

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra teorie obvodů

Návrh databáze pro měření stavu ložisek zabíhacích válců

Bc. Milan Kičák

Komunikace, multimédia a elektronika / Komunikační systémy
milankicak@gmail.com

Květen 2018

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Sovka CSc.

Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Pavlovi Sovkovi CSc. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

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 22.05.2018

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce řeší problematiku klasifikace míry mechanického opotřebení ložisek na strojním zařízení ve Škoda Auto a.s. zabíhacích válců pro zabíhání automobilů. Za tímto účelem je nezbytné pomocí elektronického systému sledovat a měřit vibrace ložisek, které jsou následně zpracovány programovým prostředím Matlab. Práce obsahuje kompletní návrh vibrodiagnostického systému jak pro sledování stavu ložisek proškoleným diagnostikem, také pro automatizované sledování vývoje opotřebení. Byl proveden návrh databáze signálů společně s vytvořením samotné databáze obsahující informace o průběhu stavů ložisek. byly zjištěny důležité poznatky, které souvisí se samotným měřením signálů a to zejména stacionarita naměřených průběhů, ideální velikost záznamu s ohledem na efektivitu dalších výpočtů. byly provedeny výpočty otáček kol automobilu, otáček válců, otáčky ložisek a na základě těchto informací byly vypočteny hodnoty chybových frekvencí které indikují mechanický stav ložiska. Celý proces zabíhání automobilů ŠKODA AUTO a.s. pozůstává z dvou fází a při každé z nich se provádí testovací úkony, automobil roztočí kola z 0 až na 200 km/h. Průběh zkoušky a tedy i vývoj vibrací není stacionárního charakteru a do velké míry závisí od aktuální pracovní směny výrobních pracovníků, kteří tento test provádí. Z těchto důvodů je nutné za účelem co nejpřesnější klasifikace míry stavu opotřebení ložisek mít přesnou a aktuální informaci o otáčkové frekvenci ložisek. Tento fakt znamená dodatečnou instalaci otáčkového čidla o nejbližší dlouhodobé odstávky strojního zařízení zabíhacích válců.

This thesis deals with the classification of the mechanical wear of bearings in the company Skoda Auto a.s. action rollers for driving cars. For this purpose it is necessary to monitor and measure the vibrations of the bearings, which are subsequently processed by the Matlab programming environment, using the electronic system. The work includes a complete design of the vibrodiagnostic system, both for the monitoring of the condition of the bearings by the trained diagnostician, also for the automated monitoring of the wear development. The design of the database of signals was carried out together with the creation of the database itself containing information about the course of the bearing states. Important findings related to signal measurement itself, namely the stationarity of the measured waveforms, the ideal size of the record with respect to the efficiency of other calculations were found. Car rotation calculations, roller revolutions, bearing speeds were calculated and based on this information, the error rates that indicate the mechanical condition of the bearing were calculated. The whole process of driving ŠKODA AUTO a.s. consists of two phases and each of them performs test operations, the car spins wheels from 0 to 200 km/h. The course of the test, and therefore the development of vibrations, is not stationary in character and depends to a large extent on the actual work shift of the production personnel carrying out the test. For this reason, accurate and up-to-date information on the bearing speed of bearings is necessary in order to as accurately as possible to classify bearing wear. This fact means an additional installation of the speed sensor for the closest long-term shutdown of the rolling stock machinery.

Obsah /

| | |
|--|----|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Technická diagnostika | 3 |
| 2.1 Základní definice a terminologie | 3 |
| 2.2 Diagnostický systém | 3 |
| 2.3 Vibrodiagnostika ve ŠKODA AUTO a.s. | 4 |
| 2.4 Rozdělení ložisek a základní parametry | 4 |
| 2.5 Vznik vibrací v ložisku | 5 |
| 2.5.1 Diagnostika valivých ložisek pomocí snímání vibrací | 6 |
| 2.6 Měření a vyhodnocení vibrací ... | 7 |
| 2.6.1 Snímače vibrací | 7 |
| 2.7 Poruchové frekvence valivých ložisek | 9 |
| 2.7.1 Výpočet poruchových frekvencí ložisek | 10 |
| 2.7.2 Vývoj opotřebení ložisek | 11 |
| 2.8 Vznik vibrací na dalším vybavení strojů | 13 |
| 2.9 Hodnocení vibrací strojů dle ČSN ISO 10816-3 | 14 |
| 2.10 Analýza signálů vibrací v časové oblasti | 16 |
| 2.11 Analýza signálů vibrací ve frekvenční oblasti | 17 |
| 2.12 Vyhodnocování spekter signálů | 18 |
| 2.13 Metoda obáلكové analýzy | 19 |
| 3 Návrh vibrodiagnostického systému a jeho základní požadavky | 20 |
| 3.1 Popis zařízení zabíhacích válců | 20 |
| 3.1.1 Vyhodnocovací jednotka VSE100 | 23 |
| 3.1.2 Software VES004 a jeho vlastnosti | 27 |
| 3.1.3 Průběhy vibrací na válcích během zkoušek | 29 |
| 3.1.4 Závislost otáček válců a chybových frekvencí ložisek | 33 |
| 4 Databáze naměřených signálů .. | 37 |
| 5 Návrh metody popisu vývoje stavu ložisek | 39 |
| 5.1 Porovnání vývoje signálu ve spektrální oblasti | 41 |
| 5.2 Porovnání vývoje signálu pomocí okamžité spektrální obálky | 43 |
| 5.2.1 Zobrazení průběhu spektrální obálky | 45 |
| 5.2.2 Metoda sledování vývoje chybových frekvencí proškoleným diagnostikem | 46 |
| 5.2.3 Metoda automatizovaného vyhodnocení vývoje chybových frekvencí | 47 |
| 5.3 Shrnutí metod popisu vývoje stavu ložisek | 47 |
| 6 Závěr | 49 |
| A Zadání práce | 51 |
| B Obrázky | 52 |
| C Obsah příloženého CD | 60 |
| Literatura | 61 |

Tabulky / Obrázky

| | |
|--|----|
| 3.1. Výpočet otáček válců dle rychlosti vozu..... | 34 |
| 3.2. Výpočet frekvencí ložisko 22218 | 34 |
| 3.3. Výpočet frekvencí ložisko 22216 | 35 |
| 2.1. Poškození ložiska na vnější dráze - prasklina | 6 |
| 2.2. Možné umístění snímačů v několika rovinách..... | 7 |
| 2.3. Grafické zobrazení první úrovně opotřebení..... | 11 |
| 2.4. Grafické zobrazení druhé úrovně opotřebení..... | 12 |
| 2.5. Grafické zobrazení třetí úrovně opotřebení..... | 12 |
| 2.6. Grafické zobrazení čtvrté úrovně opotřebení..... | 13 |
| 2.7. Řemenice jako zdroj vibrací ... | 13 |
| 2.8. Excentrická řemenice jako zdroj vibrací..... | 14 |
| 2.9. Tabulka hodnocení vibrací dle ISO 10816-3 | 15 |
| 2.10. Grafické zobrazení úrovně zrychlení vibrací výrobce Adash | 16 |
| 3.1. Pohled na válce pro zabíhání automobilů ŠKODA | 21 |
| 3.2. Půdorys strojního zařízení pro zabíhání automobilů..... | 22 |
| 3.3. Snímač VSA001 v jeho uložení . | 23 |
| 3.4. Snímač VSA001 v jeho uložení na domečku | 23 |
| 3.5. Nárýs a bokorys jednotky IFM VSE100 | 24 |
| 3.6. Jednotka IFM VSE100..... | 24 |
| 3.7. Typické zapojení jednotky VSE100 | 25 |
| 3.8. Čelní pohled na online systém měření vibrací | 26 |
| 3.9. RMS hodnoty v časové doméně | 27 |
| 3.10. Peak hodnoty v časové doméně | 28 |
| 3.11. Příklad průměrování | 29 |
| 3.12. Průběh vibrací u zkoušky fáze jedna, vůz Fabia..... | 30 |
| 3.13. Průběh vibrací u zkoušky fáze dvě, vůz Fabia | 31 |
| 3.14. Průběh vibrací u zkoušky fáze jedna, vůz Fabia Combi... | 32 |

| | | |
|--------------|--|----|
| 3.15. | Průběh vibrací u zkoušky fáze dvě, vůz Fabia Combi | 33 |
| 3.16. | Graf závislosti rotační frekvence a chybové frekvence ložiska 22218 | 36 |
| 3.17. | Graf závislosti rotační frekvence a chybové frekvence ložiska 22216 | 36 |
| 4.1. | ukázka náhledu výstupního souboru z měření v .csv tabulce | 38 |
| 4.2. | ukázka náhledu výstupních souborů ve formátu .csv | 38 |
| 4.3. | ukázka náhledu výstupních souborů ve formátu .mat | 38 |
| 5.1. | Určení úseku stacionarity signálu pomocí FFT | 40 |
| 5.2. | Ukázka náhledu výkonového spektra vibrací ložiska číslo 12 z databáze v období květen 2018 | 42 |
| 5.3. | Spektrum vibrací ložiska číslo 12 z databáze 2018 | 42 |
| 5.4. | Obálka signálu vibrací ložiska 12 - květen 2018 | 43 |
| 5.5. | Obálka signálu vibrací ložiska 12 | 44 |
| 5.6. | Obálka spektra vibrací ložiska 12 | 45 |
| 5.7. | Zobrazení průběhu zkoušky vozu z 0 na 2000 a na 0 rpm - Ložisko 12 | 46 |
| 5.8. | Vanova křivka opotřebení | 48 |
| B.1. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 1 u průběhu zkoušky | 52 |
| B.2. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 2 u průběhu zkoušky | 53 |
| B.3. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 3 u průběhu zkoušky | 53 |
| B.4. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 4 u průběhu zkoušky | 53 |

| | | |
|--------------|---|----|
| B.5. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 5 u průběhu zkoušky | 54 |
| B.6. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 6 u průběhu zkoušky | 54 |
| B.7. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 7 u průběhu zkoušky | 55 |
| B.8. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 8 u průběhu zkoušky | 55 |
| B.9. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 9 u průběhu zkoušky | 56 |
| B.10. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 10 u průběhu zkoušky | 56 |
| B.11. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 11 u průběhu zkoušky | 57 |
| B.12. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 12 u průběhu zkoušky | 57 |
| B.13. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 13 u průběhu zkoušky | 58 |
| B.14. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 14 u průběhu zkoušky | 58 |
| B.15. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 15 u průběhu zkoušky | 59 |
| B.16. | Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 16 u průběhu zkoušky | 59 |

Kapitola 1

Úvod

Společnosti, které v dnešní době vyrábí své produkty v rychlých intervalech, ve velké míře spoléhají na maximální technické využití strojového parku. Mezi tyto společnosti patří taky ŠKODA AUTO a.s., která se svým nastaveným výrobním taktům musí investovat nemalé finanční prostředky na obnovu a údržbu strojů a strojních zařízení. V dnešní době se začíná využívat oblast takzvané prediktivní a proaktivní údržby. Prediktivní údržba provádí činnosti, které vedou k předpovědi budoucího poruchového stavu některého z článku výrobních zařízení. Proaktivní údržba je soubor opatření, které na základě zjištění díky prediktivní údržbě stanoví postupy k eliminaci budoucího poruchového stavu už v jeho ranném počátku. K nejdůležitějším prostředkům zajištění údržby jak prediktivní, tak proaktivní, patří metody technické diagnostiky, to znamená i vibrodiagnostiky, které v celé své šíři působnosti nejvýrazněji ovlivňují obsah údržby v celé své komplexnosti. V praxi to znamená, že technická diagnostika je hlavním nástrojem kontrolně inspekční a revizní činnosti, tedy zjišťování technického stavu a opotřebení, rozhoduje o nutnosti a rozsahu prováděných oprav mezi které patří odstranění následků opotřebení. Technická diagnostika patří k nástrojům a prostředkům Technická diagnostika je tedy základním atributem ovlivňujícím rozhodujícím způsobem bezpečnost provozu, to znamená je také prostředkem ke snižování rizika v obecném smyslu. Tato práce pojednává o konkrétní aplikaci proaktivního typu údržby spolu s technickou diagnostikou pomocí sledování míry vibrací strojního zařízení ve ŠKODA AUTO a.s. – zabíhací válce pro záběh automobilů. Byly zjištěny možnosti, které aktuální trh s elektronickými systémy pro měření vibrací nabízí, dále proběhla technická specifikace a byl vybrán systém sledování vibrací výrobce IFM, který nabízí maximální modularitu společně s otevřeným systémem pro sběr dat za účelem dalšího zpracování externími softwarovými prostředky. V roce 2017 proběhla ze strany autora instalace, oživení a konfigurace systému IFM, provedlo se připojení do interní IT komunikační infrastruktury ve ŠKODA AUTO a.s. V průběhu začátku roku už byly pořizovány záznamy průběhů vibrací z celkově 16 měřících míst zařízení zabíhacích válců, které se odehrávaly bez přerušení běžného výrobního procesu, tedy měření se provádělo během běžného testování a zabíhání automobilů ŠKODA bez ohrožení výrobního taktu. Tento proces byl začátkem pro vytváření databáze signálů, které obsahují hodnoty vibrací šestnácti měřících míst kde se nachází čtrnáct ložisek typu 22216 a dvě ložiska typu 22218. Signály reprezentují hodnoty vibrací za různých podmínek, ve kterých se provádí zabíhání automobilů ŠKODA. Za účelem co nejpřesnějšího odhadu mechanického stavu opotřebení ložisek se záznamy prováděly ve stavu, kdy zařízení zabíhacích válců dosahovala nejvyšších testovacích otáček, které po přepočtu na rychlost automobilu během testování se pohybovaly v průměru mezi rychlostí 160 až 210 km/h. Tento rychlostní rozptyl během zkoušky způsobuje při vyhodnocení stavu opotřebení ložisek značnou nepřesnost. Proces klasifikace míry poškození pozůstává z manuální činnosti proškoleného diagnostika, který pomocí prostředí Matlab zobrazuje průběhy signálů, porovnává jejich vzájemné hodnoty mezi aktuálním průběhem daného ložiska v měsíci a průběhem porušeným v dřívější době. Charakteristické rysy rozvoje opotřebení ložisek jsou nejvíce

patrné ve frekvenčním spektru, a to nejlépe pomocí obálky spektra. Charakteristické hodnoty chybových frekvencí se začínou dle aktuálního stádia vývoje opotřebení ložisek postupně objevovat a proškolený diagnostik je schopen tyto vývoje poruch odhalit. Nejvhodnějším způsobem takové klasifikace je nahrazení manuálního provádění sledování vývoje opotřebení automatizovaným systémem, který je schopen fungovat zcela autonomně, komunikovat s elektronikou IFM prostřednictvím komunikační infrastruktury, provádět měření průběhů a následně klasifikaci. V případě exponenciálního rozvoje poruchy automaticky zvýší četnost měření a upozorní na tento fakt provozovatele stroje, případně údržbu strojů v dané výrobní oblasti.

Kapitola 2

Technická diagnostika

Technická diagnostika je soubor zejména preventivních činností, které nejčastěji potkáte u provozně kritických výrobních zařízení. Tento soubor činností si u monitorovaných zařízení klade za cíl prodloužit životnost, zvýšit spolehlivost, předvídat poruchy a plánovaně je odstranit, snížit spotřebované energie a také snížit náklady na servis i náhradní díly, které se preventivně měnily a někdy třeba i zbytečně.

2.1 Základní definice a terminologie

Diagnostika ve vztahu ke stroji a strojnímu zařízení pozůstává z vícero oblastí, jakými jsou elektrické systémy, mechanické systémy a v poslední době hodně rozšiřující odvětví diagnostiky komunikačních sběrnic a signálů strojů a strojních zařízení. U všech těchto oblastí se provádí analýza okamžitého technického stavu konkrétních zkoumaných objektů, resp. vyhodnocení provozuschopnosti objektů za daných provozních podmínek. Diagnostika disponuje četnými metodami, které jsou aplikované na konkrétní podoblast.

Základní úkoly diagnostiky jsou:

- **Detekce** – odhalení existence vznikající poruchy, nebo možného důvodu prostoje stroje nebo zařízení.
- **Lokalizace** – určení místa, vadné části nebo uzlu vznikající poruchy.
- **Specifikace** – stanovení příčiny vznikající poruchy vyhodnocením diagnostického signálu, to znamená okamžitým stanovením a sledování dalšího vývoje po dobu provozu.
- **Predikace** – určení prognózy zbytkové životnosti (času do nutné opravy) za účelem strategického plánování a řízení údržby. [1]

2.2 Diagnostický systém

Podoblast diagnostiky, která má za úkol systematicky řešit technické záležitosti kolem diagnostiky jako samotné. Vyhodnocuje technický stav objektů a je tvořen souborem prostředků:

- **Diagnostickými prostředky** - soubor technických zařízení, postupů, metod pro analýzu a vyhodnocení technického stavu objektu.
- **Online měřením** - způsob sledování technického stavu, který je trvale nainstalován. Měření se provádí ihned po jeho odstartování, většinou je připojeno do komunikační sítě za účelem vzdálené správy a sběru naměřených hodnot do centralizovaného úložiště. Záznam hodnot a jejich vyhodnocení je možné provádět bez nutnosti manuálního zásahu diagnostika.
- **Offline měřením** - tvoří ho přenosné diagnostické prostředky, které nejsou instalovány trvale. Záznam hodnot a jejich vyhodnocení se většinou provádí manuálně diagnostikem.

- **Kombinací Online a Offline měření** - technický stav je sledován vzdáleně, bez nutnosti přítomnosti diagnostika u diagnostického systému. Vyhodnocení se provádí manuálně diagnostikem.

2.3 Vibrodiagnostika ve ŠKODA AUTO a.s.

Ve ŠKODA AUTO a.s. se provádí diagnostika vibrací strojů a strojních zařízení v několika způsoby:

- **Měření pochůzkovou metodou přenosnými systémy**
- **Měření on-line staticky instalovanými systémy**

Oba zmiňované systémy využívají přístupu proškoleného diagnostika, který umí vyhodnocovat signály vibrací pomocí různých metod, které nabízí různí výrobci a dodavatelé systémů a software. Použité metody analýzy vibrací se u většiny výrobců měřicích přístrojů a diagnostického software shodují.

Žádný z výrobců ale nepojednává o komplexním systému, který by byl schopen automatizovaně provádět měření pomocí on-line systémů a vyhodnocovat průběhy vibrací pomocí databáze signálů vibrací a tedy přesně určit aktuální stav opotřebení mechanických částí strojů a strojních zařízení ve smyslu prediktivní údržby strojního zařízení.

V době psaní této diplomové práce nebyl znám systém, který by splňoval uvedené fakty a který by byl provozován i v jiných společnostech zabývajících se podobným oborem činnosti jako společnost ŠKODA AUTO a.s. Z těchto důvodů se táto diplomová práce zabývá návrhem databáze pro měření stavu ložisek zabíhacích válců, dále samotnou realizací databáze a provedením zpracování signálů vibrací několika metodami.

2.4 Rozdělení ložisek a základní parametry

Ložiska umožňují otočné uložení čepů a hřídelí, zachycují v nich působící radiální a axiální síly a přenášejí tyto síly na ostatní části mechanismu nebo stroje. Patří mezi nejpoužívanější strojní součásti. Z hlediska plánování a řízení údržby se proto ložiska stávají jedním z nejdůležitějších problémů zajištění provozní spolehlivosti strojů a zařízení.

Z konstrukčního hlediska lze ložiska rozdělit do následujících základních skupin:

- **Kluzná ložiska** - Také někdy nazývána jako hydrodynamická ložiska. Základním principem provozu je vytvoření mazacího filmu mezi rotujícím čepem a stacionární částí kluzného ložiska. Existují následující základní typy kluzných ložisek a to: válcová kluzná ložiska, citrónová kluzná ložiska a kluzná ložiska s naklápěcími segmenty.
- **Valivá ložiska** - ložiska, která pomocí valivých rotačních elementů mezi vnějším a vnitřním kroužkem ložiska snižují tření mezi hřídelem a součástí, ve které je hřídel uložen. Při otáčení hřídele v pouzdře je výsledkem tření. Valivá ložiska zabraňují tření rotačním pohybem valivých elementů. Klec udržuje tělíska v požadované poloze na dráhách kroužků.

Druhy valivých ložisek: kuličková, válečková, soudečková, kuželníková, jehlová. Podle počtu řad se ložiska rozdělují na jednořadé a dvouřadé.

- **Ložiska speciální konstrukce** - elektromagnetická.

Podle směru působení síly, kterou zachycují se dělí ložiska na:

- **Radiální** - kolmo na dráhy ložisek.
- **Axiální** - podélně s dráhami ložisek.

Mazání ložisek se provádí:

- **Mazání tukem** - vhodné zejména pro malé tlaky, malé kluzné rychlosti, nízké teploty okolního prostředí.
- **Mazání olejem** - lepší mazací vlastnosti, olej odvádí teplo a dá se čistit. Vhodné pro aplikace ve vyšších teplotách.
- **Mazání tuhými mazivy** - pro extrémní tepelné zatížení ve vysokých teplotách okolního prostředí. [1].

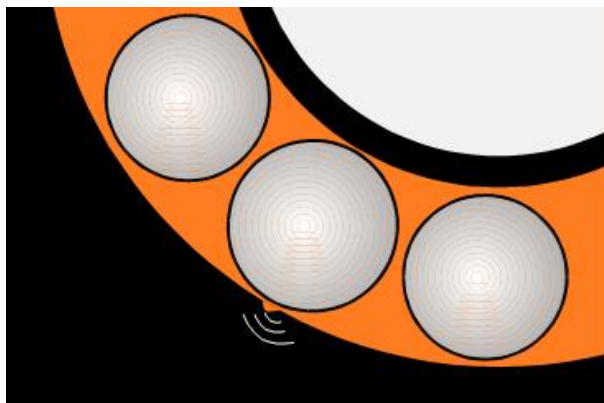
2.5 Vznik vibrací v ložisku

Ložisko zpravidla není zdrojem hluku. To, co je považováno za hluk ložiska, je ve skutečnosti slyšitelný efekt vibrací, způsobený přímo či nepřímo ložiskem, na souvisejících dílech. To je důvod, proč problémy s hlukem lze většinou považovat za otázku vibrací, která se týká celého uložení. Buzení vibrací je vyvolané proměnným počtem zatížených valivých těles. Během provozu vyvolává převalování poškozených částí ložiska vibrace určité frekvence. Frekvenční analýza vibrací umožňuje zjistit, který díl ložiska je poškozený.

Pokud ložisko pracuje ve znečištěném prostředí, částice nečistot mohou proniknout do ložiska, v němž se přes ně převalují valivá tělesa. Velikost vyvolaných vibrací závisí na množství, velikosti a složení částic, přes něž se valivá tělesa převalují. Přitom však nevznikají typické frekvence, avšak může se ozývat slyšitelný a pronikavý hluk.

Ložisko může selhat z řady příčin a to nesprávné mazání (příliš mnoho nebo příliš málo maziva), znečištěné mazivo, větší zatížení než předpokládané (způsobeno např. jinými strojními problémy, jako nevyvaha, nesouosost, ohnutý hřídel apod.), nesprávné zacházení nebo montáž, stárí (povrchová únava), atd.. Obecně, počáteční únava ložiska vyplývá ze smykových napětí, která se cyklicky objevují bezprostředně pod plochou, nesoucí zatížení. Po jisté době tato napětí způsobí trhliny, které se postupně šíří k povrchu. Když valivé prvky přecházejí přes tyto trhliny částičky materiálu se odlomují. Toto je známo jako vydrolování (pitting). Vydrolování se progresivně zvětšuje a případně vyřadí ložisko z provozu. Tento typ poškozování ložiska trvá relativně dlouhou dobu a jeho šíření se dělí na čtyři etapy. Jiný typ poškozování ložiska je iniciován poškozením plochy. Poškození plochy způsobuje trhliny, které se tvoří na povrchu a šíří se do materiálu. Poškození plochy je rovněž způsobováno nadměrným zatížením nebo nesprávným mazáním.

V obou případech poškozované ložisko produkuje zvukové a vibrační signály, které při detekování a správném analyzování poskytují personálu údržby dostatek času na nápravu příčiny problému ložiska (tím se dá efektivně prodloužit životnost ložiska), nebo když je to nezbytné, vyměnit ložisko před jeho úplným selháním a předejít tak větším materiálními škodám na provozovaném strojním zařízení. [1]



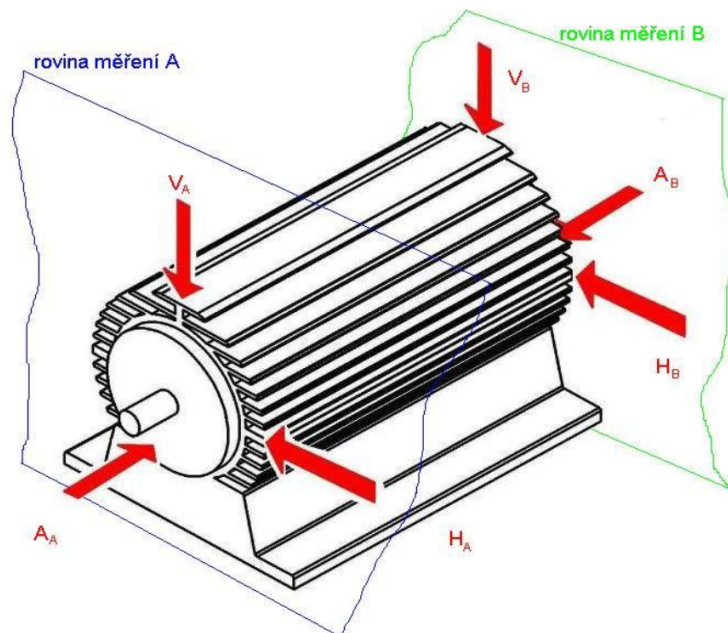
Obrázek 2.1. Poškození ložiska na vnější dráze - prasklina [1]

- **Typický průběh poškození valivého ložiska** - většina ložisek, která projdou prvním obdobím provozu, pokračuje bezporuchově nebo jen s několika málo vadami. Po určité době však počet závad začíná narůstat a rychle se rozrůstá až ke katastrofické poruše. Když ložisko začne vykazovat trend k poruše, je potřeba zvýšit četnost sběru dat, aby byla lépe určena spolehlivost stroje. Cílem systému údržby je detekovat poškození včas, aby byl dostatek času pro plánování nejefektivnější opravy. Toto se obvykle provádí trendováním měření ložiska v závislosti na čase.
- **Opotřebení ložiska a problémy s jeho vůlí** - pozdější stádium opotřebení kluzného způsobí přítomnost harmonických násobků otáčkové frekvence, typicky 10-20 násobně. Opotřebená radiální ložiska vykazují velké amplitudy ve vertikálním směru ve srovnání s horizontálním směrem. Také se může objevit, ale jenom jedna výrazná špička ve spektru na frekvenci odpovídající otáčkové frekvenci.
- **Další známé závady kluzných ložisek:**
 - rýhování - obvodové drážky způsobené nečistotami
 - únavové praskliny - nadměrné dynamické namáhání
 - koroze - vliv agresivního prostředí
 - pitting - elektrické výboje od neuzemněných rotorů [2]

2.5.1 Diagnostika valivých ložisek pomocí snímání vibrací

Provozní životnost u ložiska by měla odpovídat únavové životnosti předepsané výrobcem, to platí u ložiska, které bylo pro danou aplikaci vybráno s ohledem na otáčky, dynamické zatížení, mazání, kinematickou viskozitu a adekvátní filtrování maziva.

Diagnostika valivých ložisek pomocí snímání vibrací přispívá taky k hospodárnému provozu strojů vybavených valivými ložisky a to tím, že se využívá konstrukční rezervy předepsané výrobcem, což má za následek snížení nákladů na výměnu ložisek. Nejistí-li se, ale poškození ložiska včas, může dojít naopak k haváriím a tím ke značným finančním škodám ve výrobě. Pravidelným zjišťováním (trendováním) stavu valivých ložisek je možné provádět přesnější analýzu a lepší plánování údržby zařízení s ohledem na finanční hospodárnost provozu stroje. Nejjednodušší způsob pro detekci celkového poškození strojů je pravidelné měření mohutnosti vibrací. Vibrace ložisek se snímají na jejich uložení, tedy na ložiskovém domečku.



Obrázek 2.2. Možné umístění snímačů v několika rovinách.[5]

Obrázek 2.2 zobrazuje několik rovin, ve který se obvykle snímají vibrace. Volba roviny záleží od typu monitorovaného zařízení, od jeho instalace a provozu. Proškolený diagnostik může měřit jenom v jedné, nebo provede měření ve všech rovinách.

2.6 Měření a vyhodnocení vibrací

Provoz všech strojů vázaný na rotující pohyb je tedy provázen mechanickým kmitočtem - vibracemi, kterým se nelze v provozní praxi vyhnout. Vibrace jsou, jak už byla zmínka, zapříčiněny dynamickým namáháním stroje, technickým stavem ložisek, hřídelí, převodovek, nevývahou rotujících částí, nesouosostí, vůlemi pohybových součástí, stykem třecích ploch, střetem dvou navzájem pohybujících těles (rázy) a pod.

Vibrodiagnostika využívá jako diagnostického parametru vibrace, a právě tento diagnostický parametr dává informace k určení objektivního technického stavu rotujících strojů. Včasná detekce možné závady je pak základním předpokladem pro strategické plánování nápravných opatření.

2.6.1 Snímače vibrací

Se správným snímačem, který poskytuje důležité provozní informace, je provoz zařízení bezpečnější jak pro samotný stroj, tak i pro personál, který jej obsluhuje.

Různé provozní podmínky stroje, týkající se teplotních extrémů, magnetických polí, rozsahu vibrací, rozsahu frekvencí, elektromagnetické kompatibility (EMC), elektrostatických výbojů (ESD) a požadované kvality signálů vyžadují použití různých snímačů.

Základní rozdělení snímačů:

- Seismická zařízení, která se normálně montují na konstrukci stroje a jejichž výstup je mírou absolutních vibrací konstrukce
- Snímače relativní výchylky, které měří vibrační výchylku a střední polohu mezi rotujícími a nerotujícími elementy

Existují jistá měření na strojích, která vyžadují jiné typy snímačů, jako jsou tenzometry. Avšak jejich použití pro monitorování vibračního stavu je méně obvyklé. Vlastní výběr odpovídajících snímačů závisí na dané aplikaci, to znamená měřené veličině (výchylka, rychlost, zrychlení) vibrací, zda jsou měřeny absolutní nebo relativní vibrace (relativní např. vibrace hřídele vůči ložiskovému domku), zda se provádí měření nízkofrekvenčních, či běžných frekvenčních vibrací apod. Snímače pro monitorování stavu vibrací pak jsou rozděleny na:

- **Akcelerometry** - jejichž výstup může být zpracován tak, aby dával libovolnou veličinu (zrychlení, rychlost, výchylku vibrací). Akcelerometr je seismické zařízení, které generuje výstupní signál úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Obecně se akcelerometry montují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje. Akcelerometry jsou dostupné s různými montážními rezonančními frekvencemi, v typickém případě od 1 kHz výše. Obecně se doporučuje, aby lineární rozsah namontovaného akcelerometru pokrýval sledované frekvence. Je obvyklé integrovat výstup z akcelerometru tak, aby dával signál úměrný rychlosti. Avšak je nezbytné dávat pozor při dvojnásobné integraci na výchylku, zejména při nízkých frekvencích.

Akcelerometry jsou dostupné v různých velikostech. Jsou charakterizovány velkým dynamickým rozsahem a širokým frekvenčním rozsahem. Jsou přednostně používány v aplikacích s malými objekty majícími malou montážní plochu, při vysokých teplotách prostředí nebo v silných magnetických polích. Typický akcelerometr obsahuje jeden nebo několik piezoelektrických krystalových elementů. Piezoelektrický krystal vytváří elektrický náboj, který je úměrný působící síle, a podle jeho umístění a hmoty ve snímači rozeznáváme dva druhy akcelerometrů, **tlakový** a **smykový**.

- **Snímače rychlosti vibrací** - výstup lze integrovat na výchylku vibrací. Snímač rychlosti je seismické zařízení, které generuje napěťový signál úměrný mechanické vibrační rychlosti tělesa. Obecně se snímače rychlosti montují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje. Typický snímač rychlosti vibrací má uvnitř snímače cívku, která vlivem vibrací kmitá v poli permanentního magnetu.

- **Bezdotykové sondy** - jejichž výstup je přímo úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotujícími a nerotujícími elementy stroje. U rotujících strojů zejména u velkých rozhodujících turbinových strojů, a u strojů, u nichž hmotnost nosné konstrukce je velká ve srovnání s hmotností rotoru, může být nezbytné měřit relativní výchylku mezi rotorem a konstrukcí statoru. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které může přímo ověřit vibrační výchylku rotujícího hřídele vůči stacionárnímu ložisku nebo skříni stroje. Snímač výchylky dává střídavou složku pro vibrační pohyb a stejnosměrnou složku pro polohu.

Když je snímač výchylky použit v kombinaci se seismickým snímačem na skříni, jehož signál je integrován tak, aby dával výchylku, lze získat měření absolutní výchylky hřídele tak, že se vektorově sečtou dva signály výchylky. Pokud je fázový posun výstupních signálů seismického snímače a snímače výchylky různý, musí být kompenzován v zařízení na úpravu signálů pro kombinaci snímačů. Většina používaných snímačů výchylky pracuje na principu vířivých proudů. Cívka, kterou prochází vysokofrekvenční střídavý proud generuje vysokofrekvenční magnetické pole. Pokud jsou do tohoto pole vloženy elektricky vodivé materiály (například hřídel stroje),

jsou v materiálu generovány vířivé proudy, které berou energii z vysokofrekvenčního magnetického pole.[3]

ČSN ISO 13373-1 uvádí pro výběr z uvedených tří typů snímačů tzv. závislost dynamického rozsahu na frekvenci, která zahrnuje rozsahy většiny aplikací pro monitorování stavu vibrací.[4]

Správné měření vibrací strojů je v rozhodující míře závislé na správném přenosu pohybu na snímače, to znamená rozhoduje připevnění snímačů. Doporučený způsob uchycení závisí na přístupnosti, vhodnosti, ekonomické a technické úvaze. Danou problematikou se zabývá norma ČSN ISO 5348 [5]. Je nutno uvést, že způsob uchycení nejvýrazněji ovlivní frekvenční odezvu snímače, zejména při měření na vysokých frekvencích.

Metoda připevnění a vliv na výkonnost snímače:

- **Pevný šroubový spoj** - Žádné snížení rezonanční frekvence akcelerometru v důsledku připevnění.
- **Izolovaný šroubový spoj** - Podložkou ze slídy je montážní rezonanční frekvence mírně snížena na 28 kHz.
- **Přilepení tuhým lepidlem** - Rezonance je snížena asi na 28 kHz.
- **Přilepení měkkým epoxidem** - Rezonance je snížena asi na 8 kHz.
- **Permanentní magnet** - Rezonance je snížena asi na 7 kHz.
- **Ruční sonda se snímačem** - Rezonance je snížena na 2 kHz, metoda není doporučena pro měření nad 1kHz.[1]

V praxi je možno se setkat i s pojmem duální snímače (sondy). Jedná se o snímače, které měří absolutní a relativní vibrace hřídele, to znamená jedná se o kombinaci bezdotykového snímače na vířivé proudy a seismického snímače rychlosti.

Ve shrnutí je pak možno uvést, že k základním požadavkům na snímače vibrací patří:

- **Rezananční kmitočet** - výrazně (min. 5x) vyšší než horní mezní kmitočet měření.
- **Hmotnost** - snímače včetně úchyty by měla být min. 10x nižší než hmotnost vyšetřované soustavy.
- **Rezananční frekvence** - vyšší než vysokofrekvenční signál v měřené struktuře (některé požadavky leží nad 70 kHz).
- **Metody uchycení** - pevné uchycení pomocí šroubu je nejvhodnější způsob pro měření nad 10 kHz.
- **Kalibrace** - možnost kalibrace nad 10 kHz je běžná u širokopásových akcelerometrů (nejlehčí snímače kalibrují frekvenční odezvu až do 50 kHz). [1]

2.7 Poruchové frekvence valivých ložisek

Každé valivé ložisko při své činnosti, kterou ve stroji vykonává, generuje vibrace. Vibrace se pomocí snímačů a čidel na to určených převedou na signál. Z mechanické podstaty konstrukce ložisko generuje při své činnosti signál, ve kterém se podle rychlosti otáčení (podle otáček) objevují impulzy. Ty nejsilnější impulzy vznikají v zatížené oblasti a odtud jsou přenášeny na skříň ložiska. Mechanické rázy (impulzy) vstupují do všech ložisek v pohybu, protože ložiskové dráhy i valivá ložiska nemají úplně hladkou

plochu. Intenzita těchto rázových impulsů závisí na rázové rychlosti. Při namáhání drsnosti povrchu vznikají ve velmi rychlém sledu slabé rázové impulsy, což vytváří úroveň rázových impulsů ložiska. S postupným vývojem závady, se také mění vibrace vyvolané ložiskem, a to pokaždé, když se valivý prvek (kulička, váleček, atd.) dostane k diskontinuitě na své dráze a výsledkem jsou pulsy. Tyto pulsy se periodicky opakují s frekvencí, která je určena místem výskytu diskontinuity a geometrií ložiska. Tyto frekvence nesou název ložiskové frekvence nebo poruchové frekvence. Patří mezi ně frekvence vnitřního, vnějšího kroužku, klece ložiska a valivých těles.

2.7.1 Výpočet poruchových frekvencí ložisek

Zjišťování poruchových frekvencí počínajících defektů ložisek je popsáno v ISO normách. Pro snazší zjištění, zda součástí problému stroje je poškození ložiska, je možné vypočítat poruchové frekvence ložisek a vynést je ve vibračním spektru. Tyto rovnice jsou idealizovány, protože se předpokládá, že se valivé prvky odvalují po povrchu ložiskových drah. Valivé prvky ve skutečnosti rotují a jejich pohyb je kombinací otáčení a prokluzování. Frekvence otáčení kuličky se často uvádí jako odezvoová frekvence závady na kuličce. Pro výpočet poruchových neboli chybových frekvencí ložisek byly sestaveny tyto rovnice, kde se popisuje **BPFO** - Frequency Outer Race Defect - frekvence defektu na vnitřní dráze vnějšího kroužku ložiska, **BPFI** - Frequency Inner Race Defect - frekvence defektu na vnější dráze vnitřního kroužku ložiska, **BPF** - Frequency Ball Defect - frekvence defektu valivého tělesa (kuličky nebo válečku), **FTF** - Frequency Cage - frekvence defektu klece ložiska [2]:

- **BPFO** - frekvence defektu na vnitřní dráze vnějšího kroužku ložiska

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi\right) \cdot \frac{RPM}{60} = n \cdot FTF \quad (1)$$

- **BPFI** - frekvence defektu na vnější dráze vnitřního kroužku ložiska

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi\right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad (2)$$

- **BPF** - frekvence defektu valivého tělesa (kuličky nebo válečku)

$$BPF = \frac{P_d}{2B_p} \cdot \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \varphi\right)^2\right] \cdot \frac{RPM}{60} \quad (3)$$

- **FTF** - frekvence defektu klece ložiska

$$FTF = \frac{1}{2B_p} \cdot \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \varphi\right)^2\right] \cdot \frac{RPM}{60} \quad (4)$$

Pro případy, kdy diagnostik nemůže zjistit přesné rozměry diagnostikovaných ložisek, ale počet valivých elementů je znám, je možné za cenu nižší přesnosti použít výpočty poruchových frekvencí ložisek:

- **BPFO** - frekvence defektu na vnitřní dráze vnějšího kroužku ložiska

$$BPFO = \left(\frac{n}{2} - 1, 2\right) \cdot RPM \quad (5)$$

- **BPFI** - frekvence defektu na vnější dráze vnitřního kroužku ložiska

$$BPFI = \left(\frac{n}{2} + 1,2\right) \cdot RPM \quad (6)$$

- **BPF** - frekvence defektu valivého tělesa (kuličky nebo válečku)

$$BPF = \frac{n}{2} \cdot \left(\frac{n}{2} - 1,2\right) \cdot RPM \quad (7)$$

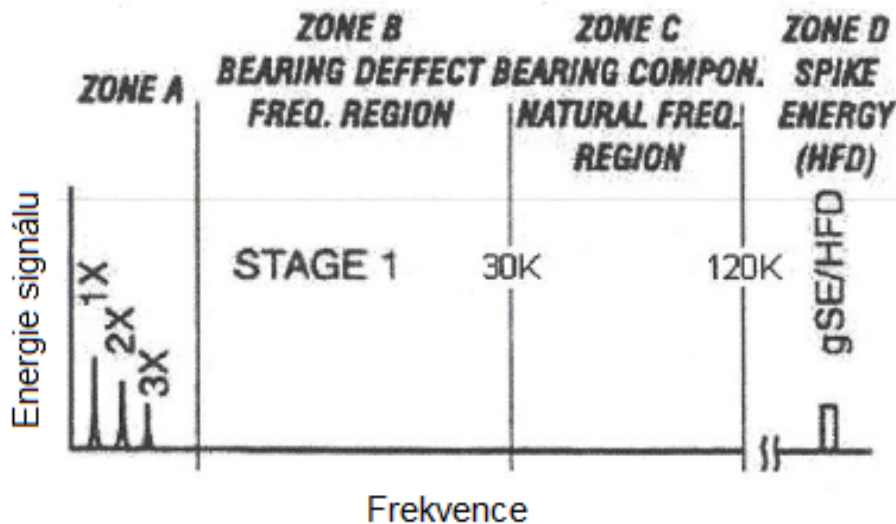
- **FTF** - frekvence defektu klece ložiska

$$FTF = \left(\frac{1}{2} - \frac{1,2}{n}\right) \cdot RPM \quad (8)$$

2.7.2 Vývoj opotřebení ložisek

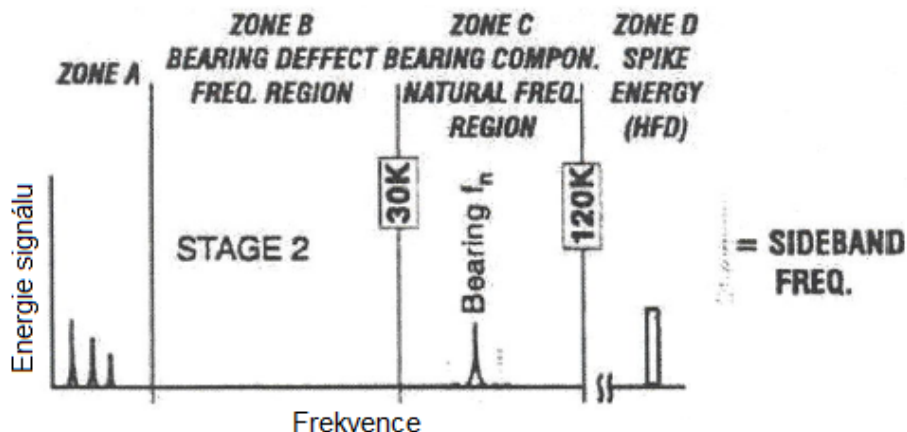
Samotný vývoj opotřebení ložisek se popisuje v několika úrovních a tyto úrovně se budo detailněji popisovat.

- **První úroveň opotřebení** - Na valivých dráhách ložiska jsou velmi malé krátery - mikropittingi. Rázy v ložisku na tyto krátery nemají ještě takovou energii, aby byly generovány měřitelné vibrační signály. V FFT spektru se zatím neobjevují výrazné harmonické násobky frekvence závady.



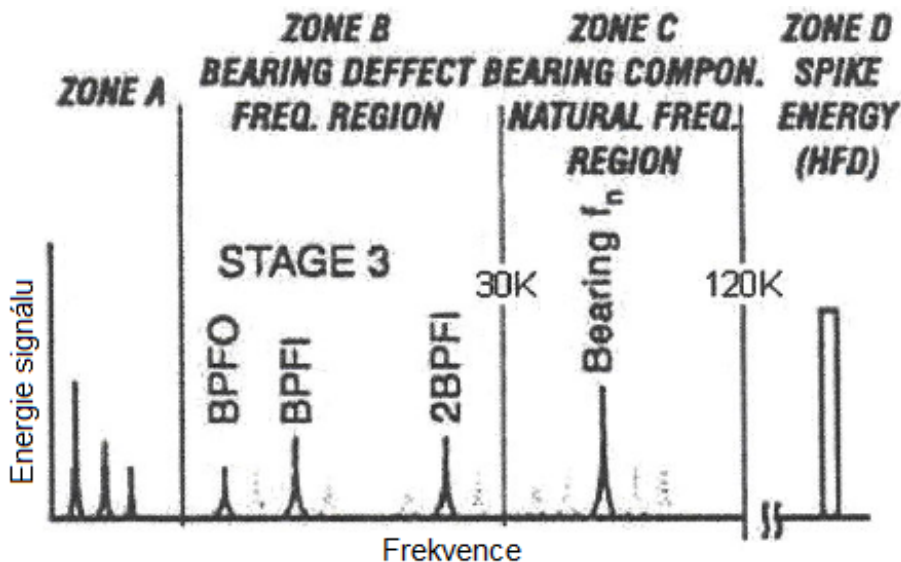
Obrázek 2.3. Grafické zobrazení první úrovně opotřebení [8]

- **Druhá úroveň opotřebení** - V FFT spektru se začínají objevovat harmonické násobky frekvence závady, vlivem narážení valivých prvků na povrchové vady. Degradace ložiska je obvykle lineární, je možné ji dobře trendovat, a proto je potřeba zvýšit četnost měření sběru dat.



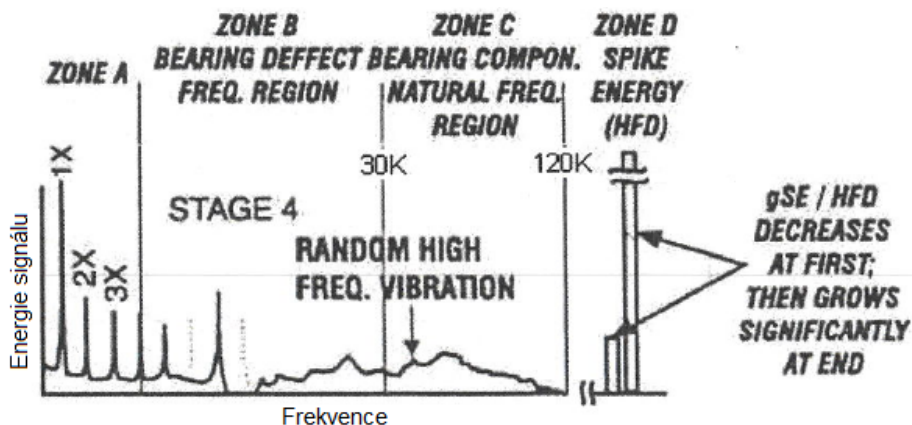
Obrázek 2.4. Grafické zobrazení druhé úrovně opotřebení [8]

- Třetí úroveň opotřebení** - Degradace ložiska se z lineárního průběhu mění na nelineární. FFT spektrum obsahuje frekvenční závady a harmonické násobky začínají mít postranní pásma s otáčkovou frekvencí. **BPFI - Ball Pass Frequency Inner Race** - frekvence závady na vnitřním kroužku: Úroveň vibrací se zvyšuje, když vada prochází zatíženou zónou a signál je modulován, takže vytváří otáčková postranní pásma. **BPFO - Ball Pass Frequency Outer Race** - frekvence závady na vnějším kroužku souvisí z větší části s konstantním zatížením ložiska. V případě nevyváhy, nesouososti nebo ohnuté hřídele se objevují postranní pásma otáčkové frekvence.



Obrázek 2.5. Grafické zobrazení třetí úrovně opotřebení [8]

- Čtvrtá úroveň opotřebení** - V této úrovni je životnost ložiska extrémně krátká, hrozí havarijní stav. V FFT spektru se objevují charakteristické špičky spolu se širokopásmovým šumem v okolí frekvence závady ložiska. Obálka spektra obsahuje velké složky, odpovídající frekvenci závady a také velká postranní pásma 1x až 2x - indikující uvolnění, případně složky indikující závadu klece.



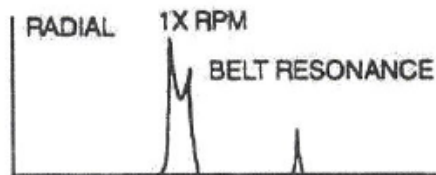
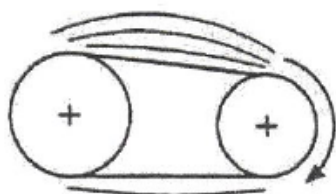
Obrázek 2.6. Grafické zobrazení čtvrté úrovně opotřebení [8]

Meze varování a poplachu - Celková úroveň vibrací je mnohem relativnější než absolutní úroveň vibrací. Úroveň vibrací je závislá na proměnných veličinách - otáčky, dynamické zatížení, přenos signálu konstrukcí, okolní teplota prostředí. Obecně nejvhodnější metoda pro definici hodnot za účelem varování a poplachu je použití statistických hodnot, které se získávají dlouhodobým trendováním stavu ložisek na dané aplikaci. Nejvhodnější je, aby byla měření prováděna za stejných okolních podmínek. Z dlouhodobých měření a zkušeností vibrodiagnostiků se obecně nastavují hodnoty varování na střední trendovou hodnotu plus dvojnásobek standardní odchylky. Hodnoty poplachu se nastavují na střední trendovou hodnotu plus trojnásobek standardní odchylky.

2.8 Vznik vibrací na dalším vybavení strojů

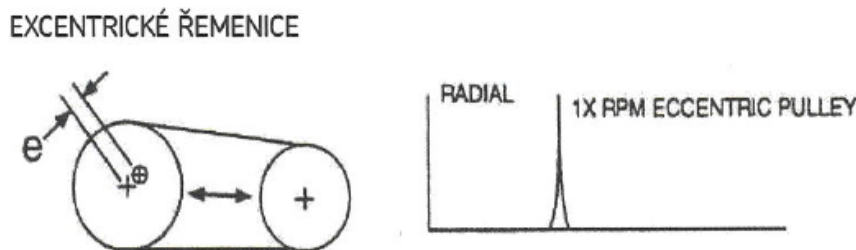
- **Rezonance řemene** – může způsobit velké amplitudy, jestliže se vlastní frekvence řemene blíží nebo souhlasí s otáčkovou frekvencí motoru nebo hnaného stroje. Vlastní frekvenci řemene se v dané aplikaci mění buď napnutím řemene, nebo změnou délky řemene nebo jeho průřezu. V provozu mají vlastní frekvence řemene tendenci být vyšší na tahové straně a nižší na nenapnuté straně.

REZONANCE ŘEMENE



Obrázek 2.7. Řemenice jako zdroj vibrací [8]

- **Excentrické řemenice** – způsobují vysoké vibrace na otáčkové frekvenci excentrické řemenice. Amplituda je obvykle nejvyšší ve směru řemenů a ukazuje se na ložiskách hnací i hnané části. Střídavá únavová napětí v řemenu a vibrace se budou také i při vyvážení excentrické řemenice promítat do spektra vibrací. Tyto vibrace je možné objevit pomocí analýzy fáze, která ukáže, že rozdíl fáze v horizontálním a vertikálním směru je buď téměř 0, nebo 180 stupňů.

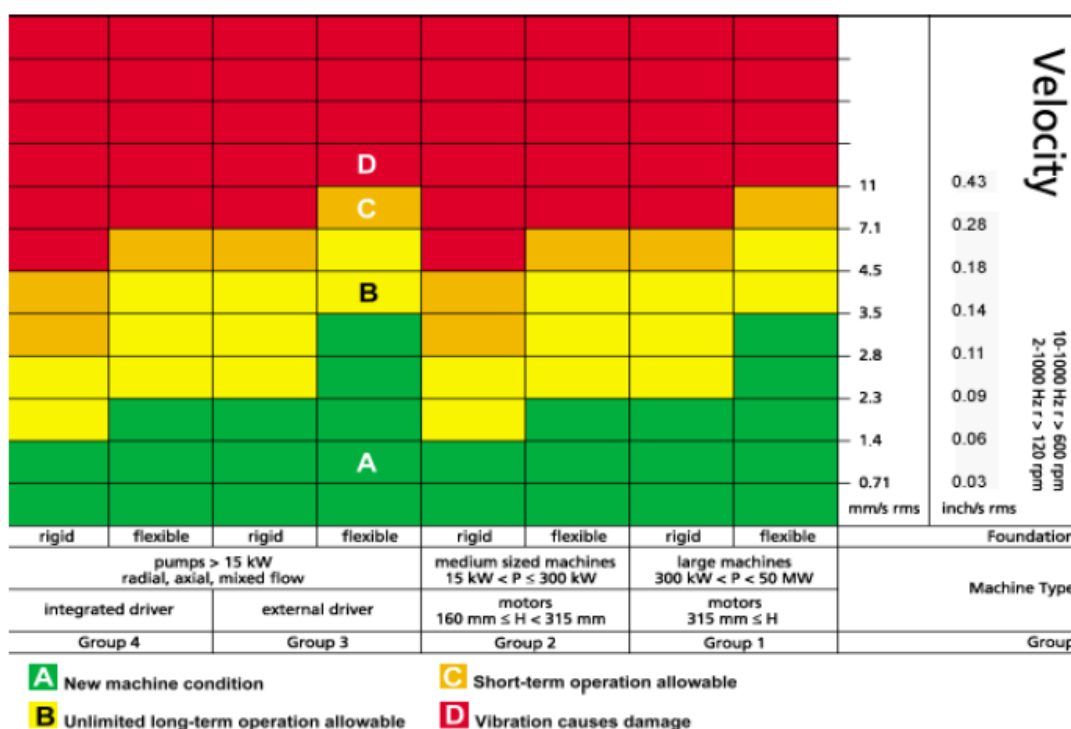


Obrázek 2.8. Excentrická řemenice jako zdroj vibrací [8]

2.9 Hodnocení vibrací strojů dle ČSN ISO 10816-3

Tato norma pojednává o hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitými otáčkami mezi 120 ot/min a 15 000 ot/min. Kritéria uvedená v této části ISO 10816 platí pro měření širokopásmových vibrací na ložiscích, ložiskových stojanech nebo tělesech strojů za ustálených provozních podmínek ve jmenovitém provozním rozsahu otáček. Vztahují se jak na přejímací zkoušky, tak na provozní monitorování. Kritéria hodnocení podle této části ISO 10816 záměrně platí jak pro trvalé, tak pro přerušované monitorování. Tato část ISO 10816 zahrnuje stroje, kterou mohou mít ozubená soukolí nebo valivá ložiska. Netýká se, ale diagnostického hodnocení podmínek těchto převodů nebo ložisek. Kritéria platí pouze pro vibrace vytvářené samotným soustrojím a ne pro vibrace přenášené na soustrojí z vnějších zdrojů.[6]

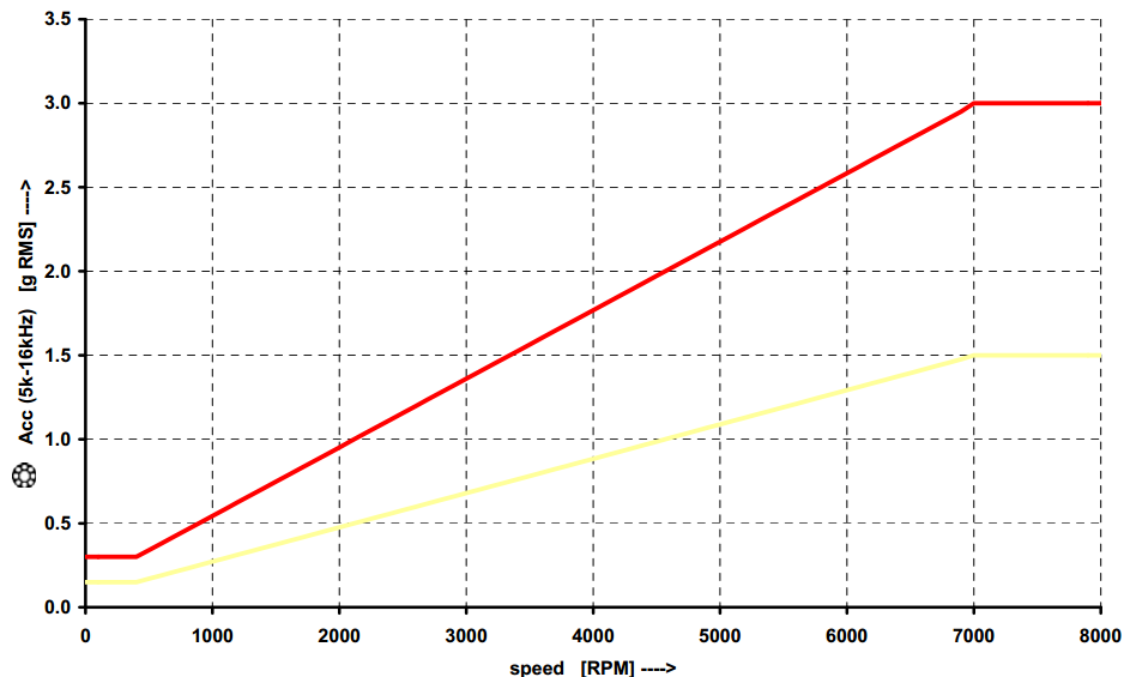
Diagnostik při provádění pochůzkového měření a vyhodnocování kritérií klasifikace mechanického stavu strojních zařízení z větší části vychází právě z této zmiňované technické normy. Tato norma obsahuje také přehlednou tabulku, viz obrázek 2.9.



Obrázek 2.9. Tabulka hodnocení vibrační dle ISO 10816-3 [6]

Tabulka na obrázku 2.9 udává hodnoty vibrační pro strojní zařízení rozdělených dle výkonu, a to do 15 kW, stroje s výkonem mezi 15 kW až 300 kW a stroje od 300 kW do 50 MW. Dále tyto stroje jsou rozděleny na podkategorie, a to dle pevného nebo pohyblivého připojení. Barevně jsou odlišeny stavy stroje na: stav nového stroje, stav stroje bez limitu dlouhodobého používání, stav stroje s limitem na dobu používání a stav stroje, kdy vibrace mohou poškodit stroj.

Nevýhoda dané normy je v tom, že pro definování mezních hodnot vůbec nezohledňuje otáčky stroje. Všechny stroje s otáčkami 120 - 15000 RPM spadají do stejných mezních hodnot. S takovýmto řešením se u diagnostiky valivých ložisek na zařízení s proměnlivými otáčkami není možné spokojit. Například: pokud bude mít stroj na rotoru těžký bod, bude vliv hmoty na stav stroje při 120 RPM velmi malý. Při 15000 RPM už bude vliv ničivý. Také norma ISO definuje meze pouze pro rychlost vibrační, nikoli pro zrychlení. Výrobce přístrojů Adash vzhledem na tento nedostatek vytvořil vlastní normu, která lépe klasifikuje vliv vibrační na životnost stroje dle jeho povahy a pracovních otáček. [7]



Obrázek 2.10. Grafické zobrazení úrovně zrychlení vibrací, výrobce Adash [7]

Na obrázku 2.10 varování představuje žlutá a alarm červená linka.

Pro účely této diplomové práce budeme při uvažování o maximálních mezních hodnotách mechanických vibrací ložisek vycházet z předpokladu, že pravidelným měřením ložiska během celého životního cyklu získáme dostatečně velké množství naměřených průběhů, ze kterých se tyto mezní hodnoty odvodí.

2.10 Analýza signálů vibrací v časové oblasti

Analýza vibrodiagnostického signálu v časové oblasti je vhodná pro přechodové jevy (rozběhy a doběhy motorů, rázové odezvy) a tehdy, existuje-li dominantní zdroj vibrací. Výhodou časového průběhu je informace o jednotlivých zdrojů kmitání následujících po sobě za určitý čas. Slouží k prvotnímu názoru na vibrace, určení statistických parametrů a dává nám představu o crest factoru. [3]

Veličiny popisující signál vibrací:

- **Špičkové hodnoty** – Peak - popisuje amplitudy krátkodobých jevů, mechanických rázů a určuje vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní.
- **Rozkmit špička - špička** – Peak to Peak - udává největší rozkmit hodnoceného sinusového kmitu a její použití je vhodné tam, kde pro hodnocení chvění je závazná výchylka chvění mezi těmito špičkami.
- **RMS** – Root Mean Square - Z hlediska kvantitativního hodnocení amplitud mechanického kmitání je nejdůležitější hodnotou, která má přímý vztah k energii vibrací. Popisuje efektivní hodnotu signálu.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2(t) dt} \quad (9)$$

- **AVERAGE** – průměrná hodnota, neboli průměrná velikost amplitudy.

$$Average = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x| dt \quad (10)$$

- **CREST FACTOR** – vyjadřuje podíl amplitudy a efektivní hodnoty, je měřítkem destruktivních vlastností signálu.

$$CrestFactor = \frac{Peak}{RMS} \quad (11)$$

Při pohledu na vibraci jako mechanickou veličinu, musí být popsána mechanickými parametry a složkami jako výchylka, rychlost a zrychlení. Výchylka je srozumitelnou veličinou a je úměrná tuhosti soustavy. Rychlost popisuje především energii vibrací a zrychlení určuje vibrační síly. Podle časových změn veličin mají vibrace charakter buď deterministické nebo náhodné.

Velká většina mechanického chvění je složena z několika složek s různými kmitočty a časový průběh jeho amplitud nám moc o diagnostikovaném předmětu nepoví, jelikož z něj nelze určit počet ani kmitočty jednotlivých složek.

2.11 Analýza signálů vibrací ve frekvenční oblasti

Druhy způsobu analýzy ve frekvenční oblasti jsou obvykle založeny na použití diskrétní Fourierovy transformace. Frekvenční analýza v principu provádí rozklad původního časového průběhu (jeho omezeného časového záznamu) na jednotlivé harmonické (sinusové nebo kosinusové) složky.

Průběh signálu se obvykle znázorňuje v čase – v časové oblasti (doméně). Posuzování časového průběhu signálu vhodně doplňují i jeho vlastnosti prezentované rozkladem na soubor elementárních funkcí. Nejpřirozenějším způsobem pro technické účely je rozklad na soubor harmonických funkcí, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova řada. Pro obecné neperiodické funkce se používá Fourierova transformace.

Rozklad na Fourierovu řadu se týká hlavně periodických nebo kvasiperiodických signálů. Přestože počet složek rozkladu je obecně nekonečný, obsahuje tento rozklad jen složky s frekvencemi, které jsou násobky harmonické, základní frekvence opakování signálu (vyšší harmonické a subharmonické). Spektrum tak obsahuje jen izolované složky.

Oba typy transformace, jak FT, tak i FŘ (Fourierova řada) lze počítat numericky pomocí DFT rychlých algoritmů označovaných jako FFT (Fast Fourier Transform).

$$F[k] = \sum_0^{N-1} \left(x[n] e^{-j \frac{2\pi k n}{N}} \right) \quad pro \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

Podstatou je zvláštní způsob přerovnání vstupních dat tak, aby se značně urychlil výpočet (autoři Cooley a Tukey) Fourierovy transformace i Fourierovy řady. V nematematickém vyjádření je možno uvést, že FFT rozkládá signál na určité složky, které jsou celočíselným násobkem základní frekvence. FFT rozkládá signál na harmonické složky s amplitudami odpovídající frekvenčním složkám. Ničeméně platí, že

získané spektrum je diskrétní podobně jako u Fourierovy řady. Velikost frekvenčního kroku Δf mezi čarami spektra závisí na počtu vzorků N a vzorkovací frekvenci $\Delta f = f_s/N$ v Hz. Frekvenční spektrum časového signálu lze zobrazit v amplitudovém nebo fázovém vyjádření. Vibrační signál je způsobem periodickými ději, u nichž frekvenční rozklad odpovídá stavu strojního zařízení a příčin jeho případného zhoršení. Spektrum vibrací spočtené pomocí FFT umožňuje detekovat chybové frekvence jednotlivých zdrojů vibrací. [9]

2.12 Vyhodnocování spekter signálů

V technické diagnostice strojů pracujících s periodickým cyklem je frekvenční spektrum vibračního signálu základním zdrojem informací o technickém stavu a příčinách poškození jednotlivých strojních součástí, pro které existuje propracovaná metodika stanovení závadových frekvencí. Přístroje ve vibrodiagnostice - frekvenční analyzátoři také používají rychlou Fourierovu transformaci (FFT). Z těchto důvodů se práce dále víc zabývá zpracováním signálů vibrací ložisek zabíhacích válců ve frekvenční oblasti.

- **Frekvenční spektrum** – Frekvenční spektrum časového signálu je zobrazení v souřadnicích amplituda – frekvence. Z hlediska přenášené energie jsou časový průběh a frekvenční spektrum rovnocenné. U strojů s periodickým pracovním cyklem je vibrační signál způsoben těmito periodickými ději a u nichž frekvenční rozklad, tedy rozklad na množství sinusových signálů s příslušnou amplitudou a počáteční fází, dává diagnostikovi významný nástroj pro identifikaci technického stavu. Lze diagnostikovat případné zhoršení a to přiřazením jednotlivých zdrojů budícím frekvencím ve spektru vibrací, a jak už byla zmínka, tak nejrozšířenějším způsobem stanovení frekvenčního spektra je u současných analyzátorů FFT, a to pro svoji přesnost, rychlost a srozumitelnost, to znamená realizovatelnost ve formě elektronického obvodu. Paměť analyzátoru nabere vzorek časové funkce, který považuje za transparentní z dlouhodobého hlediska a vytvoří z něj nekonečnou smyčku. Z tohoto důvodu je nutné, aby signál začínal a končil ve stejném bodě. Pro správné provedení analýzy je nutné, aby data, která paměť vyřízne z nekonečného časového průběhu reprezentovala děje ve strojním zařízení, a aby byla před matematickým zpracováním upravena do potřebného tvaru, tak aby z nich bylo možné udělat nekonečnou smyčku. K tomu slouží časová okénka, která upravují hodnoty časového průběhu na začátku a konci naměřeného souboru. Vhodné okénko je třeba zvolit před začátkem analýzy a jeho volba výrazně ovlivňuje přesnost analýzy.[2]
- **Spektrální výkonová hustota a její význam při měření vibrací** - Výkon spotřebovaný lineární kmitající soustavou je úměrný druhé mocnině amplitudy měřené veličiny, resp. je roven sumě výkonů připadajících na jednotlivé frekvenční složky. U signálů se spojitým spektrem je možné předpokládat, že spektrum je složeno z velkého množství frekvenčních čar (teoreticky nekonečného) s velmi blízkou amplitudou a fází. Tento ryze matematický přístup nelze uplatnit u FFT, která realizuje spektrum na konečném množství frekvenčních čar, přesto fyzikální podstatu lze chápat ve smyslu uvedených skutečností. Spektrální výkonová hustota jako veličina nachází uplatnění především při teoretických matematických úvahách při zpracování signálu. Jako jediná je z matematického hlediska jednoznačně definovaná jako Fourierova transformace autokorelační funkce. Z toho je opět zřejmé, že

se zde pracuje se spojitými funkcemi a že se jedná o statistickou veličinu. Podle teoretického výkladu lze spatřovat význam spektrální výkonové hustoty jako veličiny, která nám v určitém frekvenčním pásmu umožňuje odhadnout energii přenášenou vibrující hmotu. Vždy je tedy nutné hovořit o frekvenčním pásmu, nikoliv o diskrétní frekvenci. Z hlediska praktického použití je spektrální výkonová hustota vhodná pro náhodné signály se spojitým spektrem. Při sledování spektra diagnostikovaných strojních zařízení má technik u moderních analyzátorů možnost vybrat zobrazenou veličinu ve spektru. Obvykle si vystačí s RMS (efektivní hodnota signálu), která k splnění všech cílů zcela postačuje. Volbou výkonové hustoty se pouze změní veličina na svislé ose spektra, ale tvar zůstane zachován.[2]

2.13 Metoda obávkové analýzy

Pro přesné určení aktuálního stavu ložisek jsou vyvinuty speciální obávkové metody zobrazení zrychlení vibrací. Výhodou obávkové analýzy je její rychlost s následnou identifikací poruchy. Je určena k odhalení poruchy ložiska, kdy v následném spojení s FFT analýzou lokalizuje přesnou část ložiska, která je poškozena (vnitřní kroužek, vnější kroužek, valivý element, klec). Protože každá část ložiska má různou relativní rychlost vzhledem k hřídeli, dají se určit frekvence, na kterých se projevují tyto poruchy. Tato metoda spočívá v měření rázových impulsů, které vzniknou při porušení dráhy průchodem kuličky, válečků nebo záběrem zubů. Odvalováním poškozeného prvku ložiska dochází k nárazům, které vyvolají zvýšené vibrace na frekvenci nárazu. Signál se nejdříve přivede do filtru (pásmové propusti), který propustí jen vysoké frekvence a odstraní většinu šumu. Po usměrnění se změní v tzv. obávkou (obalené pulsy). Energie signálu se filtrací sníží, ale impulsy se opakují ve stále stejných intervalech, neboť frekvence opakování signálu se filtrováním nezmění. Spektrum obávkou získáme pomocí FFT analyzátoru. Toto spektrum obsahuje složku, jejíž frekvence udává kinematické frekvence ložiska. Popsaná metoda je u mnoha výrobců diagnostických systémů označována jako H-FFT.

Obávkou spektra lze získat různými způsoby, např.: pomocí:

- Filtrací kepstra [21], [23], [24]
- Interpolací spektra [22]
- Hilbertovy transformace komplexní obávkou [12]

Pro účely této práce byla použita metoda Hilbertovy transformace komplexní obávkou.

Kapitola 3

Návrh vibrodiagnostického systému a jeho základní požadavky

V této části se práce zabývá komplexní problematikou systému pro snímání, měření, zpracování a vyhodnocení vibrací na strojním zařízení zabíhacích válců. Poznatky v této části vychází ze zkušeností z návrhu a realizace elektronického systému, který byl z důvodu psaní této práce nainstalován.

Základní požadavky na vibrodiagnostický systém:

- **Mechanické připojení čidel pro měření vibrací** - Snímání 16 ložisek kdykoliv během normální produkce. Měřicí body se upevní na požadované místo nedestruktivním způsobem, bez mechanického poškození domečkového uložení válců. Nejvhodnější metodou je osazení měřicího místa podložkou, která bude nalepena na domečku pomocí lepidla. Do podložky se pomocí závitů upevní měřicí čidlo. Z měřicího čidla se pomocí průmyslového konektoru s krytím IP68 připojí kabel, který bude ústít v centrálním rozvaděči umístěného v blízkosti měřících míst.
- **Měření dat z vibračních čidel** - Probíhá pomocí čtyř elektronických převodníků IFM VSE100, které převádí analogový signál ze čtyř vstupů vibračních čidel do digitální podoby a umožňují vzdálenou správu a stahování dat pomocí síťového rozhraní ethernet.
- **Online přístup k měřeným veličinám** - Z důvodu provozu strojního zařízení není možné provádět měření vibrací ložisek pochůzkovou metodou během normální produkce automobilky, proto zde byl požadavek na instalaci systému pro měření a ukládání hodnot, který bude připojený do lokální sítě ŠKODA za účelem komunikace, vzdálené správy a zasílání elektronických zpráv přímo na oddělení údržby, která má na starost zajištění bezproblémové funkce celého strojního zařízení.
- **Automatizované zpracování a klasiface vývoje poruchy na zařízení** - Vzhledem k důležitosti bezporuchového provozu strojního zařízení pro zabíhání automobilů ŠKODA je nevyhnutelné kontinuální sledování stavu mechanického uložení válců pomocí ložisek.

3.1 Popis zařízení zabíhacích válců

Zabíhací válce 3.1 se nacházejí v montážní hale v Mladé Boleslavi, jsou jedním z nejdůležitějších kroků konečné montáže vozů ŠKODA.

- **Strojní zařízení určeno pro záběh automobilů:** Škoda Fabia III, Fabia III Combi, Rapid Spaceback
- **Funkce zabíhacích válců** - Automobily ŠKODA musí před provedením optické kontroly podstoupit kontrolu záběhem (na lince zabíhacích válců), kde se provádí testování mechanických a elektrických součástí pohonného ústrojí automobilu. Zde pracovník výrobní oblasti najede automobilem do linky na 8 válců a provádí testy automobilu, jakými jsou rozjetí kol na první až pátý převodový stupeň, jízda ustálenou rychlostí 180 km/h, brždění s lehkou zátěží a nakonec jízda na reverzní převodový stupeň.

Ve výrobním závodě v Mladé Boleslavi byla provedena během celozávodní dovolené v roce 2017 instalace on-line systému pro sledování a ukládání signálů vibrací ze šesnácí čidel, které měří úroveň mechanického zrychlení na domečcích, ve kterých se ložiska nacházejí. Do těchto ložisek je uloženo 8 válců, na kterých se odvalují kola automobilů. Zároveň o celozávodní dovolené byla provedena údržba těchto ložiskových uložení spolu s preventivním namazáním všech ložisek. Snímače zrychlení VSA001 výrobce IFM jsou našroubovány závitem M8 do kovového uložení, které je pomocí epoxidového lepidla připevněno na domečkovém uložení.



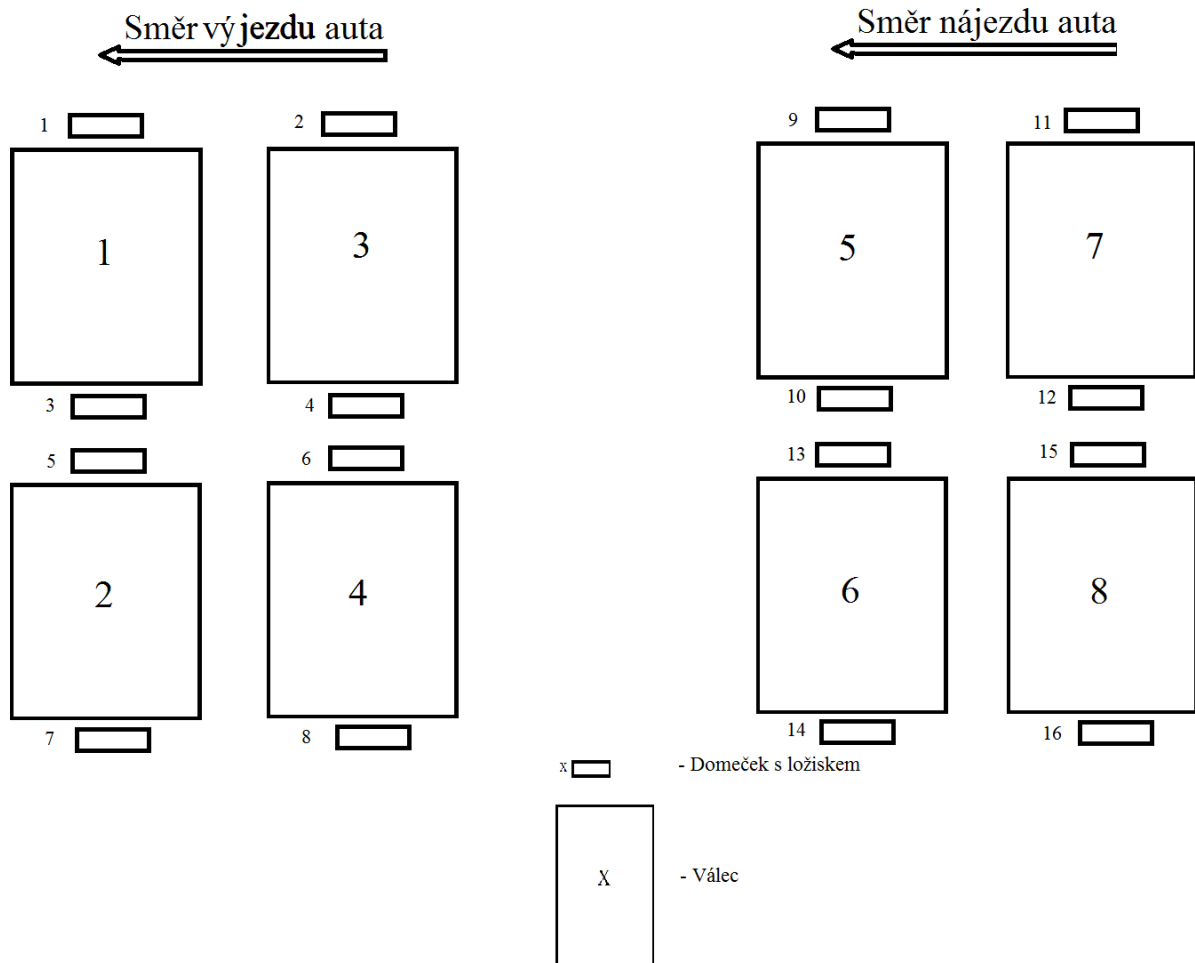
Obrázek 3.1. Pohled na válce pro zabíhání automobilů ŠKODA

Obrázek 3.1 zobrazuje rozmístění válců s čísly 1 až 8, které jsou připevněny pomocí domečků s čísly 1 až 16. V domečcích jsou instalovány ložiska, zdroj vibrací a zdroj signálů pro sestavení databáze. V domečkovém uložení 7 a 14 se nachází ložisko typu 22218, pro zbylá uložení jsou všude použita ložiska 22216. Ložiska typu 22218 jsou použita z toho důvodu, že musí snášet vyšší zatížení během zkoušky zabíhání automobilů z důvodu toho, že hřídel která prochází skrze ložiska, je vybavena

převodem s klínovým ozubeným řemenem pro přenos kroutícího momentu na zadní nápravu.

Půdorys linky zabíhacích válců

Typ: Domeček160 22216 FAG SNV 140 pro uložení 1-6, pro uložení 7 a 14 Domeček160 22218 FAG SNV 160



Obrázek 3.2. Půdorys strojního zařízení pro zabíhání automobilů

Obrázek 3.3 zobrazuje snímač VSA001 spolu s připojeným kabelem, upevněným v podložce, která se na domečky v horizontální, která nejvíc zohledňuje síly při působení tlaku odvalujících se kol automobilu. Připevněna byla pomocí průmyslového epoxidového lepidla. Tento druh spojení má nevýhodu v omezení přenášeného pásma. Pro naše účely je ale pásmo do 10 kHz zcela postačující. Výhodou lepení vibračních čidel je fakt, že se žádným mechanickým způsobem odvrtávání závitu do domečkového uložení nenarušuje homogenita materiálu.



Obrázek 3.3. Snímač VSA001 v jeho uložení

Přípevnění snímačů proběhlo pomocí vícesložkového lepidla v horizontálním směru, který nejvíc zohledňuje síly při působení tlaku odvalujících se kol automobilu.



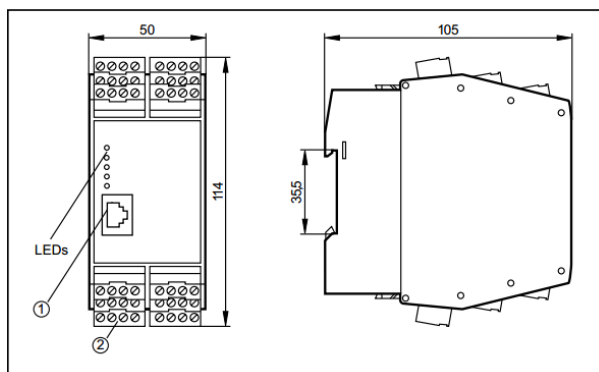
Obrázek 3.4. Snímač VSA001 v jeho uložení na domečku

Veškeré vodiče od všech šestnácti čidel byly svedeny do jednoho centrální místa, hlavní rozvaděčové skříně, kde byl instalován samotný elektronický systém vyhodnocení vibrací a bylo provedeno připojení do interní IT komunikační sítě.

3.1.1 Vyhodnocovací jednotka VSE100

Tyto jednotky tvoří srdce celého systému, který je vybaven čtyřmi jednotkami IFM VSE100, což jsou elektronické převodníky analogového signálu vibrací na digitální podobu a následné uložení a export záznamu. Disponují kompaktními rozměry, možností montáže na DIN lištu do rozvaděče, napájení DC 24V, dále jednotky VSE100 disponují 4 dynamický vstupy pro připojení vibračních čidel (typu VSA, VSP a IEPE), 2 analogovými vstupy pro snímání proudových a napěťo-

vých hodnot (0/4 – 20 mA, 0 – 10V), dále mají 8 libovolně konfigurovatelných I/O vstupu-výstupů. Připojením a konfigurací pomocí LAN rozhraní usnadňují přístup technika k datům a nastavením jednotky. Na čelné straně jednotek se nachází 5 LED kontrolky indikujících připojení a konfiguraci jednotlivých vibračních senzorů, varování a chybové stavy a další stavy.

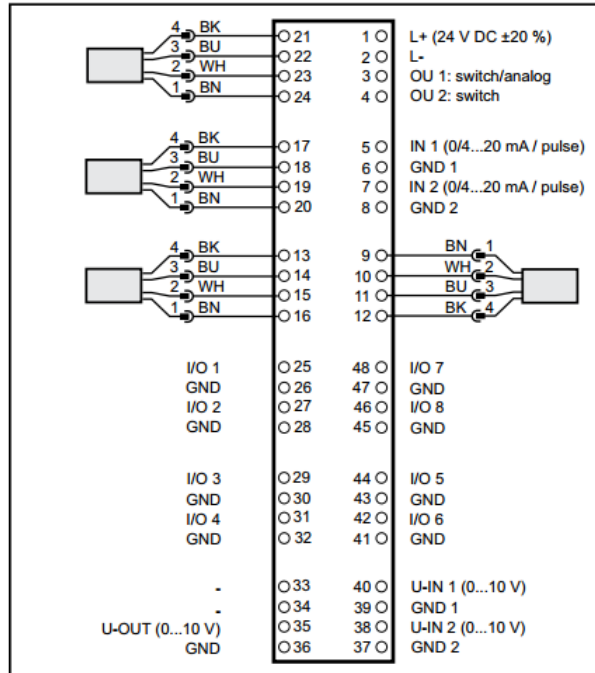


Obrázek 3.5. Nárys a bokorys jednotky IFM VSE100 [18]



Obrázek 3.6. Jednotka IFM VSE100 [18]

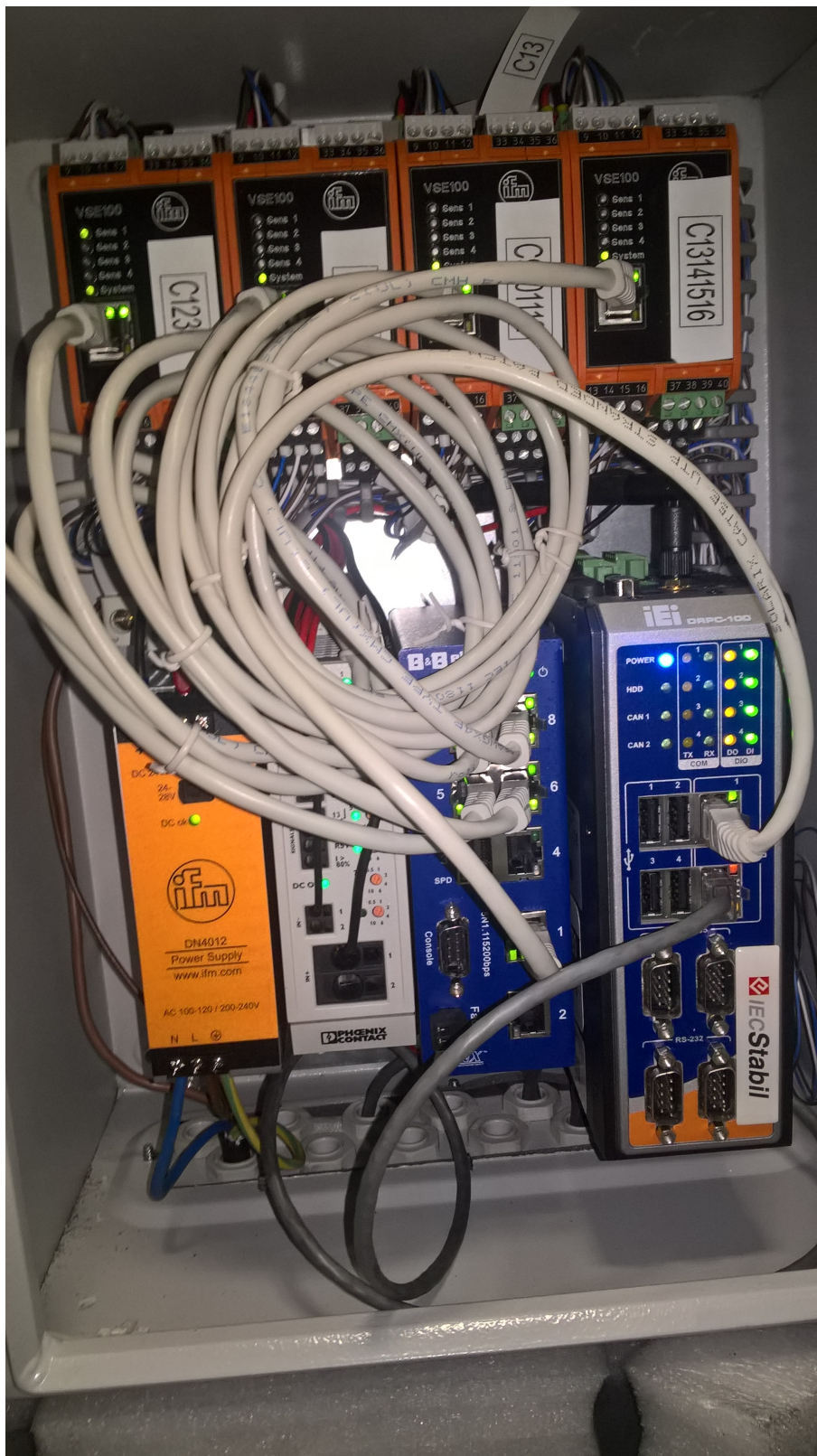
Na obrázku 3.6 se nachází bližší pohled na elektronický převodník. Jeho provedení krytí v IP20 má nevýhodu, že není možné provést instalaci přímo na místě instalace vibračních čidel, ale je nutné jednotku instalovat do krytu odolného proti prachu, nečistotám a vodě. Výhodou je, ale zase flexibilita připojení, jak analogových veličin, tak digitálních vstupů a výstupů. Je možné systém dovybavit varovným signalizačním zařízením, které upozorní přímo výrobní pracovníky na nestandardní hodnoty vibrační ložisek zabíhacích válců.



Obrázek 3.7. Typické zapojení jednotky VSE100 [18]

Typické zapojení jednotek VSE100 zobrazené na obrázku uvádí taky barvy vodičů kabelů pro připojení vibračních čidel. Samotné připojení je realizováno pomocí konektorů se šroubovými spoji, které se ale v případě výměny jednotky VSE100 dají jednoduše vysunout.

Na fotografii 3.8 je zobrazený náhled elektronického vybavení rozvaděče. Podrobnosti zapojení a konfigurace se nebudeme v této práci zabývat. Celý systém byl v rámci této diplomové práce zcela navrhnout, realizován, nainstalován a zprovozněn autorem práce.



Obrázek 3.8. Čelní pohled na sestavený a nainstalovaný online systém měření vibrací

3.1.2 Software VES004 a jeho vlastnosti

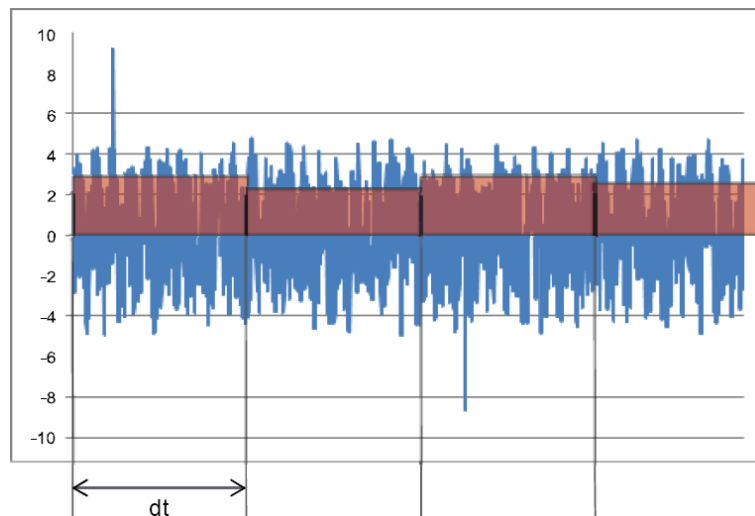
Software VES004 od výrobce IFM slouží pro nastavení (parametrizaci), ovládací a diagnostiku monitorovacích a vyhodnocacích jednotek vibrací VSE100, které byly použity pro dlouhodobé sledování vývoje mechanického stavu ložisek na válcích pro strojní zařízení pro zabíhání automobilů ŠKODA.

Obecný popis vlastnosti software VSE004: Fyzikální jednotky vibrací:

- Zrychlení (a) - hodnota v *mg*
- Rychlost (v) - hodnota v *mm/s*
- Výchylka (d) - hodnota v *mm*

Typy objektů pro monitorování pomocí vibrací v programu VSE004:

- Nevývaha
- Diagnostika valivých ložisek
- Ve frekvenční doméně a-RMS v-RMS d-RMS
- V časové doméně a-RMS v-RMS a-Peak
- Monitorování spodní limitní hodnoty, monitorování vrchní limitní hodnoty

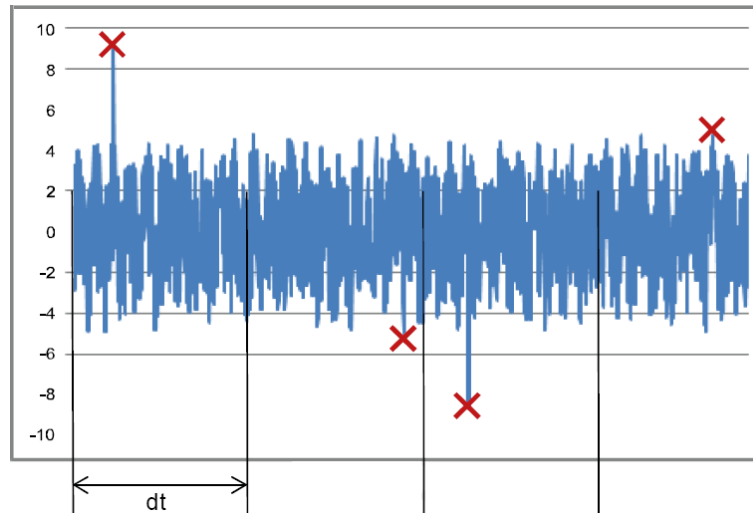


Obrázek 3.9. RMS hodnoty v časové doméně [19]

Schéma na obrázku 3.9 ilustruje výpočet RMS signálu v časové oblasti. Vektor *dt* je šířka okna, pro kterou se počítá střední hodnota. Osa x je časový průběh signálu, osa y je hodnota amplitudy.

Monitoring středních (RMS) hodnot signálů se provádí pro:

- Měření dle normy ISO 10816 a dalších aplikovaných standardů
- Uvolnění části stroje
- Chyby ustavení stroje
- Problémy elektromotorů – rotor, stator



Obrázek 3.10. Peak hodnoty v časové doméně [19]

Na obrázku 3.10 jsou červenými křížky ilustrovány špičkové hodnoty v časové oblasti. Vektor dt zobrazuje šířku okna.

Monitoring špičkových (Peak) hodnot signálů se provádí pro:

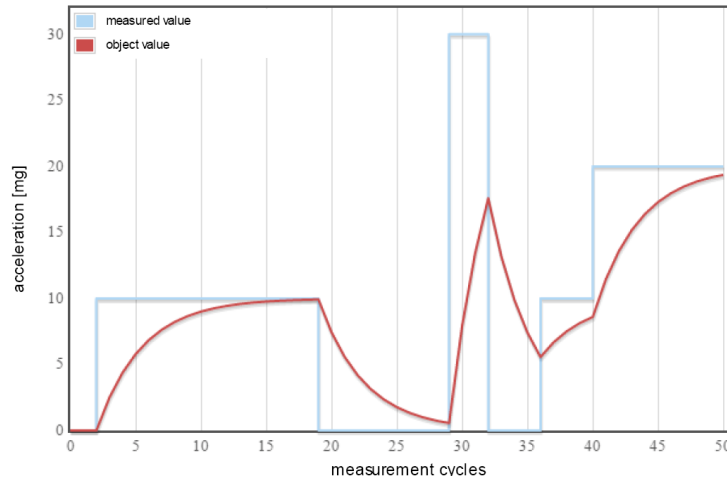
- Nabourání vřetena a obrobku na obráběcích strojích
- Kavitace – diagnostika proudění kapaliny v čerpadle
- Styk kov na kov, ku příkladu poškození ložisek

Monitorování a diagnostika objektů - jako nevyvaha, zrychlení, rychlost vibrací bývá diagnostikována pomocí analýzy FFT, obálková metoda H-FFT se využívá pro monitoring periodických signálů (ku příkladu ložiska). **Metody analýzy** - FFT – Fast Fourier Transformation a H-FFT (obálkové spektrum). Obálková metoda H-FFT zpracovává jednotky gravitačního zrychlení – g.

Fitralce signálu - Filtrování se využívá při analýze pomocí obálkové metody H-FFT, základní nastavení pásmové propusti mezi 450 – 5950 Hz je využitelný v mnoha aplikacích. Pro monitorování pomalých aplikací do 120ti otáček za minutu (20 Hz otáčková frekvence) je preferovaný filtr horní propust nad 5000 Hz. Pro analýzu v časové doméně se používají filtry pro diagnostiku zařízení nebo objektů pracujících s otáčkovou frekvencí 120 – 600 ot/min. Dolní propust od 2 Hz do 975 Hz, se využívá pro objekty s otáčkovou frekvencí větší než 600 ot/min. Dolní propust od 10 Hz do 975 Hz. Pro monitorování mechanického nárazu se používá filtr dolní propust do 975 Hz. Monitorování vývoje opotřebení ložisek a čerpadel používá filtr typu horní propust 3750 Hz.

Triggrování měření - V programu VES004 jsou tři možnosti spuštění měření vibrací jednotlivých kanálů. Manuální spuštění triggrování měření dle aktuální potřeby obsluhy programu, automatické spuštění triggrování závislé od přednastavené veličiny (otáčková frekvence, digitální nebo analogový vstup) a časově řízené měření, které provádí měření vybraných kanálů dle přednastaveného časového okna.

Průměrování měření - Krátkodobé špičky v signálu mohou být potlačeny pomocí funkce průměrování. Objekty monitorované v časové doméně, nebo monitorování rozsahů ve frekvenční doméně se většinou neprůměrují.



Obrázek 3.11. Příklad průměrování [19]

Na obrázku 3.11 je zobrazení průměru, osa x znázorňuje počet vzorků a osa y zobrazuje zrychlení signálu. Červený průběh představuje zprůměrovaný průběh, modrý průběh je reálně naměřená hodnota.

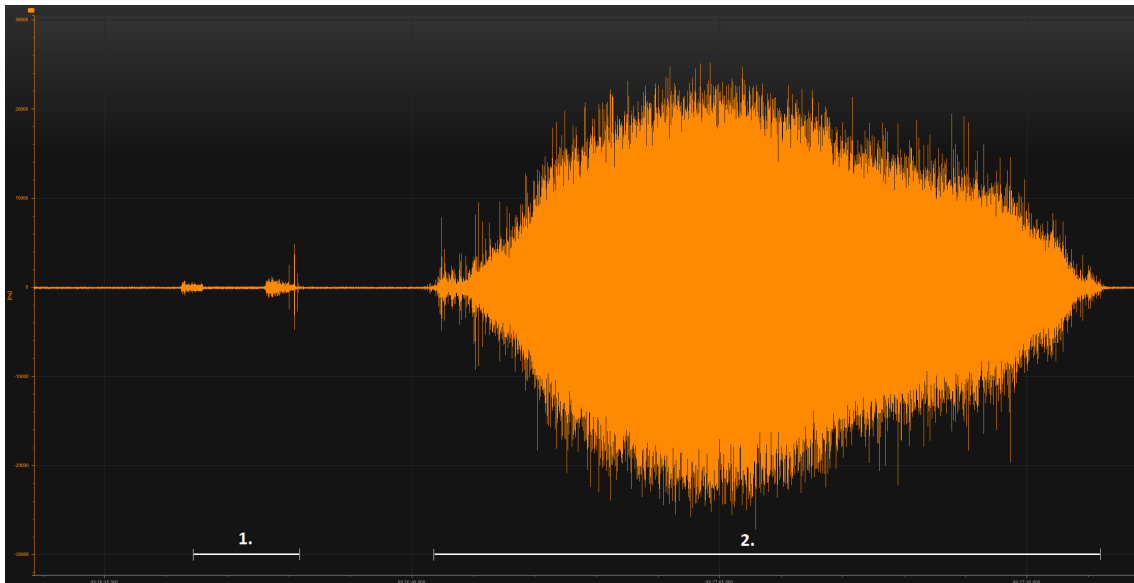
Průběh měření a jeho podmínky - Měření vibrací probíhalo pomocí vzdáleného spojení PC stanice a vyhodnocovací jednotky VSE100 pomocí intranetového připojení ve ŠKODA AUTO a.s. Trigger pro start měření se prováděl manuálně, dle hodnot aktuálního zrychlení v online náhledu a to v čase kdy Peak hodnoty dosahovaly aktuálně nejvyšších hodnot (předpoklad pro nejvyšší otáčkovou frekvenci válců).

3.1.3 Průběhy vibrací na válcích během zkoušek

Tato sekce ilustruje vývoj vibrací během celé zkoušky zabíhání automobilu. Průběhy na obrázcích 3.12 3.13 3.13 3.13 zobrazují vývoj vibrací na ložisku číslo 12 a to v několika fázích testování vozů Škoda Fabia.

Úsek číslo 1: Na obrázku 3.12 ukazuje zrychlení vibrací ložiska v době nájezdu automobilu na testovací válec. Když se auto nachází svými koly na válcích, pneumatické zvedače se zapustí do podlahy a automobil svojí vahou sesedne na válec.

Úsek číslo 2: Na obrázku 3.12 se zobrazuje průběh vibrací ložiska v době roztočení kol automobilu z rychlosti 0 na rychlost přibližně 190 km/h a zpátky na rychlost 0. Špičkové hodnoty zrychlení dosahují místy hodnot až 25 g. Délka testovacího úseku trvá přibližně 62 sekund a mění se v závislosti od požadavku výrobního pracovníka, který zrovna test provádí.

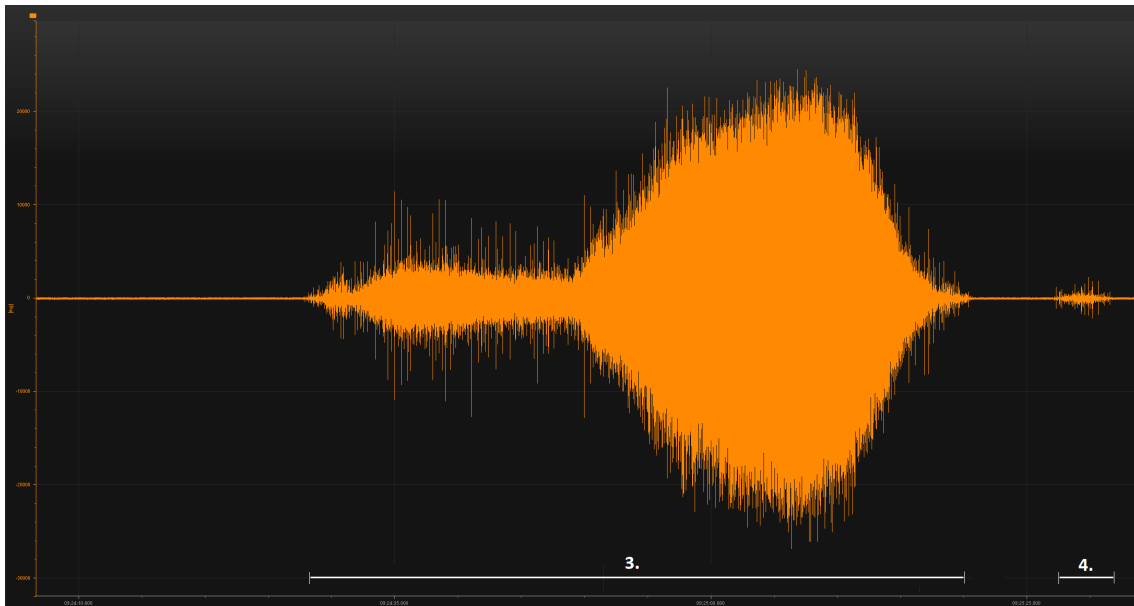


Obrázek 3.12. Průběh vibrací u zkoušky fáze jedna, vůz Fabia

Po provedení zkoušky z úseku 2. provádí výrobní pracovník předepsané testy elektroniky vozu v klidovém stavu bez otáčení kol, čemu odpovídají téměř nulové hodnoty zrychlení vibrací na ložisku.

Úsek číslo 3: Na obrázku 3.13 je začátek druhé fáze testování vozu Škoda Fabia, výrobní pracovník se rozjíždí na první a poté hned na druhý převodový stupeň, který má několik vteřin zařazený, poté řadí třetí stupeň a znovu se rozjíždí automobilem až na rychlost přibližně 190 km/h. Špičkové hodnoty zrychlení dosahují místy hodnot až 22 g. Poté začne razantně brzdit až na nulové otáčky. Délka testovacího úseku trvá přibližně 53 sekund a mění se v závislosti od aktuálního výrobního pracovníka, který test provádí. Tímto je celé testování samotného automobilu provedeno.

Úsek číslo 4: Pneumatické zvedáče se zvednou z podlahy a kola automobilu se vysunou na úroveň, která umožňuje vyjetí automobilu z linky zabíhacích válců. Obrázek 3.13

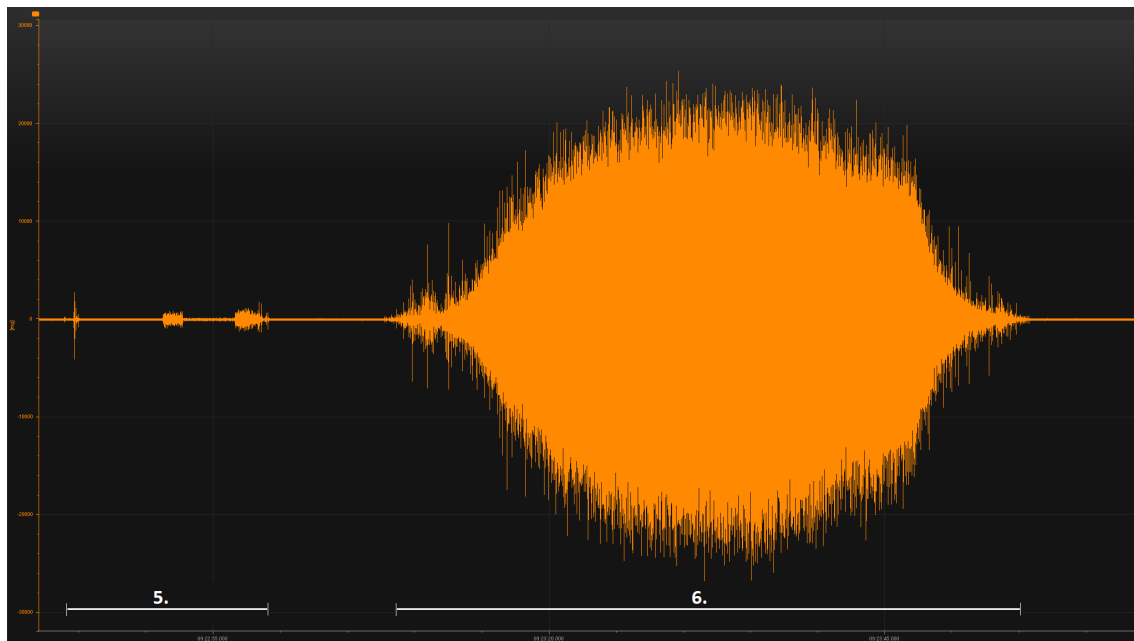


Obrázek 3.13. Průběh vibrací u zkoušky fáze dvě, vůz Fabia

Průběhy zobrazují vývoj vibrací na ložisku číslo 12, a to v několika fázích testování vozu Škoda Fabia Combi.

Úsek číslo 5: Na obrázku 3.14 je zobrazeno zrychlení vibrací ložiska v době nájezdu automobilu na testovací válec. Když se auto nachází svými koly na válcích, pneumatické zvedače se zapustí do podlahy a automobil svojí váhou sesedne na válec.

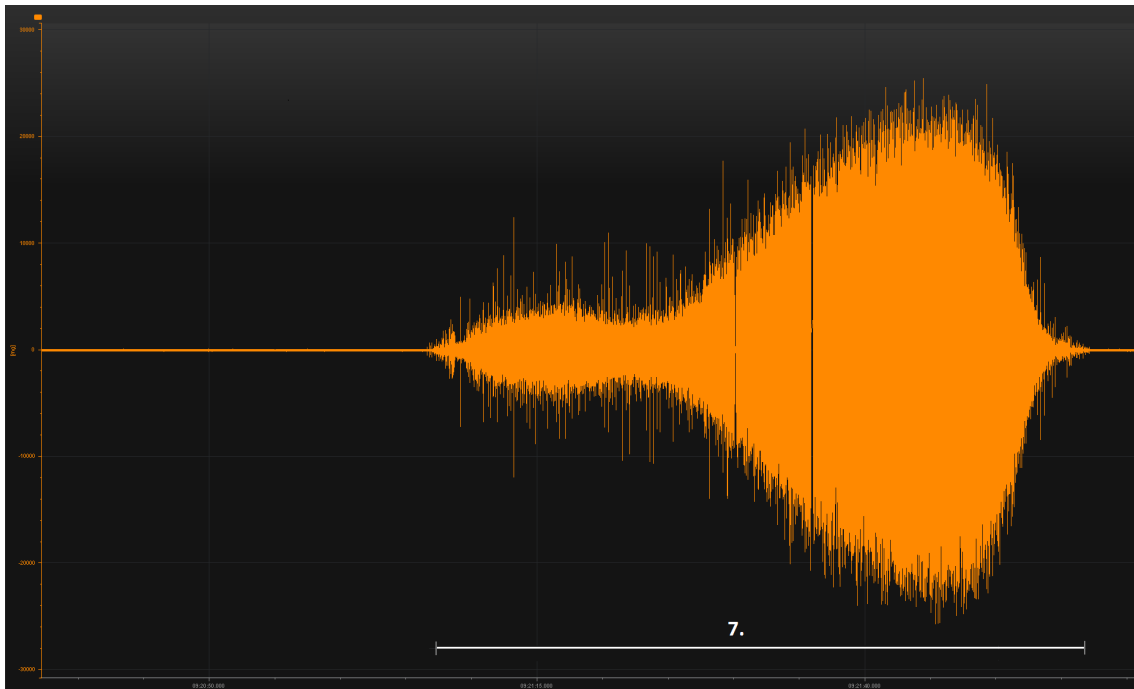
Úsek číslo 6: Na obrázku 3.14 Zde se zobrazuje průběh vibrací ložiska v době roztočení kol automobilu z rychlosti 0 na rychlost přibližně 160 km/h a zpátky na rychlost 0. Špičkové hodnoty zrychlení dosahují místy hodnot až 21 g. Délka testovacího úseku trvá přibližně 50 sekund a mění se v závislosti od aktuálního výrobního pracovníka, který test provádí. Zde můžeme taky pozorovat rozdíly typu testování u vozu Fabia a Facia Combi, ačkoli se jedná z pohledu testování o téměř shodné vozy se shodným rozvorem náprav, délka testování a záběhu automobilu je značně odlišná.



Obrázek 3.14. Průběh vibrací u zkoušky fáze jedna, vůz Fabia Combi

Po provedení zkoušky z úseku 6 provádí výrobní pracovník předepsané testy elektroniky vozu v klidovém stavu bez otáčení kol, čemuž odpovídají téměř nulové hodnoty zrychlení vibrací na ložisku.

Úsek číslo 7: Obrázek 3.15. Začátek druhé fáze testování vozu Škoda Fabia, výrobní pracovník se rozjíždí na první a poté hned na druhý převodový stupeň který má několik vteřin zařazený, poté řadí třetí stupeň a znovu se rozjíždí automobilem až na rychlost přibližně 160 km/h. Špičkové hodnoty zrychlení dosahují místy hodnot až 22 g. Poté začne razantně brzdít až na nulové otáčky. Délka testovacího úseku trvá přibližně 53 sekund a mění se v závislosti od aktuálního výrobního pracovníka, který test provádí. Celé testování samotného automobilu je provedeno. Nakonec se pneumatické zvedáče zvednou z podlahy a kola automobilu se vysunou na úroveň, která umožňuje vyjetí automobilu z linky zabíhacích válců.



Obrázek 3.15. Průběh vibrací u zkoušky fáze dvě, vůz Fabia Combi

3.1.4 Závislost otáček válců a chybových frekvencí ložisek

Na základě změřených rozměrů kol vozidel Fabia byly vypočteny otáčky válců dle rychlosti automobilu během zabíhací zkoušky. Výsledky jsou zaznamenány do tabulky 3.1.

| Rychlost auta | | Otáčková frekvence | | Otáčky |
|---------------|--------|--------------------|------------|-----------|
| [km/h] | [m/s] | kolo auta [Hz] | válce [Hz] | válce RPM |
| 10 | 2.778 | 1.499 | 1.768 | 106.090 |
| 20 | 5.556 | 2.999 | 3.536 | 212.179 |
| 30 | 8.333 | 4.498 | 5.304 | 318.269 |
| 40 | 11.111 | 5.998 | 7.073 | 424.358 |
| 50 | 13.889 | 7.497 | 8.841 | 530.448 |
| 60 | 16.667 | 8.996 | 10.609 | 636.537 |
| 70 | 19.444 | 10.496 | 12.337 | 742.627 |
| 80 | 22.222 | 11.995 | 14.145 | 848.716 |
| 90 | 25.000 | 13.495 | 15.913 | 954.806 |
| 100 | 27.778 | 14.994 | 17.682 | 1060.895 |
| 110 | 30.556 | 16.493 | 19.450 | 1166.985 |
| 120 | 33.333 | 17.993 | 21.218 | 1273.074 |
| 130 | 36.111 | 19.492 | 22.986 | 1379.164 |
| 140 | 38.889 | 20.992 | 24.754 | 1485.254 |
| 150 | 41.667 | 22.491 | 26.522 | 1591.343 |
| 160 | 44.444 | 23.990 | 28.291 | 1697.433 |
| 170 | 47.222 | 25.490 | 30.059 | 1803.522 |
| 180 | 50.000 | 26.989 | 31.827 | 1909.612 |
| 190 | 52.778 | 28.488 | 33.595 | 2015.701 |
| 200 | 55.556 | 29.988 | 35.363 | 2121.791 |
| 210 | 58.333 | 31.487 | 37.131 | 2227.880 |
| 220 | 61.111 | 32.987 | 38.899 | 2333.970 |

Tabulka 3.1. Výpočet otáček válců dle rychlosti vozu

Dle vzorců pro výpočet chybových frekvencí (1 - 4) uvedených v kapitole 2.7.1 byly vypočteny hodnoty chybových frekvencí v závislosti od rychlosti automobilu v průběhu zkoušky zabíhání automobilu. Chybové frekvence jsou vypočteny pro oba typy použitých ložisek a to 22218 3.2 a 22216 3.3. Tyto chybové frekvence se v závislosti od míry opotřebení ložisek objevují ve spektrální složce vibračního signálu. Takový příklad zobrazení chybových frekvencí jak ve spektru, tak v obálce spektra se nachází v následujících kapitolách.

Ilustrace zobrazení chybových frekvencí ve formě grafů pro ložisko 22218 3.16 a 22216 3.17 na další straně.

| Frekvence [Hz] pro ložisko 22218 | | | | | | |
|----------------------------------|----------|-------|----------|--------|--------|--------|
| otáčky ot/min | F_{ot} | Klec | F_{ve} | BPFI | BPFO | BPF |
| 100 | 1.67 | 0.71 | 5.65 | 19.00 | 14.30 | 11.30 |
| 500 | 8.33 | 3.57 | 28.20 | 95.20 | 71.40 | 56.50 |
| 1000 | 16.70 | 7.14 | 56.50 | 190.50 | 142.90 | 112.90 |
| 1500 | 25.00 | 10.70 | 84.70 | 285.70 | 214.30 | 169.40 |
| 2000 | 33.30 | 14.30 | 112.90 | 381.00 | 285.70 | 225.80 |
| 2500 | 41.70 | 17.90 | 141.10 | 476.20 | 357.10 | 282.30 |

Tabulka 3.2. Tabulka s výpočtem frekvencí ložisko 22218

Tabulky 3.2 3.3 obsahují vypočtené hodnoty chybových frekvencí, pro otáčky válce od 100 ot/min až do 2500 ot/min.

| Frekvence [Hz] pro ložisko 22216 | | | | | | |
|----------------------------------|----------|-------|----------|--------|--------|--------|
| otáčky ot/min | F_{ot} | Klec | F_{ve} | BPFI | BPFO | BPF |
| 100 | 1.67 | 0.72 | 5.85 | 19.90 | 14.30 | 11.70 |
| 500 | 8.33 | 3.59 | 23.30 | 99.60 | 71.40 | 58.60 |
| 1000 | 16.70 | 7.18 | 58.60 | 199.20 | 142.90 | 117.20 |
| 1500 | 25.00 | 10.80 | 87.90 | 298.70 | 214.30 | 175.80 |
| 2000 | 33.30 | 14.40 | 117.20 | 398.30 | 301.70 | 234.40 |
| 2500 | 41.70 | 18.00 | 146.50 | 497.90 | 377.10 | 293.00 |

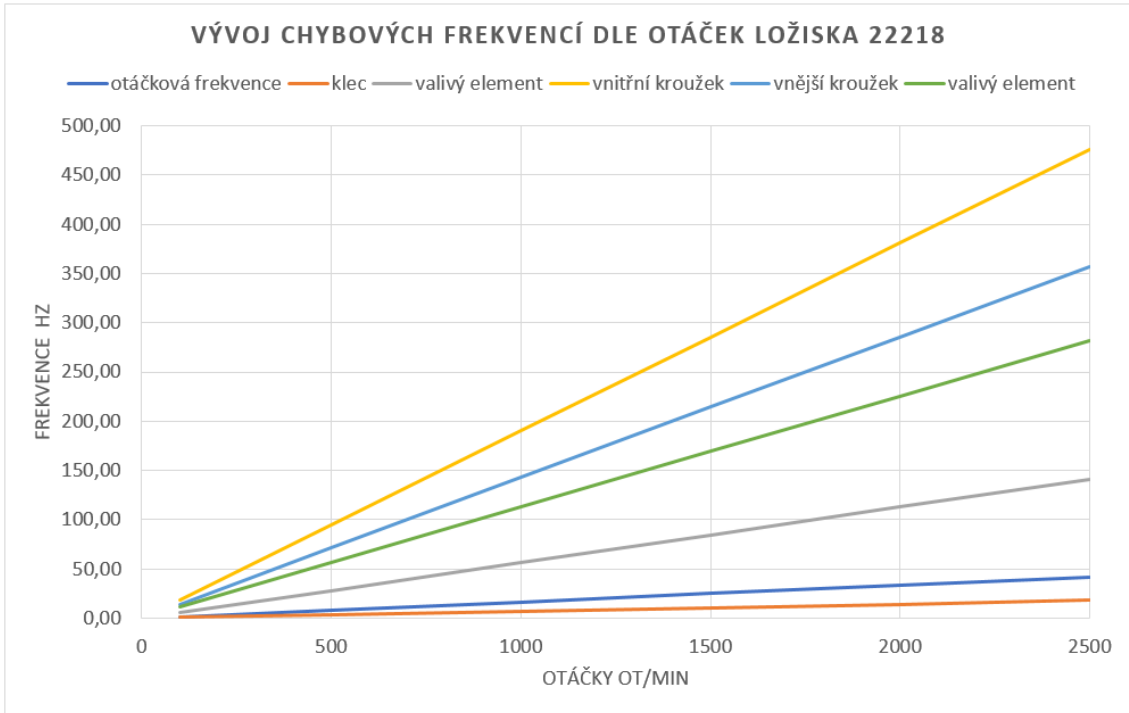
Tabulka 3.3. Tabulka s výpočtem frekvencí ložisko 22216

Význam zkratek v tabulce 3.2 3.3 :

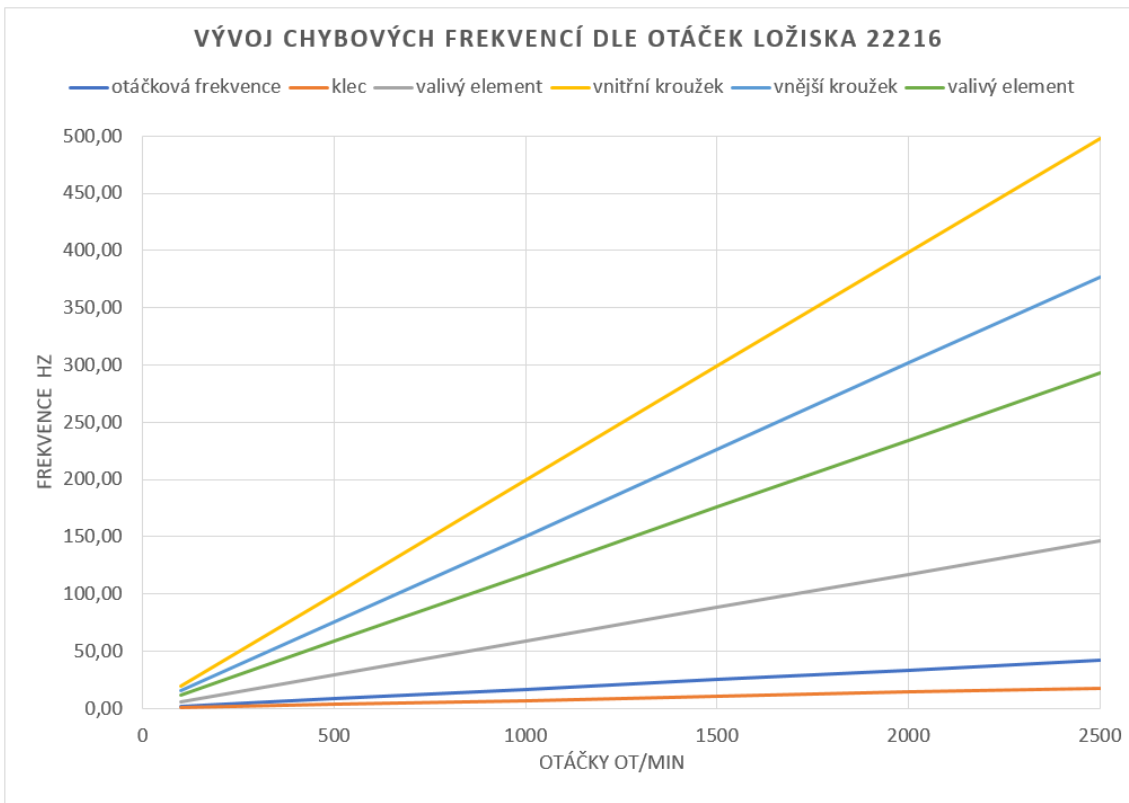
- **Fot** - otáčková frekvence hřídele.
- **Klec** - otáčková frekvence klece ložiska.
- **BPF - Frequency Ball Defect** - chybová frekvence defektu valivého tělesa nebo elementu ložiska (válečku).
- **BPFO - Frequency Outer Race Defect** - chybová frekvence defektu na vnitřní dráze vnějšího kroužku ložiska.
- **BPFI - Frequency Inner Race Defect** - chybová frekvence defektu na vnější dráze vnitřního kroužku ložiska.
- **Fve** - rotační frekvence valivého tělesa nebo elementu ložiska (válečku).

Graf závislosti rotační a chybové frekvence ložiska 22218 z tabulky 3.16 a pro 22216 z tabulky 3.17 ukazuje na lineární závislost vývoje chybových frekvencí jednotlivých mechanických částí, ze kterých je ložisko složeno. Tento fakt bylo možné očekávat, neboť přepočítání rychlosti vozu na otáčky a poté na chybové frekvence je lineární, nicméně tyto výsledky budou využity pro vyhodnocení přesnosti měření otáček. Vypočtené hodnoty z tabulek 3.16 3.17 v budoucnu umožní určit přesnost měření otáček inkrementálním čidlem umístěným na hřídeli pohonu.

Výpočty uvedené v této kapitole popisují jak chybové frekvence ložisek použitých na lince zabíhacích válců, tak otáčkovou frekvenci hřídele, valivých elementů a klece ložiska. Sledováním amplitud na těchto frekvencích je možné charakterizovat druh a míru vývoje opotřebení konkrétní částí ložiska.



Obrázek 3.16. Graf závislosti rotační frekvence a chybové frekvence ložiska 22218



Obrázek 3.17. Graf závislosti rotační frekvence a chybové frekvence ložiska 22216

Na ose x jsou vyneseny otáčky válců, které se během zkoušky pohybují od 0 do přibližně 2000 ot/min. což odpovídá přibližně rychlosti automobilu 190 km/h.

Kapitola 4

Databáze naměřených signálů

Databáze naměřených průběhů signálů obsahuje signály ze všech měřených bodů ze zabíhacích válců, tedy šestnáct měřících míst. Obsahuje záznamy průběhu vibrací ze šestnácti uložení válců – ložisek. Záznamy byly pořízeny periodicky v době od prosince 2017 do dubna 2018 dvakrát za měsíc. Měření probíhalo pomocí software VSE004 a připojení přes ethernetovou síť ve ŠKODA AUTO, tedy vzdáleně. Měření se provádělo pokaždé v době běžného provozu montážní haly pro vozy ŠKODA. Kdyby nebylo možné provádět měření pomocí síťového ethernet rozhraní, měření by se provádělo pochůzkovou metodou, a to by bylo možné jenom v době mimo běžný provoz montážní haly. Pochůzková metoda měření má také nevýhodu, a to přístup k uložení válců v ložiskách (domeček ložiska), kdy pro přiložení vibračního senzoru je nezbytné demontovat ochranné krytování na lince zabíhacích válců, což je z časových důvodů možné provést jenom mimo dobu běžného provozu montážní haly – tedy mimo výrobní program ŠKODA AUTO. Četnost pochůzkového měření je tím pádem nedostačující pro vytvoření databáze signálů a zachycení rozvoje mechanického opotřebení ložisek.

Postup měření - Vzhledem k nutnosti ukládat naměřená data v první fázi experimentu ručně, byl použit následující postup. Naměřené signály byly pokaždé pořizovány v době, kdy právě probíhala zabíhací zkouška automobilu, tedy výrobní pracovník řídící automobil najíždí na válce a navolí začátek testovací zkoušky. Najetí vozu na válce lze pozorovat jako vibraci, která se převádí také na ložiska a je možné ji vidět v online náhledu programu VSE004. Výrobní pracovník začíná pomalu rozjíždět automobil na první rychlostní stupeň, což je také patrné na narůstající amplitudě zrychlení. Tato testovací sekvence probíhá dle aktuální potřeby výrobního pracovníka (který provádí také nastavování a testování dalších akčních členů v automobilu pomocí diagnostického přístroje) a netrvá u každého testovaného auta stejně dlouho. Až dosáhne amplituda zrychlení svých maximálních otáček (co se taky projeví na ustálené úrovni hladiny vibrací na ložiscích), provede se trigger (start měření) na daném ložisku. Maximální otáčky nejsou u každého měření pevně stanoveny, protože jejich hodnota do značné míry závisí od právě testovaného automobilu a personálu na výrobní směně ve ŠKODA AUTO a.s. Z pozorování a měření bylo zjištěno, že amplituda zrychlení se ustálí při dosažení rychlosti přibližně 190 km/h testovaného automobilu, což odpovídá otáčkové frekvenci válců 33,3 Hz a tedy 2000 otáček za minutu. Délka samotného měření závisí od aktuálních podmínek testovaného automobilu, ale minimálně obsahují soubory při vzorkovací frekvenci 20 kHz víc než 100 000 tisíc vzorků každého ložiska.

Zpracování záznamu - naměřené záznamy se za účelem dalšího zpracování převáděly ze software VSE004 pomocí exportování z datového formátu .idat (vnitřní formát pro záznam dat programu VSE004) do formátu .csv programu Excel. Pomocí programu Excel byly z dat ve formátu .csv vybrány jenom hodnoty, které

odpovídají naměřeným veličinám vibrací a převedeny do formátu .mat a dále zpracovány software Matlab ve verzi 2017b a poté verzi 2018a. Nevýhodou tohoto postupu je pracnost převádění naměřených numerických hodnot a fakt, že software Excel nedokáže zobrazit víc než 1 milion navzorkovaných hodnot v řádcích, což někdy znamená, že při vyšší vzorkovací frekvenci je postup převodu dat z formátu .idat do formátu .csv nemožný, bez toho aniž by bylo měření rozděleno už přímo v software VSE004. Tato nevýhoda manuálního zpracování záznamu se dá eliminovat použitím vzdáleného přístupu mezi software Matlab a elektronickým převodníkem VSE100 pomocí komunikačního protokolu OPC-UA na komunikační vrstvě ethernetové sítě ve ŠKODA AUTO a.s.

| | |
|---|--|
| 1 | DeviceID;DeviceName;VESID;Type;Name;Timestamp;Unit;SampleRate;Value; |
| 2 | {e694d3f6-5f52-451a-959b-8ae2c5164a1e};VSE100_01;1;RawData;Sensor 1;1512626282785000;m/s ² ;20000;71.31829071; |
| 3 | {e694d3f6-5f52-451a-959b-8ae2c5164a1e};VSE100_01;1;RawData;Sensor 1;1512626282785050;m/s ² ;20000;-80.48744202; |
| 4 | {e694d3f6-5f52-451a-959b-8ae2c5164a1e};VSE100_01;1;RawData;Sensor 1;1512626282785100;m/s ² ;20000;82.80965424; |
| 5 | {e694d3f6-5f52-451a-959b-8ae2c5164a1e};VSE100_01;1;RawData;Sensor 1;1512626282785150;m/s ² ;20000;-60.6169548; |
| 6 | {e694d3f6-5f52-451a-959b-8ae2c5164a1e};VSE100_01;1;RawData;Sensor 1;1512626282785200;m/s ² ;20000;18.05101967; |

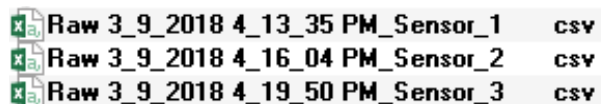
Obrázek 4.1. Příklad - ukázka náhledu výstupního souboru z měření v .csv tabulce

Význam standardu pro označování naměřených průběhů:

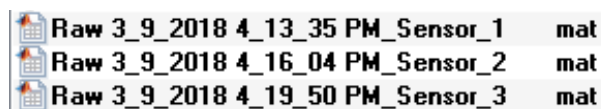
- Raw - označuje druh měření, raw znamená neupravený signál s $f_s = 20$ kHz
- 3_9_2018 - uvádí datum naměřeného průběhu
- 4_13_35 PM - označuje čas pořízení průběhu
- Sensor_1 - název měřicího místa, čidla

Interpretace záznamu měření v časové oblasti - k vizualizaci navzorkovaného signálu se použil software Matlab s nainstalovaným toolboxem Signal Processing Toolbox, který obsahuje nástroj na základní zobrazení, úpravu a zpracování signálu Signal Analyzer. Většina zaměřených průběhů má délku záznamu od pěti sekund do padesáti sekund, a to protože limitujícím faktorem je schopnost měřicí jednotky VSE 100 při vzorkovací frekvenci $f_s=20$ kHz exportovat měřený záznam delší než 50 vteřin, a tedy 1024000 vzorků. Vzhledem na povahu měření takový dlouhý záznam není potřeba. K dalším výpočtům výkonového spektra a obálkového spektra se využívá přibližně 500 ms až 1000 ms záznamu, který má stacionární charakter a jeho amplituda (největší zrychlení nebo vychylka) je v maximálních hodnotách.

Obrázky zobrazují strukturu databáze, která obsahuje záznamy jak ve formátu .csv, tak ve formátu .mat, řazeny jsou sestupně od senzoru 1 až po sensor 16. Všechna měření jsou standardně popisována dle vzoru na obr.: 4.2 a 4.3.



Obrázek 4.2. Příklad - ukázka náhledu výstupních souborů ve formátu .csv



Obrázek 4.3. Příklad - ukázka náhledu výstupních souborů ve formátu .mat

Kapitola 5

Návrh metody popisu vývoje stavu ložisek

V této kapitole je popsán návrh metody, pomocí které může jak diagnostik, tak automatizovaný systém klasifikovat míru poškození ložisek na lince zabíhacích válců a tím pádem bude moct předem informovat provozovatele zařízení o potřebě servisního zásahu. Návrh metody slouží pro sledování vývoje opotřebení ložisek, pomocí které lze předejít poruchovým stavům a případným odstávkám zařízení pro zabíhání automobilů ŠKODA a také nemalým finančním ztrátám. Dalším aspektem je hospodárnost provozu a maximální využití životnosti současných ložisek. Během sestavování databáze signálu a provádění zpracování signálů vibrací ložisek bylo zjištěno několik problémů, které je nutné při návrhu metody zohlednit.

- **Stacionarita naměřeného signálu**
- **Spuštění (trigger) měření**
- **Shodná délka všech měření**
- **Přesná informace o aktuálních otáčkách**

Stacionarita naměřeného signálu: Vzhledem ke zkušenostem získaným při řešení této práce a z provedených zkoušek automobilů na zabíhacích válcích je zřejmé, že nutnou podmínkou provádění záznamu měření v odpovídající fázi zabíhání automobilu je dosažení a udržení stacionárního záznamu vibrací na jednotlivých ložiskách. Pro tyto účely byl vytvořen jednoduchý algoritmus v prostředí Matlab, pomocí kterého se provádí odhad míry difference oken signálu se zobrazením stacionárních úseků signálu.

Test stacionarity využívá pouhé Fourierovy transformace. Zde je použit jako základní páteř procházení vibračního cyklu "for". V jedné iteraci se vyjmou ze signálu dvě okna o předem stanovené délce, kterou si na začátku programu můžeme navolit. Po aplikaci FFT na obě okna $Y_1[k]$ a $Y_2[k]$, je vypočten kvadrát modulu, který je následně filtrován dolní propustí pro vyhlazení spektra. Výsledky jsou použity pro výpočet difference $DIF[k]$, jejíž hodnoty jsou průběžně ukládány. Vektor difference byl vypočten podle vzorce (1), který byl vybrán z důvodu jeho jednoduchosti a používá se jako jedna z metod při sledování stacionarity průběhu signálu EEG.

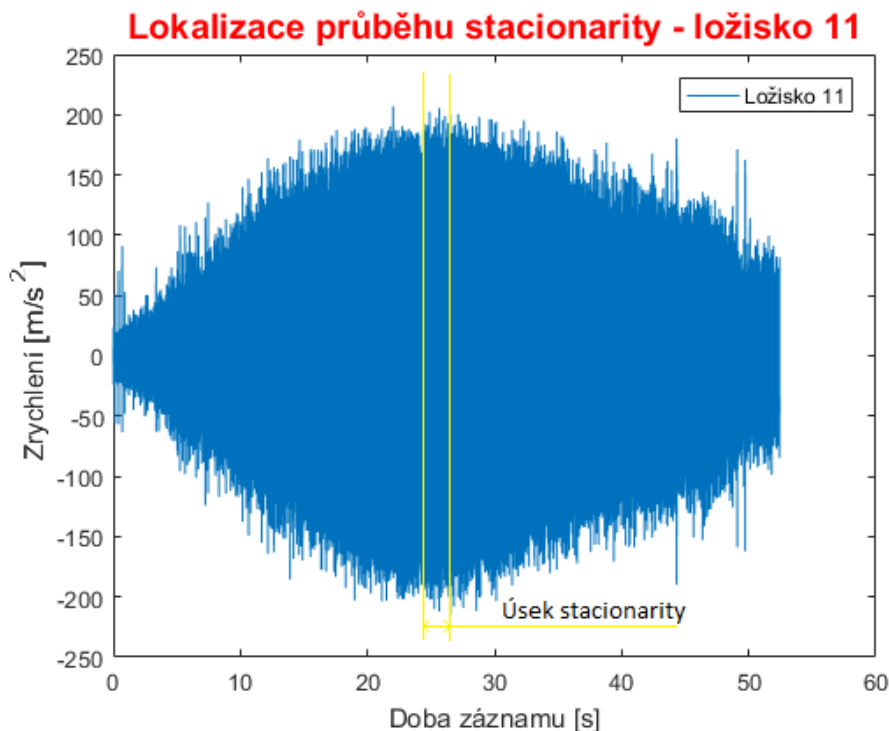
$$DIF[k] = \frac{1}{2} \left[\frac{Y_1[k]}{Y_2[k]} + \frac{Y_2[k]}{Y_1[k]} - 1 \right] \quad (1)$$

Vektor hodnot difference je procházen s pomocí cyklu while s opětovným využitím oken. V okně je hledána maximální vyskytující se hodnota difference a jsou detekovány průchody nad předem stanovenou prahovou hodnotu. Tato místa jsou uložena do proměnné polohy. Na konci programu je série příkazů odpovídající za následné zobrazení grafu signálu s vyznačenými segmenty a zobrazení grafu hodnot difference.

Volbu prahu ovlivňují proměnné jako množství lepidla na připevnění čidla, nelinearita čidla a taky samotné umístění čidla. Pro každé ložisko byly hodnoty velikosti oken a prahu diference stanoveny experimentálně.

Tento postup bude v budoucnu doplněn o statistické testy stacionarity, které umožní použít spektrální nebo keprstrální vzdálenost. Statistické vyhodnocení doposud nebylo možné provést z důvodu nedostatku dat a z důvodu, že databáze neobsahuje signály vibrací za celý životní cyklus ložisek.

Zobrazení 2.3 ilustruje výsledek algoritmu, pro zjištění stacionárního úseku na příkladu průběhu vibrací ložiska 11 v období květen.



Obrázek 5.1. Určení úseku stacionarity signálu pomocí FFT.

Spuštění (trigger) měření: Během vytváření databáze signálů ze zabíhacích válců byl zjištěn také problém spuštění měření, dále jenom trigger měření. Jedná se o moment, kdy se pošle povel převodníku VSE100 pro ukládání záznamu z aktuálního průběhu vibrací na ložiscích. Trigger měření se provádí manuálně diagnostikem, na základě odhadu počátku stacionárního úseku a maximálních otáček dosažených u testování automobilu na válcích. Manuálně lze trigger provádět v daný moment u měření jenom jednoho kanálu převodníku VSE100.

Shodná délka všech měření: Z důvodu dalších výpočtů spektra a obálového spektra je nutné používat délku záznamu, která je u všech měření shodná. Během vytváření databáze byly pořizovány záznamy s rozdílnými délkami, které byly následně před zpracováním a výpočty manuálně zkráceny a upraveny na požadované délky. Pro zjednodušení zpracování dat je přínosné už v kroku měření signálu provádět záznamy o shodné délce se shodnou vzorkovací frekvencí.

Přesná informace o aktuálních otáčkách: Pro nejpřesnější výpočet hodnoty chybových frekvencí je nutné mít přesnou informaci o aktuálních otáčkách ložisek.

Vzhledem na povahu zkoušky a rozdíly maximálních otáček při testování různých modelů automobilů a také vzhledem na rozdíly ve způsobu testování u různých výrobních pracovníků, je žádoucí mít společně s naměřeným průběhem vibrací zanesenou informaci o aktuálních otáčkách válců a ložisek přímo do měření. Aktuální otáčky nebylo možné při aktuálním vybavením měřicího systému snímat a měřit.

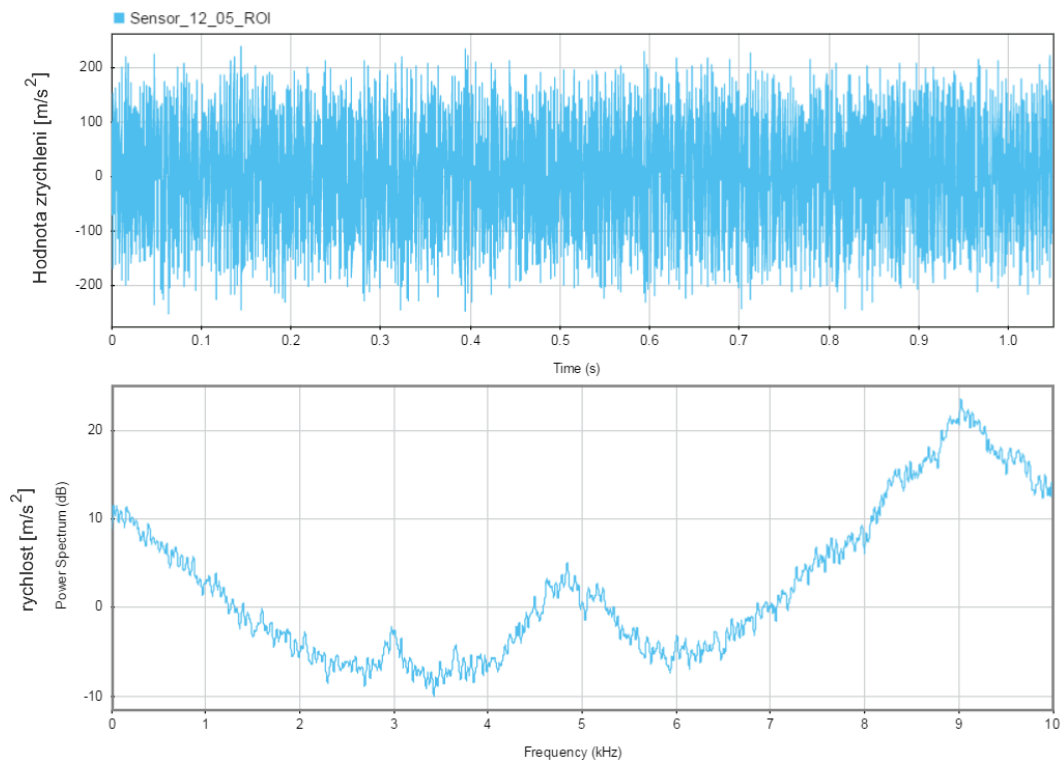
5.1 Porovnání vývoje signálu ve spektrální oblasti

Tato část práce ilustruje časový průběh získaného měření a jeho spektrální průběh.

Na obrázku 5.2 je zobrazené spektrum signálu do 10 kHz na ose x, amplituda na ose y zobrazuje výkon signálu na jednotlivých frekvencích zobrazený v jednotkách dB. Důvodem je přehlednější zobrazení celého výkonového spektra. V tomto režimu zobrazení je nejvíce patrný vliv nestacionarity signálu na výpočet výkonového spektra.

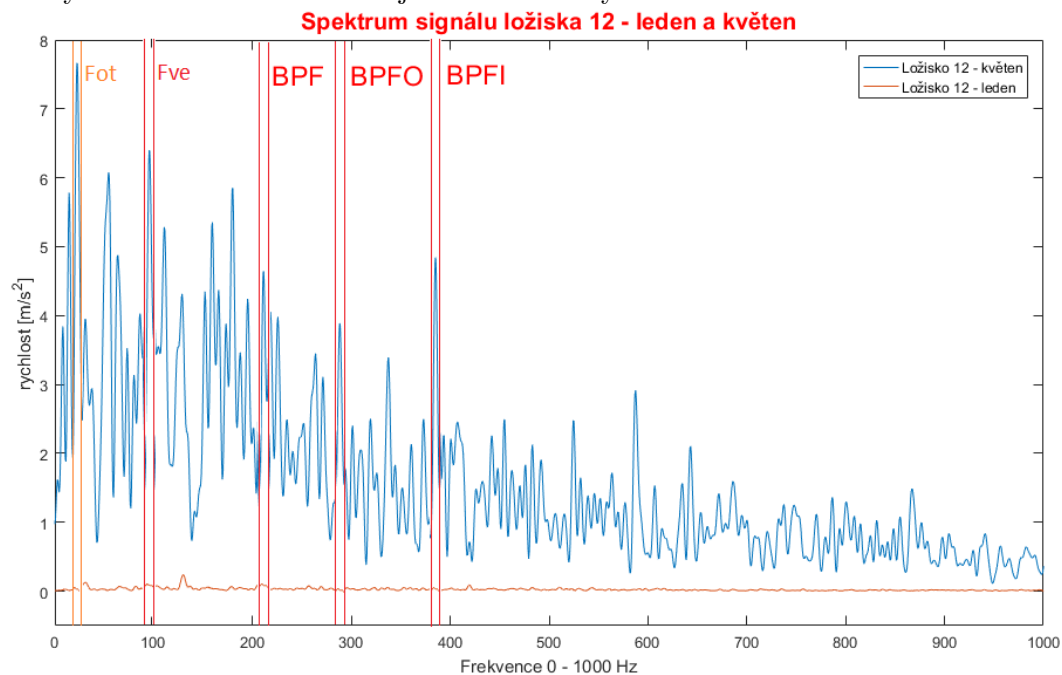
Dané spektrum interpretuje výkon signálu jednotlivých frekvencí, přičemž frekvenční spektrum od 0 do 1000 Hz obsahuje hodnoty frekvencí, mezi kterými se nacházejí chybové frekvence námi sledovaného vývoje poruchy ložiska, další harmonické složky, jak otáčkové frekvence hřídele, tak samotných chybových frekvencí. V této oblasti se projevuje čtvrté stádium opotřebení ložisek (jak bylo popsáno v předchozí kapitole). Oblast frekvencí od 1 kHz do 6 kHz obsahuje další harmonické složky chybových frekvencí ložisek, ale hlavně zde se projevují další mechanické zdroje rušení, mezi které patří odvalování kol právě zajížděného automobilu, rušení od ozubeného řemenu, kterým jsou připojeny válce mezi přední a zadní nápravou, vibrace konstrukce strojního zařízení apod.

Oblast frekvencí nad 6 kHz až do 10 kHz obsahuje náhodný šum, který se dostává na elektronický převodník VSE100 a také šum z vibračního čidla VSA001, protože zde končí jeho frekvenční rozsah. Jednotlivá výkonová spektra všech šestnácti ložisek jsou hodně rozdílná. Souvisí to ve své podstatě s mechanickým rozložením na lince zabíhacích válců, dále s metodou upevnění všech vibračních čidel a to pomocí epoxidového lepidla, dále jsou to nelinearity samotných čidel VSA001 a v neposlední řadě umístění těchto čidel v horizontální rovině na domečkovém uložení ložisek, které nebylo provedeno úplně ve stejný poloze u všech domečků z důvodu výrobních nesymetrií vnějších ploch na domečku.



Obrázek 5.2. Příklad - ukázka náhledu výkonového spektra vibrací ložiska číslo 12 z databáze v období květen 2018

Průběh výkonu do frekvence 1 kHz může evokovat, že naměřený průběh zrychlení vibrací není vycentrovaný a obsahuje stejnosměrnou složku. Za tímto účelem se provedl výpočet stejnosměrné složky průběhu zrychlení ložiska 12, výsledkem ale byla minimální hodnota stejnosměrné složky.



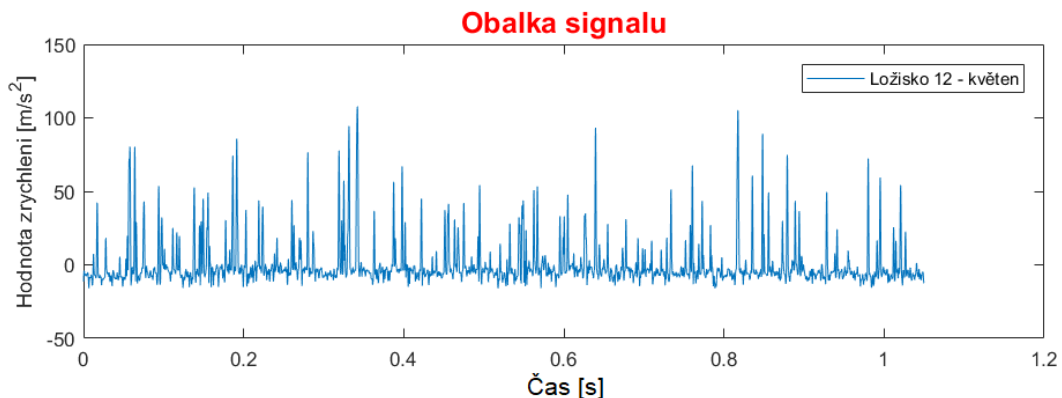
Obrázek 5.3. Spektrum vibrací ložiska číslo 12 z databáze 2018

Signál na obrázku 5.3 vykresluje detail spektra ve frekvenčním rozsahu od 0 do 1kHz, pro ložisko 12 v období leden a květen, kde se objevuje opotřebění ložiska. Toto opotřebění je patrné z maxima na frekvencích:

- **Fot** - otáčková frekvence hřídele, Peak přibližně na 28 Hz.
- **Fve** - rotační frekvence valivého tělesa nebo elementu ložiska (válečku), Peak přibližně na 98 Hz.
- **BPF - Frequency Ball Defect** - chybová frekvence defektu valivého tělesa nebo elementu ložiska (válečku), Peak přibližně na 209 Hz.
- **BPFO - Frequency Outer Race Defect** - chybová frekvence defektu na vnitřní dráze vnějšího kroužku ložiska, Peak přibližně na 287 Hz.
- **BPFI - Frequency Inner Race Defect** - chybová frekvence defektu na vnější dráze vnitřního kroužku ložiska, Peak přibližně na 390 Hz.

5.2 Porovnání vývoje signálu pomocí okamžité spektrální obálky

Tato sekce ilustruje možnost použití okamžité a spektrální obálky pro popis stavu ložiska.



Obrázek 5.4. Obálka signálu vibrací ložiska 12 - květen 2018

Průběh signálu představuje obálku 5.4 získanou pomocí Hilbertovy transformace (dále jenom HT). Tato metoda je vhodná pro detekci náhodných či opakujících se pulzů při měření stavu ložisek za jinak stacionárních podmínek. Obrázek 5.4 zobrazuje výskyt těchto pulzů v časech $t = 0.32, 0.64, 0.82 \dots N/f s$. Pokud je výskyt pulzů periodický, tak je možné konstatovat poškození ložiska, jedná se v tomto stavu o narážení valivého elementu na poškození jednoho z kroužků, případně klece ložiska.

Ve frekvenční oblasti je Hilbertova transformace (s využitím věty o konvoluci v časové oblasti Fourierovy transformace) definována jako:

$$H\{X(f)\} = X(f) \cdot H(f) \quad (2)$$

Výpočet HT ve frekvenční oblasti tedy odpovídá vynásobení kladné části spektra činitelem j a $-j$ u záporné části spektra. Aplikací IFT na vztah:

$$H(f) = F\{h(t)\} = -j \cdot \text{sgn}(f) \quad (3)$$

potom dostaneme

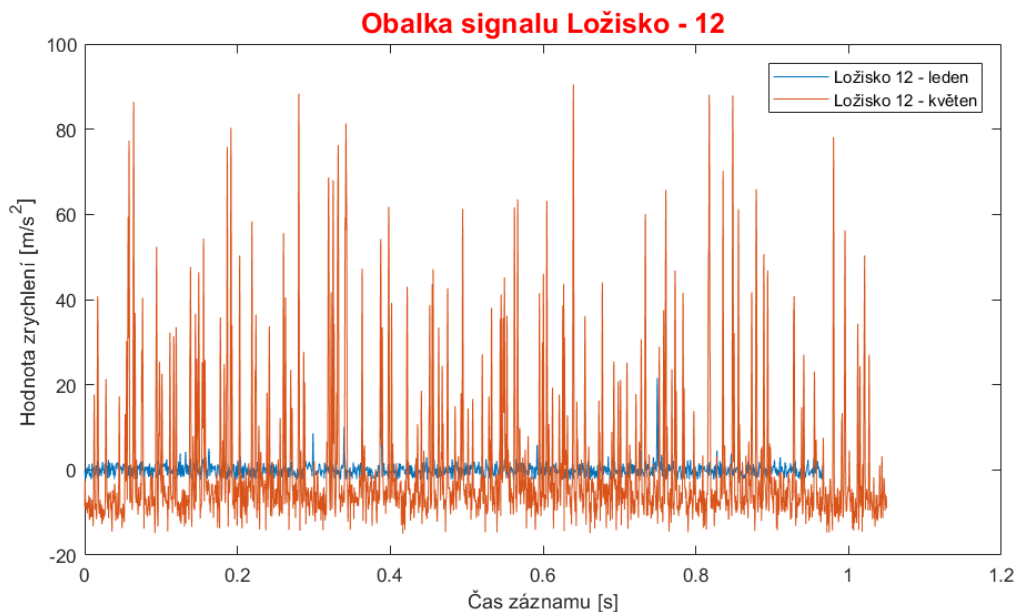
$$F^{-1}\{H(f)\} = F^{-1}\{F\{x(t)\} - j \cdot \text{sgn}(f)\} \quad (4)$$

Jinak řečeno, po následné IFT získáme kvadraturní složku $x_Q^2(t)$ vstupního signálu $x(t)$. Kvadraturní složku signálu lze získat jednak přímou aplikací HT na vzorkovaný signál, mnohem častěji se ale setkáme s jejím generováním pomocí analogového kvadraturního směšovače, či přibližným výpočtem číslicovou filtrací tzv. Hilbertovým transformátorem.

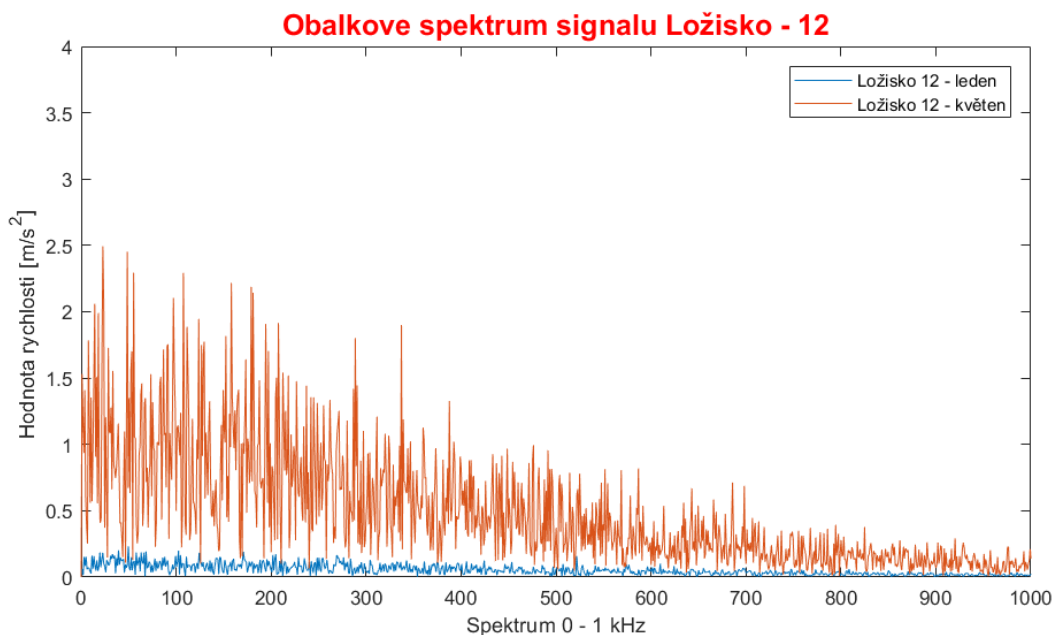
Okamžitá obálka signálu $x(t)$ je dána vztahem:

$$o(t) = \sqrt{x^2(t) + x_Q^2(t)} \quad (5)$$

Metoda využívá okamžité obálky signálu vibrací jednak pro detekci náhodných rušení (průjezd manipulační techniky a podobně) v blízkosti zabíhacích válců, tak pro detekci periodicky se opakujících impulsů generovaných mechanickými rázy. Tyto rázy na obrázku 5.6 indikují poškození části ložiska (vnějšího, vnitřního kroužku, klece ložiska), poškození některého z valivých elementů, nesprávné napnutí řemene, uvolnění uložení ložiska, nevyváhu pohonu nebo jiné částí konstrukce stroje. Pro kvantifikaci míry opotřebení ložiska využívá úrovně spektrální obálky získané v průběhu životnosti ložiska.



Obrázek 5.5. Obálka signálu vibrací ložiska 12 - leden, květen



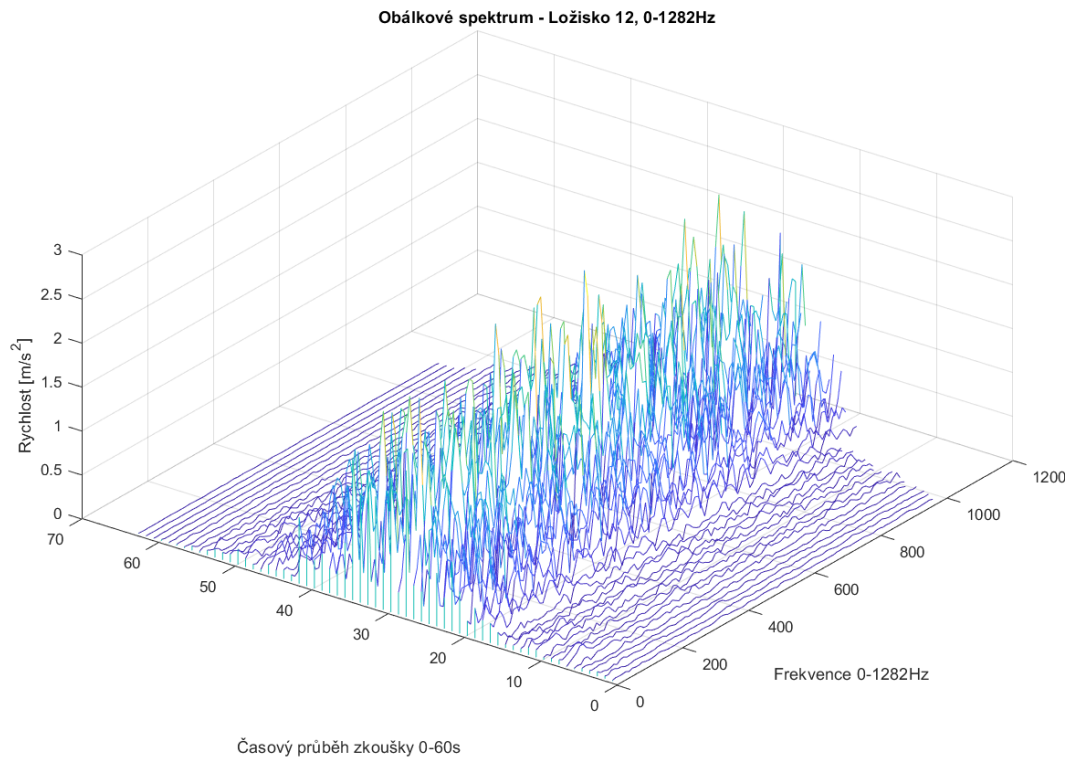
Obrázek 5.6. Obálka spektra vibrací ložiska 12 - leden, květen

Signál na obrázku 5.6 vykresluje detail spektra ve frekvenčním rozsahu od 0 do 1kHz, kde se objevuje opotřebení ložiska a je patrné z maxima na frekvencích.

Zajímavým způsobem klasifikace opotřebení ložisek se jeví zobrazení obálky spektra signálu ložiska na obrázku 5.6 s následným srovnáním z různých časových období. Na obrázku je zobrazen průběh obálky jak signálu v časové oblasti, tak jeho spektra ložiska 12 v období leden a květen. Je patrné, že v období leden byly amplitudy v okolí chybových frekvencí ložisek a jejich harmonické složky spolu s postranními pásmy v nerozvinutém stavu. Natož průběh stejného ložiska v období květen už naznačuje rozvoj mechanického opotřebení. Úseky chybových frekvencí je možné klasifikovat stejným způsobem jako v případě porovnání signálů ve spektrální oblasti na obrázku 5.3

5.2.1 Zobrazení průběhu spektrální obálky

Obálková metoda je vhodná na zobrazení celého průběhu zkoušky automobilu. Nalezení vhodného okamžiku pro spuštění měření signálů vibrací je obtížné, vzhledem na nestabilitu otáček válců během testování automobilů. Pro lepší ilustraci změny průběhu signálu během celé zkoušky je vhodné promítnutí obálkového spektra na zabíhacích válcích, viz obrázek 5.7, pomocí zobrazení ve třech rovinách.



Obrázek 5.7. Zobrazení průběhu zkoušky vozu z 0 na 2000 a na 0 rpm

Náhledy průběhů všech ložisek se nachází v části příloha této práce.

5.2.2 Metoda sledování vývoje chybových frekvencí proškoleným diagnostikem

Základním způsobem monitorování mechanického stavu ložisek je pravidelná kontrola vývoje opotřebení diagnostikem, tedy provádění měření manuálně spolu s vyhodnocením. Tato metoda je hodně časově náročná a nepřesná. Může nastat situace, kdy se poškození ložisek rozvine do takové podoby, kdy během několika dnů provozování může dojít k havarijnímu stavu. Tento stav nemusí zrovna diagnostik včasné zachytit.

- Diagnostik pravidelně pomocí vzdáleného přístupu on-line sleduje hodnoty: Historické hodnoty vývoje vibrací v časové oblasti, aktuální hodnoty vibrací jednotlivých ložisek, sleduje počítadlo případného překročení limitní hodnoty nastavené pro jednotlivá ložiska.
- Provádí měření jednotlivých ložisek v době normální produkce a záběhu vozů ŠKODA.
- Měření se provádí pomocí funkce programu VSE004 s názvem RAW data a funkce záznamu aktuálního online náhledu. Ukládá se signál vzorkovaný 20 kHz, maximální délka záznamu pro optimální další zpracování v systému Matlab by měla mít do sedm vteřin.

- Spuštění samotného záznamu signálů (trigger) se provádí v okamžiku, kdy testovaný automobil má maximální rychlost (maximální otáčky válců), která se pohybuje v závislosti od aktuálních okolností v hodnotách 160 – 210 km/h.
- Pravidelně se provádí převod záznamů z podoby RAW do souborového systému .mat, kde se v programu Matlab provede výpočet obálkového spektra.
- Aktuální průběh obálkového spektra je diagnostikem porovnán s předchozími záznamy z jednotlivých ložisek.
- V případě nárůstu exponenciálního nárůstu hodnot obálkového spektra v okolí chybových frekvencí ložisek se zvýší četnost měření.
- V momentě, kdy hodnoty chybových frekvencí dosáhnou kritických hodnot, diagnostik kontaktuje provozovatele zařízení o možné budoucí komplikaci.
- Před dokončením analýzy je možné sledovat míru nárůstu opotřebení a vydat varování, viz norma 10816-3 a obrázek 2.9.

5.2.3 Metoda automatizovaného vyhodnocení vývoje chybových frekvencí

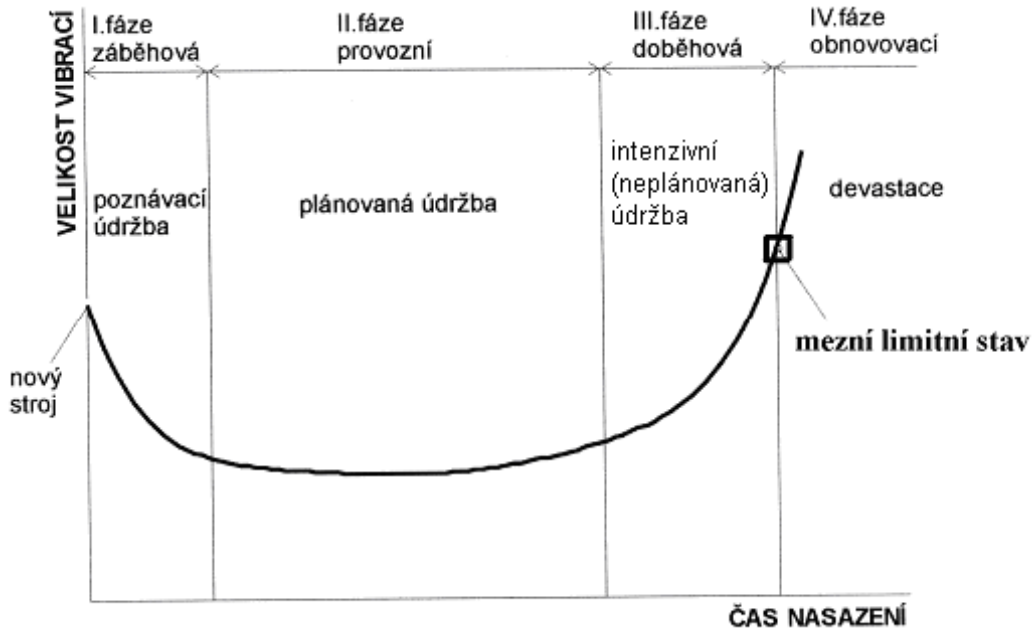
Automatizované vyhodnocení vývoje opotřebení ložisek by mělo vyřešit všechny nevýhody, které obsahuje manuální vyhodnocení proškoleným diagnostikem. Je možné provádět vyhodnocení mnohem častěji a s vyšší přesností bez nutnosti zásahu obsluhy. Automatizované testování provádí veškeré funkcionality jako v případě metody sledování vývoje chybových frekvencí proškoleným diagnostikem, ale také navíc nabízí několik výhod a to:

- Vyšší četnost měření, než je možné dosáhnout proškoleným diagnostikem.
- Komunikace pomocí síťového rozhraní s jednotkou VSE100 pomocí komunikačního protokolu OPC UA.
- Jednotný trigger spuštění měření pro všechny měřené kanály jednotky VSE100.
- Automatické sledování stacionarity průběhu měření.
- Automatické ukládání průběhů do databází na FTP server.
- Automatické vyhodnocení stavu ložisek.
- V případě překročení mezí pro varovné hlášení nebo alarmové hlášení se automaticky provede kontaktování provozovatele pomocí e-mailu, nebo SMS.

5.3 Shrnutí metod popisu vývoje stavu ložisek

Metoda sledování stavu ložisek bude využívat signály všech 16 čidel. Signály z ložisek budou po dokončení příslušného programového vybavení, automaticky vzorkovány a ukládány do databáze na serveru ve ŠKODA AUTO a.s. Periodicky budou všechny signály z celé zkoušky analyzovány s cílem určit míru opotřebení ložisek. Ze signálů budou odhalovány okamžité obálky a spektrální obálky. Překročili úroveň obálky signálu a spektrální obálky nastavenou mez, což indikuje dosažení kritické míry opotřebení ložisek, budou vygenerována dvě po sobě jdoucí varování a následně „alarm“ – informace pro provozovatele a údržbu zařízení zabíhacích válců o potřebě neprodleně provést servisní zásah.

Stanovení kritické meze vibrací bude možné až po statistické analýze databáze, která bude obsahovat záznamy z celé doby životnosti ložisek. Jedna z možností je využití vanové křivky 5.8, nicméně její parametry lze získat až po kompletaci databáze doby životnosti všech ložisek v systému.



Obrázek 5.8. Idealizovaná křivka opotřebení ložisek - Vanova křivka [1]

Návrhem pro další postup je sledování funkce vývoje opotřebení podle toho, jak funguje – vanova křivka 5.8. Vzhledem k teplotě, způsobu použití válců tato úloha není triviální, i vzhledem na to, že každé ložisko se opotřebovává nerovnoměrně a za různá časová období. Tyto tvrzení potvrzují první analýzy doposud získané databáze. Pro větší šumovou odolnost a zvýšení variability bude v budoucnu Fourierova transformace nahrazena empirickým rozkladem signálu (EMD). V případě poškození ložisek se mohou objevovat rázy, v tomto případě budeme zkoumat použití keprální analýzy pro včasnou detekci poškození ložiska.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo realizovat databázi pro měření stavu ložisek zabíhacích válců. Aby bylo možné navrhnout a vytvořit databázi signálů vibrací ložisek ze strojního zařízení zabíhacích válců ve ŠKODA AUTO a.s., bylo nutné dovybavit strojní zařízení elektronickým systémem pro měření signálů vibrací, který je možné ovládat vzdáleně pomocí síťového rozhraní v rámci IT infrastruktury. Důvodem tohoto řešení byla absence fyzického přístupu k předmětným ložiskům za účelem pravidelného měření a vyhodnocení dat.

Sestavování navrhnuté databáze probíhalo několik měsíců a pozůstávalo z měření signálů vibrací na domečkovém uložení šestnácti ložisek, pomocí kterých se odvalují zabíhací válce. Signály obsahují průběhy vibrací všech ložisek, které jsou interpretovány v hodnotách rychlosti a zrychlení m/s^2 . Během sestavování databáze se provádělo srovnávání signálů jednotlivých ložisek s rozdílným časovým vývojem za účelem najít nejvhodnější metodu analýzy popisující vývoj opotřebením mechanického stavu ložisek a uložení zabíhacích válců. První testovaná metoda byla založena na výpočtu spektra signálu pomocí Fourierovy transformace, výpočet výkonu nad frekvencemi, které nejvíce vypovídaly o stavu ložisek, takzvanými chybovými frekvencemi ložisek určené deterministickým výpočtem pomocí matematických vztahů. Další testovací metoda byla založena na výpočtu obálkového spektra nad frekvenčním pásmem, které má souvislost se stavem ložisek. Porovnáním těchto metod byl zjištěn problém, který se týká stacionarity naměřených průběhů vibrací ložisek. Za tímto účelem byl sestaven algoritmus pro testování stacionarity signálu vibrací z vytvořené databáze, fungující na základě výpočtu míry diference stacionárních segmentů signálu pomocí rychlé Fourierovy transformace.

Veškeré naprogramované algoritmy Matlab mohou být použity pro realizaci metody automatizovaného vyhodnocení vývoje chybových frekvencí ve ŠKODA AUTO a.s., pro který tato práce poskytuje dostatečné množství poznatků a ověřených faktů. V případě realizace zmiňovaného automatizovaného systému připadá v úvahu dovybavení současného elektronického systému měření vibrací o čidlo pro měření absolutní hodnoty otáčkové frekvence válců a tedy také otáček ložisek. Tento fakt vychází z poznatků o potřebě stacionarity měření, kdy byly zjištěny zjevné rozdíly mezi jednotlivě pořízenými záznamy průběhů během zabíhání automobilů, závisující od lidského faktoru obsluhy na zařízení zabíhacích válců. Pomocí aktuální informace o otáčkách bude možné provádět automatizované vyhodnocení úrovně opotřebením mechanického stavu ložisek. Realizovaná a v budoucnu postupně doplňovaná databáze signálu vibrací bude sloužit ke zvýšení spolehlivosti klasifikace míry opotřebením ložisek, co by mohlo vést ke značným finančním úsporám. Metoda sledování stavu opotřebením ložisek by také měla zabránit výpadkům a prostojům ve výrobě, způsobenými prostojem zařízení.

Příloha A

Zadání práce



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kičák** Jméno: **Milan** Osobní číslo: **457343**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Komunikační systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh databáze pro měření stavu ložisek zabíhacích válců.

Název diplomové práce anglicky:

Design of a database for measuring the condition of the roller bearings.

Pokyny pro vypracování:

1. Popište uspořádání a postup měření ze zkušebního zařízení na zabíhání motorových vozidel ŠKODA pomocí zabíhacích válců.
2. Sestavte databázi signálů vibrací ze zabíhacích válců v různých režimech provozu. Uspořádejte a popište databázi (labeling).
3. Pokuste se nalézt vhodné parametry popisující stav opotřebení ložisek a uložení zabíhacích válců. Ověřte tyto parametry pomocí srovnání databází nasnímaných v různých časech.
4. Na základě zjištěných parametrů z bodu 1 až 3 navrhnete vhodnou metodu získávání parametrů popisujících vývoj stavu ložisek a uložení zabíhacích válců.

Seznam doporučené literatury:

1. A. V. Oppenheim, R.V. Schaffer: Discrete-time signal processing. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1989
2. B.G. Quinn, E.J. Hannan: The estimation and tracking of frequency. Cambridge University Press, New York, 2001

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **30.08.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2018**

Platnost zadání diplomové práce:
do konce letního semestru 2018/2019

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

prof. Ing. Pavel Sovka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

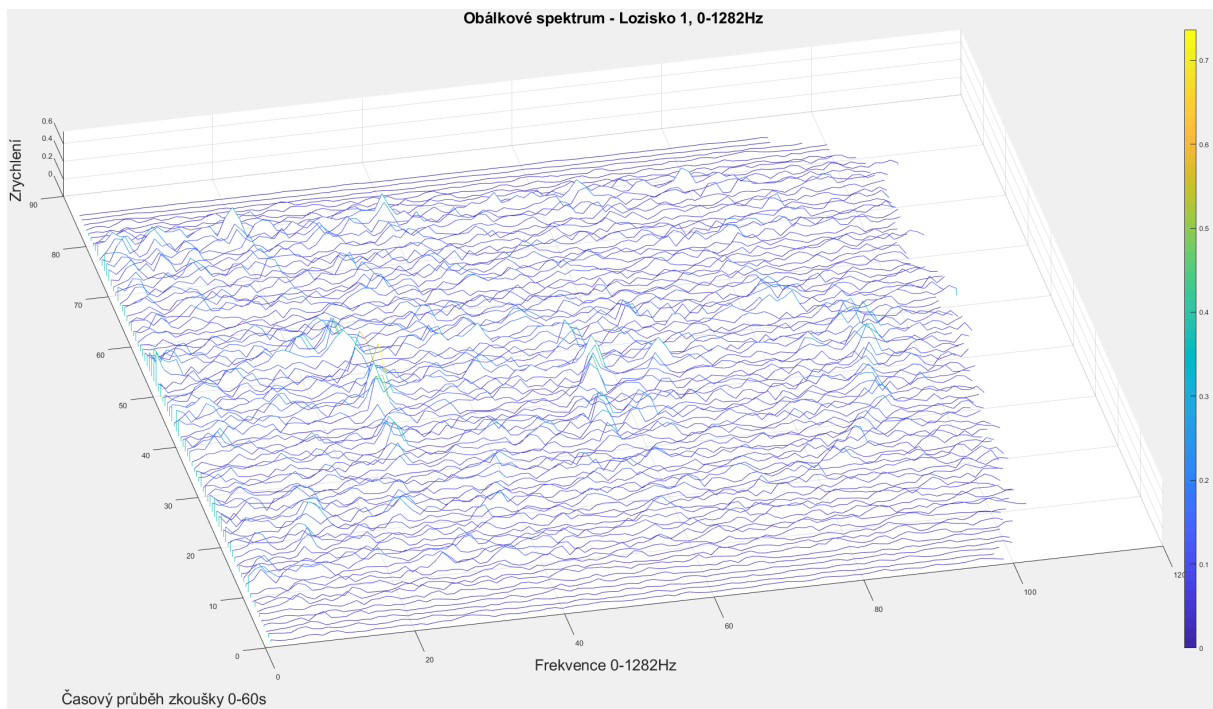
Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

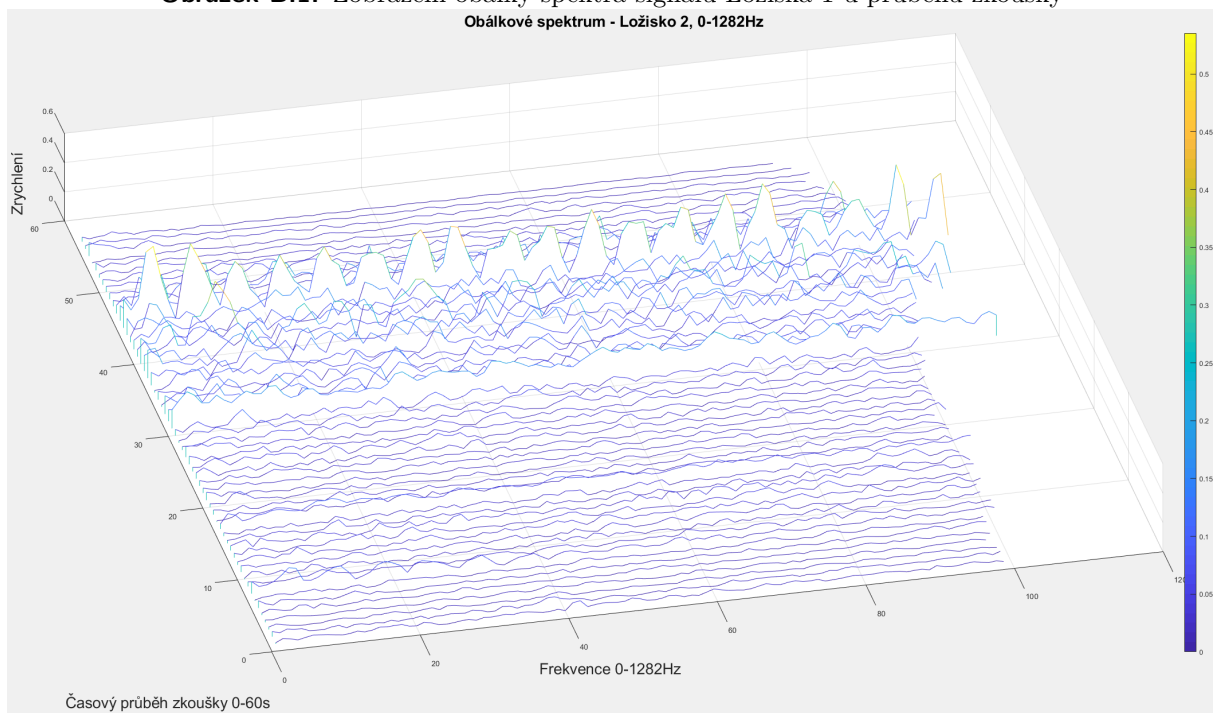
Podpis studenta

Příloha B

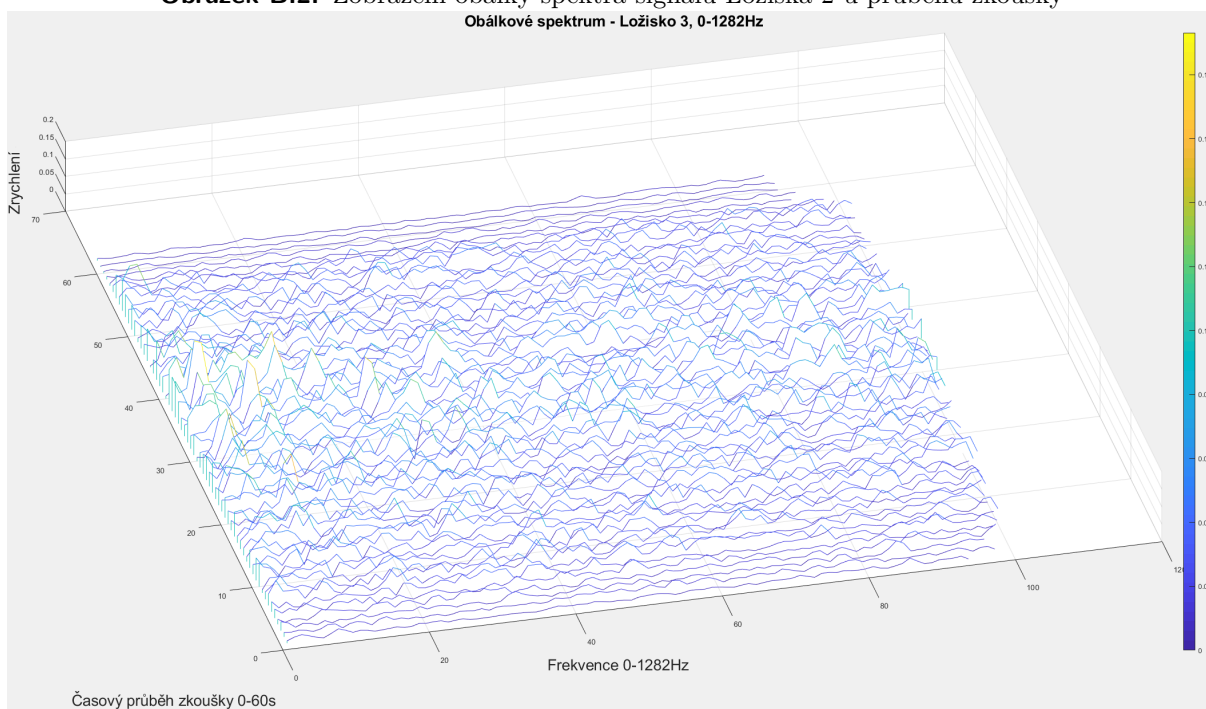
Obrázky



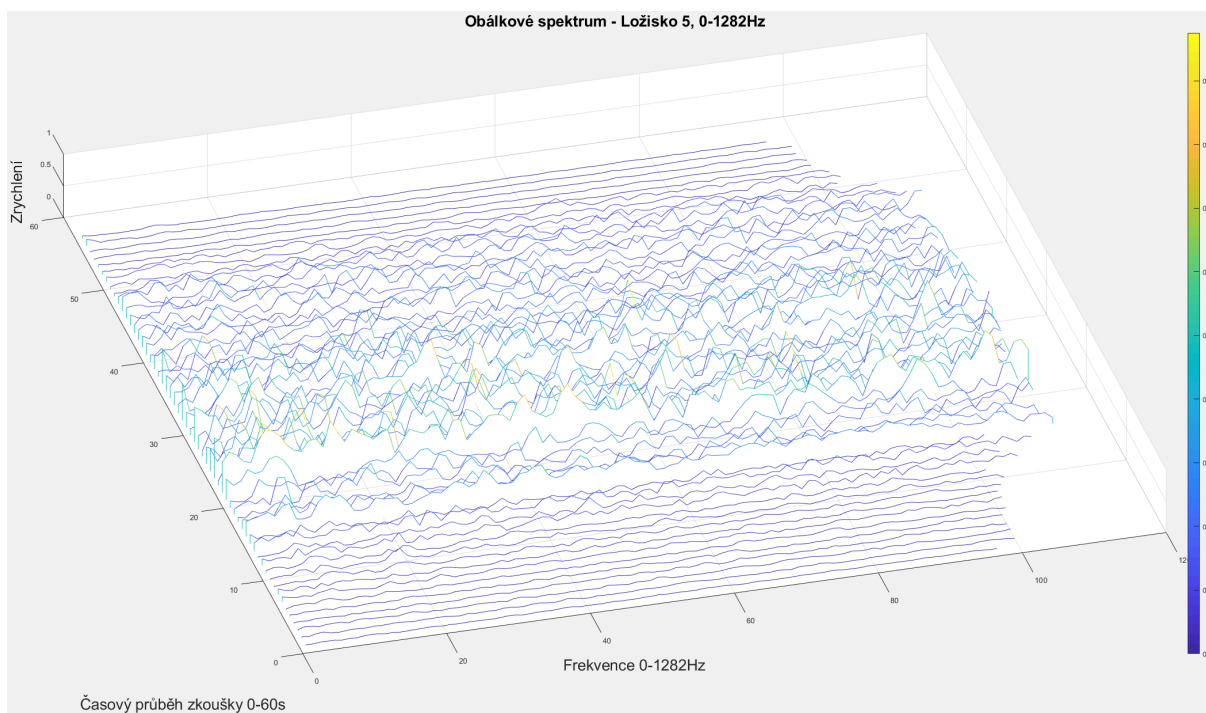
Obrázek B.1. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 1 u průběhu zkoušky



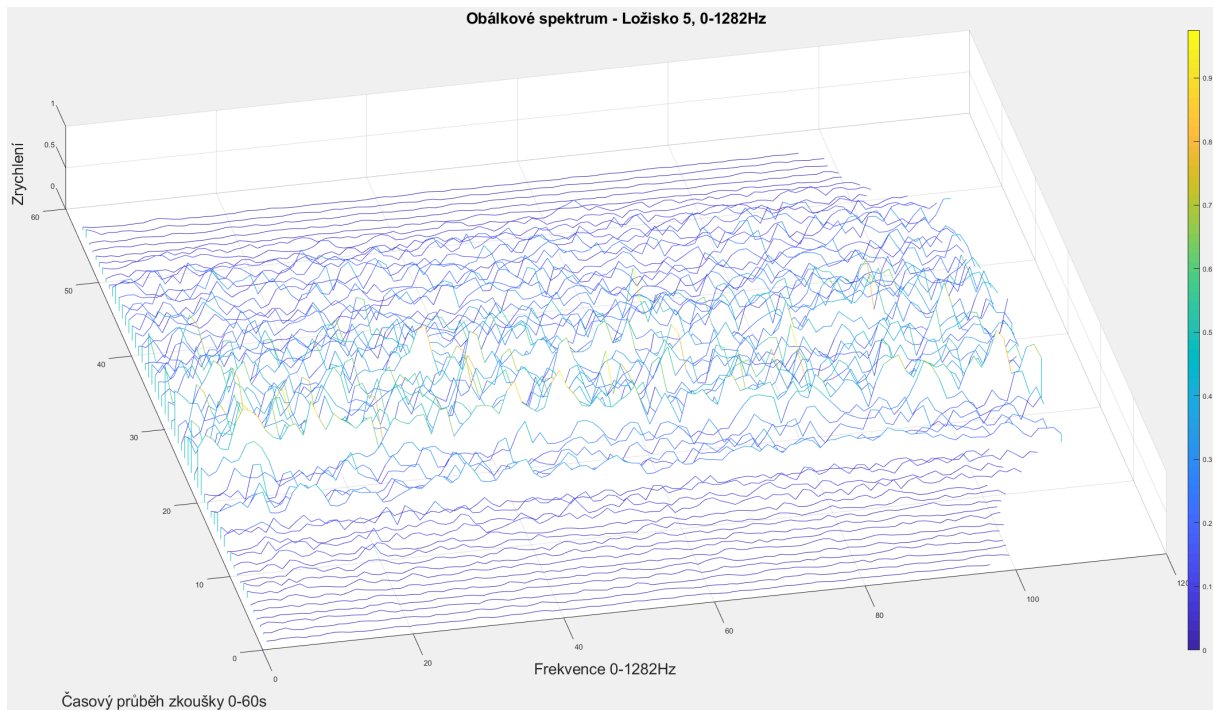
Obrázek B.2. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 2 u průběhu zkoušky
Obálkové spektrum - Ložisko 3, 0-1282Hz



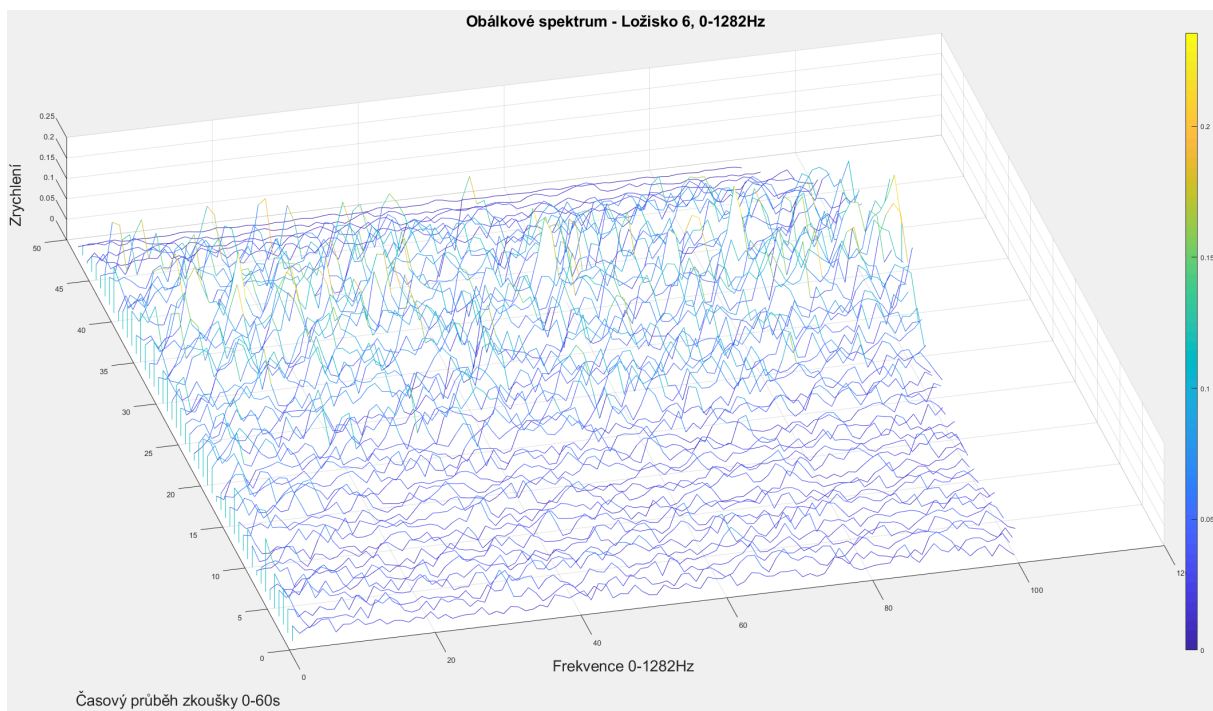
Obrázek B.3. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 3 u průběhu zkoušky



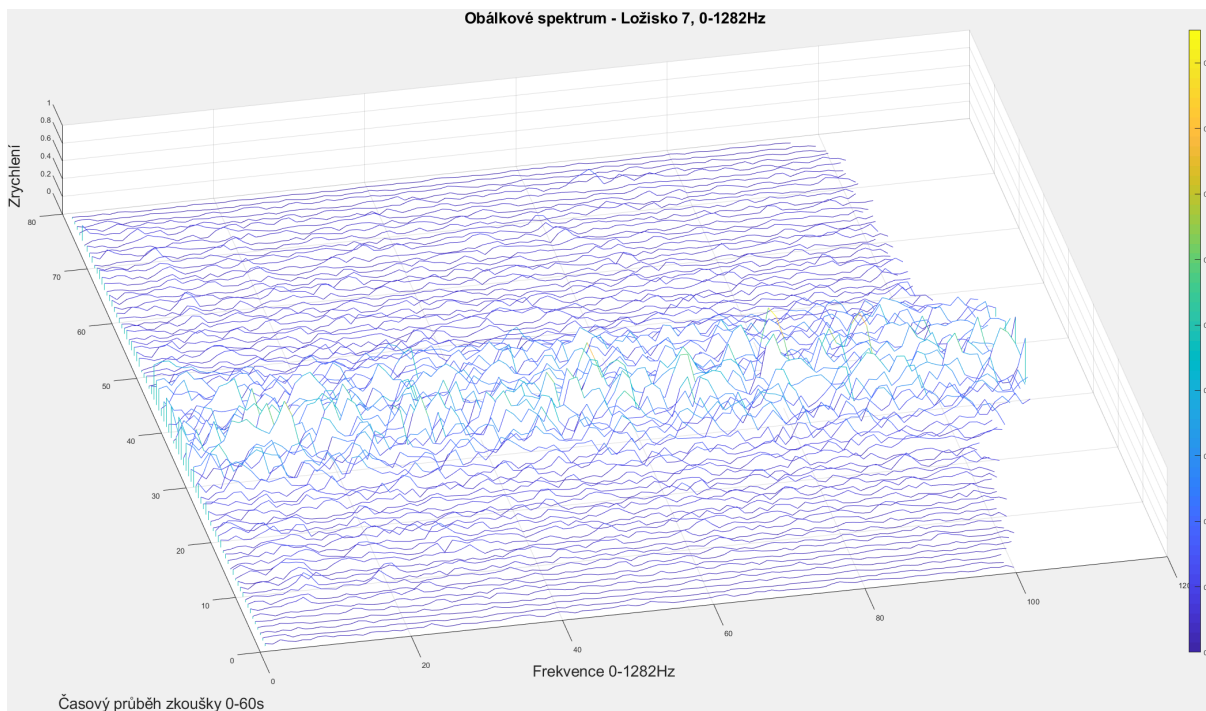
Obrázek B.4. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 4 u průběhu zkoušky



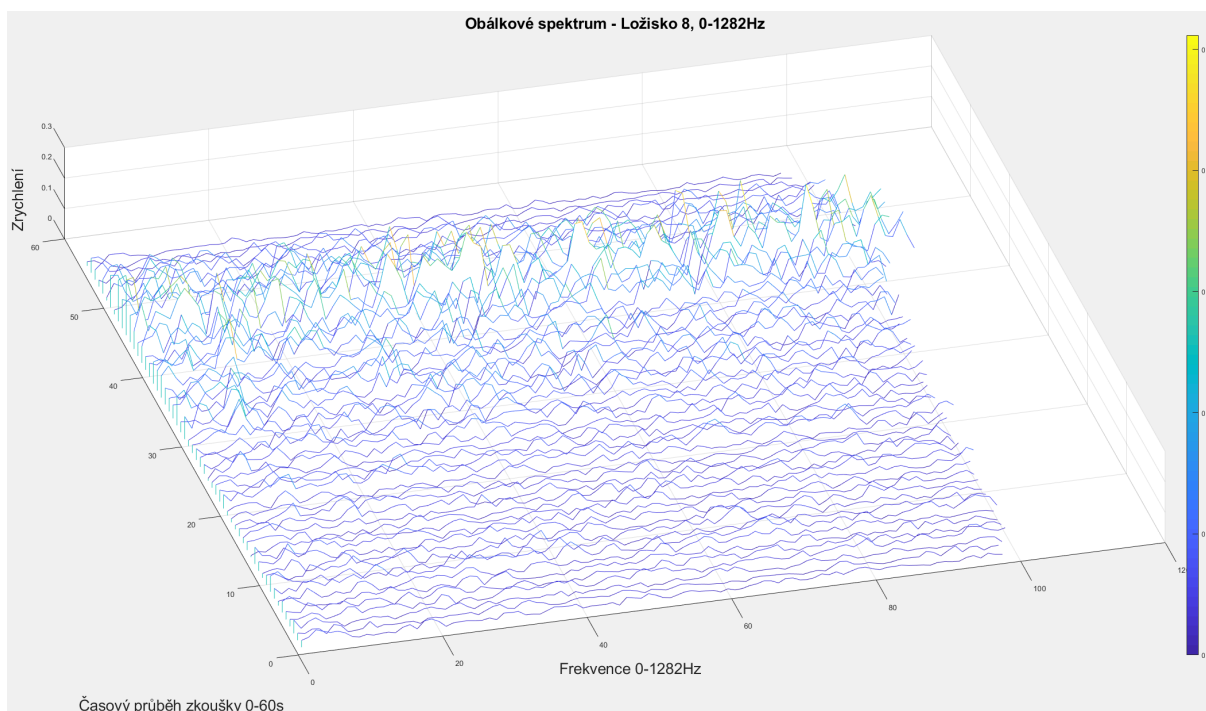
Obrázek B.5. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 5 u průběhu zkoušky



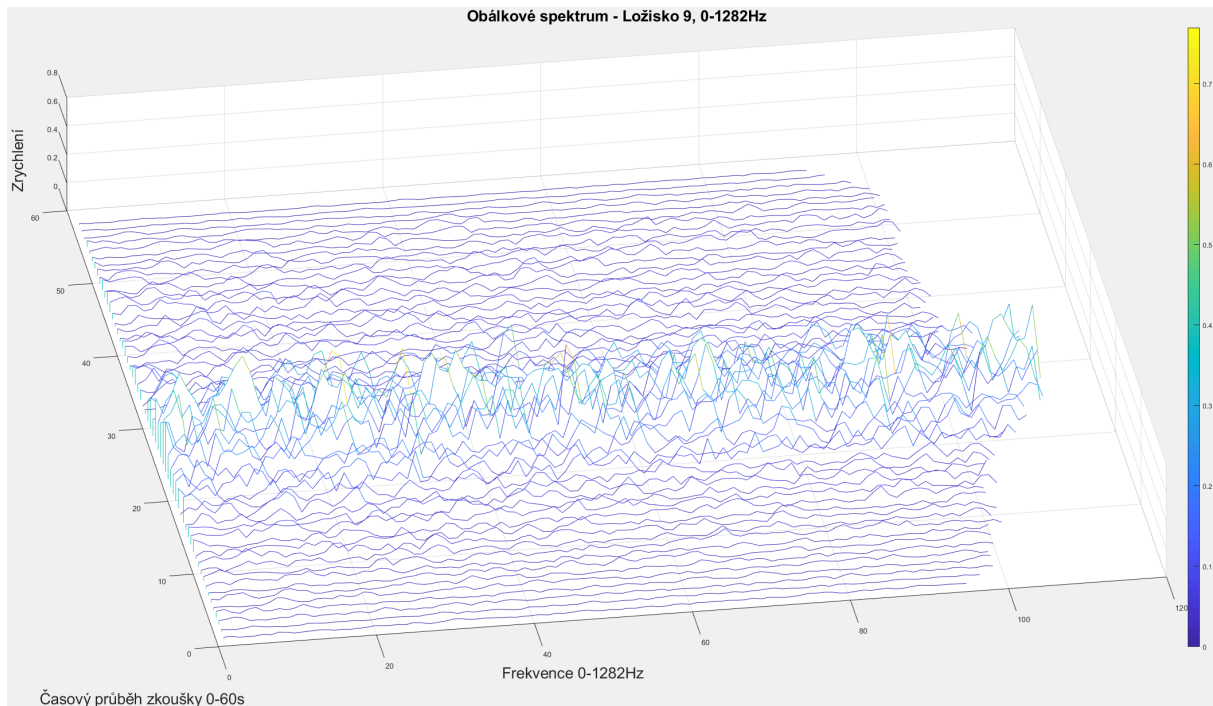
Obrázek B.6. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 6 u průběhu zkoušky



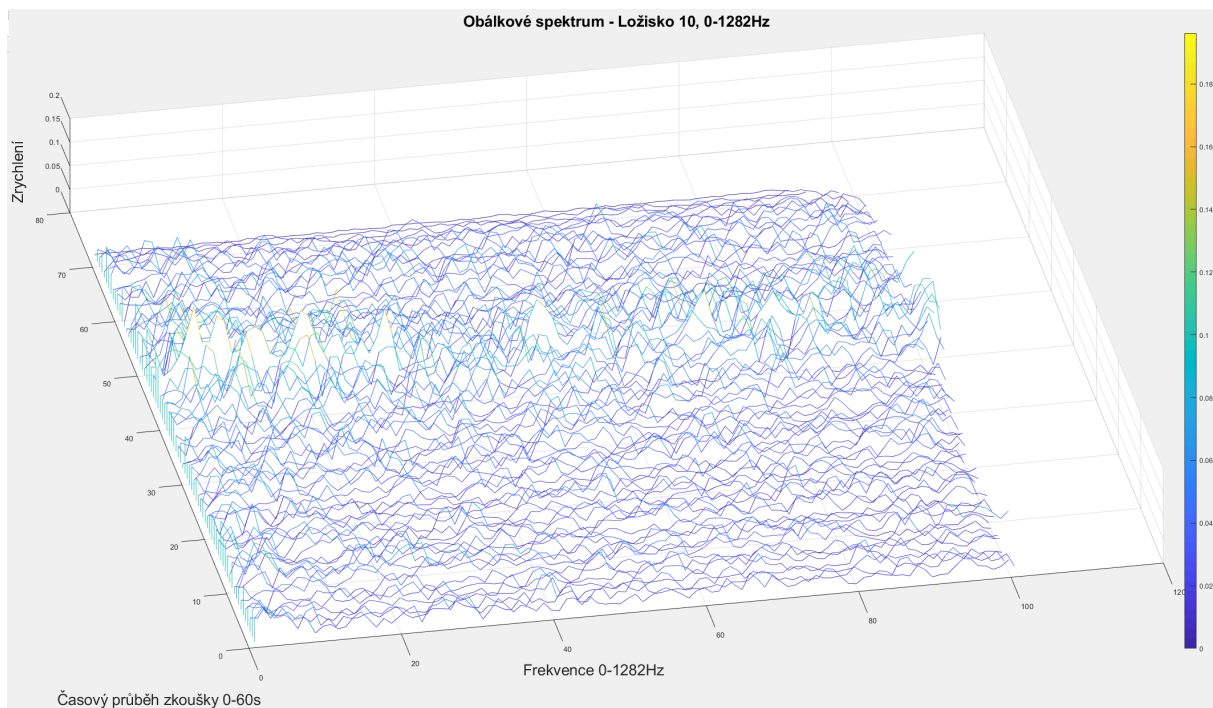
Obrázek B.7. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 7 u průběhu zkoušky



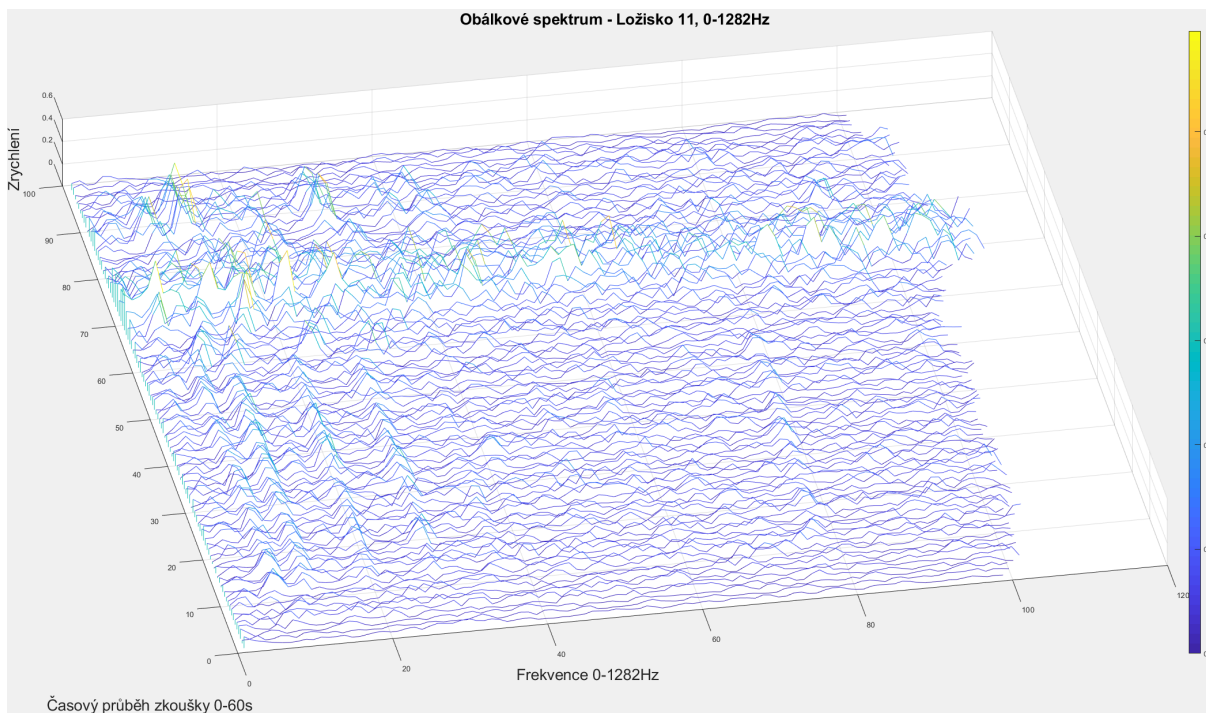
Obrázek B.8. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 8 u průběhu zkoušky



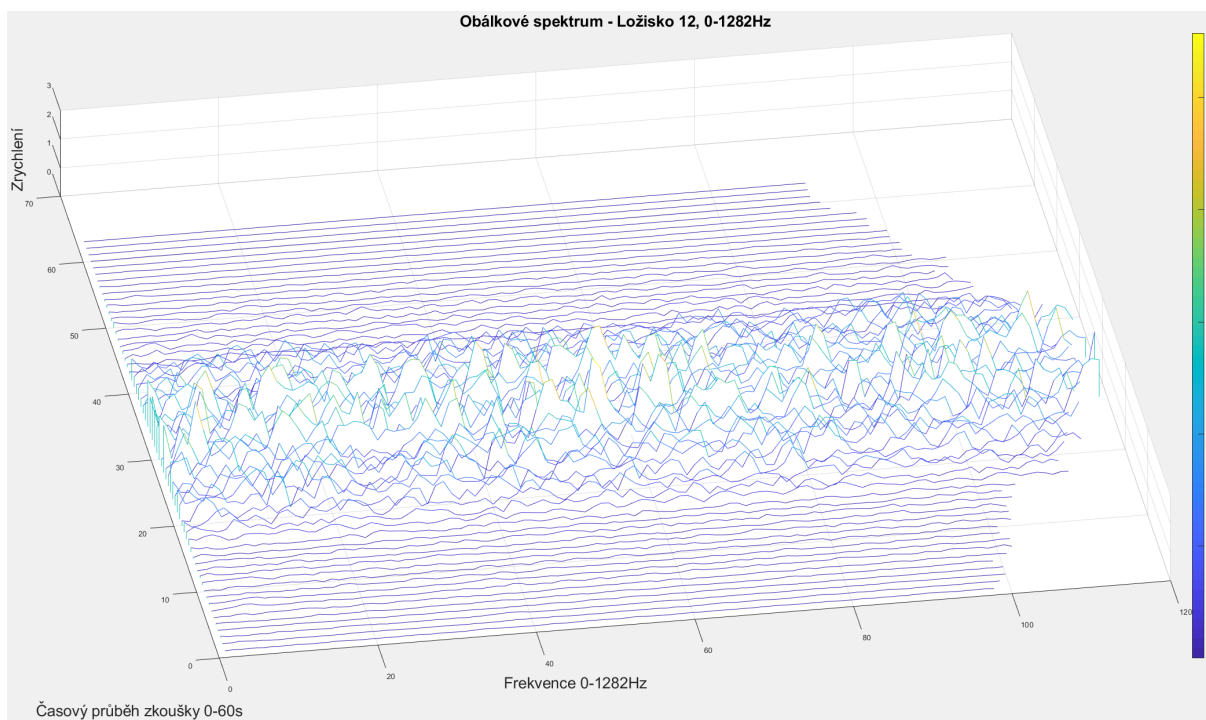
Obrázek B.9. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 9 u průběhu zkoušky



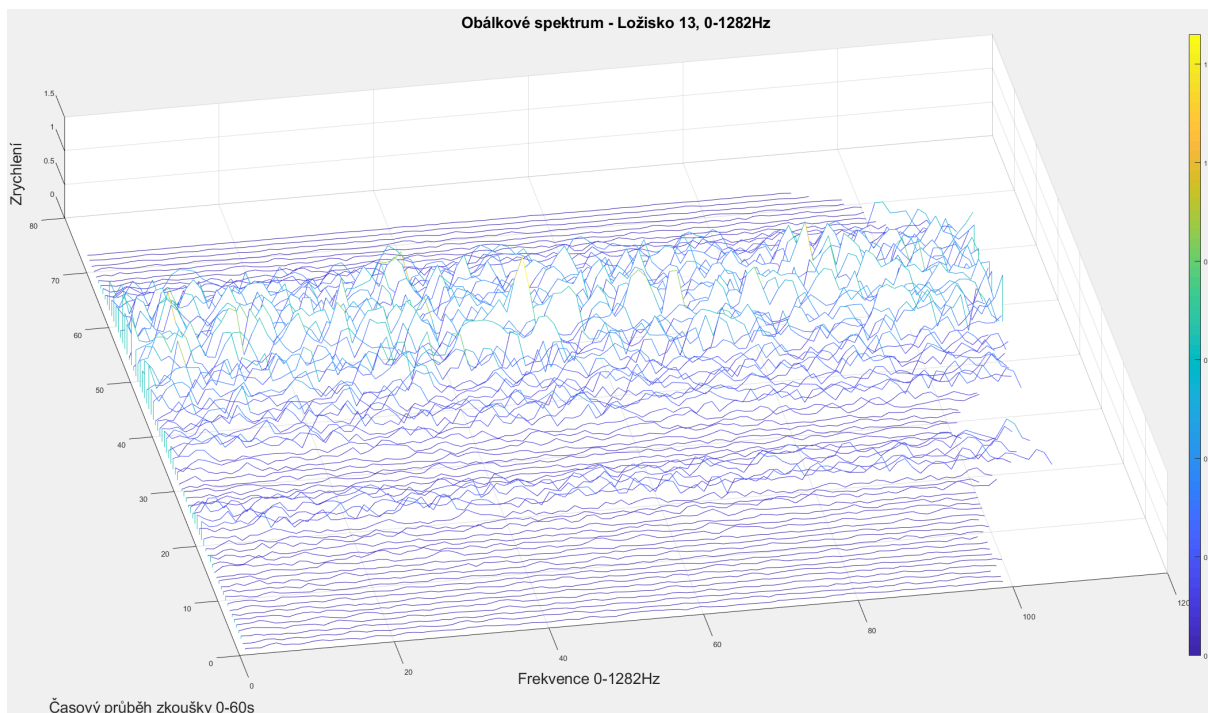
Obrázek B.10. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 10 u průběhu zkoušky



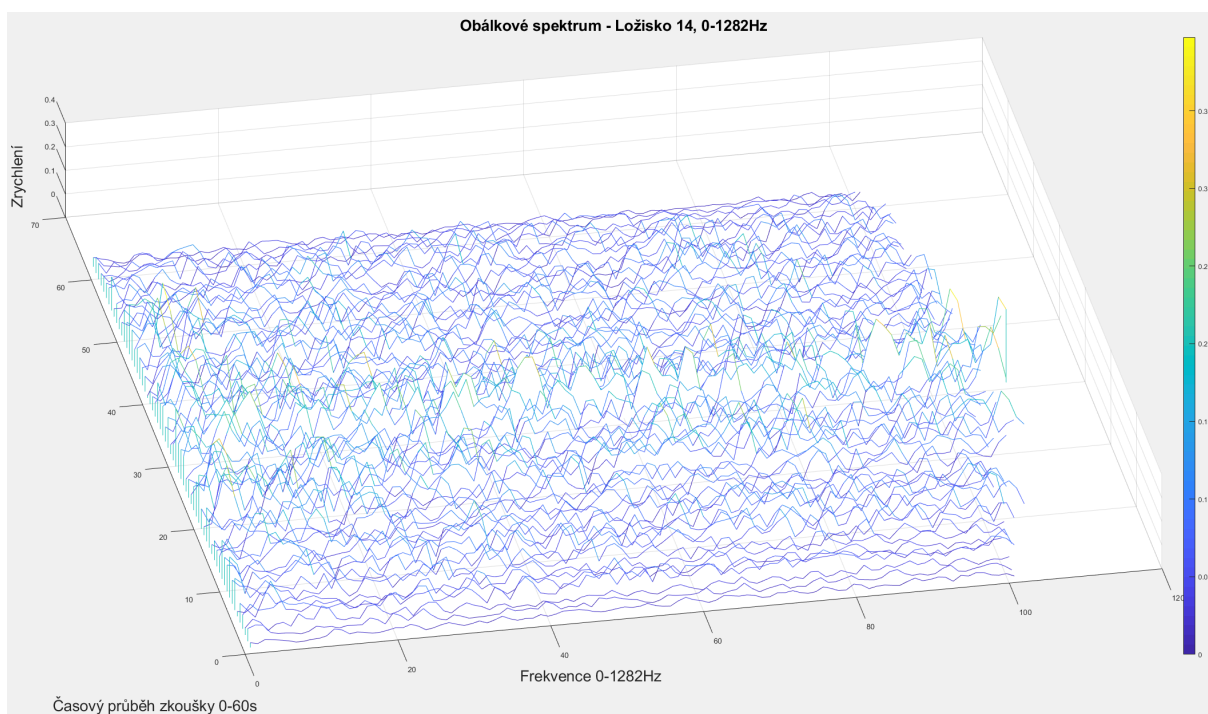
Obrázek B.11. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 11 u průběhu zkoušky



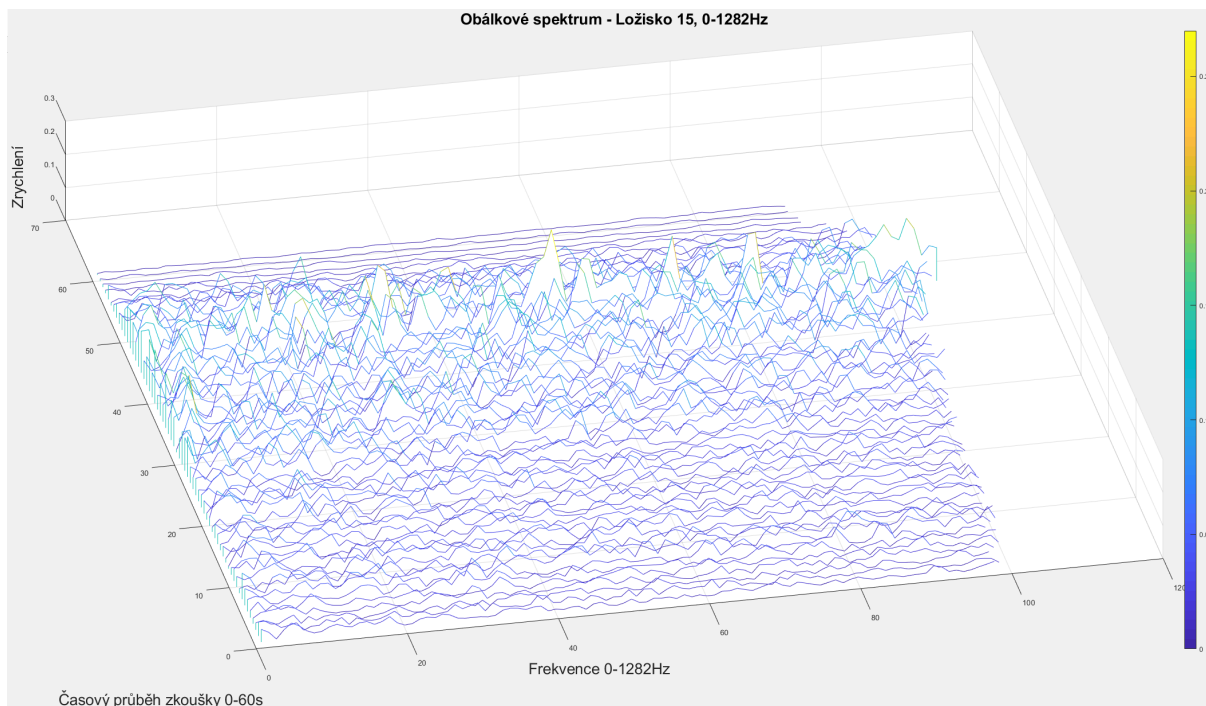
Obrázek B.12. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 12 u průběhu zkoušky



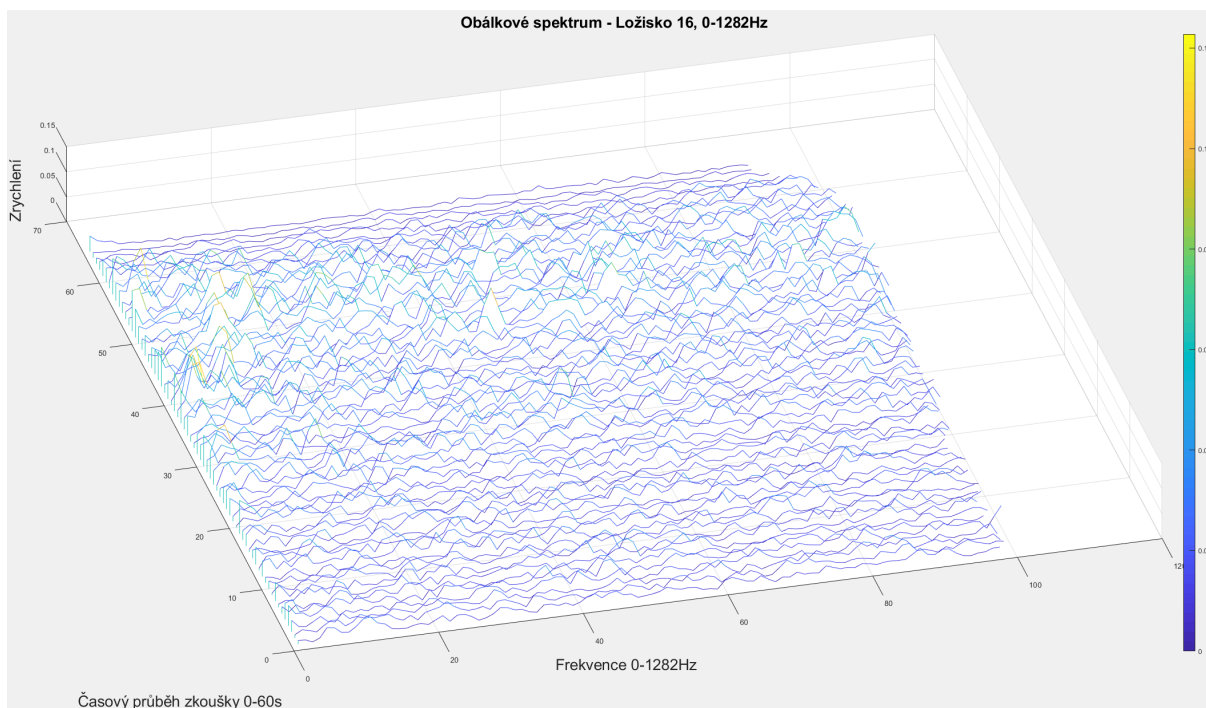
Obrázek B.13. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 13 u průběhu zkoušky



Obrázek B.14. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 14 u průběhu zkoušky



Obrázek B.15. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 15 u průběhu zkoušky



Obrázek B.16. Zobrazení obálky spektra signálu Ložiska 16 u průběhu zkoušky



Příloha C

Obsah přiloženého CD

- Text diplomové práce ve formátu PDF.
- Adresář *Databáze* - obsahuje *.mat* soubory s průběhem vibrací 16-ti ložisek od ledna do května 2018.



Literatura

- [1] Helebrant, F., Hrabec, L., Blata, J.,: *Provoz, diagnostika a údržba strojů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2013
- [2] Helebrant, F.,: *Technická diagnostika a spolehlivost: Vibrodiagnostika II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, ISBN 80-24-80650-9
- [3] Kreidl, M., Šmíd R.: *Technická diagnostika*. Praha: BEN, 2006, ISBN 80-7300-158-6
- [4] Technická normalizační komise, Český normalizační institut: *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 1: Obecné postupy*. Praha: www.unmz.cz, 2003
- [5] Technická normalizační komise, Český normalizační institut: *ČSN ISO 5348 Vibrace a rázy. Mechanické připevnění akcelerometrů*. Praha: www.unmz.cz, 1999
- [6] Technická normalizační komise TNK 11 Vibrace a rázy, Český normalizační institut: *ČSN ISO 10816-3 Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min a 15000 1/min při měření in situ*. Praha: www.unmz.cz, 12/1999, 01 1412
- [7] Adash s.r.o: *Adash A4900 Vibro manual*. Ostrava: www.adash.cz , 07/2016, Verze 4.59
- [8] Berry, M., SKF cz a.s.: *Ilustrovaná tabulka pro vibrodiagnostiku dle Berryho*. Praha: www.skf.cz 2015
- [9] Sovka, P., Uhlíř, J.: *Číslíkové zpracování signálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002
- [10] Sovka, P., Pollák, P.: *Vybrané metody číslíkového zpracování signálů*. Skripta ČVUT, Praha 2001
- [11] Rektorys, K.,: *Přehled užití matematiky II* , Prometheus , Praha 2001, ISBN 80-7196-181-7
- [12] Openheim, A.V., Shafer, R.W.: *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall, Inc.: New Jersey 1990
- [13] Rabiner, L., R., Gold, B.,: *Theory and Application of Digital Signal Processing*. Prentice-Hall, Inc.: New Jersey 1975
- [14] Astrom, K., R., Wittenmark, B.,: *Computer Controlled Systems*. Prentice-Hall, Inc.: New York 2011
- [15] Quinn, B.G., Hannan, E.J.,: *The Estimation and Tracking of Frequency*. Cambridge University Press.: University of Mancheste 2012, ISBN: 9780511609602
- [16] Hwei, P. HSU.,: *Signals and systems*. The McGraw-Hill Companies, Inc.: New York 1995, ISBN 0-07-030641-9

- [17] Franklin, F., Powell, J., D., Emami-Naeini, A.,: *Feedback Control of Dynamic Systems*. Pearson Education.: New York 2011, ISBN 0133002276
- [18] IFM electronic, efector VSE100: *Operating instructions Diagnostic electronics for vibration sensors*. Nemecko: www.ifm.com, 02/2015, 80227555/00
- [19] IFM electronic, efector octavis: *Original Software Manual, Parameter setting software for efector octavis VES004*. Nemecko: www.ifm.com, 07/2017, 70639903UK
- [20] Vdoleček F.,: *Spolehlivost a technická diagnostika*. Brno 2002.[cit. 2018-11-04] , autnt.fme.vutbr.cz/Lab/A1-731a/FSD.pdf
- [21] Schwarz, D., Rodet, X.,: *Spectral Envelope Estimation and Representation for Sound Analysis-Synthesis*. www.researchgate.net, Paris , 2010
- [22] Drugman, T., Stylianou, Y.,: *Fast Inter-Harmonic Reconstruction for Spectral Envelope Estimation in High-Pitched Voices*. ieeexplore.ieee.org, IEEE,,: 2014
- [23] Morgy, M., Achtenová, G.,: *Envelope Detection and Cepstrum Analysis for Gear Fault Diagnosis*, MEASUREMENT,,: Slovakia 2015
- [24] Nadeu, C.,: *A Simple Spectrum Estimation Techniques based on the Analytic Cepstrum*. , Elsevier Science Publishers B.V.,: Barcelona 1990
- [25] Howard, I., M.,: *Complex Modulation for Bearing Fault Detection*. , Department of Defence Melbourne,,: Australia 1989
- [26] Huang, E.,: *On Instantaneous Frequency*. , World Scientific Publishing Company, 2009