` - kontaktní úhel  $\alpha$  [rad] (viz kapitola 2)

Některá načtená data by v typické úloze analýzy reálného signálu nebyla dostupná. Jedná se například o generovanou hodnotu SNR a znalost rezonančního kmitočtu  $f_c$  závady. Tyto hodnoty jsou v databázi uvedeny pro možnost porovnání a pozorování parametrů analyzovaných signálů a mohou sloužit jako kritérium úspěšnosti detekce závady. V provedených metodách analýzy jsou k vyhodnocení použita data, která je možné odvodit ze znalosti rozměru ložiska a rychlosti otáčení stroje  $f_r$ . Jedná se tedy typicky o hodnoty odvozených poruchových frekvencí. Postup analýzy lze stejným způsobem aplikovat na reálná data. Metoda kurtogramu již byla použita v analýze reálné databáze [4] v kapitole 3.

## 8.1 Hodnoty poruchových frekvencí

Z předpokladu známé otáčkové frekvence stroje  $f_r$  a modelu ložiska lze ze vztahů 2.1 - 2.4 dopočítat teoretické hodnoty chybových frekvencí shodných s hodnotami použitých pro generátor databáze. Tyto frekvence pro jednotlivé typy ložisek z vytvořené databáze jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Tabulka 8.1: Poruchové frekvence jednotlivých typů ložisek

typ ložiska	NICE	Koyo 1205	SKF 608	SKF 6024
BPFI [Hz]	119	71	222	123
BPFO [Hz]	81	49	128	77
BSF [Hz]	128	52	174	103

## 8.2 Detekce závady

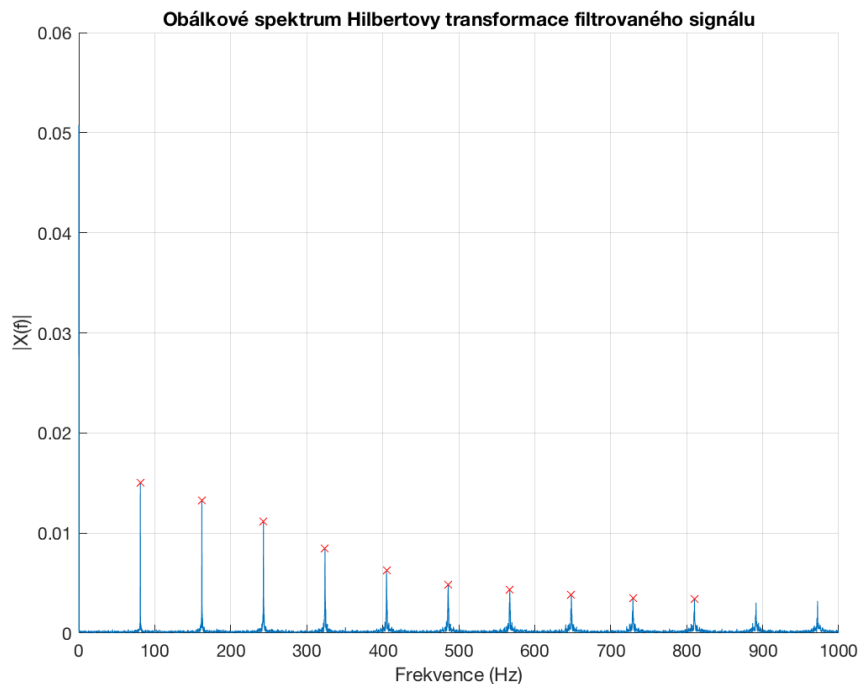
Ze zobrazeného obálkového spektra analyzovaného signálu je možné analyzovat frekvenci pulzů generovaných závadou. Pro poloautomatizovanou detekci pulzů je použita funkce Matlabu `findpeaks`, která určí hodnoty a indexy lokálních maxim. Funkci lze nastavit minimální úroveň maxima, počet detekovaných maxim a jejich minimální rozestup. Počet detekovaných maxim je nastaven na prvních 10 harmonických násobků a jejich minimální rozestup teoretickou hodnotou *BPFO*, která je dle porovnání hodnot z tabulky 8.1 vždy nejmenší, což odpovídá propozici v kapitole 2.

```
[PKS,LOCS] = findpeaks(spec,...
'NPeaks',NP,'Threshold',TH,'MinPeakDistance',MPD);
```

Kód 8.2: Příklad nastavení funkce `findpeaks`

Kde proměnné *PKS* a *LOCS* jsou vektory hodnoty a indexu lokálních maxim. Proměnná *spec* je analyzované spektrum.  $NP = 10$  udává počet určených

špiček spektra.  $TH = 10^{-6}$  udává minimální úroveň lokalizované špičky a  $MPD = BPFO$  [Hz] odpovídá minimální možné vzdálenosti špičky závady ve spektru. Ukázka lokalizovaných špiček ve spektru je na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1: Spektrum obálky signálu `sig_n22.mat` ložiska **NICE** s detekovanými pulzy

Hodnota frekvence prvního impulsu udává frekvenci detekované závady. Další pulzy harmonických násobků by při správné detekci měly ležet v ekvidistantní vzdálenosti o hodnotě charakteristické frekvence detekované závady. Při detekci prvních několika harmonických násobků ve spektru lze určit jejich vzdálenost pomocí difference ze vztahu 8.1.

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1}, \quad i = 2, \dots, N. \quad (8.1)$$

Kde  $x_i$  je hodnota pozice pulzu na frekvenční ose ve spektru a  $x_{i-1}$  je pozice předchozího pulzu. Při očekávané ekvidistantní vzdálenosti pulzů by měl být výsledek difference konstantou o hodnotě charakteristické frekvence závady. Při lokalizaci prvních 10 harmonických násobků je výsledek jejich difference vektor o 9 prvcích dle principu předpisu vztahu difference 8.1. Střední hodnota tohoto vektoru dle vztahu 8.2 je odhadem frekvence závady  $BPF$ , která je následně porovnána s teoretickými hodnotami jednot-

livě pro  $BPFI$ ,  $BPFO$ ,  $BSF$ . U správné detekce se shoduje s vybranou teoretickou frekvencí závady. Výsledek difference určených frekvenčních hodnot špiček spektra je jedním z kritérií úspěšné detekce závady.

$$BPF = \frac{1}{9} \sum_{i=2}^{10} \Delta x_i \quad (8.2)$$

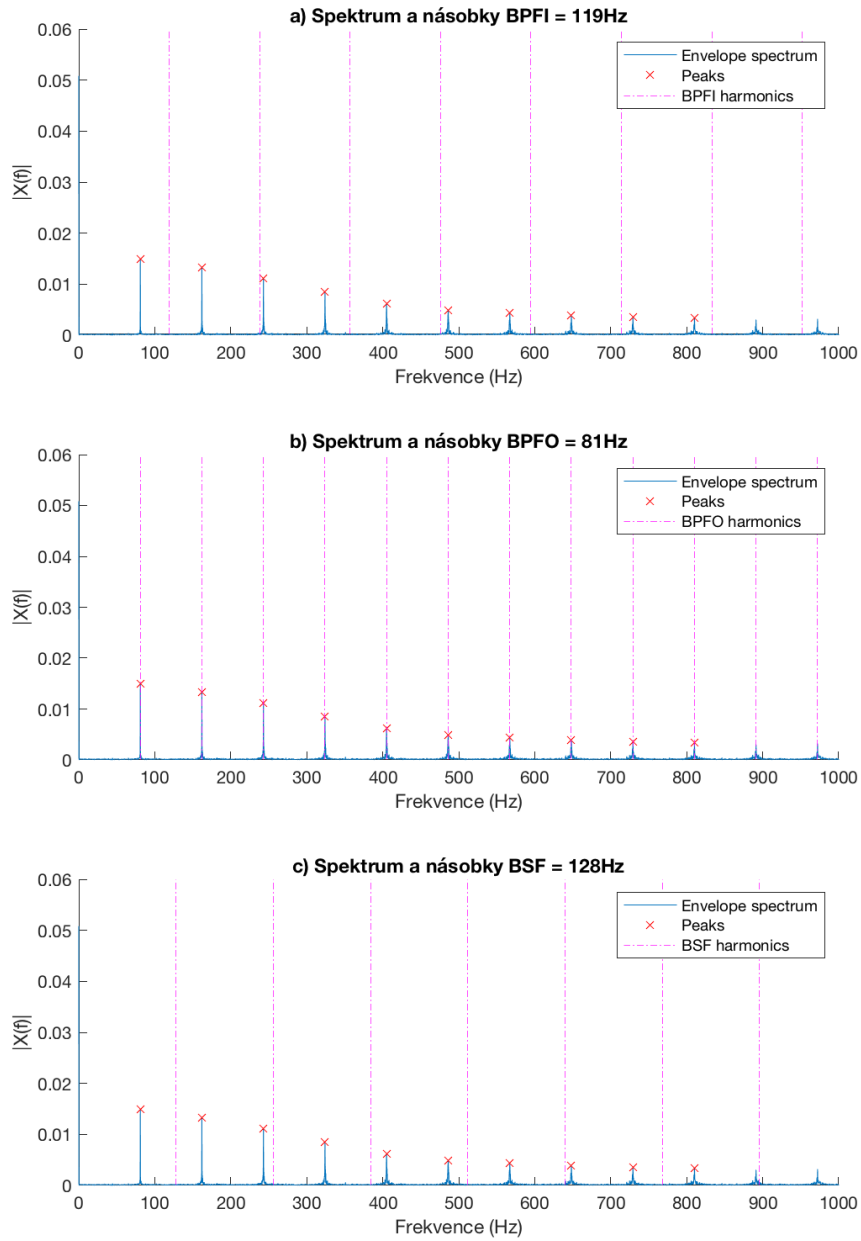
### 8.3 Porovnání spektra s hodnotami poruchové frekvence

Pulzy lze analogicky určit přímo z grafického zobrazení spektra pozorováním. Při grafické analýze spektra jednoho poruchového signálu lze do spektra postupně vykreslit teoretické hodnoty chybových frekvencí jednotlivých závad. Toto spektrum je postupně třikrát zobrazeno na obrázku 8.2 a), b) c). Veřvypočteném obálkovém spektru by se v případě detekované závady měly špičky impulzů spektra překrývat s jednou z teoretických hodnot chybových frekvencí viz obrázek 8.2 b). Při jiném typu závady by se spektrum analyzovaného signálu překrylo s hodnotami v grafu 8.2 a) případně c). Z uvedené hodnoty odhadu frekvence závady  $BPF$  v hlavičce obrázku lze porovnat teoretickou hodnotu detekované závady a její odhad.

### 8.3. Porovnání spektra s hodnotami poruchové frekvence

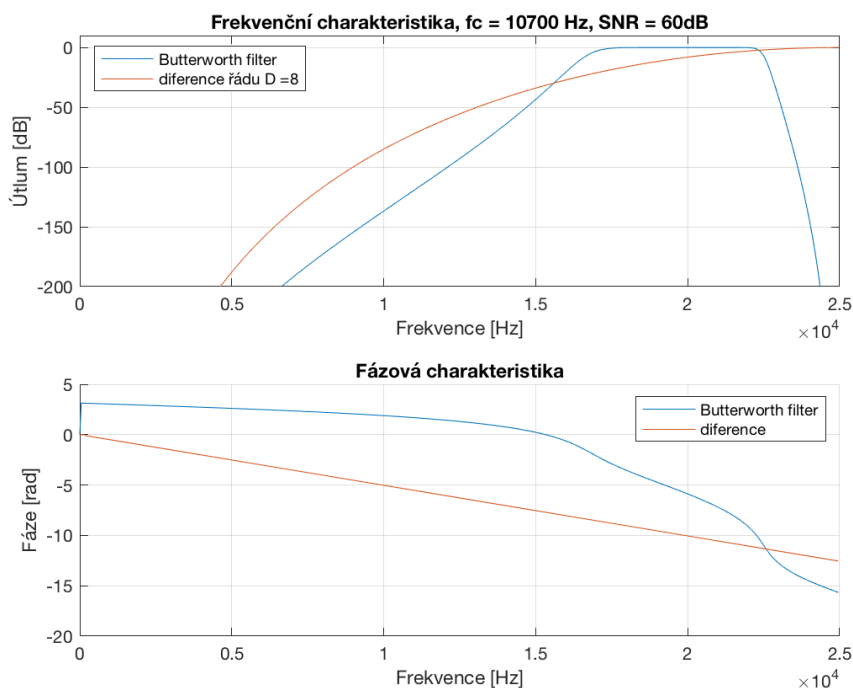
Obálkové spektrum Hilbertovy transformace filtrovaného signálu: sig\_n22

odhad frekvence poruchy: 81Hz



Obrázek 8.2: Porovnání spektra obálky signálu sig\_n22.mat ložiska NICE

- a) Spektrum závady BPFO s vnesenými násobky teoretické BPFI
- b) Spektrum závady BPFO s vnesenými násobky teoretické BPFO
- c) Spektrum závady BPFO s vnesenými násobky teoretické BSF



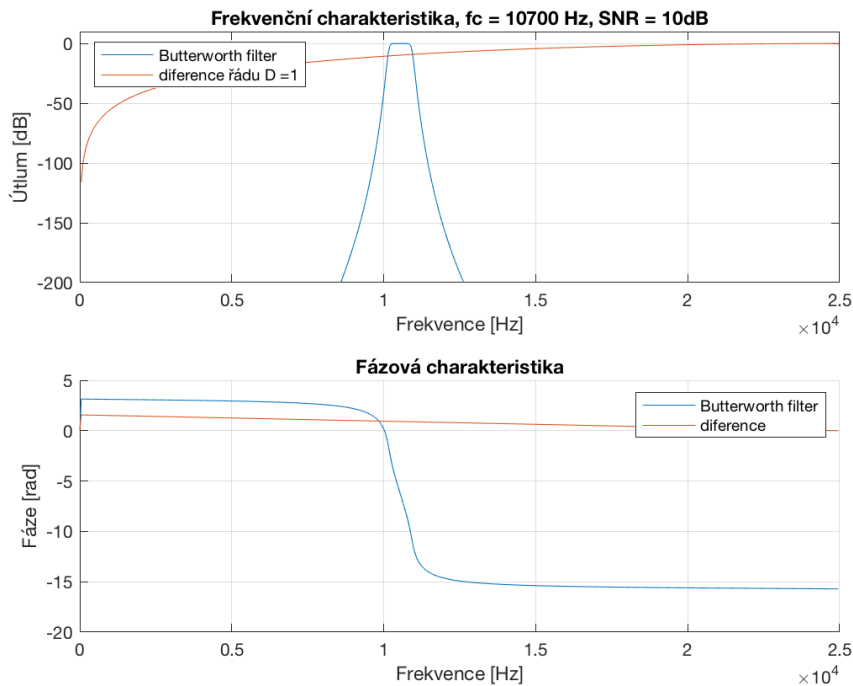
Obrázek 8.3: Frekvenční a fázová charakteristika filtrace a diference (vysoké SNR)

## 8.4 Frekvenční charakteristika filtrace a diference

Na obrázku 8.3 je porovnávána frekvenční charakteristika optimální diference řádu 8 první metody z kapitoly 6 a metody analýzy navrženého filtru pomocí kurtogramu z kapitoly 7. Obrázek je uveden pro analyzovaný signál ložiska **NICE sig\_n61.mat** s generovaným vysokým SNR 60 dB. Propustné pásmo filtru je navrženo dle výstupu kurtogramu s hodnotami  $f_c = 20833$  Hz a  $BW = 8333$  Hz. Ve frekvenční charakteristice je shoda obou metod v potlačení nízkých kmitočtů. Obě metody odhalí nezarušené impulzy, které mají širokopásmový vysokofrekvenční charakter.

Postupnou analýzou signálů s klesající hodnotou SNR lze sledovat rozdíl v návrhu obou metod především na rozdílné frekvenční charakteristice filtrace signálu. Na obrázku 8.4 je pro shodné ložisko s obrázkem 8.3 vynesena frekvenční charakteristika zpracování signálu diferencí a filtrace signálu generovaného s hodnotou  $SNR = 10$  dB. Návrh optimálního řádu diference s ohledem na maximální špičatost určí pro zašuměný signál ideální řád diference  $D_{max} = 1$ . Takto navržená diference má menší útlum nízkých kmitočtů. Vypočtené spektrum diferencovaného signálu stále obsahuje impulzy závad,

#### 8.4. Frekvenční charakteristika filtrace a diference



Obrázek 8.4: Frekvenční a fázová charakteristika filtrace a diference (nízké SNR)

kteří začíná maskovat úroveň šumu. Další zvyšování úrovně šumu, který prostou diferencí řádu 1 nelze potlačit, zamaskuje špičky ve spektru a metoda detekce závady pomocí diference selhává.

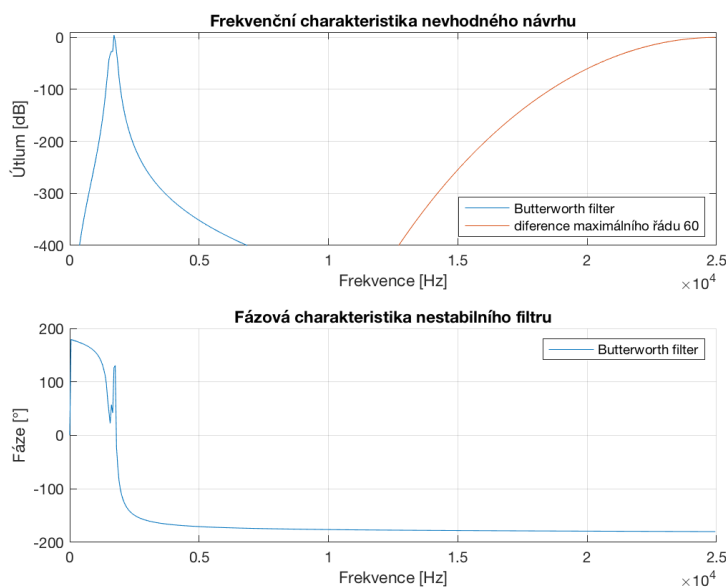
Na obrázku 8.4 lze pozorovat výhodu optimální filtrace navržené metodou kurtogramu, která potlačí širokopásmový šum a zvýrazní pásmo určené rezonanční frekvence  $f_c$  impulzů závady. Následná frekvenční analýza tak není zkreslená šumem a proto funguje i pro vysoké úrovně šumu. Metoda kurtogramu vykazuje robustnější chování na analyzovaných datech, vyžaduje ale sofistikovanější přístup a kontrolu požadované optimální šířky pásma a navrženého filtru. Při vysoké úrovni SNR a dominantnímu charakteru širokopásmových pulzů může vést návrh kurtogramu na filtr typu doplní propust, který nepotlačuje nízkofrekvenční signály nevývahy. Další selhání metody kurtogramu může být požadavek velmi úzké šířky pásma, která vede k návrhu nestabilního filtru. Nestabilní filtr znehodnotí výstupní data a neumožní další kroky analýzy. Pro tento krok je vhodné zařadit kontrolní kritérium analýzy stability pomocí modulu pólů navrženého filtru.

## 8.5 Nevhodný návrh

Na obrázku 8.5 je ilustrace typického selhání v případě obou metod. Jedna z příčin selhání difference je rostoucí vývoj maximální špičatosti a návrh optimálního řádu pro maximální řád  $D_{top} = 60$ . Frekvenční charakteristika takové difference tlumí obvykle i rezonanční kmitočet impulzů závady a metoda nevede k úspěšné detekci závady. Možným řešením je omezení maximálního řádu difference, pokud její průběh roste a určí maximum špičatosti pro poslední analyzovaný řád.

Návrh filtru pomocí kurtogramu pro požadovanou centrální frekvenci  $f_c = 3242$  Hz a šířku pásma  $BW = 381$ , získanou při analýze reálného signálu závady `OuterRaceFault_2.mat` z databáze [4], je příkladem návrhu nestabilního filtru. Průběh fázové charakteristiky na obrázku 8.5 vykazuje tuto nestabilitu. Kontrola stability filtru může být provedena výpočtem modulu pólů s následnou kontrolou jejich modulů:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^P b_i z^{-i}}{1 + \sum_{j=1}^Q a_j z^{-j}} = \frac{Y(z)}{1 + X(z)} = \frac{Y(z)}{\prod_{j=1}^Q (z - p_j)}; \quad |p_j| < 1; \quad (8.3)$$



Obrázek 8.5: Ukázka frekvenční charakteristiky nevhodného návrhu filtru a vysokého řádu difference



## 8.6 Analýza vzorových a specifických signálů

V příloze B práce jsou uvedeny některé výsledky analýzy různorodých signálů pro všechny 4 typy ložisek vytvořené databáze. Kompletní výsledky analýzy jsou dostupné v adresáři `pictures` složky každého ložiska dle popisu databáze na obrázku 5.2.

Na vzorovém obrázku B.1 je analyzována závada vnitřního kroužku ložiska **Koyo 1205** metodou difference. Z průběhu B.1 a) je patrný překryv teoretických hodnot *BPFI* se špičkami spektra signálu. Totožné spektrum je porovnáno s teoretickými hodnotami *BPFO* B.1 b) a *BSF* B.1 c). Z hodnoty odhadu frekvence poruchy 71 Hz a překryvu s teoretickými hodnotami *BPFI* odpovídá výsledek analýzy předpokladu. Metoda difference je takto ověřena na signálech s vysokým SNR. Na tomto spektru závady lze pozorovat typický jev amplitudové modulace otáčení vnitřního kroužku.

Obrázek B.2 analyzuje specifický signál ložiska **Koyo 1205** s modelovaným dvojitým nárazem kuličky na prasklinu o definované šířce. Průběh B.2 b) ilustruje překryv spektra závady s teoretickými hodnotami *BPFO*. Typ závady ložiska je tedy i pro tento signál určen korektně jako závada vnějšího kroužku. Průběh B.2 a) je totožné spektrum závady *BPFO* porovnané s teoretickými hodnotami *BPFI* a analogicky Průběh B.2 c) je průběh totožného spektra porovnan s teoretickými hodnotami *BSF*. Toto spektrum nevykazuje amplitudovou modulaci.

Signál ložiska **SKF 6024** se závadou praskliny na kuličce je analyzovaný na obrázku B.3. Ve spektru jsou patrné sudé násobky teoretické hodnoty závady *BSF* a amplitudová modulace frekvencí *FTF*. Proto se překryv spektra a teoretických hodnot projeví na průběhu B.3 c), ale pouze se sudými násobky harmonických frekvence *BSF*. Automatické určení hodnoty poruchové frekvence není správné. Konstantně nastavená minimální vzdálenost detekce špiček selhává pro vynechané liché násobky špiček. Detekce poruchy praskliny kuličky je ale patrná z grafického zobrazení a překryv totožného spektra nastane pro průběh frekvencí *BPFI* B.3 a) nebo *BPFO* B.3 b).

Ložisko **SKF 608** se jako jediné vyznačuje otáčením vnějšího kroužku a statickým vnitřním kroužkem. Na obrázku B.4 je patrná amplitudová modulace právě při analýze poruchy vnějšího kroužku. Signál je analyzován metodou kurtogramu a detekce některých špiček je amplitudovou modulací zkreslena. Na grafickém výstupu je ale průběh závady patrný. Překryv spektra a teoretických hodnot frekvence závady nastane pro průběh B.4 b). Na průběhu totožného spektra vůči teoretickým hodnotám *BPFI* B.4 a) a *BFS* B.4 c) k překryvu nedojde.

Pro analyzovaný signál ložiska **NICE** je vybraný případ generovaného signálu bez závady. Na obrázku B.5 je spektrum signálu zpracovaného metodou difference a i pro nízké SNR je průběh spektra hladký a bez přítomných impulzů závady. Průběh tohoto spektra vůči všem poruchovým frekvencím B.5 a), b), c) se dle předpokladu nepřekryje.

---

## Závěr

Hlavním cílem této práce zaměřené na detekci vad ložisek bylo vytvoření a zpracování databáze vygenerovaných signálů typických závad ložisek. Práce se zabývá pouze popisem valivých ložisek. V kapitole 1 a 2 je představena problematika vibrodiagnostiky a analýza vibrací typických závad. Pro tyto závady jsou definovány jejich charakteristické frekvence *BPFI*, *BPFO* a *BSF* v závislosti na rychlosti otáčení  $f_r$ . Další zpracování analýzy těchto frekvencí je vždy vztaženo ke konstantní hodnotě rychlosti otáčení ložiska  $f_r$ . Z úvodu do přehledu analýzy měřených signálů je diskutována motivace pro tvorbu databáze generovaných signálů pro modelované parametry jednotlivých typů ložiska. Jeden ze základních bodů motivace je možnost vytvoření různorodých trénovacích dat pro následné statistické zpracování analýzy měřených signálů a možnosti detekce konkrétní závady a lokalizace poruchy.

V kapitole 3 jsou analyzovány parametry reálných stacionárních signálů dostupné databáze. Analýza reálných signálů dává opodstatněný základ pro modelování signálů, které svou variací a možností nastavení parametrů odpovídají typickým průběhům naměřených signálů závad ložisek. V kapitole 4 je podrobně popsán model generování signálů pro jednotlivé typy závad a pro jejich specifické případy. Parametry modelu jsou opřeny a předchozí analýzu reálných dat a generovaná data mají několik kontrolních bodů pro dodržení mezi reálného chování ložiska.

Z modelovaných signálů je dále v kapitole 5 sestavena databáze pro vybrané 4 modely reálných ložisek. Výběr typů ložisek vychází z jejich užití v praxi a nebo odpovídá modelu ložisek popsáných při analýze reálných signálů. Tvorba databáze na základě rozměrů ložiska je vhodná pro další využití generátoru databáze pro jiný typ ložiska. Nová databáze pak může sloužit pro porovnání naměřených dat, případně pro rozšíření trénování dat modelů statistického zpracování nebo pro ověření metod analýzy typických závad.

Pro ověření výstupních dat databáze jsou v práci představeny dvě odlišné metody analýzy poruchových vad. První metoda je popsána v kapitole 6.

---

Tato metoda vychází z úpravy signálu pomocí diference a následné frekvenční analýzy obálky. Tato metoda má obecně jednodušší princip a nastavení optimální úrovně diference závisí na celkové hodnotě špičatosti signálu. Navržený optimální řád diference je jedním z kritérií následné účinnosti této metody. Navržený 1. řád diference nemusí vést na dostatečné potlačení šumu signálu. Další selhání metody nastává v případě návrhu maximální úrovně diference, která potlačí rezonanční kmitočty detekovaných závad.

V kapitole 7 je popsána zavedená metoda analýzy pomocí kurtogramu. Analýza signálu pomocí kurtogramu umožňuje vyhledat lokální maximum špičatosti ve frekvenčním pásmu a následnou filtraci definovaného pásma. Úspěšnost metody poté záleží na návrhu optimálního filtru pro potlačení šumu a jiných deterministických signálů. Pro metodu kurtogramu je uvedeno jako vhodné kritérium účinnosti detekce kontrola stability navrženého filtru. Kontrola stability filtru probíhá pomocí analýzy modulu jeho pólů.

Signály databáze jsou po výběru uvedených metod analýzy poruchových signálů zpracovány v kapitole 8. Jako referenční metoda je zvolena metoda kurtogramu a výsledky jsou porovnány s metodou analýzy pomocí diference signálu. Referenční metoda provádí úspěšnou detekci i na silně zašuměných signálech. Nad rámec zadání práce jsou výsledky metod analýzy použity k detekci typu závady, které je možné pozorovat v obálkovém spektru analyzovaných signálů. Další metody pokročilejší lokalizace a detekce typu závady je vhodné rozšíření práce. Použité metody jsou navrženy pro zpracování signálů s konstantní otáčkovou frekvencí ložiska. Souběžně s touto prací je psána práce [26], která se zabývá nestacionárním průběhem otáčkových frekvencí. Při zpracování nestacionárních signálů s proměnnou rychlostí otáčení ložiska je třeba využít jiné metody, případně signál segmentovat do vhodných stacionárních úseků.

---

## Literatura

- [1] Antoni, J.: Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*, ročník 21, č. 1, 2007: s. 108–124, ISSN 0888-3270, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.12.002>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327005002414>
- [2] Sawalhi, N.: Rolling element bearings localized fault diagnosis using signal differencing and median filtration. *Journal of Vibroengineering*, ročník 20, č. 3, may 2018: s. 1322–1339, doi:10.21595/jve.2017.18254. Dostupné z: <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18254>
- [3] Randall, R. B.; Antoni, J.: Rolling element bearing diagnostics—A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, ročník 25, č. 2, 2011: s. 485–520, ISSN 0888-3270, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327010002530>
- [4] Bechhoefer, E.: *Condition Based Maintenance Fault Database for Testing Diagnostics and Prognostic Algorithms [online]*. MFPT, 2013, [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.mfpt.org/fault-data-sets/>
- [5] Dolníček, P.: *Rešeršní studie zaměřená na vzduchová ložiska*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, 2015.
- [6] Kičák, M.: *Návrh databáze pro měření stavu ložisek zabíhacích válců*. Diplomová práce, České vysoké učení v Praze, 2018.
- [7] Vaculka, M.: *Návrh metodiky výpočtu životnosti valivého ložiska*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, 2016.
- [8] McFadden, P.; Smith, J.: Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *Journal of Sound*

- and Vibration*, ročník 96, č. 1, 1984: s. 69–82, ISSN 0022-460X, doi: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(84\)90595-9](https://doi.org/10.1016/0022-460X(84)90595-9). Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022460X84905959>
- [9] Worden, K.; Staszewski, W. J.; Hensman, J. J.: Natural computing for mechanical systems research: A tutorial overview. *Mechanical Systems and Signal Processing*, ročník 25, č. 1, 2011: s. 4–111, ISSN 0888-3270, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.013>.
- [10] Xin, G.; Hamzaoui, N.: Semi-automated diagnosis of bearing faults based on a hidden Markov model of the vibration signals. *Measurement*, ročník 127, 05 2018, doi:[10.1016/j.measurement.2018.05.040](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.040).
- [11] Yu, G.; Li, C.; Sun, J.: Machine fault diagnosis based on Gaussian mixture model and its application. *Int J Adv Manuf Technol*, ročník 48, 2010: s. 205–212. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2283-5>
- [12] McInerney, S.; Dai, Y.: Basic vibration signal processing for bearing fault detection. *IEEE Transactions on Education*, ročník 46, č. 1, 2003: s. 149–156, doi:[10.1109/TE.2002.808234](https://doi.org/10.1109/TE.2002.808234).
- [13] Chandravanshi, M.; Poddar, S.: Ball Bearing Fault Detection Using Vibration Parameters. *International Journal of Engineering Research I&T Technology*, ročník 2, 12 2013.
- [14] Rektorys, K.: *Přehled užití matematiky I*. Praha: Prometheus, 7 vydání, 2000, ISBN 80-7196-180-9.
- [15] Konstantin-Hansen, H.: *Envelope Analysis for Diagnostics of Local Faults in Rolling Element Bearings*. Bruel and Kjaer, 2021, [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/bo0501.pdf>
- [16] Životský, P.: *Chybové frekvence ložisek*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, 2008.
- [17] Franklin, G. F.; Powell, D. J.; Emami-Naeini, A.: *Feedback Control of Dynamic Systems*. USA: Prentice Hall PTR, čtvrté vydání, 2001, ISBN 0130323934.
- [18] Sawalhi, N.; Randall, R.: Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults: Part I. The combined gear bearing dynamic model and the simulation of localised bearing faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*, ročník 22, č. 8, 2008: s. 1924–1951, ISSN 0888-3270, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.12.001>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327007002725>
- [19] ISO: *ISO 683-17:2014 Heat-treated steels, alloy steels and free-cutting steels — Part 17: Ball and roller bearing steels*. Leden 2015, 25 s.

- 
- [20] Mikulčák, J.: *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: SPN, 1988.
- [21] Kong, F.; Huang, W.; Jiang, Y.; aj.: Research on effect of damping variation on vibration response of defective bearings. *Advances in Mechanical Engineering*, ročník 11, č. 3, 2019: str. 1687814019827733. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1687814019827733>
- [22] Kubíček, A.: Odstraňování šumu z pohybových dat. Bachelor Thesis, 2018, České Vysoké Učení Technické v Praze.
- [23] Nadeu, C.: A simple spectrum estimation technique based on the analytic cepstrum. Barcelona: EUSIPCO, 1990, s. 465–468. Dostupné z: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/84324>
- [24] Alan V Oppenheim, R. W. S.: *Discrete-Time Signal Processing*. Georgia Institute of Technology: Pearson, třetí vydání, 2010, ISBN 9780132158176.
- [25] Johansson, M.: *The Hilbert transform*. Diplomová práce, Växjö University, Sweden, 1999.
- [26] Kubíček, A.: *Bearing fault detection in non-stationary operating conditions*. Diplomová práce, České Vysoké Učení Technické v Praze, 2021.

## Seznam použitých zkratek

**BPMI** Ball pass frequency inner race

**BPMO** Ball pass frequency outer race

**FTF** Fundamental train frequency

**BSF** Ball spin frequency

**MFPT** (Society for) Machinery Failure Prevention Technology

**AWGN** Additive white Gaussian noise

**LS** Least Squares

**SNR** Signal to Noise Ratio

**BW** Band Width

**FFT** Fast Fourier transform

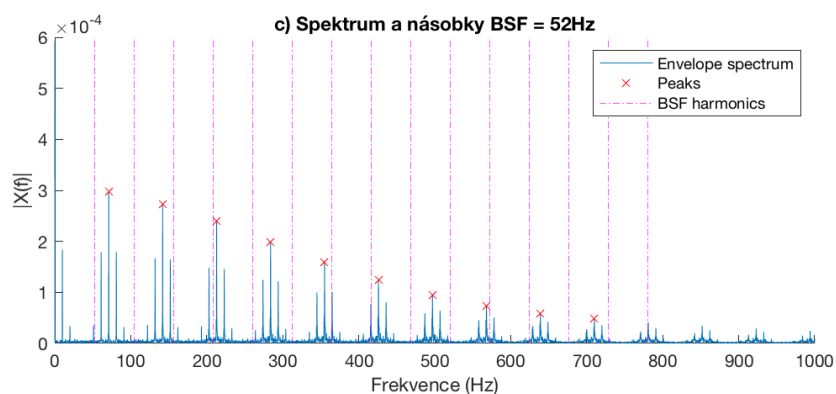
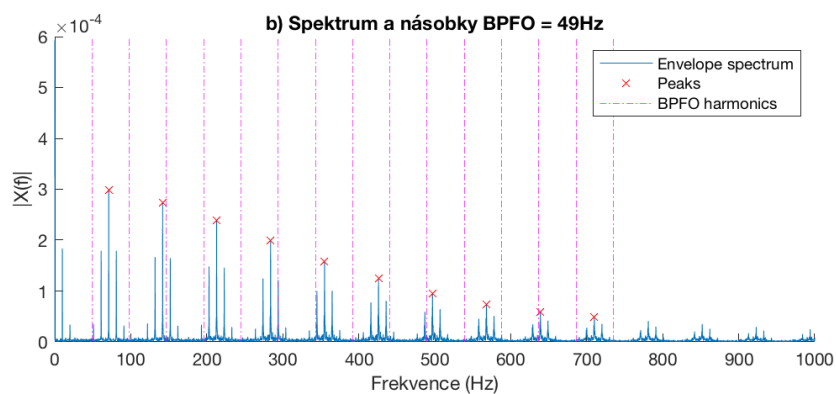
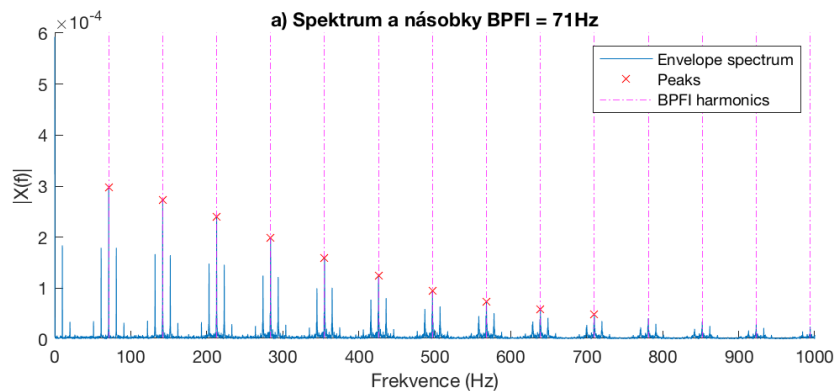
**STFT** Short-time Fourier transform

**PSD** Power spectral density

## Obrázky

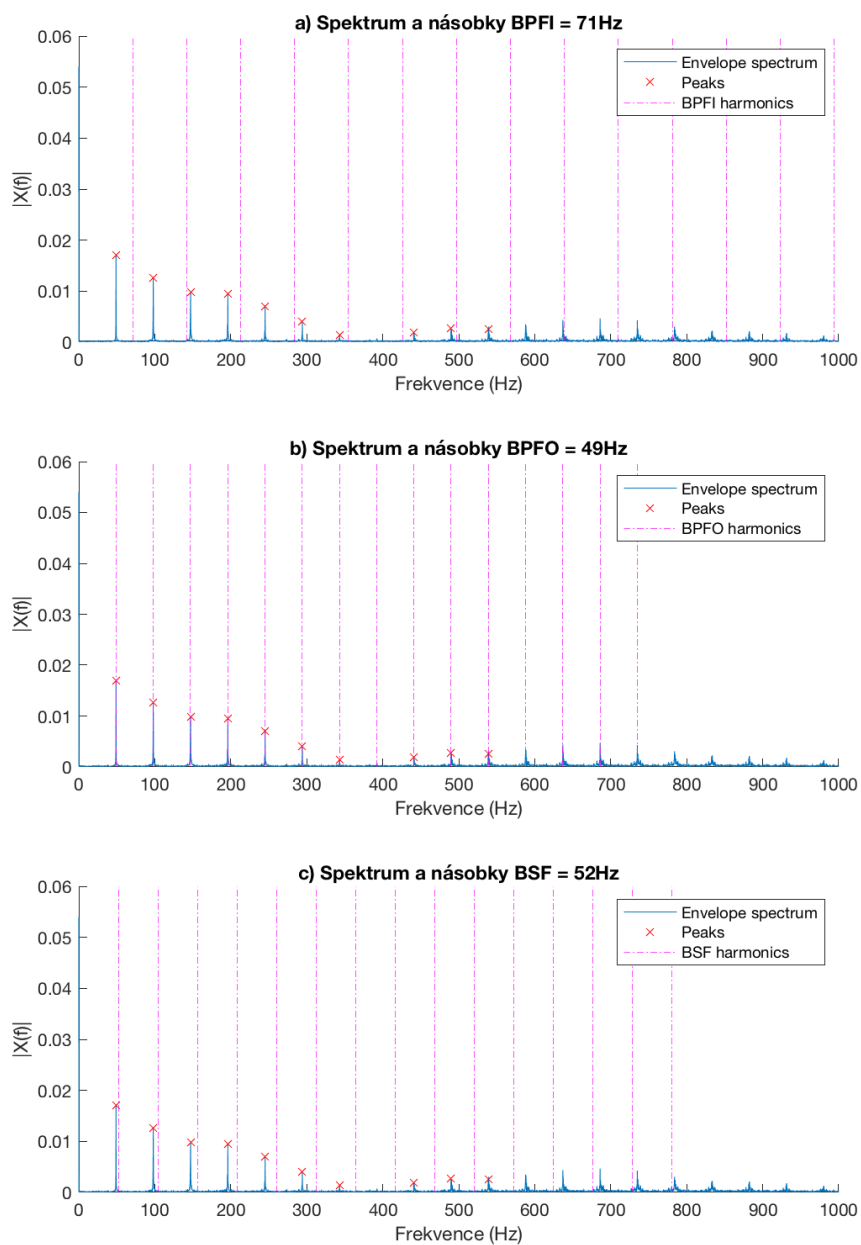


Obálkové spektrum difference signálu: sig<sub>n</sub>61  
 odhad frekvence poruchy: BPF=71Hz



Obrázek B.1: Spektrum obálky signálu sig<sub>n</sub>61.mat ložiska **Koyo 1205**  
 a) Spektrum závady BPFi s vyneseními násobky teoretické BPFi  
 b) Spektrum závady BPFi s vyneseními násobky teoretické BPFo  
 c) Spektrum závady BPFi s vyneseními násobky teoretické BSF

Obálkové spektrum Hilbertovy transformace filtrovaného signálu: sig\_n26  
 odhad frekvence poruchy: BPF=49Hz

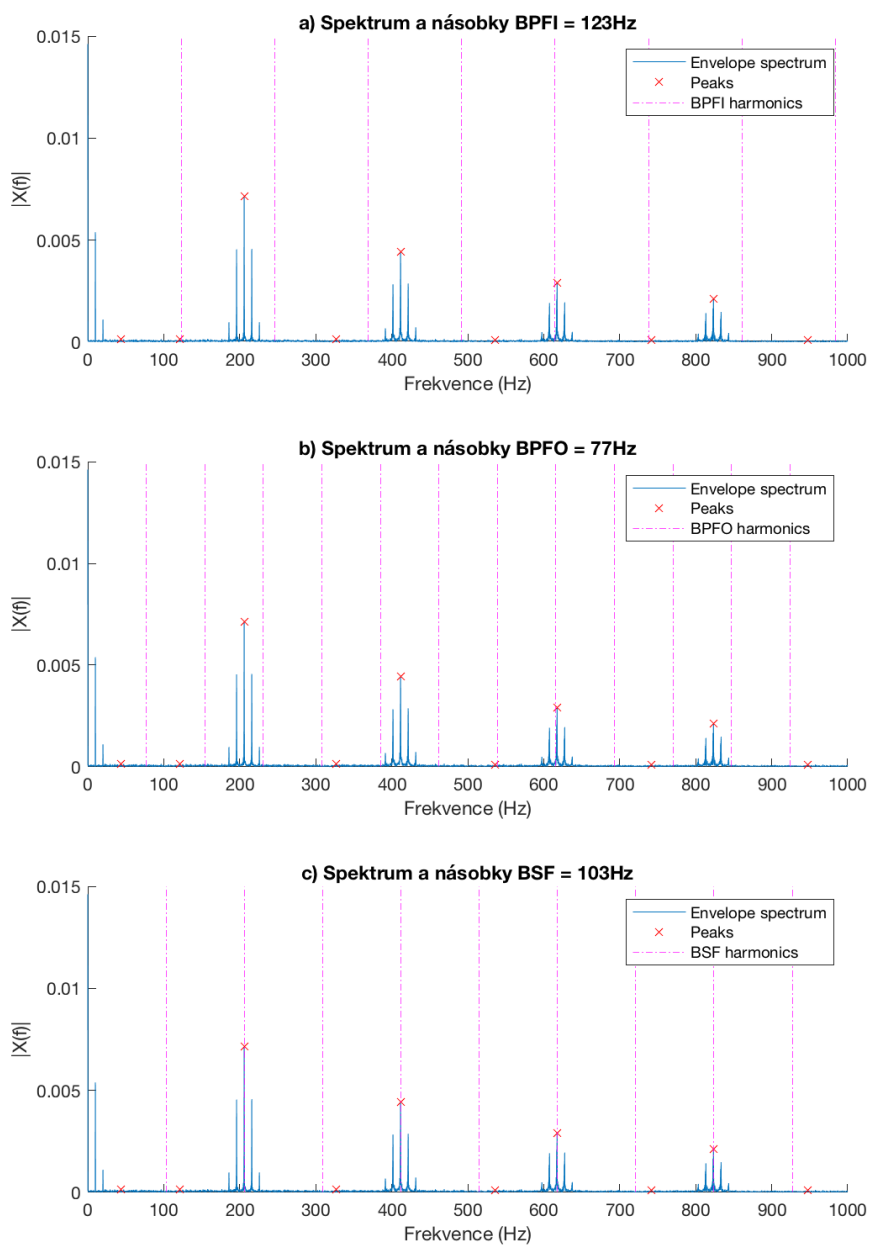


Obrázek B.2: Spektrum obálky signálu sig\_n26.mat ložiska **Koyo 1205**

- a) Spektrum závady BPFO s vnesenými násobky teoretické BPF
- b) Spektrum závady BPFO s vnesenými násobky teoretické BPFO
- c) Spektrum závady BPFO s vnesenými násobky teoretické BSF

Obálkové spektrum difference signálu: sig\_n23

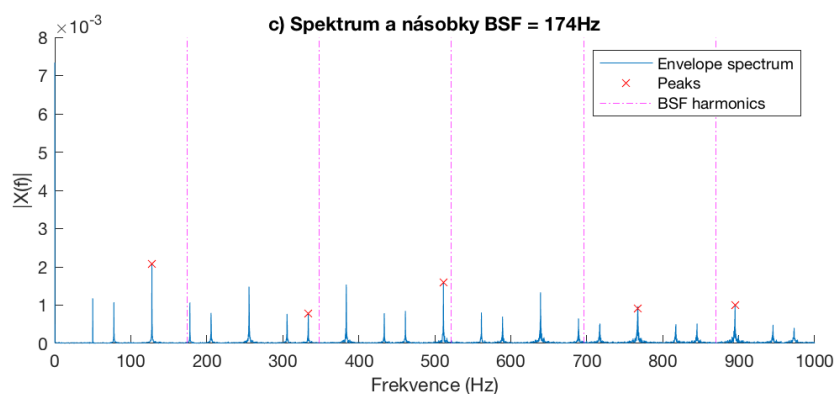
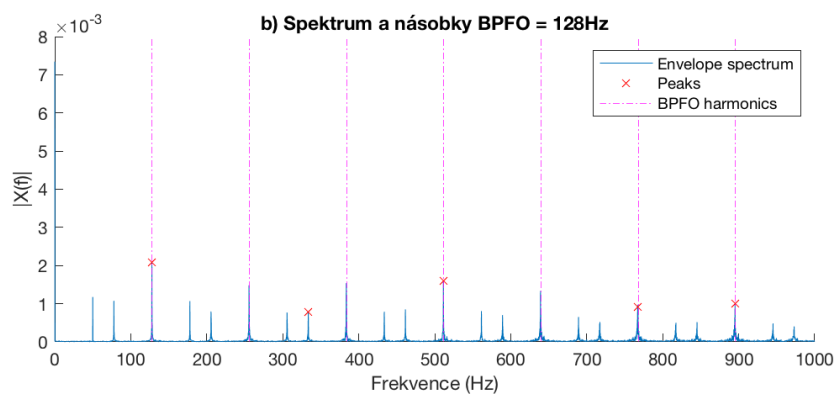
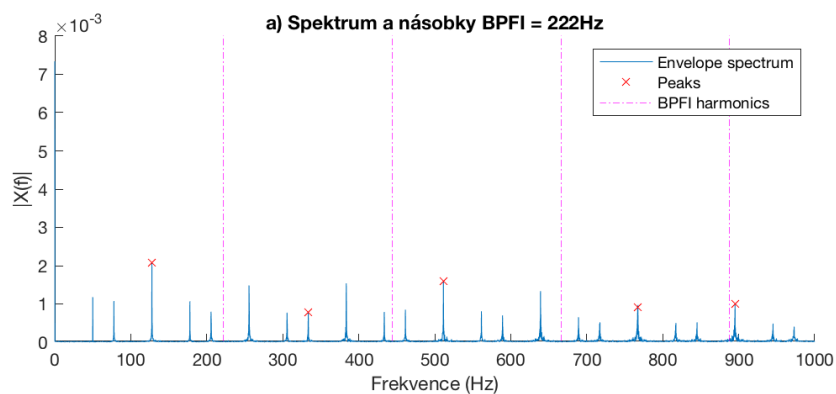
odhad frekvence poruchy: BPF=96Hz



Obrázek B.3: Spektrum obálky signálu sig\_n23.mat ložiska SKF 6024

- a) Spektrum závady BSF s vyneseními násobky teoretické BPF
- b) Spektrum závady BSF s vyneseními násobky teoretické BPFO
- c) Spektrum závady BSF s vyneseními násobky teoretické BSF

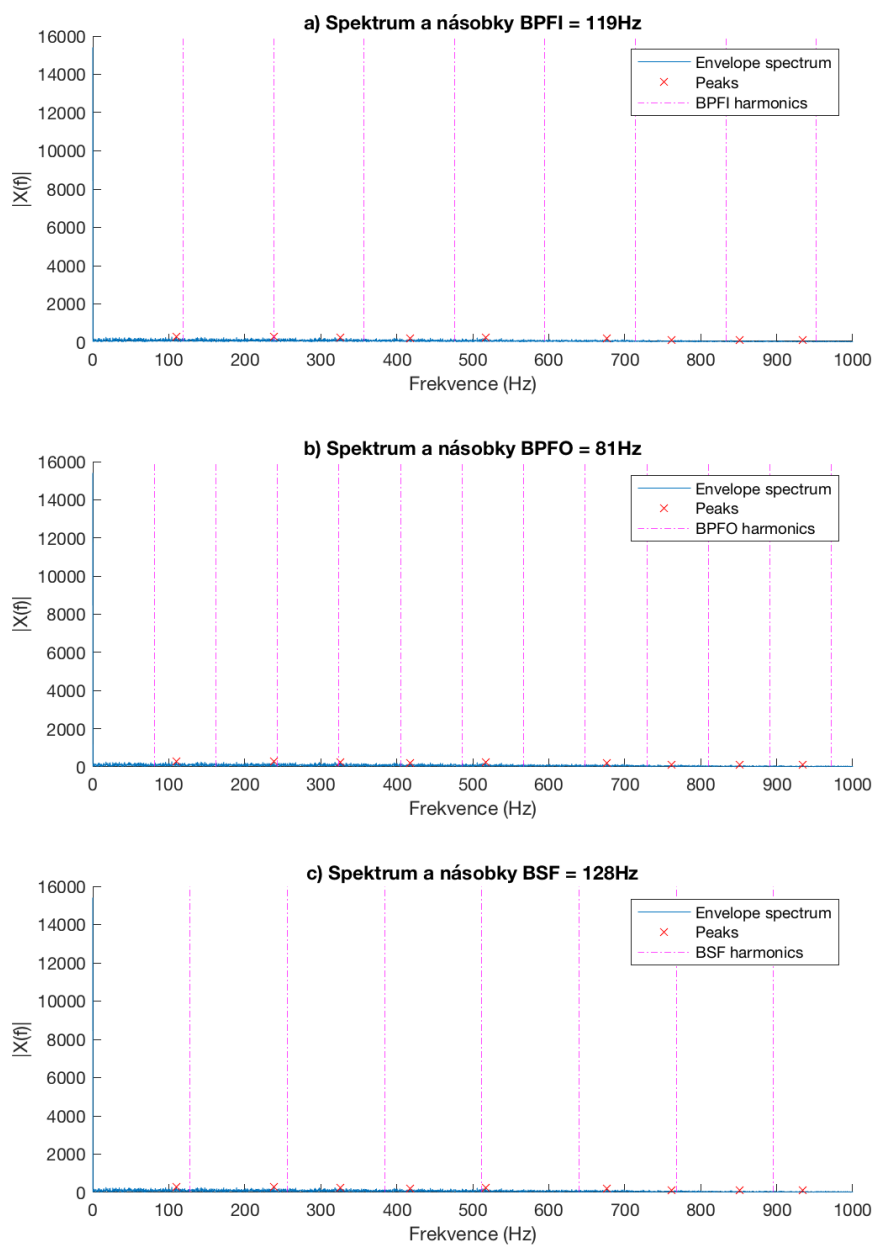
Obálkové spektrum Hilbertovy transformace filtrovaného signálu: sig<sub>n</sub>42  
 odhad frekvence poruchy: BPF=219Hz



Obrázek B.4: Spektrum obálky signálu sig<sub>n</sub>42.mat ložiska SKF 608

- a) Spektrum závady BPF s vnesenými násobky teoretické BPF
- b) Spektrum závady BPF s vnesenými násobky teoretické BPF
- c) Spektrum závady BPF s vnesenými násobky teoretické BSF

Obálkové spektrum difference signálu: sig\_n04  
odhad frekvence poruchy: BPF=90Hz



Obrázek B.5: Spektrum obálky signálu sig\_n04.mat ložiska NICE

- a) Spektrum bez závady s vnesenými násobky teoretické BPF
- b) Spektrum bez závady s vnesenými násobky teoretické BPFO
- c) Spektrum bez závady s vnesenými násobky teoretické BSF

---

## Obsah přiloženého CD

database .....	adresář databáze
├─ Mathwork_NICE.....	data ložiska NICE
│ └─ Mathwork_NICE.mat .....	rozměry ložiska NICE
│ └─ sig_nYX.mat .....	signály databáze
│ └─ pictures .....	analýza databáze
├─ Sawalhi_Koyo_1205.....	data ložiska Koyo 1205
│ └─ Sawalhi_Koyo_1205.mat .....	rozměry ložiska Koyo 1205
│ └─ sig_nYX.mat .....	signály databáze
│ └─ pictures .....	analýza databáze
├─ SKF_6024 .....	data ložiska SKF 6024
│ └─ SKF_6024.mat .....	rozměry ložiska SKF 6024
│ └─ sig_nYX.mat .....	signály databáze
│ └─ pictures .....	analýza databáze
├─ SKF_608 .....	data ložiska SKF 608
│ └─ SKF_608.mat .....	rozměry ložiska SKF 608
│ └─ sig_nYX.mat .....	signály databáze
│ └─ pictures .....	analýza databáze
└─ text .....	text práce
└─ DP_Lahoda_Ondrej.pdf .....	text práce ve formátu PDF