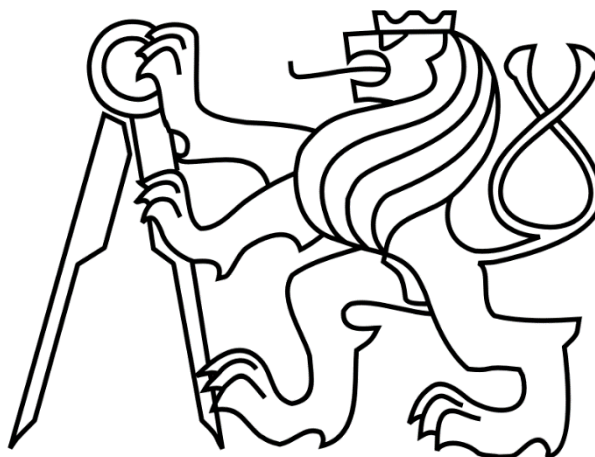


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Vysokofrekvenční diagnostika rotačních strojů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 23.7.2021

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Davidu Burianovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady a věcné připomínky při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.

Anotace

Autor:	Tomáš Chvosta
Název BP:	Vysokofrekvenční diagnostika rotačních strojů
Rozsah práce:	75 stran
Akademický rok:	2020/2021
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. David Burian, Ph.D.
Zadavatel tématu:	ČVUT FS, Ú12135
Využití:	Analýza rotačních strojů metodami vibrodiagnostiky
Klíčová slova:	vibrace, vysokofrekvenční diagnostika, akustická emise, ložisko
Anotace:	<p>Bakalářská práce se zabývá měřením a zpracováním změřených vysokofrekvenčních vibračních signálů, které se využívají pro diagnostiku valivých ložisek. V úvodní části této práce jsou rozebrány projevy poškození ložiska a jednotlivé specializované metody pro jejich odhalení. Pro analýzu signálů byly vytvořeny dva programy v prostředí LabView. Experimentálně získaná data jsou v softwarové aplikaci zpracována do obálek a vytvořena spektra pomocí metody FFT s následným zobrazením kaskádních grafů a spektrálních map. V závěru jsou porovnány výsledky snímačů stejného typu a jednotlivé metody navzájem.</p>

Annotation

Author:	Tomáš Chvosta
Title of bachelor dissertation:	High frequency diagnostics of rotating machines
Extent:	75 pages
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. David Burian, Ph.D.
Submitter of the Theme:	ČVUT FS, Ú12135
Application:	Rotary machine analysis by methods fo vibrodiagnostics
Keywords:	vibration, high frequency diagnostic, acoustic emission, bearing
Anotation:	<p>The Bachelor thesis deals with the measurement and processing of measured high-frequency vibration signals, which are used for the diagnosis of rolling bearings. The opening part of this work analysed the manifestations of damage to the bearing and the various specialized methods for detecting them. Two programs have been created in the LabView environment to analyze signals. The experimentally obtained data is processed into envelopes in the software application and created by the FFT method with subsequent display of cascading graph and spectral maps. The final part compares the results of sensors of the same type and the different methods to each other.</p>

Seznam použitých veličin a jednotek

a	$[m/s^2]$	<i>zrychlení kmitání</i>
$BPFO$	$[Hz]$	<i>kinematická frekvence vnějšího kroužku</i>
$BPFI$	$[Hz]$	<i>kinematická frekvence vnitřního kroužku</i>
BSF	$[Hz]$	<i>kinematická frekvence otáčení kuličky</i>
BD	$[mm]$	<i>průměr valivého elementu</i>
FTF	$[Hz]$	<i>kinematická frekvence klece</i>
N		<i>počet valivých elementů</i>
n	$[Hz]$	<i>otáčky motoru</i>
PD	$[mm]$	<i>roztečný průměr</i>
RMS		<i>root mean square (efektivní hodnota)</i>
s	$[\mu m]$	<i>výchylka kmitání</i>
T	$[s]$	<i>perioda</i>
t	$[s]$	<i>čas</i>
v	$[m/s]$	<i>rychlost kmitání</i>
\bar{x}		<i>střední hodnota</i>
β	$[^\circ]$	<i>úhel dotyku</i>
φ	$[rad; ^\circ]$	<i>fázový posuv</i>
ω	$[rad/s]$	<i>úhlová rychlost</i>

Seznam použitých zkratek

<i>AE</i>	<i>acoustic emission</i>	<i>akustická emise</i>
<i>BCU</i>	<i>Bearing Condition Unit</i>	
<i>FFT</i>	<i>fast Fourier transform</i>	<i>rychlá Fourierova transformace</i>
<i>HFD</i>	<i>High Frequency detection</i>	
<i>HFE</i>	<i>High Frequency Emission</i>	
<i>SE</i>	<i>Spike Energy</i>	
<i>SEE</i>	<i>Spectral Emitted Energy</i>	
<i>SPM</i>	<i>Shock Pulse Method</i>	
<i>VI</i>	<i>virtual instrument</i>	<i>virtuální přístroj</i>

Obsah

1	Úvod	10
2	Vibrační diagnostika	11
2.1	Vibrace	11
2.2	Měření vibrací	12
2.3	Metody vyhodnocování vibrací	13
3	Závady rotačních systémů dle pásma kmitočtového spektra	17
3.1	Základní poruchy točivých strojů	18
3.2	Diagnostika valivých ložisek	20
4	Vysokofrekvenční diagnostika valivých ložisek	23
4.1	Shock Pulse Method (SPM)	24
4.2	Bearing Condition Unit (BCU)	25
4.3	High Frequency Emission (HFE)	26
4.4	High Frequency Detection (HFD)	26
4.5	Spike Energy (SE)	27
4.6	Spectral Emitted Energy (SEE)	28
4.7	Akustická emise	29
5	Zkušební zařízení a popis experimentu	32
5.1	Průběh měření	36
6	Zpracování dat	40
7	Výpočet frekvence ložiskových závad	49
8	Analýza získaných dat	50
9	Závěr	69
	Seznamy	71
	Seznam zdrojů a použité literatury	71
	Seznam tabulek, rovnic a obrázků	73
	Seznam použitého softwaru	75
	Seznam příloh	75
	Textové přílohy	75

1 Úvod

Základním úkolem diagnostiky je detekce a lokalizace poruchy nebo vady. S rozvojem tohoto vědního oboru vznikají stále nové metody pro sledování stavu strojů, které se liší přesností, zaměřením, cenou apod. Jednou z nejpoužívanějších metod je vibrační diagnostika, jelikož většina poruch je doprovázena zvýšenými vibracemi. Tyto mechanické kmity způsobují u technických zařízení namáhání materiálu což může vést až k poruše zařízení. Měření těchto vibrací se obvykle kombinuje se sledováním dalších diagnostických veličin, jako jsou například teplota, otáčky, kroutící moment apod.

Délka životnosti strojních zařízení je závislá na opotřebení jednotlivých součástí stroje. K řešení problémů je zpravidla nutné delší odstavení technického zařízení, nutná diagnostika vad a následné provedení opravy, což je v praxi časově i finančně náročné. Tento proces lze vyřešit, jestliže máme dostatek informací o stavu zařízení při provozu. Což by vedlo k odhalení skrytých vad, ze kterých by se následně mohly vyvinout vážné poruchy. Výhodou je také prodloužení životnosti jednotlivých elementů stroje a možnost zásahu až v okamžiku, kdy je skutečně zapotřebí.

Cílem této bakalářské práce je porovnání vysokofrekvenčních metod diagnostiky ložisek pro analýzu různých zdrojů poruch. Teoretická část se zabývá základními pojmy týkajícími se vibrací, projevy závad ložisek ve frekvenčním spektru a vysokofrekvenčními metodami měření vibrací. Praktická část se poté věnuje měření na zkušebním stavu, vytvoření programu pro zpracování obdržovaných zaznamenaných dat a vyhodnocení výsledků měření.

2 Vibrační diagnostika

Vibrační diagnostika zpracovává data získaná zpravidla za chodu stroje. Je založena na vyhodnocování mechanického kmitání měřeného na pohyblivých i nepohyblivých částech. Průběžné sledování hodnot slouží k posouzení provozních podmínek a zajištění co nejdějšího bezporuchového a bezpečného provozu. Po měření teplot se jedná o nejpoužívanější metodu pro monitorování technického stavu strojů. [1]

2.1 Vibrace

Mechanické kmitání neboli vibrace, lze charakterizovat jako dynamický děj, při němž hmotné body nebo hmotná tělesa kmitají kolem klidové rovnovážné polohy. Důležitým parametrem pro popis signálu je amplituda a frekvence. U harmonického signálu je frekvence jen jedna. U složených signálů je jich až nekonečně mnoho.

Průběh veličin charakterizujících kmitání se v průběhu času mění a lze jej vyjádřit následujícími rovnicemi: (2.1) průběh výchylky v [μm] ($1=10^{-6}$ m), (2.2) rychlost vibrací [mm/s] a (2.3) zrychlení vibrací [m/s^2]

$$s = s_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

$$v = \frac{ds}{dt} = v_{max} \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.2)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = a_{max} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.3)$$

kde ω [rad/s] představuje úhlovou rychlost, t [s] čas a φ je fázové posunutí dané počáteční výchylkou. Tyto veličiny jsou navzájem v pevném matematickém vztahu (Tab. 2.1), proto stačí sledovat pouze jednu z nich. [1][2]

Tab. 2.1: Přepočet veličin charakterizující vibrace [2]

Přepočet	Dráha kmitání s [μm]	Rychlost kmitání v [mm/s]	Zrychlení kmitání a [m/s^2]
Dráha kmitů s	1	$\frac{v}{\omega}$	$\frac{a}{\omega^2}$
Rychlost kmitání v	$s \cdot \omega$	1	$\frac{a}{\omega}$
Zrychlení kmitání a	$s \cdot \omega^2$	$v \cdot \omega$	1

Pro zjednodušený popis signálu, koncentrovaného do jedné skalární veličiny, se používají veličiny jako efektivní hodnota (RMS, root mean square), střední hodnota (\bar{x}), špičková hodnota a absolutní špičková hodnota (Peak to Peak). Je třeba si uvědomit, že pokud doba měření není shodná s vzorkovací periodou (čas mezi jednotlivými vzorky), což v praxi obvykle nenastane, získáme při opakovaných měřeních hodnoty, které se i při dodržení všech zásad mohou lišit. Vzorkovací perioda odpovídá převrácené hodnotě vzorkovací frekvence. Tato frekvence musí být dle Nyquistova vzorkovacího teorému minimálně dvakrát větší než nejvyšší dosažená frekvence ve vzorkovaném signálu

efektivní hodnota:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2 dt} \quad (2.4)$$

střední hodnota:

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x| dt \quad (2.5)$$

kde T označuje analyzovaný časový úsek, který může ale nemusí odpovídat periodě.

Příčiny vibrací jsou nejčastěji dynamické síly, které souvisejí s výrobními nepřesnostmi, vůlí pohyblivé součásti, nevyvážeností součásti s rotačním kmitavým pohybem, případně poruchami (samobuzené kmitání, turbulence, kavitace atp.). [1][2]

2.2 Měření vibrací

Průběh vibrací lze zaznamenat různými typy snímačů, které sledují výchylku, rychlost (velometry), nebo zrychlení (akcelerometry). Jednotlivé typy senzorů se od sebe liší frekvenčním a dynamickým rozsahem, citlivostní mírou šumu a řadou dalších parametrů. Volba vhodného akcelerometru závisí na konkrétní aplikaci, ceně, dostupnosti, přístroji apod. Obecně lze říct, že největšího rozpětí frekvenčního rozsahu lze dosáhnout při využití piezoelektrického akcelerometru. Tyto typy lze použít pro frekvence v rozsahu 0,01 Hz až desítky kHz. [3]

Pro diagnostiku strojů se nejčastěji využívají piezoelektrické akcelerometry, jejichž podstatou je piezoelektrický jev. Dochází k deformaci piezokeramické destičky, při níž vzniká elektrický náboj. Uvnitř snímače se také nacházejí dvě hmoty, z nichž jedna je uložena pružně a tvoří referenční hmotu a druhá je pevně spojena s povrchem měřeného objektu.

Kvůli rozptylu a útlumu šířícího se signálu je vhodné umístit senzor co nejbližší iniciačnímu místu. Připevnění se volí v závislosti na frekvenčním rozsahu a citlivosti použitého snímače. Pro běžná provozní měření ve frekvenčním rozsahu kolem 2 kHz se často využívá uchycení za pomoci magnetu. Při potřebě vyšších frekvenčních rozsahů se přistupuje k šroubovému spoji, případně k lepidlu (často HBM X60). Při instalaci je potřeba dbát na čistotu a rovnost plochy pod snímačem. [4]

2.3 Metody vyhodnocování vibrací

Norma ČSN ISO 10816 pojednává o hodnocení vibrací strojů měřených na rotujících částech i stacionárních konstrukcích na základě dvou kritérií (velikost a změna velikosti vibrací).

Velikost vibrací

Norma ČSN ISO 10816 se zabývá měřením celkové efektivní hodnoty rychlosti vibrací (mohutnost vibrací) ve frekvenčním pásmu, typicky 10 až 1000 Hz, kde se vyskytuje převážná část informací o stavu stroje. Na základě mohutnosti vibrací jsou pak stroje řazeny do čtyř pásem: **pásmo A** – vibrace nových, případně nedávno prověřených strojů, **pásmo B** – stroje ve velmi dobrém stavu, **pásmo C** – vibrace na pomezí přístupnosti s omezeným provozem, **pásmo D** – nepřístupné vibrace, nutná odstávka stroje.

Změna velikosti vibrací

Změna velikosti vibrací se provádí vzhledem k již dříve naměřeným hodnotám. Hodnocení stroje dle tohoto kritéria vyžaduje dlouhodobější sledování. Vlastní diagnostická činnost má dvě rozdílné fáze:

Trvalé sledování stroje (monitorování) – účelem je zjistit odchylku od normálního stavu (detekovat závadu).

Vlastní analýza problému (diagnostika v užším slova smyslu) – účelem je zjištění příčiny vznikající poruchy, případně stanovit trend rozvoje závady a zjistit její příčinu.

Velikost vibrací se v průběhu času mění, a proto se sledují průběžné časové trendy, které můžeme rozdělit na:

- A** – setrvale dobrý stav, bez závad,
- B** – náhlá změna, může být způsobeno nesprávným zásahem údržby při opravě stroje
- C** – postupné poškozování, například v důsledku opotřebení
- D** – nesmyslný „trend“ - může být způsoben například nevhodným výběrem místa měření nebo špatným uchycením snímače

[3][5]

Frekvenční analýza vibrací

Časová vlna se skládá z jednotlivých vibrujících částí. Cílem frekvenční analýzy je popsat rozložení složek signálu ve frekvenční oblasti, tedy vyjádřit analyzovaný signál pomocí ortogonálních (navzájem kolmých) bázových funkcí. Nejčastější zpracování získaných dat je za pomoci Fourierovy transformace (FT), popř. rychlé Fourierovy transformace. (FFT), která zkracuje výpočetní čas. Postupy spojené s frekvenční analýzou jsou implementovány do analyzátorů, které jsou rozděleny do různých typů (provozní nebo laboratorní, jedno nebo vícekanálové), ale v principu pracují stejně. Výsledkem FT je zobrazení časového signálu ve frekvenční oblasti (frekvenční spektrum). Ve frekvenčním spektru se amplitudy jednotlivých časových vln promítají jako spektrální čáry na příslušné frekvenci. Jednotlivé časové vlny lze vyjádřit jako funkce sinus, které mají různé amplitudy. Jejich frekvence jsou harmonické násobky základní frekvence ω . [3][4]

Při zpracování naměřených vibračních dat dochází k rozložení původně spojitého periodického signálu na soubor harmonických funkcí s různými frekvencemi a tím se převede na digitální signál. Tento převod zajišťuje A/D (analogově/digitální) převodník, který provádí vzorkování a následné kvantování. Tento postup se označuje jako diskretizace. Diskretizovanou funkci $f(t)$ můžeme zapsat jako konečnou Fourierovu řadu, pokud je definována na množině N jednotlivých časových okamžiků t_k

$$x_k (= x(t_k)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left(a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) \right) \quad (2.6)$$

kde a_0 , a_n a b_n jsou Fourierovy neboli spektrální koeficienty FT.

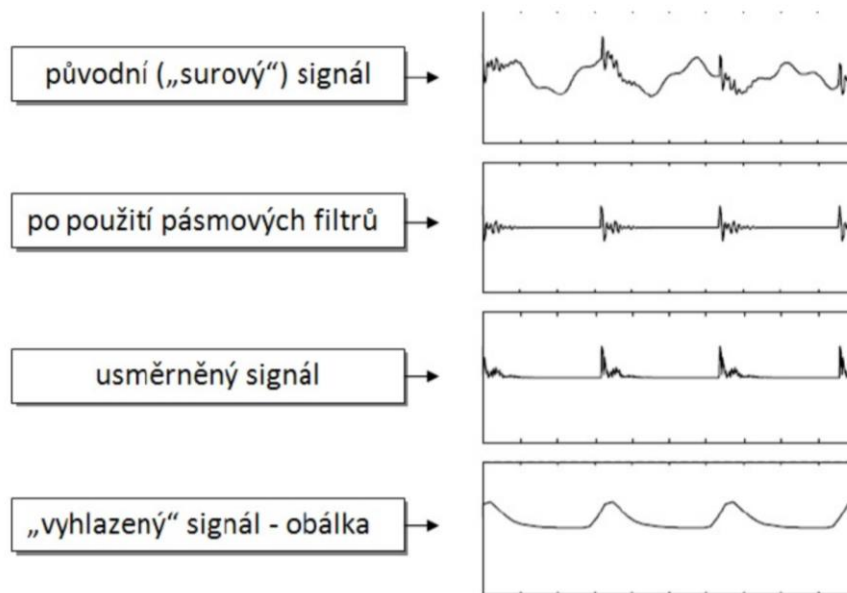
Při využití analýzy signálu FFT je potřeba dodržet několik pravidel. Jedním z nich je zajištění dostatečné vzorkovací frekvence (dvojnásobek maximální frekvence vzorkovaného signálu – Nyquistova frekvence). Dále je potřeba vyvarovat se chyby únikem. K jejímu potlačení slouží tzv. váhová okna, díky nimž je zamezeno nespojitostem mezi jednotlivými částmi diskretizovaného signálu, které FT považuje za periodické (i když ve skutečnosti periodické nejsou). Váhové okno je například Hanningovo okno, které signál na okrajích potlačí do nuly, a tím původní neperiodický signál přiblíží periodickému průběhu. [3][4]

Obálková analýza (Envelope Analysis)

Obálková analýza je nejčastěji využívána pro určení stavu valivých ložisek, kde nízká amplituda opakujícího se vibračního signálu může být skryta ve vibračním šumu.

Principem je zaznamenávání rázových impulzů, které vznikají odvalováním valivých elementů přes místo poruchy v oběžné dráze. Pokud se tento defekt ložiska objeví, pak dochází k buzení rezonanční frekvence mimo běžné pásmo. K tomuto buzení dochází s opakující se frekvencí, která odpovídá kinematické frekvenci poškozené komponenty ložiska (vnější kroužek, vnitřní kroužek, valivý element, klec).

Zaznamenaný signál prochází přes vysokofrekvenční filtr pro odstranění nízkofrekvenčních kmitů. Dále je filtrovaný signál usměrněn a dochází k zvýraznění periodických rázových pulsů, a tedy k vzniku obálky (*Obr. 2.1*).

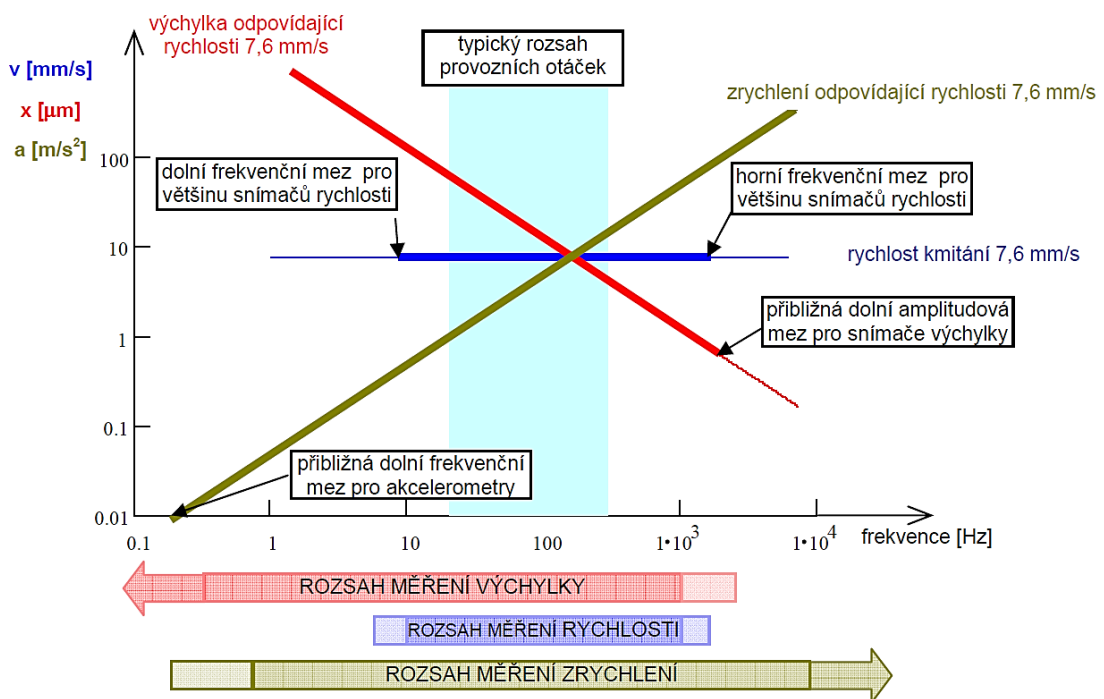


Obr. 2.1: Vytvoření obálky zrychlení [6]

Na takto usměrněném signálu se následně prování výpočet FFT. Výstupem poté může být například obávkové spektrum zrychlení vibrací v podobě frekvenčního spektra. [1][6]

3 Závady rotačních systémů dle pásma kmitočtového spektra

Za předpokladu konstantní velikosti kmitání na všech frekvencích vyjádřené rychlostí např. 7,6 mm/s (hodnota, se kterou se při běžných měřeních setkáme), pak se výchylka při stejné velikosti vibrací s nárůstem frekvence snižuje a zrychlení zvyšuje. Frekvenční rozsah je tedy jedním z parametrů rozhodujících o typu sledované veličiny (výchylka, rychlost a zrychlení vibrací). Následující graf (Obr. 3.1) znázorňuje možnosti sledování jednotlivých veličin vzhledem k frekvenčnímu rozsahu.



Obr. 3.1: Omezení při měření [3]

Modře označená oblast zvýrazňuje frekvenční rozsah běžných měření (10 – 1000 Hz). Jedná se o základní pásmo pro dlouhodobé sledování vibrací, vztahující se k normám 10 816, 20 816 a jejich derivátům. [3]

3.1 Základní poruchy točivých strojů

Základní frekvence, na kterou se ve vibrodiagnostice váže stanovení sledovaného frekvenčního pásma, je otáčková frekvence. V oblasti obráběcích strojů se otáčkové frekvence pohybují od jednotek Hz (v případě velkých karuselů i méně), přes otáčkové frekvence v řádu desítek Hz (stroje s převodovkou s ozubenými koly), dále stroje s frekvencemi v řádu stovek Hz (elektrovřetena) až po pneumaticky naháněná vřetena s otáčkovou frekvencí v jednotkách kHz. Na zmíněnou otáčkovou frekvenci se váží další významné frekvence - harmonické, ložiskové, záběrové, ev. jejich harmonické násobky a k nim navázaná postranní pásma. Dle tradiční logiky uplatňované zejména pro stroje s pracovními otáčkami v řádu jednotek tisíc otáček za minutu, je proto pro rotory obráběcích strojů obtížné stanovovat přesné hranice nízkofrekvenční a středofrekvenční diagnostiky. Vzhledem k tomu, že vysokofrekvenční diagnostické metody nejsou přímo navázané na otáčkovou frekvenci, lze její hranici stanovit fixně. Jako nejčastěji uváděná hranice je brána frekvence 20kHz, odvozená od hranice slyšitelnosti lidským uchem.

V oblasti frekvencí, odpovídající otáčkové frekvenci a jejím harmonickým násobkům do cca patnáctinásobku, získáváme diagnostické informace týkající se nevyváženosti, nesouososti a prohnutí hřídelů, mechanických vůlí, defektů na kluzných i valivých (v určitém stadiu opotřebení) ložiskách a další. [3]

Nevyváženost

Tato chyba může být způsobena konstrukcí, technologií, výrobními nepřesnostmi nebo pochybením při montáži. Následkem je zvyšování namáhání jednotlivých částí rotoru, ložisek a nosných konstrukcí. Ve frekvenčním spektru se objevují výrazné amplitudy na frekvenci odpovídající otáčkové frekvenci a výjimečně se vyskytují na jejím dvojnásobku. Velmi důležité je porovnání velikosti vzniklé amplitudy jak v radiálním, tak i axiálním směru na daném ložiskovém stojanu. Pokud se poměr složek výrazně liší, obvykle se jedná o mechanické uvolnění. [3]

Nesouosost

Jedná se o další běžnou závadu, jejíž příčinou je nesprávné ustavení strojů. Následkem je fázový posuv na otáčkové frekvenci v axiálním nebo radiálním směru o 180° dle typu nesouososti. Na nesouosost poukazují vyšší hodnoty amplitudy na druhé harmonické frekvenci oproti základní otáčkové frekvenci. [3]

Kritické otáčky – rezonance

Ke kritickým otáčkám rotoru dochází, pokud se otáčky přiblíží k některé z jeho vlastních frekvenčních hodnot. Tento jev je označován jako rezonance. Vzhledem k malému tlumení u ocelových konstrukcí je změna amplitudy v okolí rezonance velmi výrazná především na první harmonické frekvenci. [3]

Přidírání

Zadírání rotoru vzniká při uvedení nového nebo opraveného stroje do provozu. Indicií je časový signál vibrací, který není symetrický kolem nulové hodnoty. Ve frekvenčním spektru se objevují výrazné harmonické násobky otáčkové frekvence. [3]

Analýza převodovek s čelními ozubenými koly

Lze detekovat opotřebení stykové plochy zubu, nestejnou šířku, vyštípnutí, nebo zlomení zubu ozubeného kola, ohnutý hřídel s ozubeným kolem, excentricitu uložení kol převodovky.

Základem jsou zubové frekvence, které vznikají při záběru dvou a více ozubených kol. Zubová frekvence je dána periodicky proměnou tuhostí spoje ozubených kol v záběru a rázy při styku zubů. Signál amplitudové modulace je dán základními spektrálními složkami, které jsou ovlivněny vyššími harmonickými a bočními signály v návaznosti na zubovou frekvenci. Při opotřebení zubů dochází ke zvyšujícím se amplitudám spektrálních složek zubů. Ve spektru se tento stav projevuje nárůstem druhé a třetí spektrální složky, rozšířením bočních pásem a vznikem rezonanční složky spektra při zubové frekvenci. [2]

Elektrické nebo magnetické poruchy u indukčních motorů

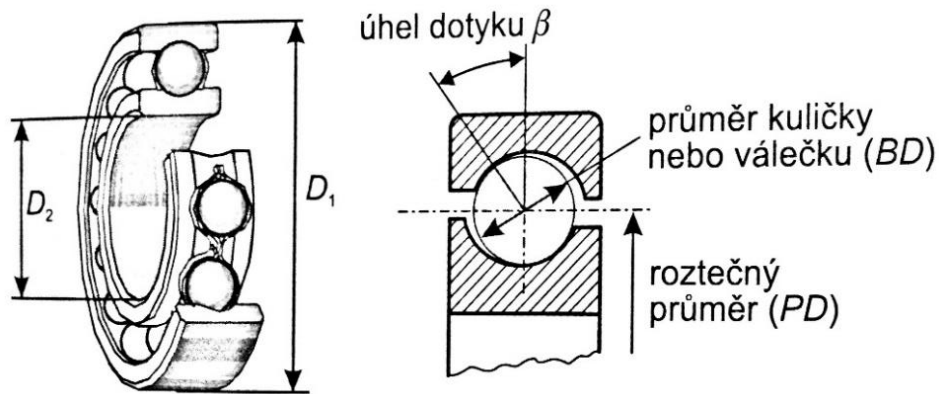
Při poruše rotorové tyče (prasknutí, uvolnění) u indukčních motorů dochází ke vniku vibrací, které se projevují ve spektru nárůstem postranních pásem. Velikost spektrálních složek poskytuje informace o závažném defektu. Výstřednost rotoru, proměnná vzduchová mezera a defekty v kovových částech rotoru se ve spektru projeví navýšením druhé harmonické složky, včetně postranního pásma, elektrické nebo magnetické poruchy u indukčního motoru, kavitačními jevy a další. [2]

3.2 Diagnostika valivých ložisek

Poruchy valivých ložisek se projevují ve všech frekvenčních pásmech v závislosti na použité metodě diagnostiky a stádiu rozvoje poškození ložiska. Ložiskové frekvence závad se zpravidla vyskytují, pokud se vyskytne porucha. Jedná se o jedny z mála zdrojů vibrací, které generují necelé násobky otáčkové frekvence. Detekování závad a jejich vibrací se provádí v oblasti ultrazvuku a vyšších frekvencí. [3]

Frekvence ložiskových závad

Na valivém ložisku rozlišujeme čtyři typy závad podle místa, kde se závada vyskytuje. Každé z těchto závad odpovídá tzv. frekvence ložiskové závady, kterou lze spočítat na základě parametrů ložiska (*Obr. 3.2*) a otáčkové frekvence.



Obr. 3.2: Geometrie kuličkového ložiska [2]

Pro případ stojícího vnějšího kroužku platí:

BPFO (Ball Pass Frequency Outer Race) frekvence závady vnějšího kroužku

$$BPFO = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta \right) \cdot n = N \cdot FTF \quad (3.1)$$

BPFI (Ball Pass Frequency Inner Race) frekvence závady vnitřního kroužku

$$BPFI = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta \right) \cdot n \quad (3.2)$$

BSF (Ball Spin Frequency) frekvence závady valivého elementu

$$BSF = \frac{PD}{2 \cdot BD} \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta \right)^2 \right) \cdot n \quad (3.3)$$

FTF (Fundamental Train Frequency) frekvence závady klece

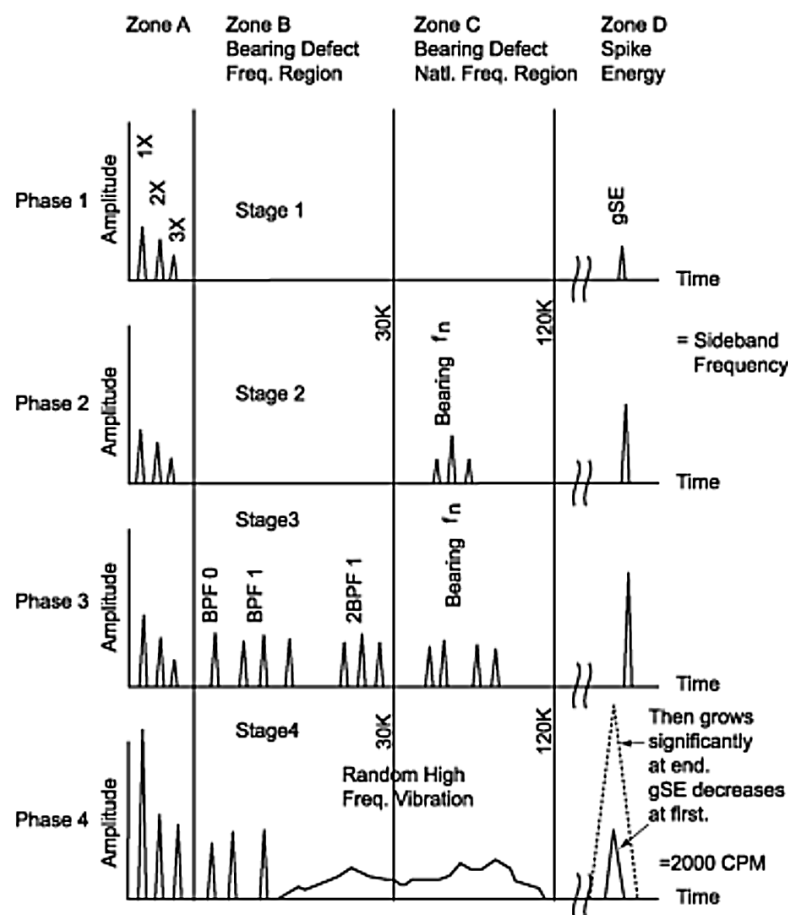
$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta \right) \cdot n \quad (3.4)$$

- N počet valivých elementů
- n otáčky rotoru [Hz]
- BD průměr valivého elementu [mm]
- PD roztečný průměr [mm]
- β konstantní úhel dotyku [°]

[2][3]

Projevy poškození ložiska ve frekvenčním spektru

Ložiska procházejí čtyřmi fázemi poškození s ohledem na rostoucí vadu. Identifikace těchto charakteristik napomáhá nejen k identifikaci poškozeného ložiska, ale také poskytuje informaci o rozsahu poškození. Průběhy všech čtyř fází ve frekvenčním spektru jsou znázorněny na *Obr. 3.4*.



Obr. 3.4: Etapy poškození ložiska [14]

V počáteční fázi opotřebení ložiska se defekty projevují akustickými emisemi ve vysokých frekvencích (až několik MHz). K detekci jsou zapotřebí vysokofrekvenční vibrační metody jako např. Spike Energy, nebo Shock Pulse Method.

V druhé fázi dochází k poškození jednotlivých elementů ložiska. Kinematické frekvence jsou velmi malé, a proto se vibrační diagnostika provádí v ultrazvukovém pásmu (20 – 60 kHz). Dále se objevují postranní pásma nad a pod přirozenými frekvencemi. Pro diagnostiku signálu se používá mnoho metod, která jsou často patentovány u různých společností. Například metoda BCU (Bearing condition Unit) společnosti Schenk, SPM (Shock pulse metod) společnosti SPM, nebo obálková analýza. Díky vysoké citlivosti uvedených metod na ostré impulzy se širokým spektrem signálu lze odhalit drobné mikrotrhliny.

Ve třetí fázi se objevují specifické frekvence defektů ložisek ve spektru. Převážně se vyskytují v oblasti 500 Hz až 8 kHz. Při tomto stupni zhoršení by již mělo dojít k výměně ložiska. Vnitřní defekty budou navíc obvykle doprovázeny frekvencemi postranního pásma pod a nad frekvencemi defektů ložisek. Pro zpracování signálu se nejčastěji používá obálková analýza.

Ložisko ve čtvrté fázi je již před úplným selháním. Okraje oběžných drah nebo valivé prvky se začínají zablokovávat. S opotřebením se objevuje více harmonických složek ložiskové frekvence a počet postranních pásem roste. Dochází k znatelnému nárůstu otáčkových spektrálních složek a frekvence poruch valivých ložisek jsou nahrazovány náhodnými vibracemi. Defekty lze pozorovat již v oblasti nízkých kmitočtů.
[2][14]

4 Vysokofrekvenční diagnostika valivých ložisek

Při poškození se od místa vzruchu šíří energie v podobě napěťových vln, které vytvoří krátkodobé vlnění na povrchu stroje. Tyto velmi ostré kmity jsou dobře měřitelné v oblasti ultrazvuku a vyšších frekvencí (nad 20 kHz).

Specifickou částí stroje, která je nejčastěji sledována vysokofrekvenčními metodami, je ložisko. Frekvenční rozsah měření se může hodně lišit, proto je důležitá volba správného frekvenčního rozsahu pro konkrétní ložisko. [1]

Nejčastějšími monitorovacími zařízeními jsou vysokofrekvenční akcelerometry, případně ultrazvukové senzory. Výhoda snímače zrychlení je, že dokáže zachytit primární energii z napěťových vln vyvolanou rázem, únavou i nechtěným třením.

Vibrační analýzy se rozdělují podle toho, zda probíhají v časové nebo ve frekvenční oblasti. Při zaměření se na analýzu časového záznamu lze získat rychlý přehled o stavu ložiska, ovšem ve většině případů se nezjistí původ poruchy. Při vibrační diagnostice se sledují efektivní (RMS) a špičkové (PEAK) hodnoty signálu a následně se získané hodnoty porovnávají s vibracemi nepoškozeného ložiska. U poškozených ložisek lze v časové oblasti pozorovat vyšší hodnoty RMS a jiné časové rozložení extrémů. Ve frekvenční oblasti na poškození poukazují vyšší amplitudy ve spektru vibračního signálu.

Pro získání hodnot RMS a PEAK, je potřeba, aby signál procházel přes frekvenční filtr, který propustí jen určité pásmo frekvencí. Naměřené hodnoty se zpracovávají do tzv. časových trendů. Pokud se začnou hodnoty zvyšovat, značí to poškození.

Pro vysokofrekvenční diagnostiku lze také využít analogickou analýzu (obálkovou metodu) s rozdílem, že se využívá posunutý frekvenční filtr 16 – 20 kHz. [8]

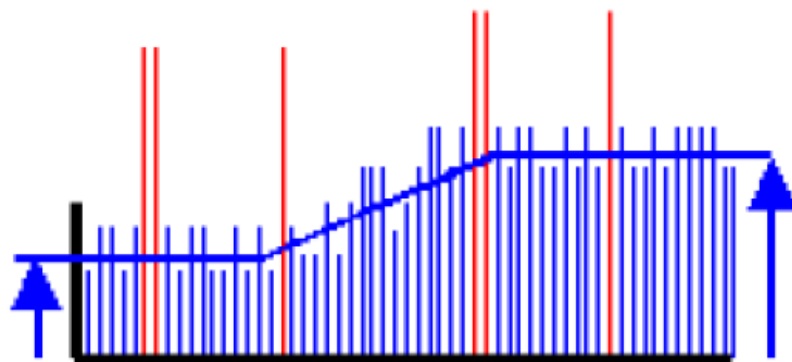
4.1 Shock Pulse Method (SPM)

SPM je metoda diagnostiky patentovaná společností SPM instrument. Vychází z poznatku, že při nárazu kov na kov vznikají krátkodobé tlakové vlny (rázové pulsy) o frekvencích pohybujících se kolem 30 – 40 kHz. Nejčastěji se tato metoda používá u valivých ložisek, ale má i mnoho dalších využití např. pro zjišťování stavu převodovek, kompresorů a dalších aplikací, kde dochází ke kontaktu kov na kov při opotřebení. [9]

Jedná se o metodu zpracování signálů za pomoci detekce rázových pulzů a jejich specifického hluku. Snímané rázy se pohybují kolem frekvence 32 – 36 kHz, na kterou jsou také nastaveny piezoelektrické akcelerometry, které se využívají při aplikaci této metody.

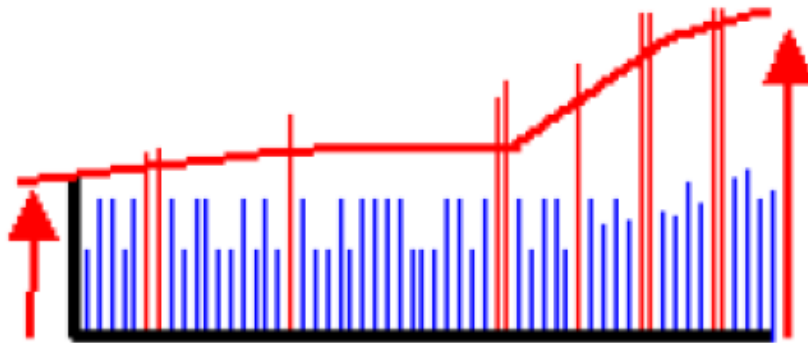
SPM je založeno na sledování dvou jevů. Vibrační fáze a rázové vlny s velkou frekvencí a malou výchylkou, která se šíří směrem od místa vzniku a je pohlcována drobnými defekty v materiálu. Rozvíjením rázu dojde k vychýlení a stlačení jednotlivých struktur. Po dosažení maximální hodnoty se v několika cyklech pružně ustálí do své výchozí polohy. [6][9]

Rázy jsou snímány snímačem SPM, jehož výstupní signál je úměrný velikosti rázů. Objevují se dvě úrovně amplitud tzv. Carpet Value a Max Value. Hodnotu Carpet Value (*Obr 4.1*) můžeme pospat jako charakteristický šum způsobený kontaktem styčných ploch. Projevy jsou patrné i při poškození pouze mazacího filmu.



Obr. 4.1: Průběh hodnoty Carpet Value při poškození mazacího filmu [6]

Poškození ložiska vyvolá velké výchylky, které vybudí rázovou vlnu, jejíž hodnoty převyšují Carpet Value a vzniká tzv. Max Value (*Obr 4.2*). Hodnoty Max Value se zvyšují s opotřebením ložiska a poukazují tak na stav opotřebení ložiska.



Obr. 4.2: Průběh hodnoty Max Value při poškození ložiskového elementu [6]

Amplituda rázových pulzů měřená snímači je ovlivněna několika faktory. Jedná se o rychlost odvalování (která je funkcí rychlosti nebo otáčení a velikosti ložiska), tloušťku olejového filmu, vyváženost systému mezi pohonnou a poháněnou částí stroje a mechanické faktory, jako je drsnost oběžných drah, napětí a poruchy.[6]

Nevýhodou této metody je potřeba získat relevantní informace týkající se stavu ložiska. Při měření metodou SPM si musíme uvědomit, že se jedná o kombinaci výchylky a hustoty rázů kov na kov. Tyto hodnoty se mění nejen v závislosti na opotřebení, ale i na vnitřním průměru ložiska a počtu otáček. Proto se ke vstupu do zařízení SPM připojuje navíc snímač otáček a hodnota průměru se zadává. [6][9]

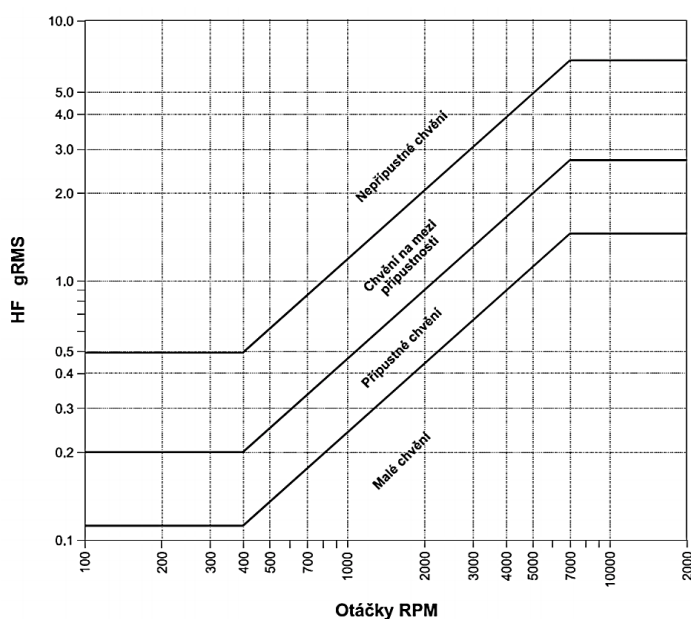
Výhodou je především nízký práh napěťové citlivosti, nízká citlivost na krátkodobé změny teploty a vysoká odolnost proti rázům. Přístroje mají obvykle vestavěný mikroprocesor pro analýzu vzorků, snímač rázových pulzů, grafický displej, případně teplotní senzor. [13]

4.2 Bearing Condition Unit (BCU)

Základem je nepřímé měření rázových impulsů pomocí akustických kmitů, které se šíří v pevném materiálu. K zesílení signálu se používá rezonanční frekvence snímače (20 – 40 kHz). Vyhodnocuje se špičková hodnota měřeného signálu, četnost rázů a doba odezvy. Hodnota BCU je závislá na energii buzení, rozměrech ložiska a geometrickém tvaru valivého elementu. Tato metoda využívá srovnání s absolutně shodným ložiskem, které bylo proměřeno na identickém místě kontrolovaného stroje od montáže až po vyřazení z funkce. Při zpracovávání dat se získá trendová křivka, která slouží jako referenční. Případně se k posouzení poškození využívá změna charakteristické veličiny vzhledem k hodnotám nově namontovaných ložisek. Patentováno společností Schenck. [6]

4.3 High Frequency Emission (HFE)

Jedná se o analýzu v časové oblasti vyvinutou společností Adash. Principem je detekce rostoucí energie vibrací současně s nárůstem poškození ložiska. Detekovaná vysokofrekvenční hodnota se vyjadřuje ve vztahu ke konstantě „g“ ($9,81 \text{ m/s}^2$). Hodnoty gRMS jsou závislé na otáčkách hřídele a pro vyhodnocení se používá příložený *Obr. 4.3*. K zesílení signálu se používá rezonanční frekvence vlastního snímače. Tato metoda je také citlivá na poruchy související s mazáním a přítomností mechanických nečistot v mazivu.[1][6]



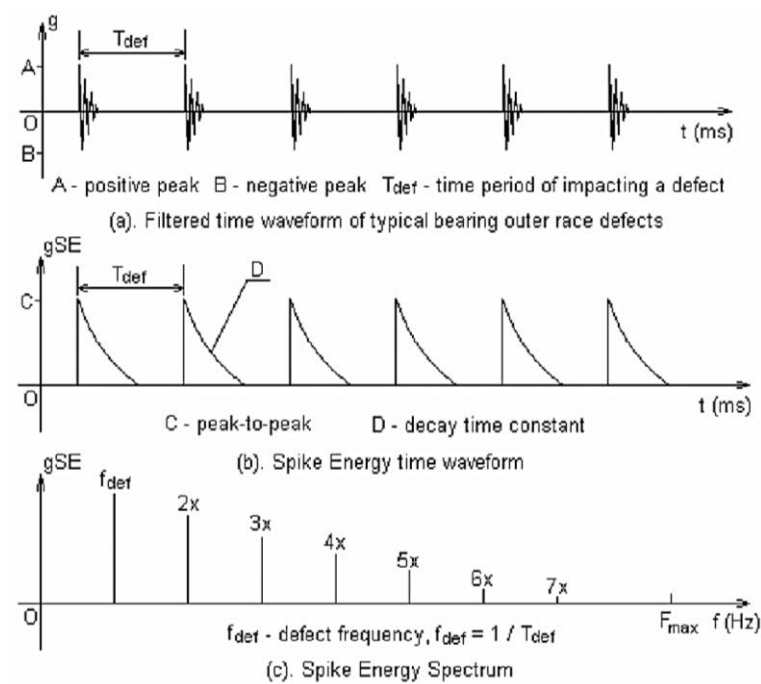
Obr. 4.3: Graf vyhodnocování stavu ložiska metodou HF [1]

4.4 High Frequency Detection (HFD)

Za pomoci této metody lze odhalit poškození kuliček, nebo válečků u valivých ložisek. Získáváme celočíselnou hodnotu celkové úrovně vibrací generovaných ve vysokofrekvenčním pásmu malými vadami. Rezonanční frekvence detekčního senzoru je v pásmovém průchodu a slouží k zesílení signálu. Vzhledem k vysokým frekvencím se pro měření využívají akcelerometry a ultrazvukové senzory. Hodnoty jsou obvykle uváděny v jednotkách zrychlení „g“. Frekvenční pásma se u jednotlivých výrobců měřících zařízení liší. Například CSI uvádí od 5 do 20 kHz, v případně SKF se jedná o 5 až 60 kHz. [15]

4.5 Spike Energy (SE)

Tato metoda byla vyvinuta společností IRD Mechanalysis. Opírá se o proces filtrování a detekci signálu, který zachycuje vlivy defektu, přičemž výrazně zesiluje základní frekvenci a její harmonické násobky. SE byla vytvořena pro diagnostiku rotačních strojů a zaměřuje se na sledování poruch ozubených kol, opotřebení ložisek a detekci mikroskopických trhlin a prasklin na dalších součástech stroje. Mechanické rázy vyvolávají krátké impulsy vibrační energie, které vybudí vlastní frekvence. Akcelerometr zaznamená energii nárazu jako funkci špičkové amplitudy a rychlosti opakování (Obr. 4.4).



Obr. 4.4: Spike Energy peak-to-peak detekce [11]

Kvůli velké citlivosti metody SE na nastavení se tato metoda aplikuje pro sledování stavu strojů s pozorováním trendů. Pro přesnější měření by se měl vždy použít stejný druh akcelerometru, způsob uchycení a umístění snímače. Zachycený signál prochází přes filtr, který propouští jen určité kmitočtové pásmo a zároveň odstraňuje šum způsobený nesouosostí, nevyvážeností a vůlemi. Díky tomu jsou poruchové frekvence ložisek a převodů výraznější. Frekvenční pásmo pro použití SE se pohybuje od 5 do 65 kHz. Získané hodnoty se udávají v jednotkách zrychlení „g“. [11]

4.6 Spectral Emitted Energy (SEE)

SEE poskytuje velmi včasné odhalení závad ložisek a převodů ozubených kol. Pro měření se využívá detekce akustické emise generované kontaktem kov na kov. Okolnosti, které mohou vést ke vzniku akustické emise, jsou například defekt ložiska, nedostatečné mazání, mikroprokluzování (tření), kavitace proudění, třískové obrábění kovu, elektrický šum, znečištění plastického maziva, dynamické přetížení, tvoření trhlin, kontakt kov na kov a další.

Technologie SEE používá speciální snímače akustické emise, které zaznamenávají ultrazvukovou akustickou emisi vznikající následkem poškození elementů ložisek (150 – 500 kHz).

Pokud dojde k zvyšování hodnot SEE, ložisko je podrobněji monitorováno (zkrátí se intervaly měření a použije se multiparametrické monitorování). Trendování hodnot, obálkování, měření teplot a vibrací nejlépe umožní analyzovat problém a určit vhodnou dobu pro opravu. [15]

Numerická analýza SEE

Při detekci signálu v blízkosti monitorovacího snímače je zásadní znalost této oblasti. Např. pokud k ložisku, na kterém se provádí měření, přiléhá převodovka, může být akustická emise z převodovky přičítána k hodnotám SEE naměřeným v ložisku. V takovém případě mohou i vysoké hodnoty indikovat dobrý stav monitorovaného ložiska. Obecně ovšem hodnoty vyšší, než normální, poukazují na poškození. Pokud není znám průběh signálu na sledované nepoškozené komponentě, používají se k vyhodnocení mohutnosti signálu SEE např. následující rozsahy:

- 0 – 3 žádná identifikovatelná závada
- 3 – 20 problém s mazáním, znečištěním, defekt ložiska při malém zatížení, nebo malý defekt ložiska při normálním zatížení
- 20 – 100 defekt ložiska nebo znečištění
- 100 + výrazná závada ložiska

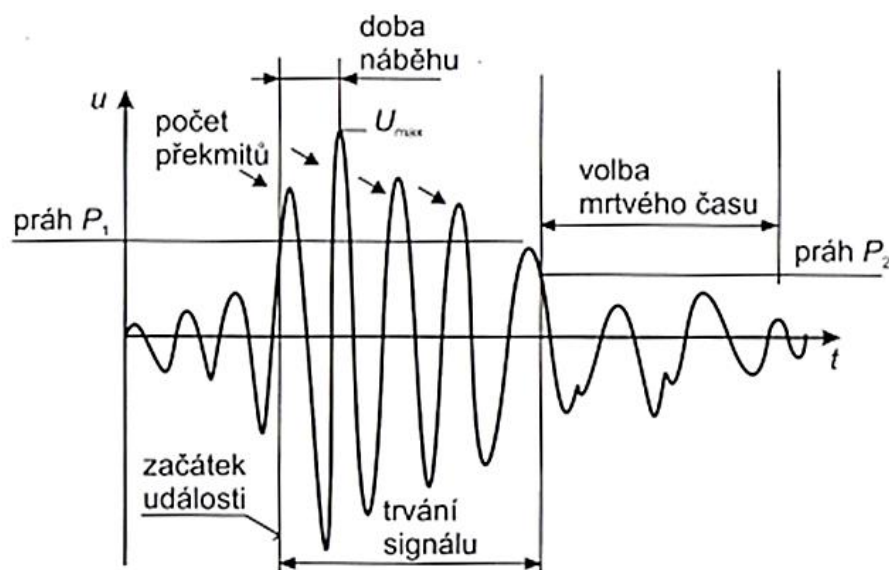
Hodnoty jsou uvedeny ve stupnici SEE. Tato čísla jsou orientační, zkušenost s trendováním měřených hodnot usnadní zjištění, které hodnoty platí pro monitorovaný objekt. [6]

4.7 Akustická emise

Akustickou emisi lze definovat jako elastickou napěťovou vlnu generovanou náhlým uvolněním nebo přerozdělením napětí v materiálu. K tomuto jevu dochází při plastické deformaci kovů doprovázené dislokačními a degradačními procesy v mikrostruktúře a makrostruktúře materiálu, kavitačními procesy v hydrodynamických systémech, turbulencemi při úniku kapaliny z potrubí atd. Metoda AE se označuje jako zaznamenání akustického zvuku, šířícího se od místa poškození, následné analogové zpracování elektrického signálu a vyhodnocení parametrů detekovaného signálu. [2]

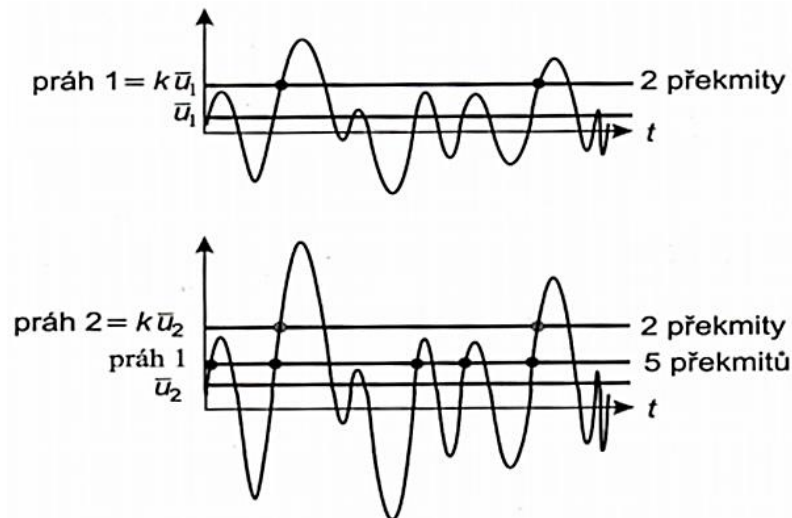
AE pracuje s frekvencemi řádu několik kHz až MHz. Jedná se o nedestruktivní pasivní metodu, což znamená, že neovlivňuje měřený objekt. Tato metoda má široké spektrum využití. Používá se při diagnostice rotujících objektů, pro detekci a lokalizaci mikrotrhlin a jejich šíření, u leteckých konstrukcí, konstrukcí mostů aj. [10][12]

Nespojitá akustická emise je impulzní napěťová vlna, vyvolaná časově oddělenými událostmi, trvající několik nanosekund až jednotek milisekund. Signál je obvykle ve formě tlumených kmitů (Obr. 4.5) a jeho spektrum je frekvenčně velmi široké. Zdrojem je aktivně měnící se prasklina v materiálu. [2]



Obr. 4.5: Parametry nespojitého (impulzního) signálu akustické emise (U_{max} je maximální amplituda signálu) [2]

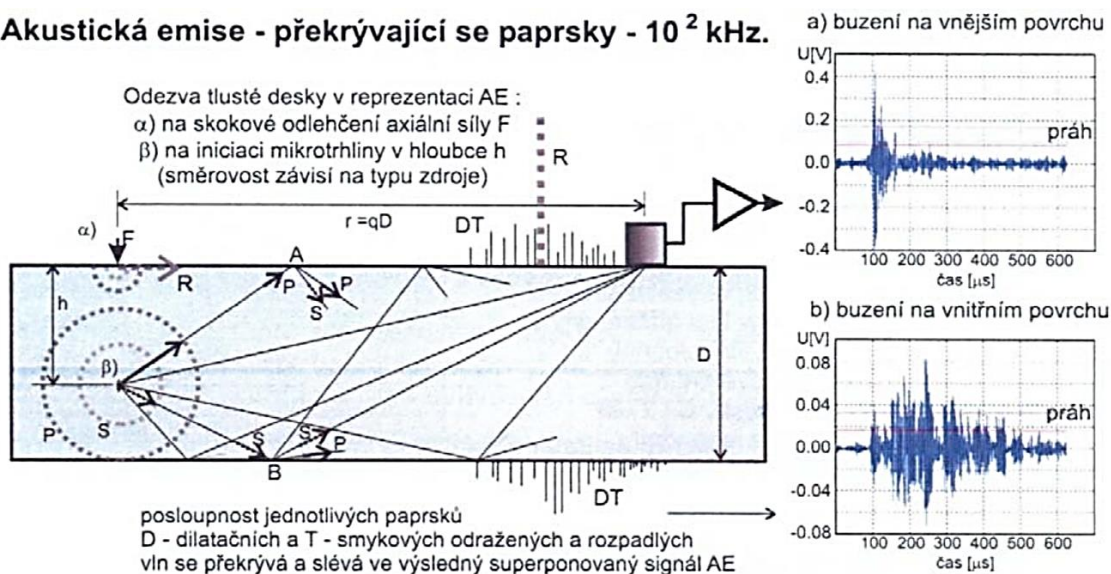
Spojité signál akustické emise je vyvolán sérií navazujících a mnohdy překrývajících se událostí, které mohou být vyvolány kavitací v kapalině, plastickou deformací povrchu kovů při tření nebo únikem kapaliny trhlinou v potrubí. Časový průběh získaného signálu má náhodný průběh (obr. 4.6). Četnost překmitů přes prahovou úroveň se vyhodnocuje za určitý předem stanovený časový interval. Práh je buď pevně stanoven, nebo je plovoucí (automaticky nastavován dle úrovně šumu nebo střední hodnoty signálu). [2]



Obr. 4.6: Průběh spojitého signálu akustické emise s pevným prahem (práh 1) a plovoucím prahem (práh 2) [2]

Tvar pulsu a pokles amplitudy závisí na kombinaci geometrických a materiálových vlastností zkoumaného materiálu. Vlny akustické emise se odrážejí v nespojitostech a na hranicích měřeného objektu (obr. 4.7). Je-li materiál dostatečně rovný a geometrické nespojitosti malé, snižuje se množství odrazů, přesto se při vyhodnocování tento aspekt bere vždy v potaz. [2]

Akustická emise - překrývající se paprsky - 10^2 kHz.



Obr. 4.7: Princip snímání a zobrazení vln AE [12]

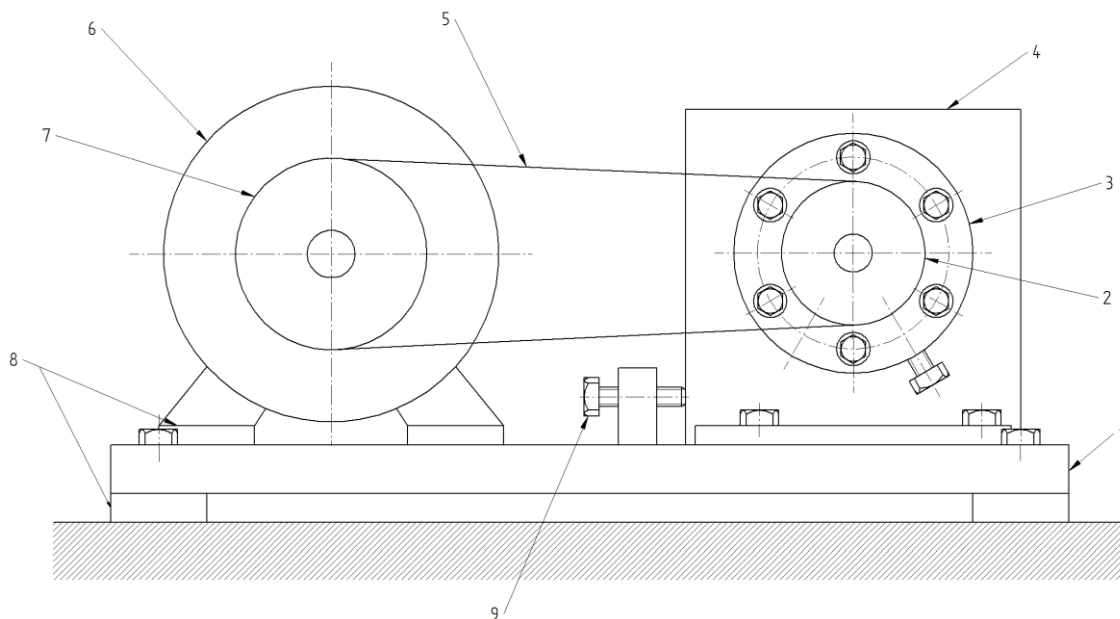
Při dopadu vlny na povrch tělesa dochází k odrazu a současně transformaci na jeden nebo více módů. Dále se vlna šíří převážně ve formě povrchové vlny. Složka vlny kolmá na povrch tělesa je detekována širokopásmovým piezoelektrickým snímačem s rezonanční frekvencí nad měřeným spektrem akustické emise nebo citlivějším rezonančním senzorem s více rezoncemi. Volbou vhodného tlumení lze u rezonančních senzorů v úzkém pásmu nastavit vyrovnanou závislost citlivosti na kmitočtu. U modernějších senzorů je v pouzdru zabudován předzesilovač. I přes velmi malou energii vlny jsou citlivé piezoelektrické snímače schopny detekovat dislokace v materiálu řádově 10^{-14} m. [10][12]

Při výběru umístění senzoru, je třeba postupovat opatrně, aby se minimalizovala ztráta energie podél cesty šíření AE kvůli lepší čistotě signálu. Důležitý je také výběr spojovacího materiálu, který je vhodný pro dané teploty použití a nezpůsobuje nepříznivé jevy jako například korozi povrchu měřeného objektu. [12]

Výhoda AE je detekce vad materiálu, pohled na celkový stav a možnost kontinuálního monitorování strojního zařízení (pomocí této metody lze zachytit okamžik vzniku vady a její rozvoj). Ve srovnání s ostatními metodami je méně pravděpodobné, že monitorování bude ovlivněno převládajícím hlukem a vibracemi, které jsou generovány pohyblivými mechanickými součástmi. Důvodem je vysokofrekvenční povaha signálu. [10]

5 Zkušební zařízení a popis experimentu

Celý experiment probíhal na standu (*Obr. 5.1*), který se skládal z motoru, řemenného převodu s převodovým poměrem 1,3:1, setrvačníku, vřetena, ložiskového domku a dvou ventilátorů pro snížení teploty, umístěných v blízkosti rotujícího vřetena. Pro snížení přenosu vibrací mezi jednotlivými komponentami byly využity silentbloky, umístěné pod motorem a také pod celým standem.



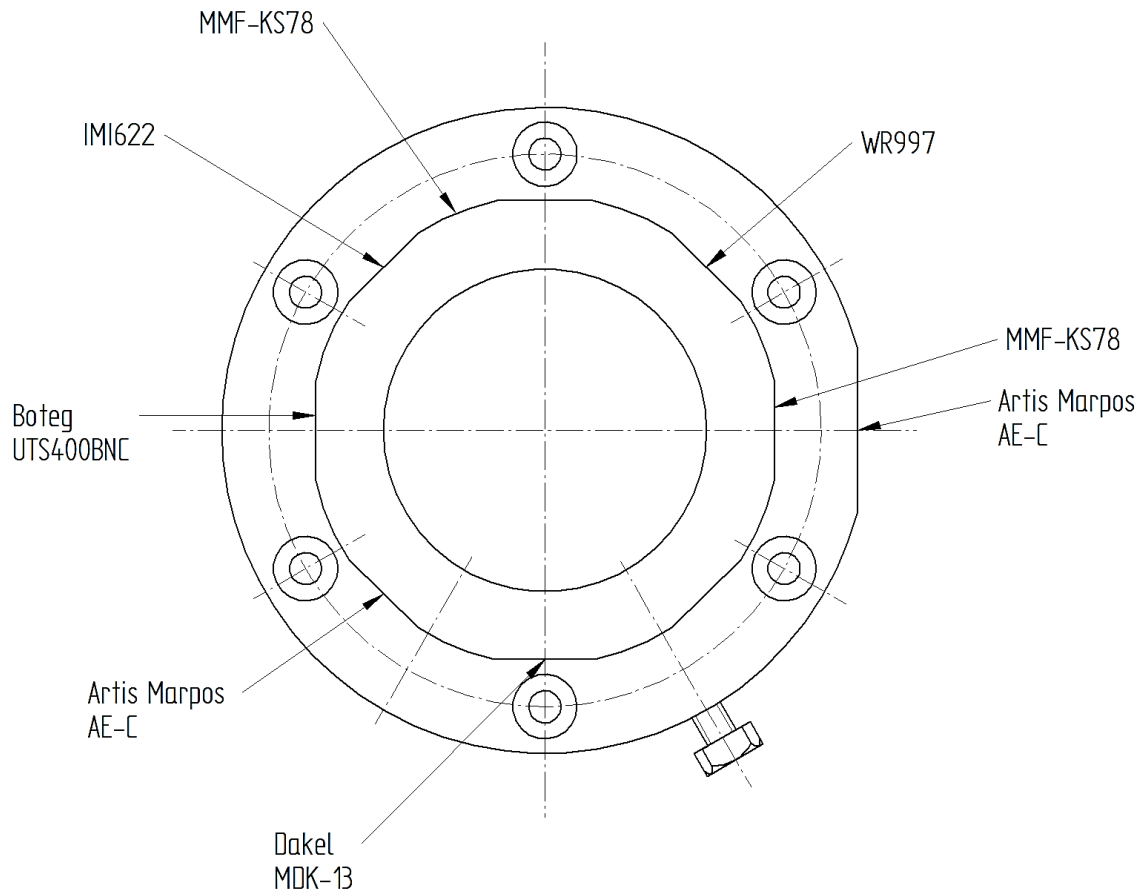
Obr. 5.1: Schéma měřícího standu

1 – základní deska, 2 – řemenice, 3 – ložiskový domek, 4 – konzole, 5 – řemen, 6 – motor, 7 – setrvačnick, 8 – silentbloky, 9 – šroub pro zajištění dostatečného napnutí řemene

Vibrace, AE, a teploty byly měřeny na ložiskovém domku, v němž se nacházela dvě valivá ložiska (FK 6008-2RS). Ložiskový domek byl upevněn prostřednictvím šesti šroubů a vysokých matic ke konzole. Dostatečné napnutí řemene bylo zajištěno pomocí upínacího šroubu. V napnutém stavu byla konzola upevněna dvěma šrouby.

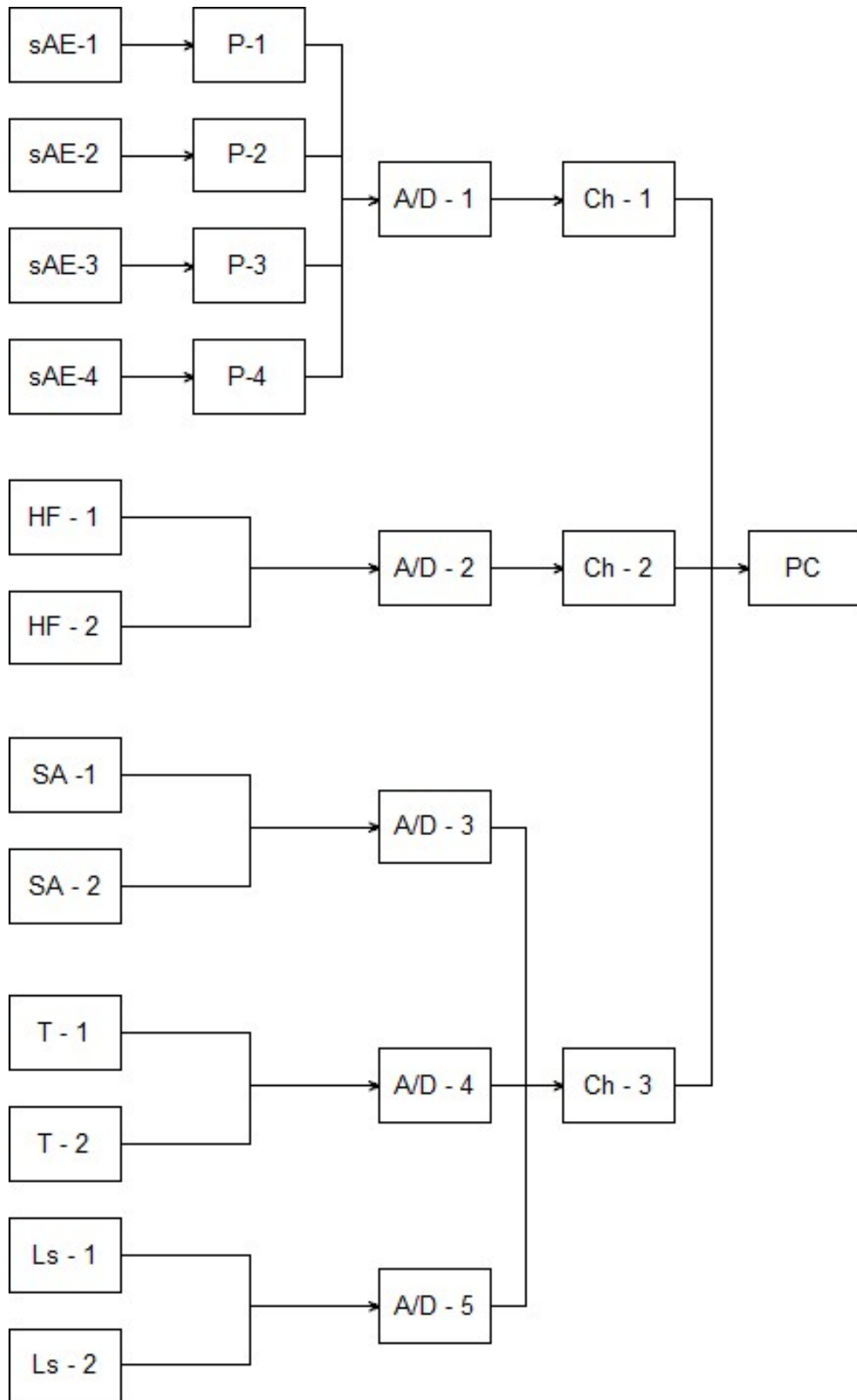
Měřící aparatura se skládala ze čtyř snímačů akustických emisí od společnosti Boteg (UTS400BNC) a Dakel (MDK-13), upevněných pomocí lepidla HBM X60 a dvou snímačů od společnosti Artis (AE-C) jejichž přichycení k ložiskovému domku zajišťoval šroubový spoj. Dále z dvou piezoelektrických akcelerometrů (MMF-KS78 a IMI 622), připevněných pomocí šroubu, a jednoho akcelerometru umístěného na motoru (WR 784) přichyceného prostřednictvím nalepené destičky a šroubu. Další signály byly získány z dvou vysokofrekvenčních akcelerometrů (WR997 a MMF-KS78) umístěných na ložiskovém domku a dvou laserových otáčkových sond generujících pulsy při

průchodu přes reflexní značku umístěnou na rotující části vřetena a pro kontrolu otáček motoru také na řemenu. Pro sledování teploty se využily dva odporové snímače Pt100 měřící teplotu na ložiskovém domku. Umístění snímačů na ložiskovém domku je znázorněno na *Obr. 5.2*.



Obr. 5.2: Schéma umístění snímačů na ložiskovém domku

Každý snímač akustických emisí byl zapojen do svého předzesilovače pro zesílení primárního signálu a základní frekvenční filtraci. Signál vedl z předzesilovače do měřící karty NI 9223. Jedná se o čtyřkanálovou vysokorychlostní analogově digitální kartu s rozlišením 16 bitů a vzorkovací frekvencí až 1 MHz (vzorkovací frekvence snímačů AE omezena hodnotou 250 kHz). Dále byla využita karta NI 9250 s vzorkovací frekvencí 102,4 kHz, do které vstupovaly akcelerometry WR997 a MMF-KS78, karta NI 9234 (vzorkovací frekvence 51,2 kHz) pro akcelerometry MMF-KS78 a IMI 622, karta NI 9239 pro otáčkové sondy a NI 9219 pro teploměry. Přenos dat mezi moduly a externím zařízením zprostředkovávaly dva jednoslotové cDAQ-9171 a jeden osmislotový cDAQ-9178. Schéma zapojení měřící aparatury viz *Obr. 5.3*, fotka zapojení viz *Obr. 5.4*.



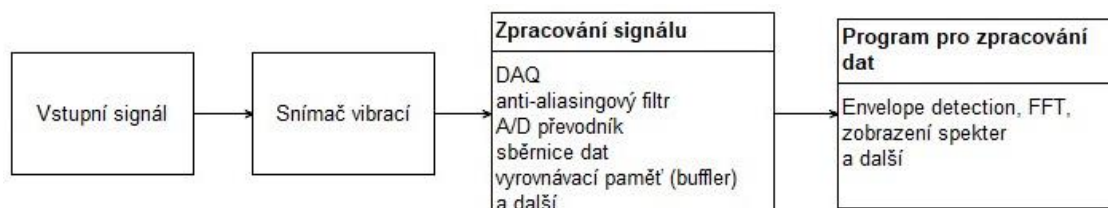
Obr. 5.3: Schéma zapojení měřící aparatury

sAE – snímač AE, HF – akcelerometr s vysokofrekvenčním měřícím rozsahem, SA – akcelerometr se standardním frekvenčním rozsahem, T – odporový snímač teploty Pt100, Ls – Laserová otáčková sonda VLSS/T/LSR, A/D – analogově digitální karta, Ch – Chassis, PC – počítač pro zaznamenávání dat



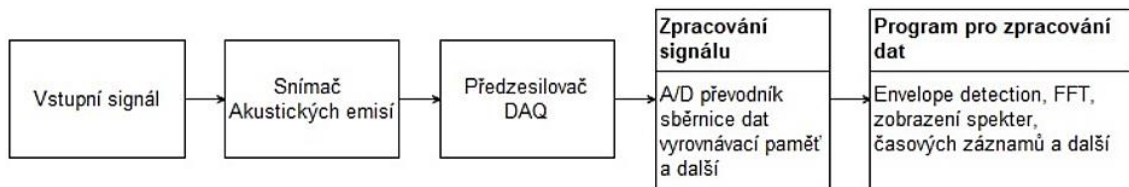
Obr. 5.4: Zapojení měřící aparatury

Obr. 5.5 znázorňuje schéma měřící aparatury použité při měření. Vstupní signál je převeden snímačem vibrací se zabudovaným předzesilovačem na elektrický analogový signál. Dále prochází anti-aliasingovým filtrem (pro omezení maximální frekvence), digitalizuje se v A/D převodníku a ukládá se. Takto získaná data se zpracovávají ve vytvořeném programu, kde dochází k obálkování a výpočtu FFT pro zobrazení frekvenčního spektra, kaskádního grafu a spektrální mapy.



Obr. 5.5: Analyzátor pro měření akcelerometry

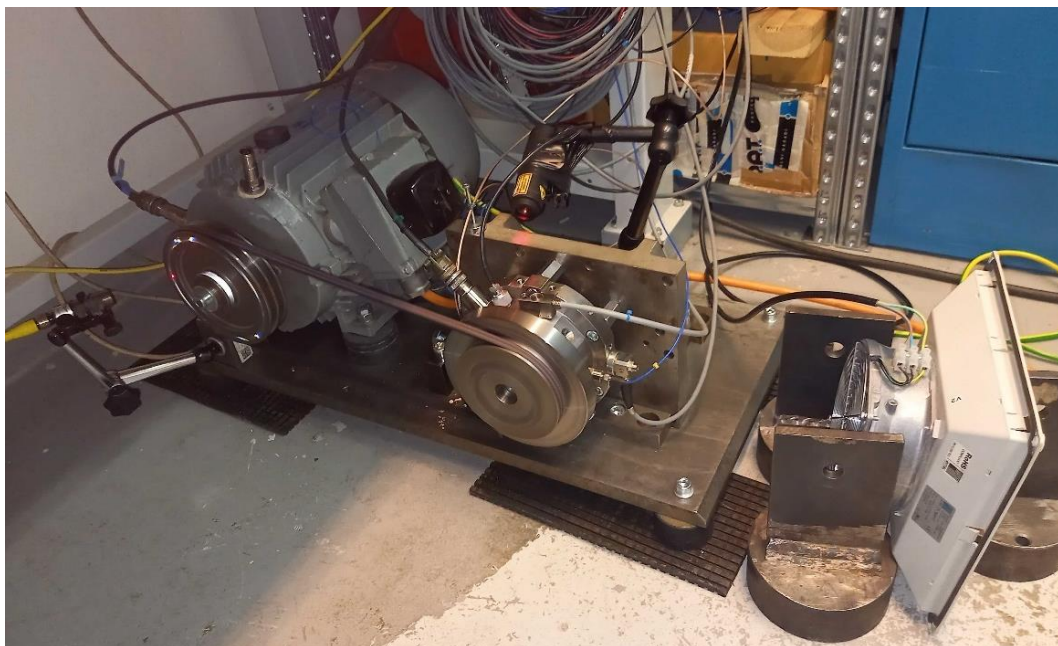
Na *Obr. 5.6* je zobrazeno schéma analyzátoru pro měření AE, které se od předešlého příliš neliší. Významná změna se týká přítomnosti předzesilovače, který není zabudovaný ve snímačích a absence anti-aliasingového filtru. Po průchodu obálkovými pásmy byl proveden FFT výpočet a uložení zpracovaných dat pro následnou vizualizaci.



Obr. 5.6: Analyzátor pro měření Akustických emisí

5.1 Průběh měření

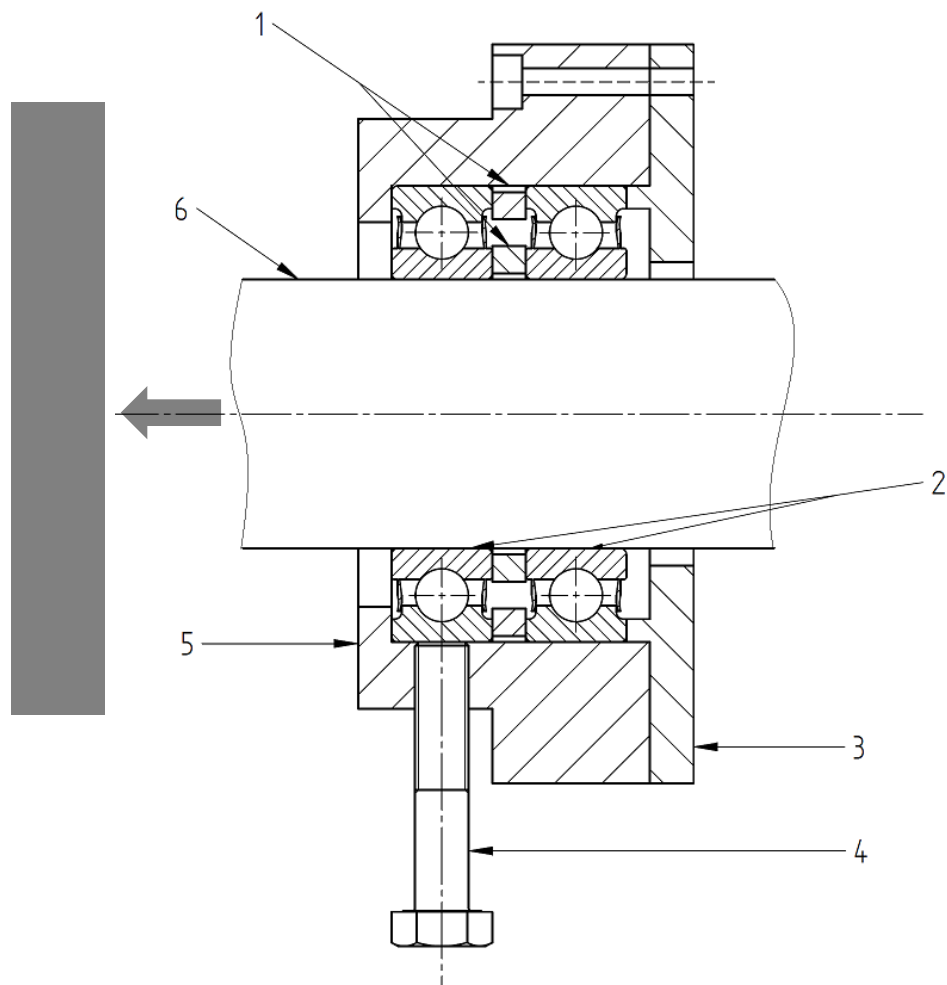
Při počátečních měřeních (*Obr. 5.7*) se zjišťovala ideální hodnota otáčkové frekvence, při níž by byl vstup nežádoucích jevů potlačen na minimum. Snímání hodnot se provádělo při otáčkových frekvencích 1640 ot/min, 2000 ot/min, 2670 ot/min, 3000 ot/min, 3300 ot/min a 4000 ot/min. Experiment ukázal, že při nižších frekvencích dochází k rezonanci částí standu, která by mohla nepříznivě ovlivnit jeho životnost. Ideální otáčková frekvence by se tedy měla nacházet nad 3300 ot/min. Další měření byla provedena při otáčkové frekvenci 3500 ot/min.



Obr. 5.7: Průběh měření

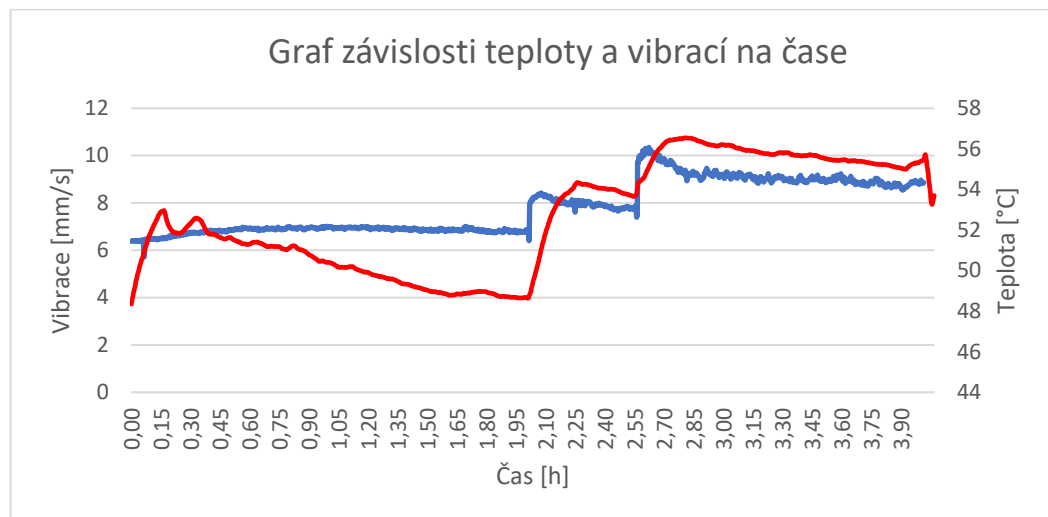
Během těchto počátečních měření došlo k první komplikaci. V původním provedení byly pro snížení přenosu vibrací využity silentbloky mezi ložiskovým domkem a konzolí, ke které byl připojen. Kvůli vysokým teplotám (bezpečnosti) byly odstraněny a došlo k náhradě za vysoké šestihřanné matice. Pro snižování teploty byl zpočátku využit jen jeden ventilátor, jednalo se však o nedostatečnou formu ochlazování a byl tedy přidán druhý. Vysoká teplota, překračující horní mez zadanou výrobcem, také zapříčinila nutné přemístění snímače akustických emisí od společnosti Artis Marpos, z horní části ložiskového domku blíže k ventilátoru. Následující změny se týkaly například úprav programu pro zaznamenávání dat, přidání dalších snímačů, a nahrazení snímačů, u kterých došlo k defektu.

Do ložiskového domku byly vyvrtány dva radiální otvory a do jednoho z nich umístěn šroub, který se v průběhu experimentu utahoval a povoloval. Umístění setrvačníku a řemenice je na *Obr. 5.8* naznačeno tučně zvýrazněnou šipkou a obdélníkem.



Obr. 5.8: Schéma zatěžování ložisek v ložiskovém domku
 1 – distanční kroužky, 2 – ložiska FK 6008-2RS, 3 – víčko, 4 – šroub pro nastavení zatíženého stavu, 5 – těleso ložiskového domku, 6 – hřídel

Utahování a povolování šroubu se v časových záznamech projevilo skokovými změnami vibrací a s tím spojeným nárůstem a poklesem teploty. Na Obr. 5.9 je zobrazen vývoj vibrací a teploty v závislosti na čase, kde osa X znázorňuje čas, na levé straně jsou na ose Y vyneseny vibrace vřetena a na pravé straně osa Y odpovídá teplotě vřetena.



Obr. 5.9: Graf závislosti vibrací a teploty na čase pro snímače IMI622 a Pt100

Z grafu můžeme vidět pozvolný pokles teploty při dosažení 56°C. Důvodem bylo zapnutí druhého ventilátoru. Dále je významný čas 2,04 h, kdy došlo ke skokové změně vibrací a postupnému nárůstu teploty. Tato změna byla způsobena již zmíněným utažením šroubu. Následně se nechal prohřát stand a stabilizovat vibrace. V čase 2,6 h došlo k dalšímu utažení.

Počet měření a průběžné úpravy standu, znázorňuje Tab. 5.1, kde se nachází i výčet STT souborů. Jednalo se o textové dokumenty se základními přehledovými údaji jako název, umístění a frekvenční rozsahy snímačů vibrací, efektivní hodnoty RMS a špičkové hodnoty Peak to Peak, informace, zda měření probíhá v zatíženém, nebo odlehčením stavu, zda v průběhu měření nedošlo k překročení předem nastavených bezpečnostních mezí apod.

Tab. 5.1: Přehled měření a vytvořených STT souborů

číslo měření	název STT souboru	provedené změny
1	05 3500	
2	101 3500	porucha snímače VOPSS-100 nahrazen MMF-KS78 (Tp)
	103 3500	
3	08 3500	do stt souborů jsou zapisovány i data ze snímačů AE
4	0508 02 3500	
5	02 3500	
6	0513 08 3500	přidán snímač Pt100 a AE-C, do stt souborů se zapisují hodnoty Peak-to-peak
	0513 09 3500	vibrace během měření stouply o více jak dvojnásobek
7	0517 01 3500	
	0517 02 3500	
	0517 03 3500	snímač od společnosti artis byl přesunut z Tp na TpRt
8	0518 02 3500	do stt souborů se zapisují informace zda probíhá měření při odlehčení/zatížení
	0518 03 3500	
9	0519 01 3500	přidán snímač MMF-KS74 (vzorkovací frek. 51,2 kHz)
	0519 03 3500	data se na hodinu přestali zaznamenávat, zřejmě kvůli přehlcené paměti PC
	0519 04 DobeH	
	0519 05 DobeHBezVentilatoru	
10	0520 02 3500	
	0520 03 3500	
	0520 04 3500	
	0520 05 3500	
	0520 07 3500	
11	0610 01 3500	
12	0602 01 3500	
	0602 02 3500	
13	0607 01 3500	
	0607 02 3500	
14	0615 01 3500	porucha snímače MMF-KS74, nahrazen MMF-KS80
15	0621 01 3500	

6 Zpracování dat

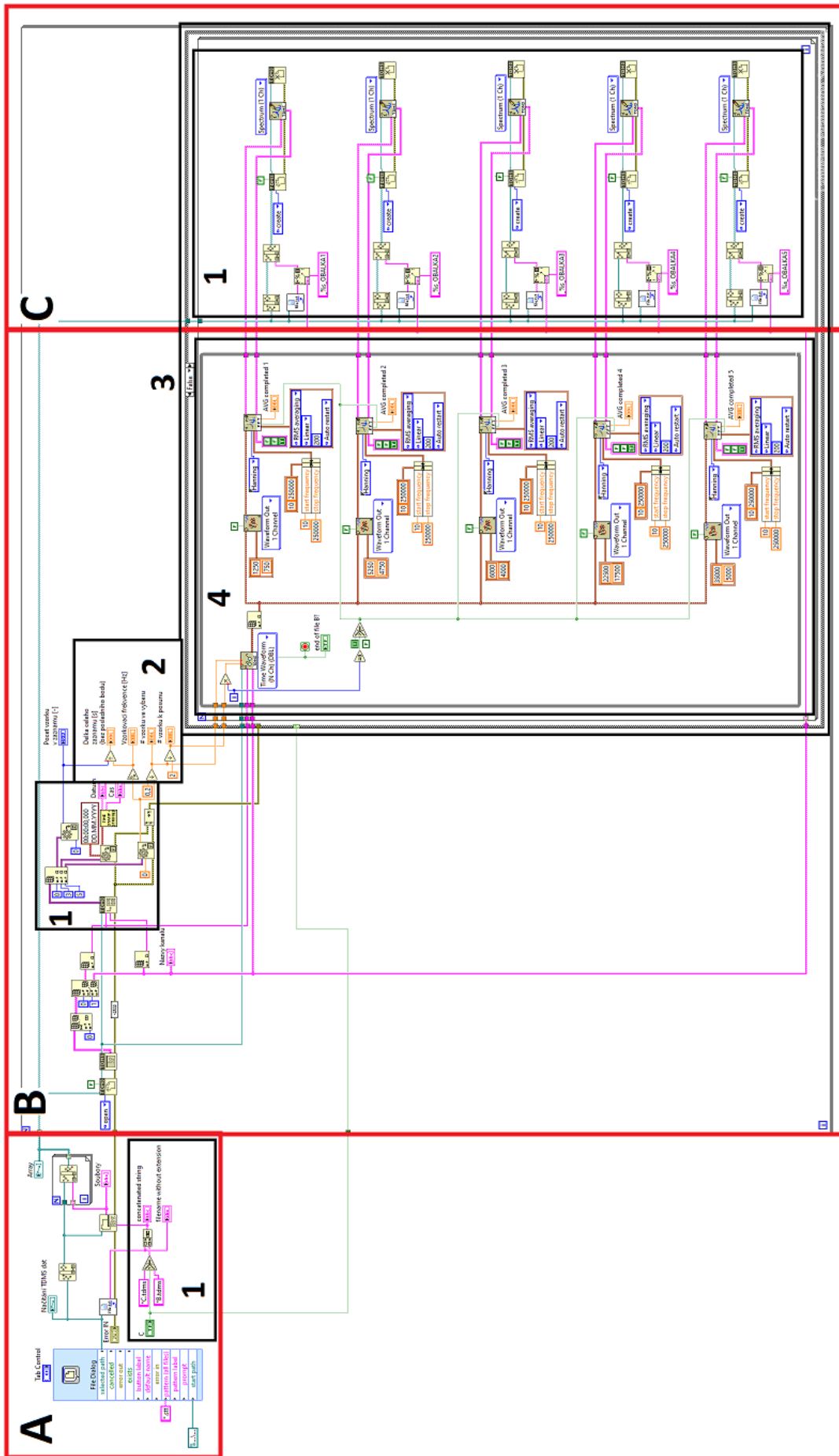
Pro zpracování naměřených dat byl zvolen program LabView. Jedná se o vývojové prostředí pro tvorbu programů na měření, zpracovávání a prezentaci dat. Programy v tomto softwaru se nazývají virtuální přístroje, z anglického virtual instrument, odtud také přípona těchto programů VI. Uživatelské rozhraní je rozděleno na dvě části. **Čelní panel** (který znázorňuje ovládací prvky, vstupní a výstupní indikátory) a **blokový diagram** (v němž je vytvářen kód za pomoci programových funkcí neboli bloků).

Vzhledem k pandemické nemoci Covid-19 jsem se nemohl účastnit všech měření. Změřená data jsem tedy obdržel a mým úkolem bylo pouze jejich zpracování a vyhodnocení výsledků. Program pro záznam dat ukládal naměřené hodnoty ve formátu TDMS do třech typů souborů, rozdělených dle typu snímačů: **A** (otáčkové sondy a akcelerometry se standardním frekvenčním rozsahem – vzorkovací frekvence 51,2 kHz), **B** (snímače AE – vzorkovací frekvence 250 kHz), **C** (akcelerometry s vysokofrekvenčním měřicím rozsahem – vzorkovací frekvence 102,4 kHz)

Celkem proběhlo 15 měření (84 hodin) s tím, že bylo získáno celkem 152 GB dat, jejichž velikost se po zpracování v VI pro výpočty téměř zdvojnásobila. Zpracování dat si vyžádalo něco málo přes 170 výpočetních hodin a vizualizace přibližně 45 minut pro jednu obálku (neočistěná data, očištěná data v zatíženém a odlehčeném stavu zobrazená v podobě frekvenčních spekter, kaskádních grafů a spektrálních map).

Pro práci s daty byly vytvořeny dvě VI pro zpracovávání a pro vizualizaci dat. Na *Obr. 6.1* je zobrazen blokový diagram pro zpracování naměřených signálů. Mezi nejpodstatnější funkce patří:

- automatické načítání časových záznamů s příponou TDMS
- FFT analýza časového záznamu
- překrytí signálu (50 %) a jeho průměrování
- obálková analýza s nastavitelnými frekvenčními rozsahy
- ukládání zpracovaných dat do souborů s příponou TDMS



Obr. 6.1: Blokový diagram pro zpracování dat

Zvýrazněné oblasti VI pro výpočty:

A – vstupní část – automatické načítání souborů TDMS podle zvoleného názvu nadřazeného souboru STT

1 – možnost výběru zpracování dat získaných z

*A – akcelerometry se standardním frekvenčním rozsahem

*B – snímače akustických emisí

*C – akcelerometry s vysokofrekvenčním měřicím rozsahem

B – výpočtová část

1 – přiřazení konkrétního času zaznamenání dat

2 – nastavení překrytí signálů, délky časového záznamu a rozlišení

3 – True: zpracování dat bez obálování, False: obálování a zpracování dat

4 – obálování s nastavitelným frekvenčním rozsahem, výpočet FFT

C – výstupní část

1 – ukládání zpracovaných dat do souborů TDMS ve podobě zprůměrovaného frekvenčního spektra

Obr 6.2 zobrazuje vytvořený program pro vytvoření frekvenčního spektra, kaskádního grafu a spektrální mapy. Zvýrazněné oblasti VI pro vizualizaci dat:

1 – Automatické načítání souborů TDMS podle zvoleného nadřazeného souboru STT

2 – možnost výběru ze zpracovaných dat

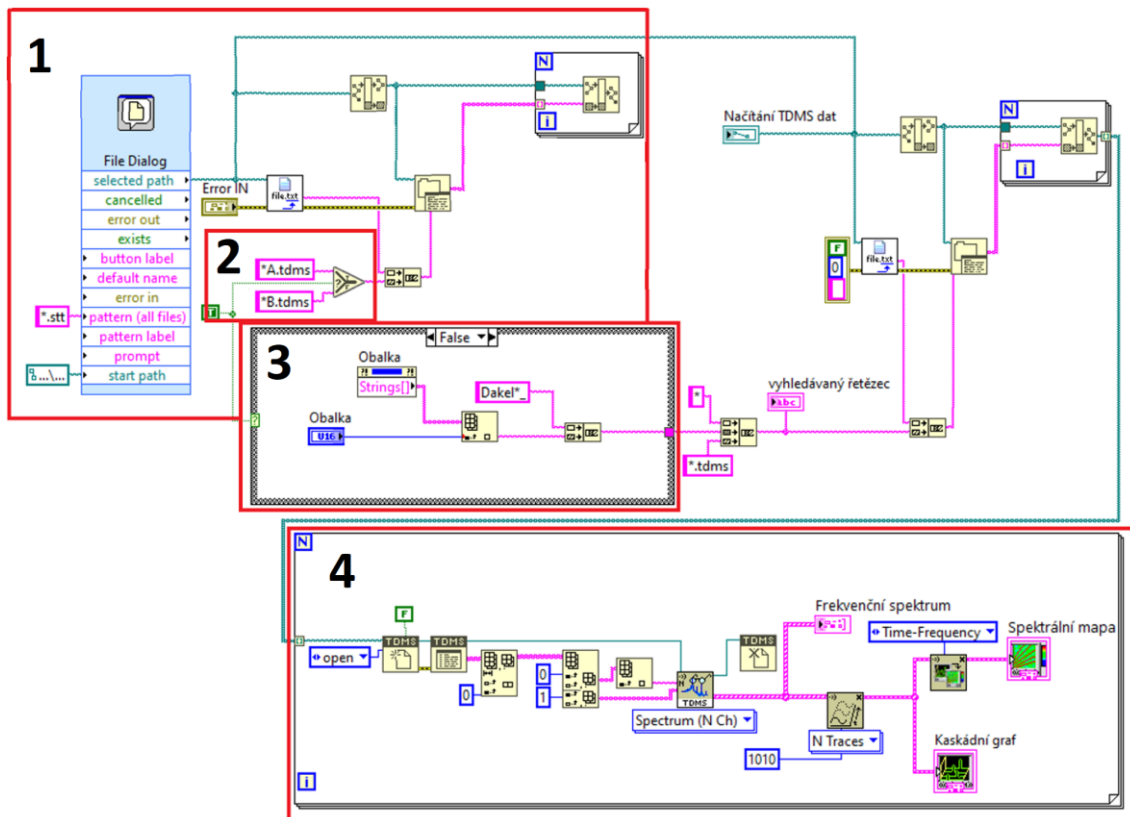
*A – akcelerometry se standardním frekvenčním rozsahem

*B – snímače akustických emisí

*C – akcelerometry s vysokofrekvenčním měřicím rozsahem

3 – výběr konkrétního snímače a obálky pro vizualizaci

4 – vizualizace zpracovaných dat do frekvenčních spekter, kaskádního grafu a spektrální mapy



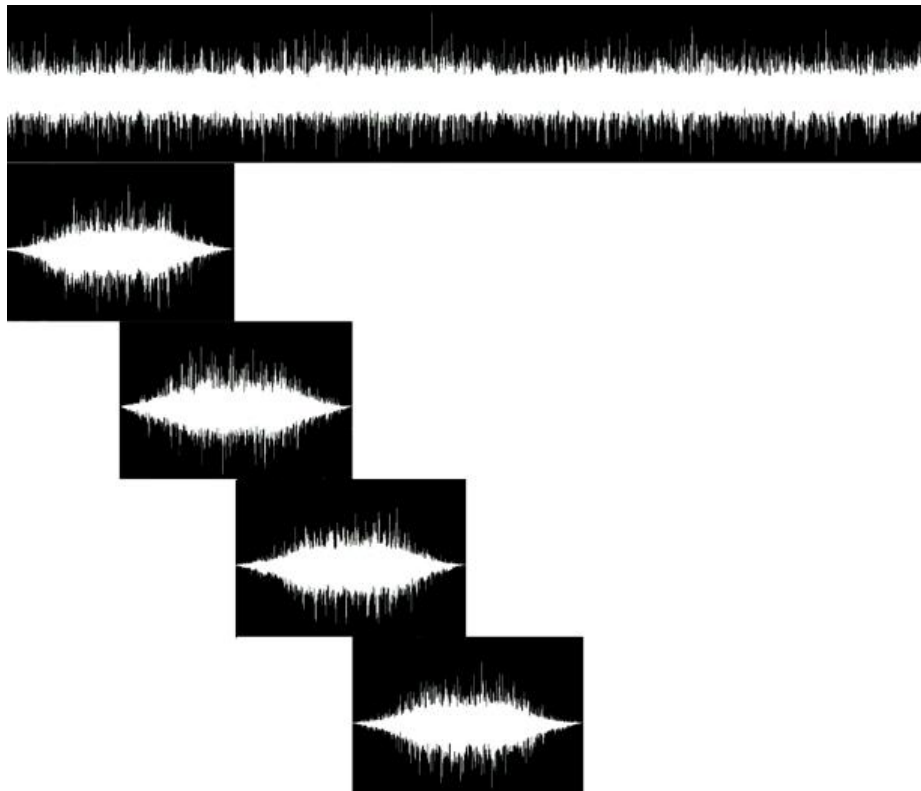
Obr. 6.2: Blokový diagram pro vizualizaci zpracovaných dat

Základní funkcí vytvořených VI v programu LabView byla frekvenční analýza signálu. Během měření se zaznamenávaly i náhodné šумы pocházející ze stroje i z okolního prostředí. Pro potlačení těchto nežádoucích jevů byla využita metoda lineárního průměrování. Princip spočívá v rozdělení časového záznamu na jednotlivé intervaly. Dále je potřeba odstranit nespojitost mezi těmito dílčími úseky, k čemuž bylo využito váhové okno, konkrétně Hanningovo. Signál je na svých okrajích potlačen do nuly, čímž se odstraní nespojitosti a signál se přiblíží periodickému charakteru. Z takto upravených signálů jsou následně vypočteny FFT spektra, jejichž průměrováním lze získat střední hodnotu amplitudy na každé frekvenci. Výsledným spektrem na jednotlivých frekvenčních čarách se pak stává aritmetický průměr spekter předchozích

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

kde n je počet průměrů (úseků), na které je časový záznam dělen.

Při průměrování spekter se část informací ztrácí, a to vždy na začátku a na konci dílčích časových úseků. Pro minimální ztráty informací v signálu bylo využito postupné načítání časových záznamů s tím, že se jednotlivé intervaly navzájem překrývaly. Při použití překrytí 50 % to tedy znamená, že každý další časový úsek začínal v polovině předešlého (Obr. 6.3) Nevýhodou tohoto systému je prodloužení výpočetního času z důvodu zvyšujícímu se množství průměrovaných úseků.



Obr. 6.3: Postupné načítání časových záznamů s překrytím 50 %

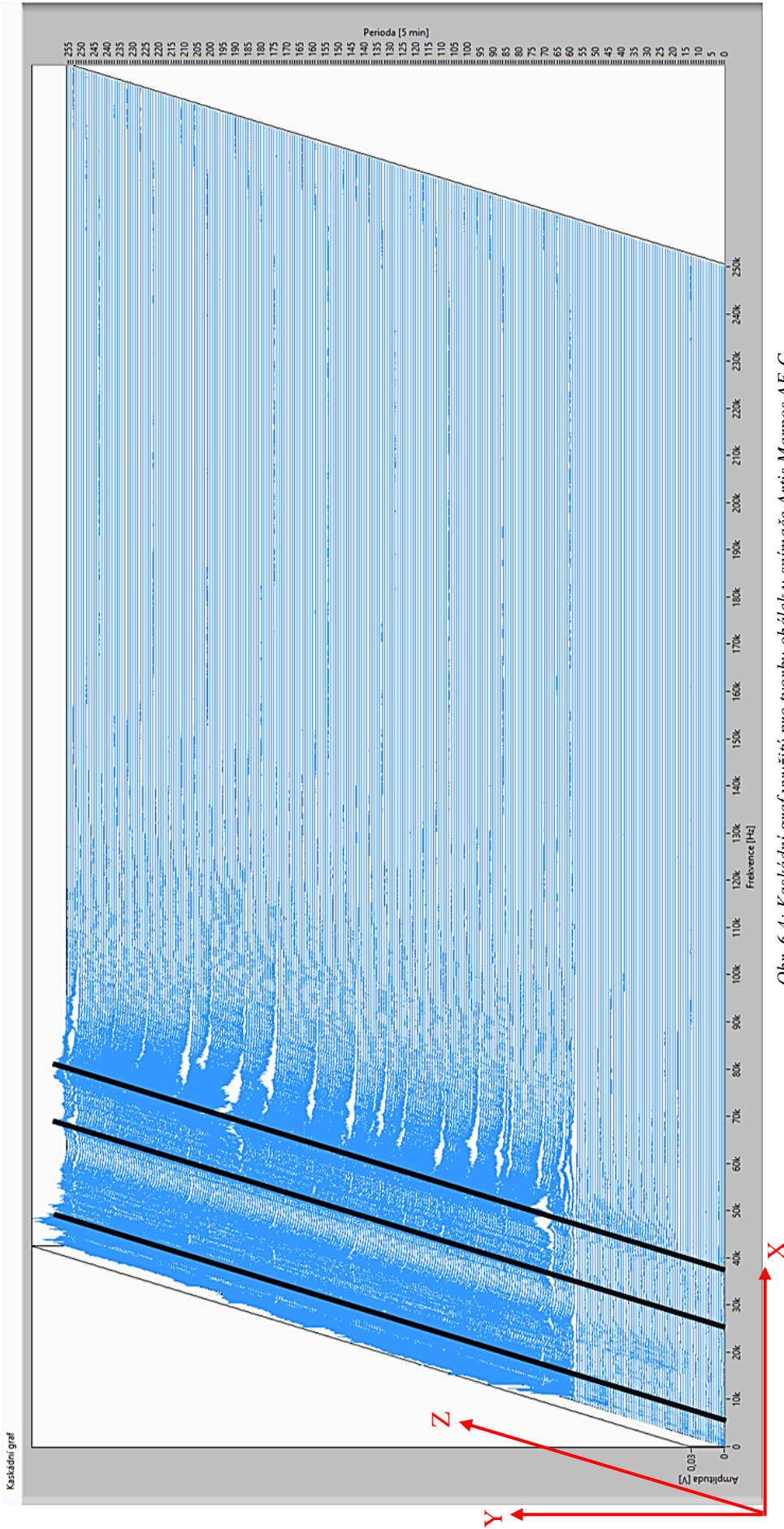
Pro lepší čitelnost, případně snadnější analýzu, se využívá např. zobrazení v kaskádním grafu, který zobrazuje postupný rozvoj vibrací ve frekvenčním spektru. Principem tohoto zobrazení je vynesení jednotlivých FFT spekter za sebou do 3D grafu. Pokud ani tento výsledek není dostatečně čitelný kvůli výskytu velkého množství zachyceného šumu nebo příliš velkému množství dat, je další možností vytvoření spektrální mapy. Jedná se o zobrazení kaskádního grafu v půdorysu, kde jsou za pomoci barevné škály zobrazeny amplitudy vibrací, akustické emise apod. Červenou barvou jsou vyznačeny nejvýraznější špičky.

Při zobrazení frekvencí v pásmu 10 Hz až 250 kHz je obvykle spektrum zaplněno mnoha frekvenčními čarami, ze kterých se obtížně analyzují výsledky. Proto bylo potřeba signály načíst i v jiné formě zobrazení a vytvořit specifické obálky a jejich frekvenční

rozsahy pro jednodušší analýzu. Data z jednotlivých snímačů byla zpracována ve VI pro výpočty a následně zobrazována s frekvenčním rozlišením 5 Hz ve třech provedeních (neupravený signál, očištěný v odlehčené a očištěný v zatížené fázi).

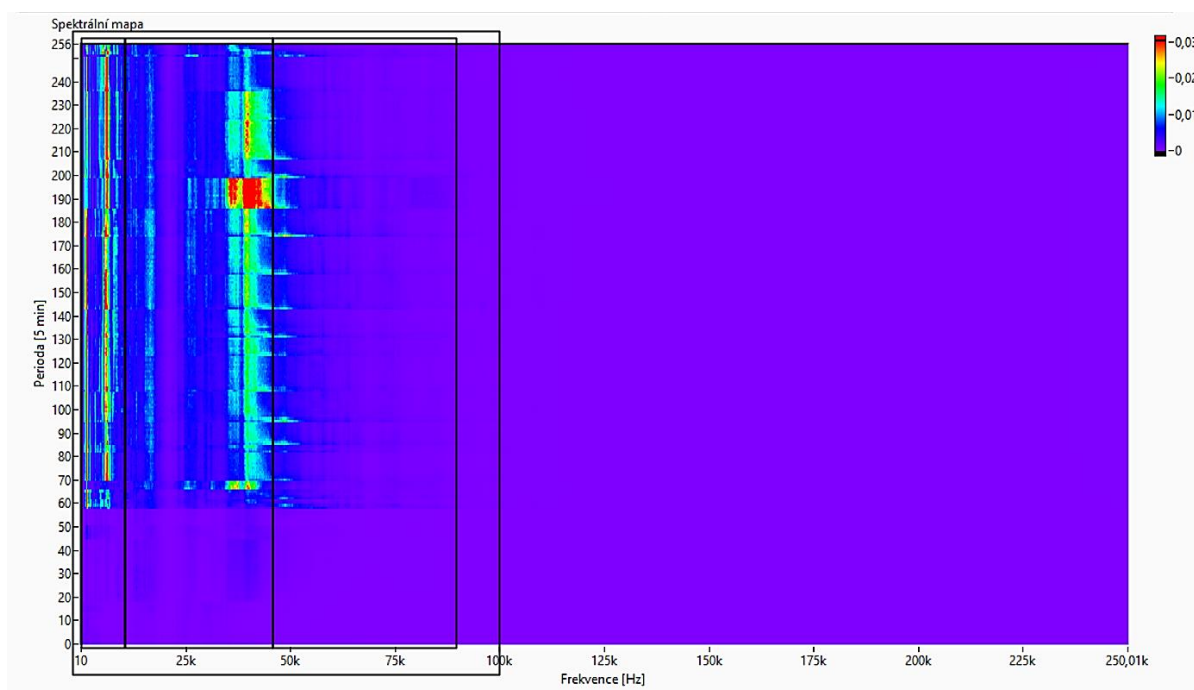
Očištěné záznamy zobrazují pouze zpracovaná data, která byla pořízena v určité fázi, a to při utaženém (zatížený stav), nebo povoleném (odlehčený stav) šroubu. Dále jsou odstraněny časové intervaly, kdy došlo k překročení některé přednastavené hodnoty jednoho ze snímačů a stroj byl automaticky odstaven.

Jako příklad určení obálek přikládám zpracovaná data ze snímače AE od společnosti Artis (AE-C) umístěného v pravé části ložiskového domku. Jedná se o kaskádní graf (*Obr. 6.4*) znázorňující pouze očištěné záznamy z měření v zatíženém stavu (utažený šroub). Na ose X jsou vyneseny frekvence, na ose Y amplituda vibrací a osa Z prezentuje počet načtených frekvenčních spekter.



Obr. 6.4: Kaskádni graf využitý pro tvorbu obálek u snímače Artis Marpos AE-C

V grafu jsou černými čarami naznačeny významné vrcholky na hodnotách 6, 26 a 36 kHz, kolem kterých bylo potřeba vytvořit obálky, pomocí nichž jsou potlačeny okolní šумы a otáčkové frekvence. Pro lepší přehlednost a přesnější určení frekvenčních rozsahů bylo dále využito spektrální mapy (Obr. 6.5).



Obr. 6.5: Spektrální mapa využitá pro tvorbu obálek u snímače AE-C

V grafech jsou vyznačené části, které odpovídají zvoleným obálkám. Tento postup byl aplikován u všech využitých snímačů (AE, akcelerometry se standardním i s vysokofrekvenčním měřicím rozsahem). V následující tabulce (Tab. 6.1) je souhrn všech snímačů a frekvenčních rozsahů jejich obálek.

Tab. 6.1: Přehled obálek pro jednotlivé snímače

typ snímače	označení snímače	frekvenční rozsahy obálek [kHz]				
snímače AE	UTS400BNC	13 - 28	38 - 53	53 - 68	77 - 92	13 - 103
	MDK-13	0,01 - 15	15 - 30	30 - 60	0,01 - 60	
	AE-C (Rt)	0,01 - 11	11 - 45	45 - 85	0,01 - 100	
	AE-C (BmLt)	0,01 - 11	11 - 45	45 - 85	0,01 - 100	
akcelerometry (102,4 kHz)	WR 997	0,5 - 2,5	4 - 12	12 - 22	22 - 32	0,5 - 32
	MMF 78	0,5 - 2,5	4 - 12	12 - 22	22 - 44	0,5 - 44
akcelerometry (51,2 kHz)	MMF 78	0,5 - 2,5	5,5 - 10,5			
	IMI 622	0,5 - 2,5	4 - 8	12 - 22	22 - 25,6	

Následně byla data opět zpracována VI pro výpočty, ovšem již s nastavenými obálkami, zobrazena do kaskádních grafů, spektrálních map i frekvenčního spektra. Vzhledem k množství vzniklých grafů jsou v kapitole 8.1 uvedeny pouze spektrální mapy obálek, které nejlépe zachytily vývoj vibrací, zobrazily rozdíly mezi zatíženým a odlehčeným stavem, lze u nich vidět vliv umístění snímače a jsou nejčitelnější. Souhrn všech grafů lze najít v přílohách.

7 Výpočet frekvence ložiskových závad

Vzhledem k stylu zatěžování jsem předpokládal poškození vnějšího kroužku. Aby byla tato hypotéza potvrzena či vyloučena, bylo potřeba vypočítat kinematické frekvence a výsledky porovnat s vzniklými grafickými výstupy. Pro výpočet bylo nutné znát otáčkovou frekvenci a parametry ložiska (FK 6008-2RS) viz kapitola 3.3.

vnější průměr	$D_1 = 68 \text{ mm}$
vnitřní průměr	$D_2 = 40 \text{ mm}$
šířka ložiska	$B = 15 \text{ mm}$
průměr kuličky	$BD = 7,94 \text{ mm}$
roztečný průměr	$PD = 54 \text{ mm}$
konstantní úhel	$\beta = 35^\circ$
počet kuliček	$N = 12 \text{ kusů}$

Měření probíhalo při nastavené otáčkové hladině 3 500 ot/min

$$BPFO = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta \right) \cdot n = \frac{12}{2} \left(1 - \frac{7,94}{54} \cdot \cos 35 \right) \cdot 58,33 = 299,1 \text{ Hz}$$

$$BPFI = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta \right) \cdot n = \frac{12}{2} \left(1 + \frac{7,94}{54} \cdot \cos 35 \right) \cdot 58,33 = 400,9 \text{ Hz}$$

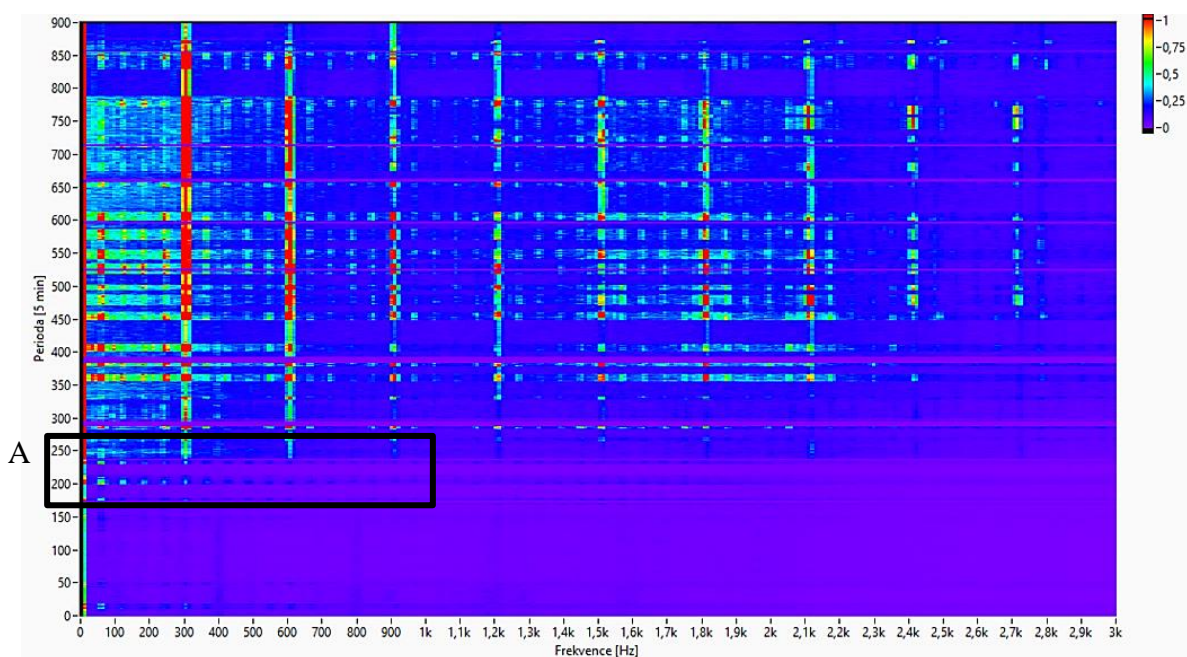
$$BSF = \frac{PD}{2 \cdot BD} \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cdot \cos\beta \right)^2 \right) \cdot n = \frac{54}{2 \cdot 7,94} \left(1 - \left(\frac{7,94}{54} \cdot \cos 35 \right)^2 \right) \cdot 58,3 = 195,5 \text{ Hz}$$

8 Analýza získaných dat

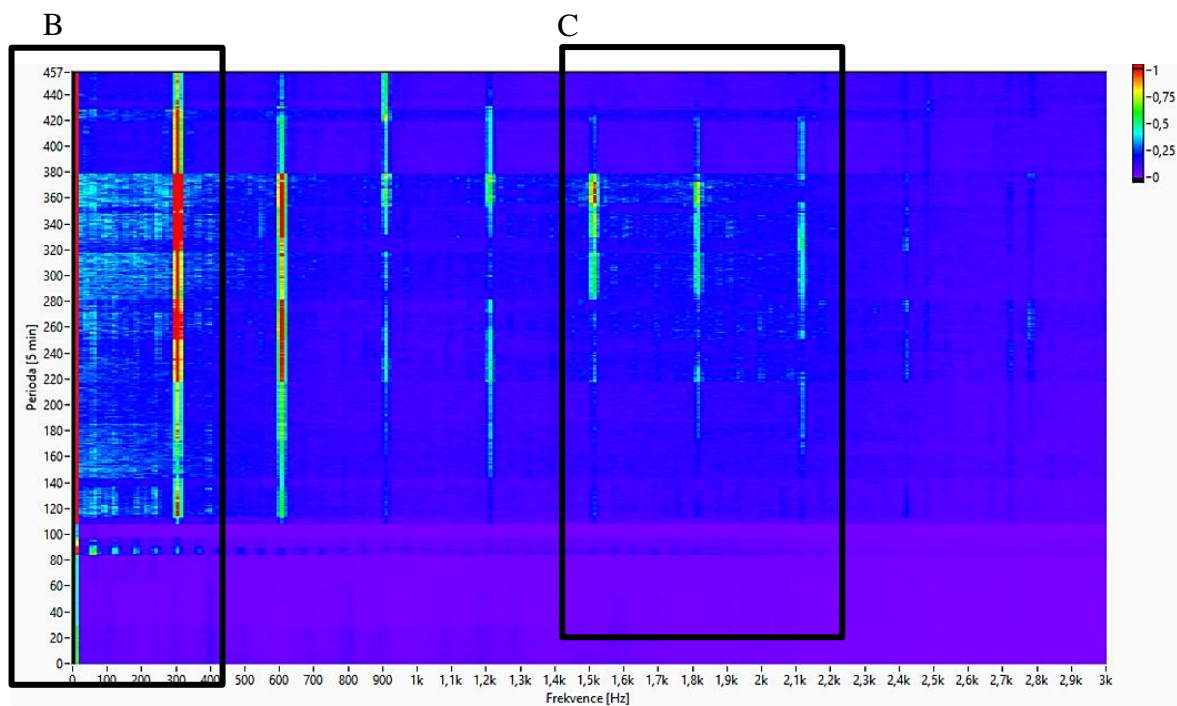
Zpracování signálů měřených pomocí akcelerometrů se standardním frekvenčním rozsahem (vzorkovací frekvence 51,2 kHz)

Pro signál ze snímače MMF-KS78 se jako nejvhodnější ukázala obálka s frekvenčním rozsahem 5,5 – 10 kHz (Obr. 8.1 – 8.3). Spektrální mapa obálkové analýzy založená na tomto pásmu nejlépe zobrazila rozdíly mezi odlehčeným a zatíženým stavem, a to nejen ve velikosti amplitud, ale také ve výskytu šumových pozadí 0 – 300 Hz (porovnání oblastí B a D) a kolem 5., 6. a 7. násobku harmonické frekvence (porovnání oblastí C a E), která byla výraznější při zatížení. Vzhledem k umístění snímače v pravé horní část ložiskového domku a ke stylu zatížení jsem předpokládal intenzivnější nárůst hodnot v zatíženém stavu, což se v grafickém zobrazení potvrdilo.

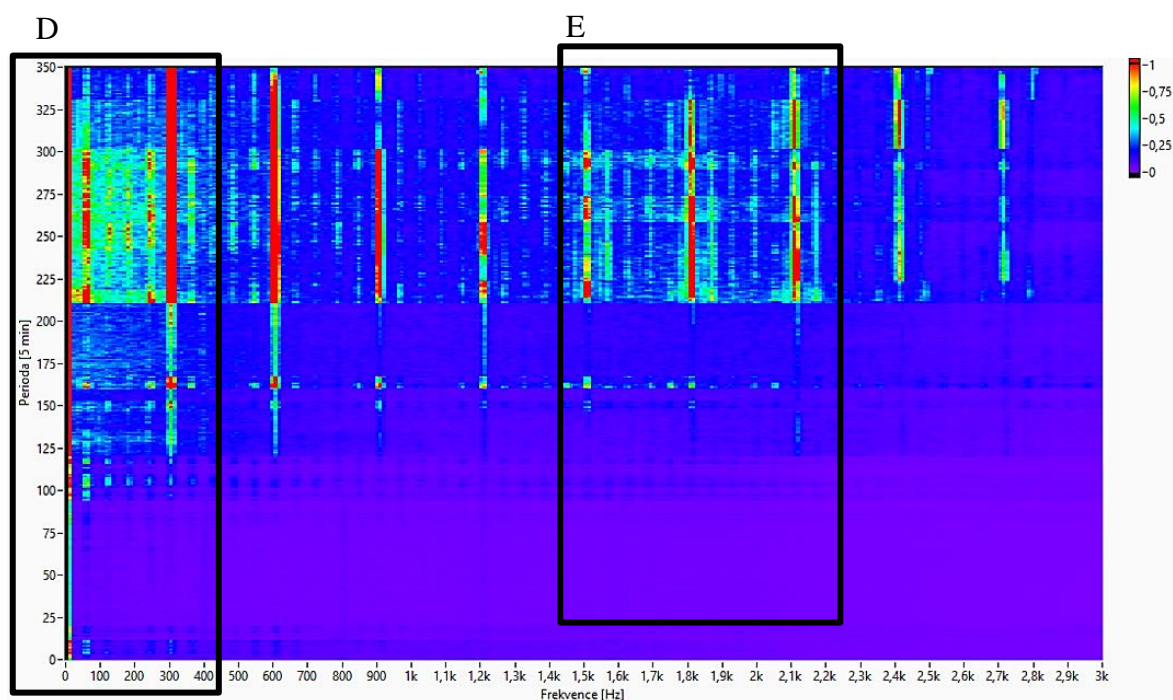
Vznik výrazného poškození se objevil kolem 240. odečtu, což vzhledem k pozdějšímu zapojení snímače odpovídá přibližně 37. hodině měření (oblast A). Při pohledu na zatížený a odlehčený stav je patrné, že výrazné frekvence se opakují na násobcích 300 Hz a jsou vidět až do devátého harmonického násobku. Tyto hodnoty odpovídají poruchové frekvenci vnějšího kroužku. Dále je možné si povšimnout (hlavně v odlehčeném stavu) střídavého nárůstu a poklesu amplitud na všech harmonických frekvencích.



Obr. 8.1: Spektrální mapa pro snímač MMF-KS78 (5,5 - 10,5 kHz)



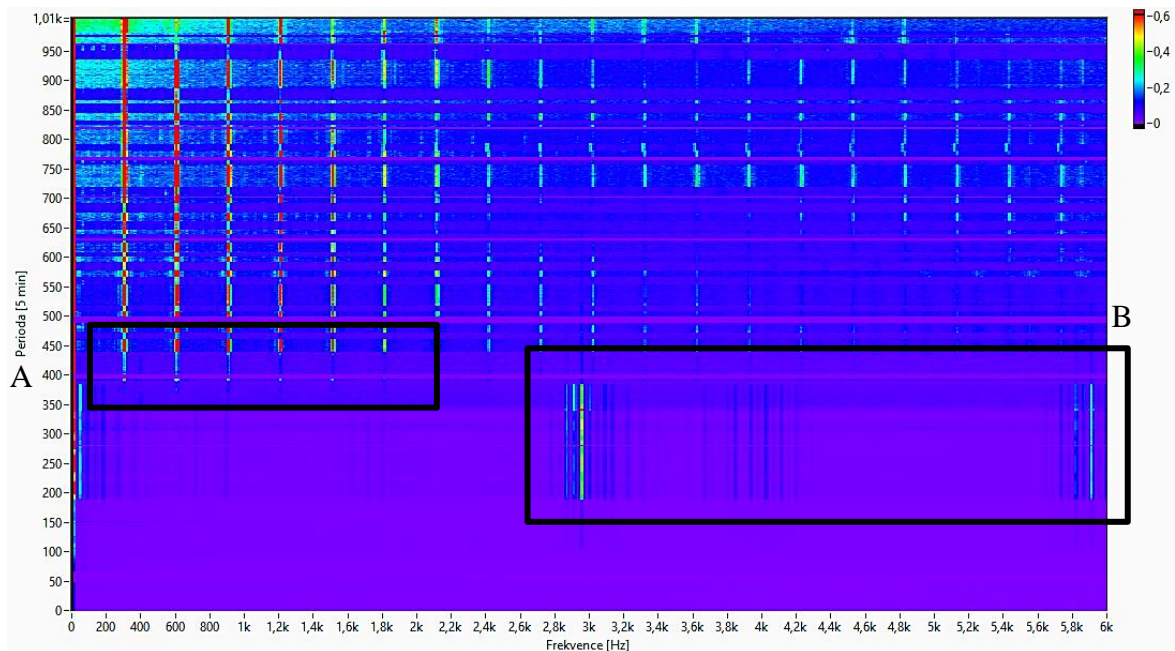
Obr. 8.2: Spektrální mapa pro snímač MMF-KS78 (5,5 - 10,5 kHz) v odlehčeném stavu



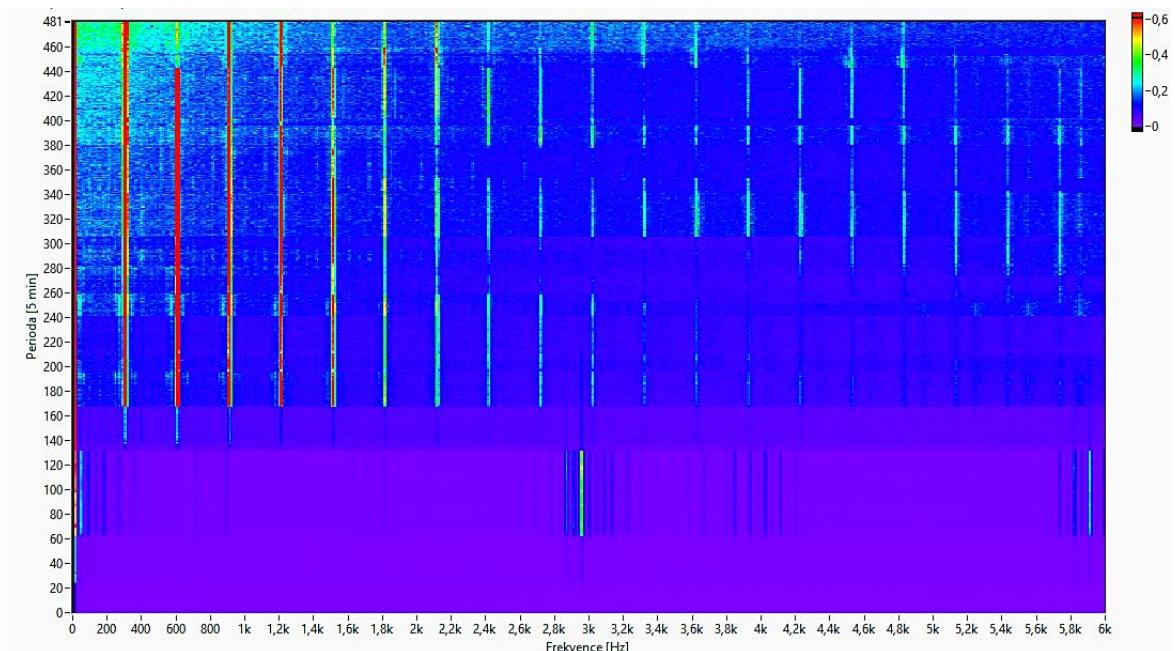
Obr. 8.3: Spektrální mapa pro snímač MMF-KS78 (5,5 - 10,5 kHz) v zatíženém stavu

Spektrální mapa signálu snímače IMI 622 se nejlépe zobrazila ve frekvenčním rozsahu 12 – 22 kHz (Obr. 8.4 – 8.6). Zde bylo rovněž detekováno výrazné poškození kolem 37. hodiny měření (440. odečet, oblast A), ovšem harmonické frekvence byly viditelné až do 19. řádu. Na rozdíl od předchozího snímače MMF-KS78 se ve spektrální mapě objevily navíc dvě oblasti s výraznými výchylkami v odečtech 195 – 395 a na hodnotách 3 a 6 kHz (oblast B). Výrazné rozdíly mezi zatíženým a odlehčeným

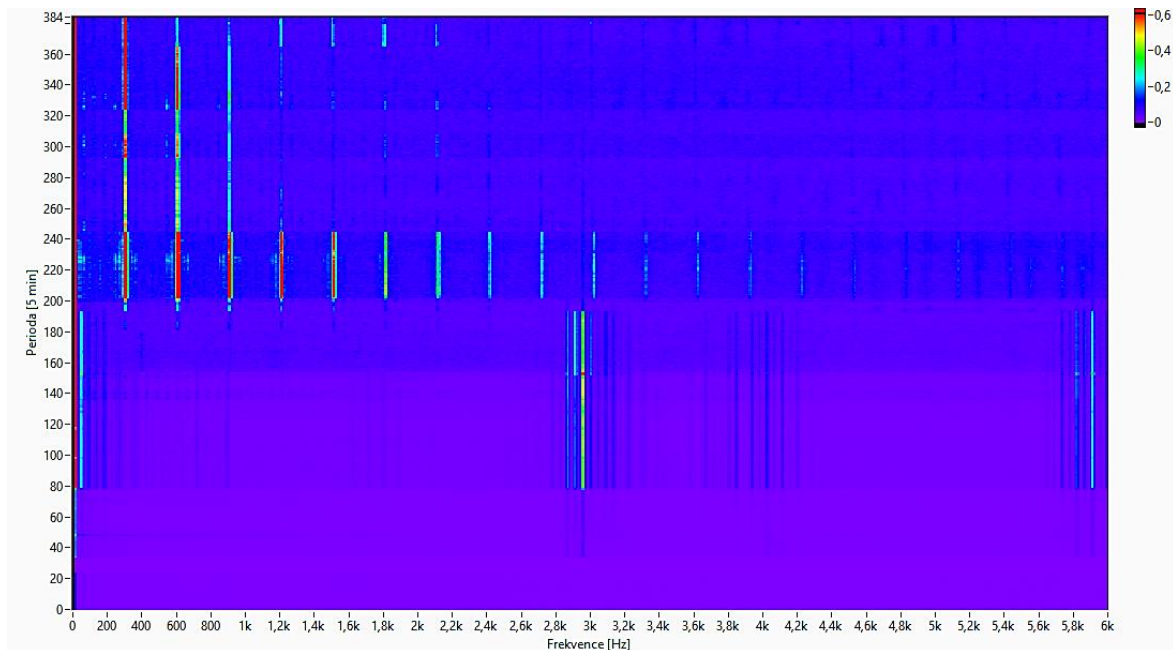
stavem jsou patrné v oblasti od 1,2 kHz, kde v zatížené části dochází k zaznamenání amplitud a po dvou hodinách měření k jejich potlačení. Oproti tomu v odlehčeném stavu jsou harmonické násobky čitelné od jejich prvních projevů po zbytek měření. Rovněž je v zatížené části výraznější kolísání amplitudy na hodnotách 300 a 600 Hz.



Obr. 8.4: Spektrální mapa pro snímač IMI 622 (12 - 22 kHz)



Obr. 8.5: Spektrální mapa pro snímač IMI 622 (12 - 22 kHz) v odlehčeném stavu

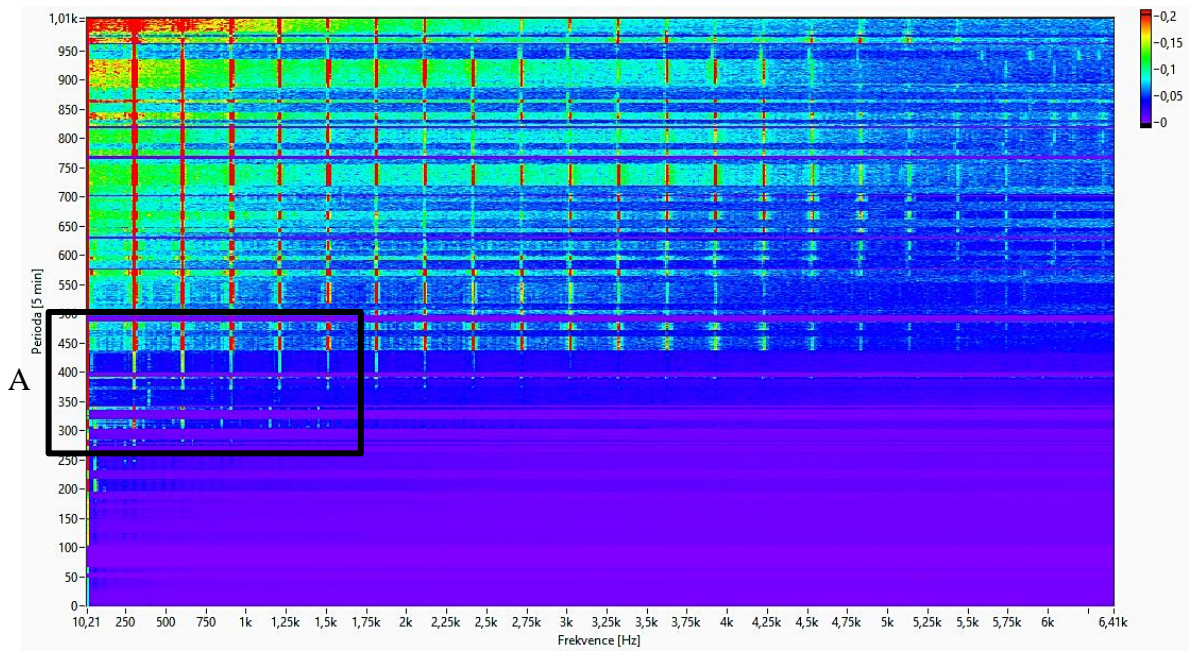


Obr. 8.6: Spektrální mapa pro snímač IMI 622 (12 - 22 kHz) v zatíženém stavu

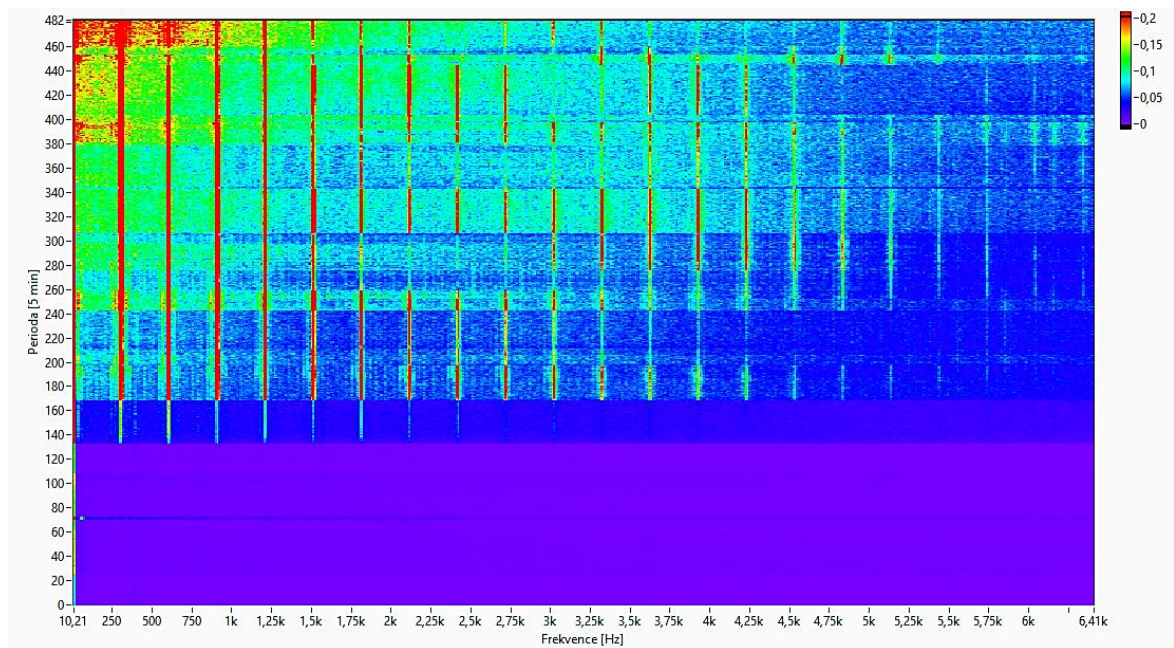
Zpracování signálů měřených pomocí akcelerometrů s vysokofrekvenčním měřícím rozsahem (vzorkovací frekvence 102,4 kHz)

Pro MMF-KS78 se jako nejvhodnější frekvenční rozsah obálky ukázal 12 – 22 kHz. Vzhledem k umístění snímače na pravou stranu ložiskového domku jsem předpokládal čitelnější zobrazení v odlehčené formě, kdy se ložisko nacházelo blíže snímači, a tedy byly lepší podmínky pro zaznamenávání dat. Tento předpoklad se potvrdil i na přiložených grafech (Obr. 8.7 – 8.9).

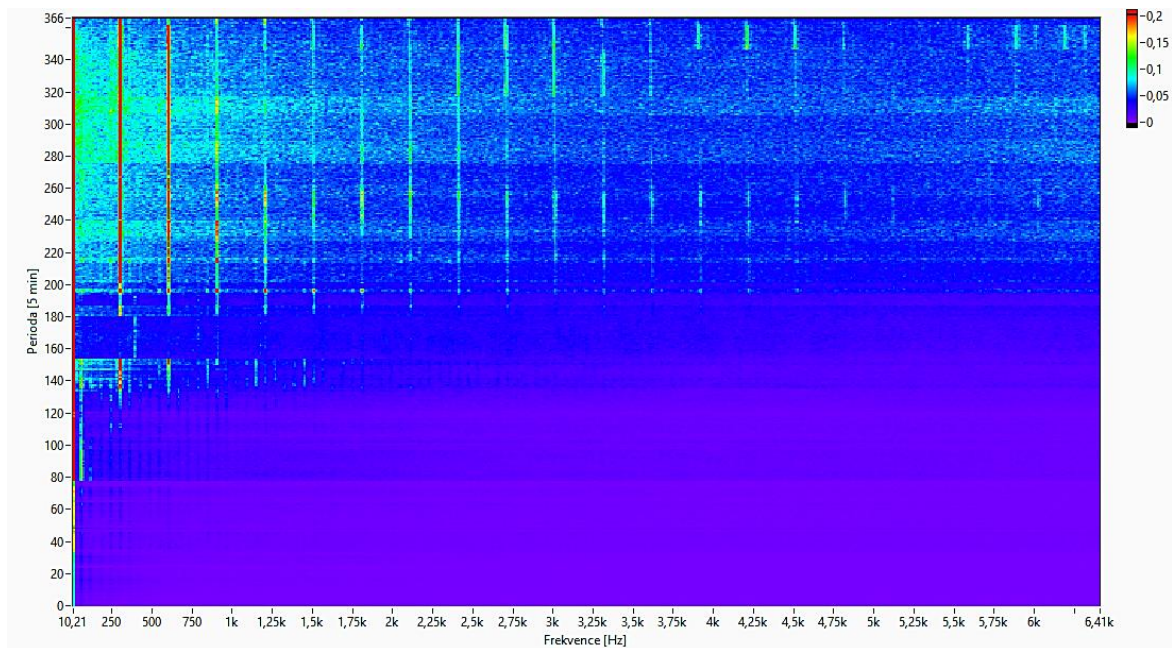
První rozvoj poruchy se objevuje již během 25. hodiny měření (300. odečet), tedy o téměř 12 hodin dříve oproti standardním akcelerometrům. Výrazný skok v amplitudách pak nastává okolo 37. hodiny měření (440. odečet, oblast A). Rozdíly mezi zatíženým a odlehčeným stavem se týkají především intenzity amplitud a množství vstupujícího šumu. V odlehčené části je vidět velmi mnoho harmonických násobků, kdy od pátého násobku dochází k výraznému kolísání hodnot. Šumy se zde zpočátku objevují pouze kolem násobků frekvence 300 Hz a poté se od 240. odečtu postupně rozšiřují, až zaplní téměř celé spektrum.



Obr. 8.7: Spektrální mapa pro snímač MMF-KS78 (12 - 22 kHz)

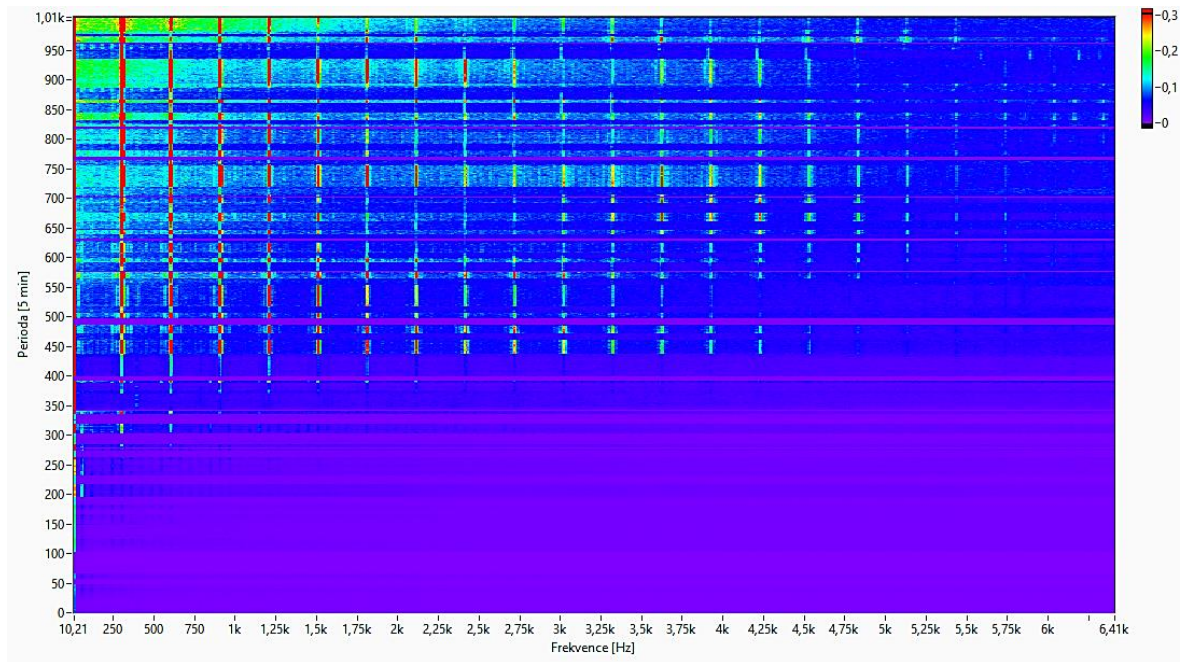


Obr. 8.8: Spektrální mapa pro snímač MMF-KS78 (12 - 22 kHz) v odlehčeném stavu

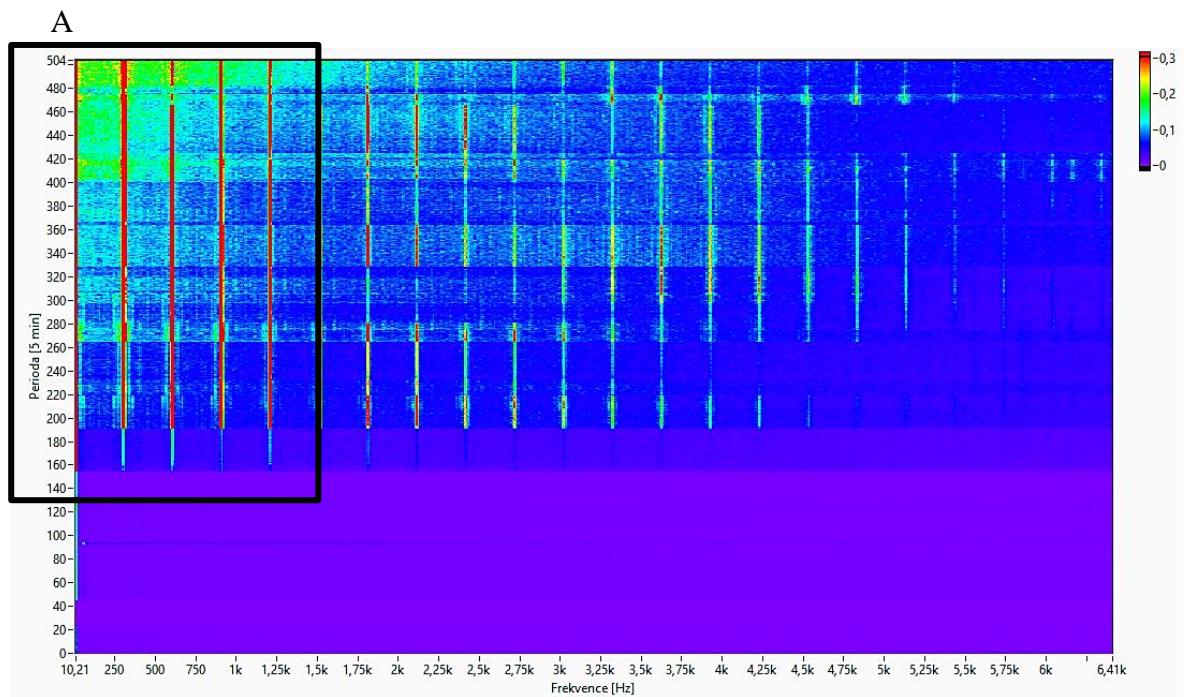


Obr. 8.9: Spektrální mapa pro snímač MMF KS-78 (12 - 22 kHz) v zatíženém stavu

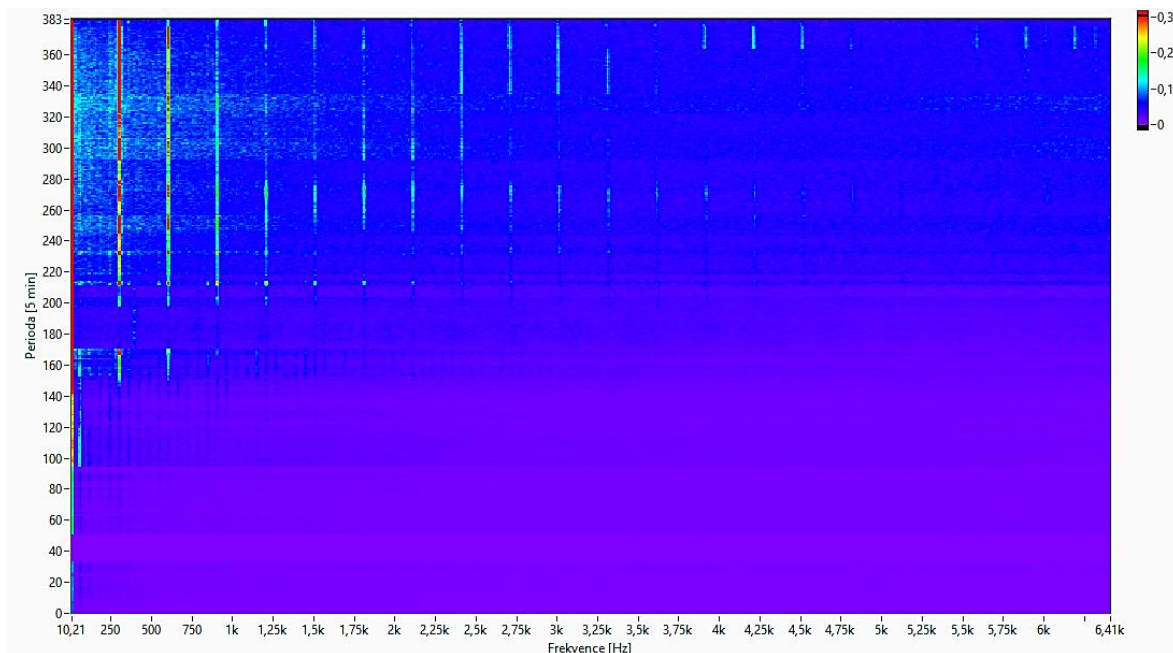
Signál ze snímače WR997 se nejlépe zobrazil ve spektrální mapě s obálkou o frekvenčním rozsahu 12 – 22 kHz (Obr. 8.10 – 8.12). Rozvíjející se poškození bylo patrné o 30 minut dříve než u snímače MMF-KS78. Umístění snímače (vpravo nahoře) se opět projevilo výraznějšími hodnotami v odlehčeném stavu (oblast A), ovšem vstupující šumy se koncentrovaly převážně kolem harmonických frekvencí a k jejich rozvoji došlo až v závěru měření. Ve spektrální mapě pro odlehčený stav jsou harmonické frekvence výrazné až do 4. řádu a dále se na dalších řádech objevilo kolísání hodnot. Oproti tomu při zatížení bylo zaznamenáno výrazně méně násobků a téměř se nevyskytovalo širokospektrální šumové pozadí.



Obr. 8.10: Spektrální mapa pro snímač WR997 (12 - 22 kHz)



Obr. 8.11: Spektrální mapa pro snímač WR997 (12 - 22 kHz) v odlehčeném stavu

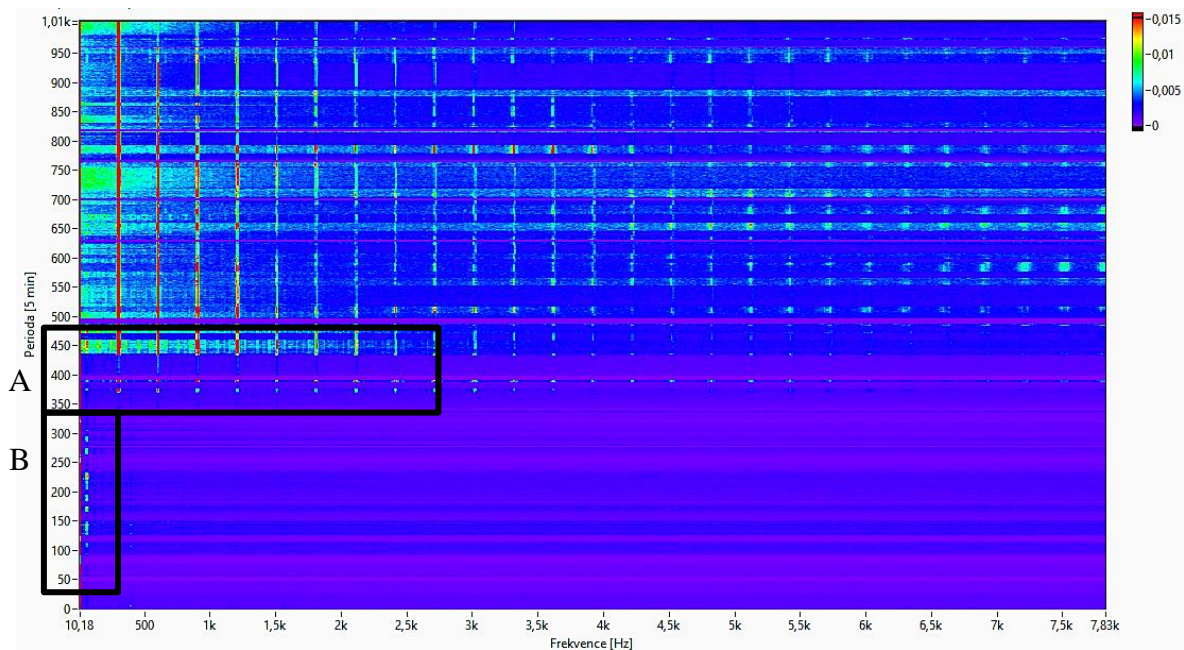


Obr. 8.12: Spektrální mapa pro snímač WR997 (12 - 22 kHz) v zatíženém stavu

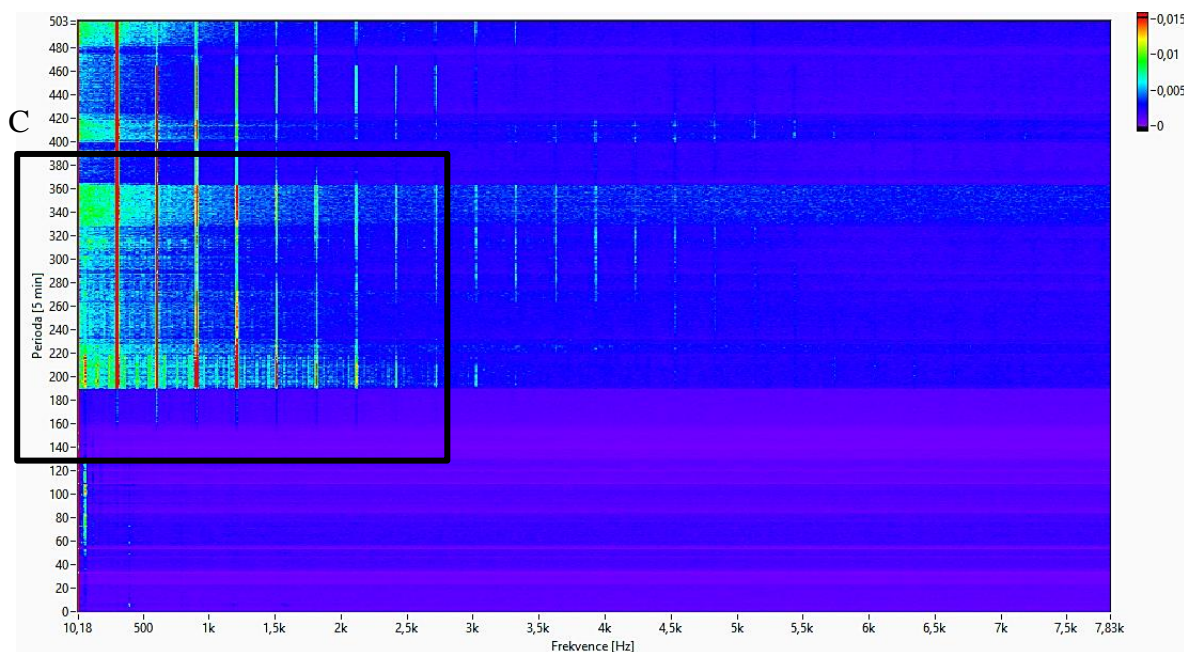
Vysokofrekvenční snímače zaznamenaly v porovnání se standardními akcelerometry větší množství harmonických frekvencí, objevilo se výraznější širokospektrální šumové pozadí a u většiny obálek došlo k útlumu druhé harmonické frekvence. Zaznamenání poruchy již nebylo skokové, ale postupné s včasější detekcí (o 11,7 hodiny dříve).

Zpracování signálů měřených pomocí snímačů akustické emise (vzorkovací frekvence 250 kHz)

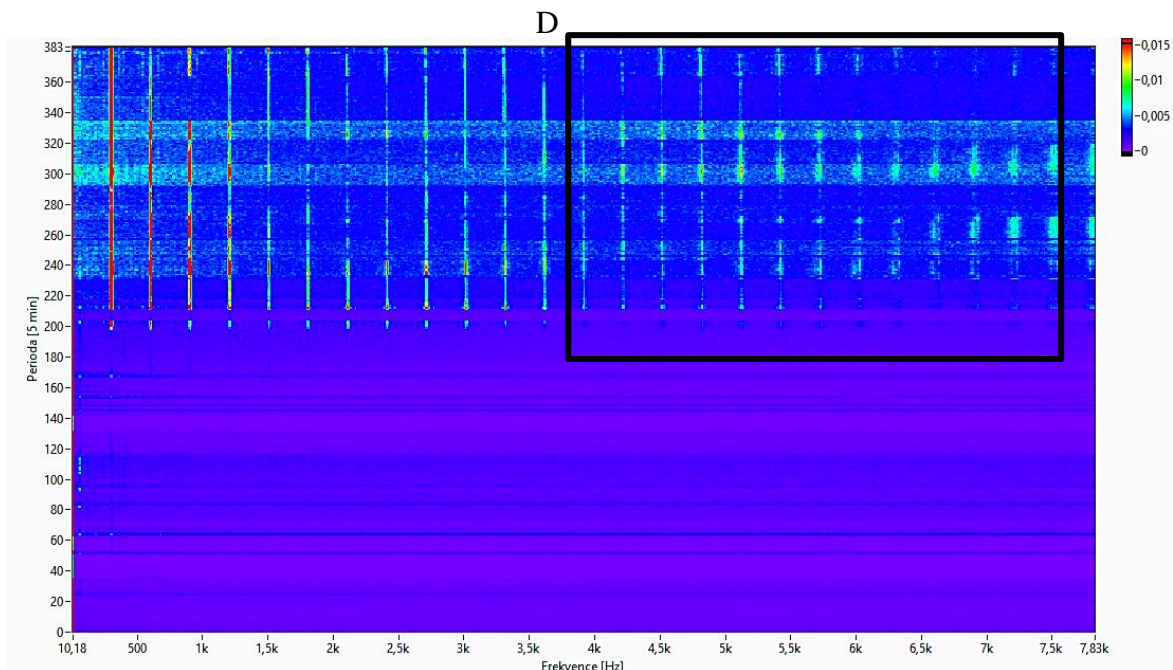
Ve spektrální mapě snímače Dakel MDK-13 s obálkou 53 – 68 kHz (Obr. 8.13) se objevilo zvýšení amplitud v nižších frekvencích (jednotky kHz) již kolem osmé hodiny (oblast B) a náznaky harmonických násobků se objevily kolem 27. hodiny měření (330. odečet, oblast A). V zatíženém stavu (Obr. 8.14) se vyskytly četnější a lépe čitelné harmonické frekvence, dále došlo k poklesu hodnot na druhé a třetí harmonické frekvenci a kolísání hodnot v rozmezí 4 – 7,8 kHz (oblast D). V odlehčeném stavu (Obr. 8.15) se ukázalo výraznější širokospektrální šumové pozadí, které se při zaznamenání poruchy projevilo až do frekvence 2,5 kHz (oblast C). Po několika hodinách bylo potlačeno a kolem 58 hodiny měření (700. odečet) se opět objevilo. Opět došlo ke kolísání amplitud (od 2 do 5 kHz) a ke konci měření k potlačení druhé harmonické frekvence.



Obr. 8.13: Spektrální mapa pro snímač Dakel MDK-13 (53 - 68 kHz)

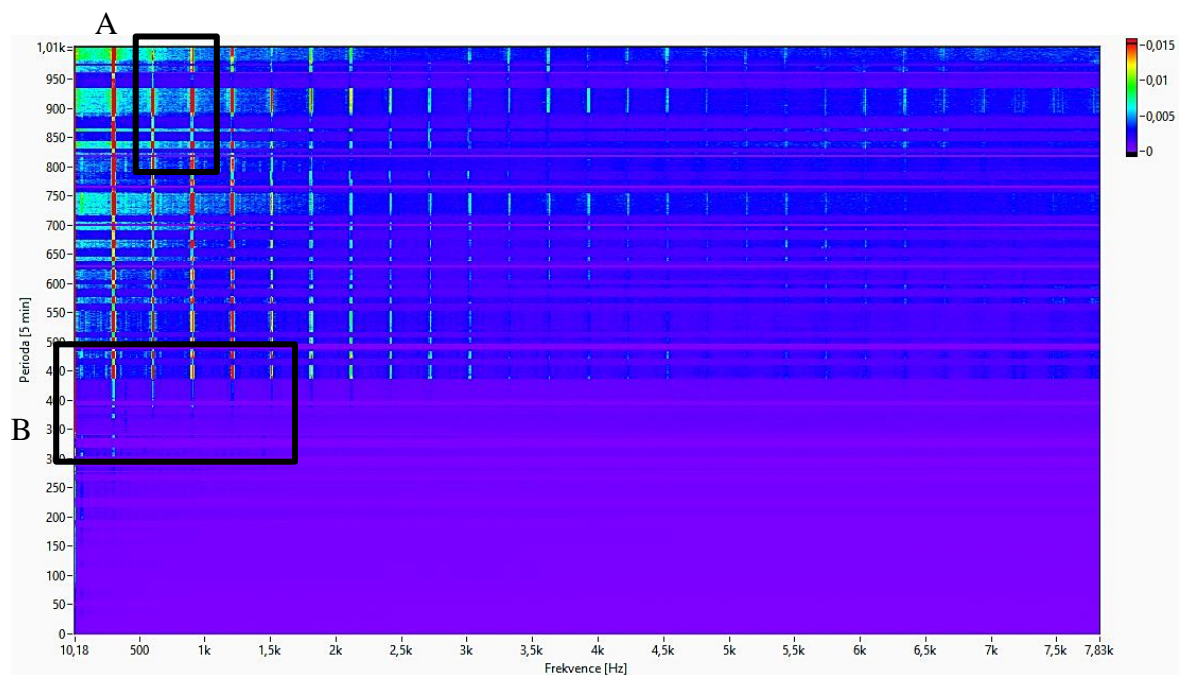


Obr. 8.14: Spektrální mapa pro snímač Dakel MDK-13 (53 - 68 kHz) v odlehčeném stavu

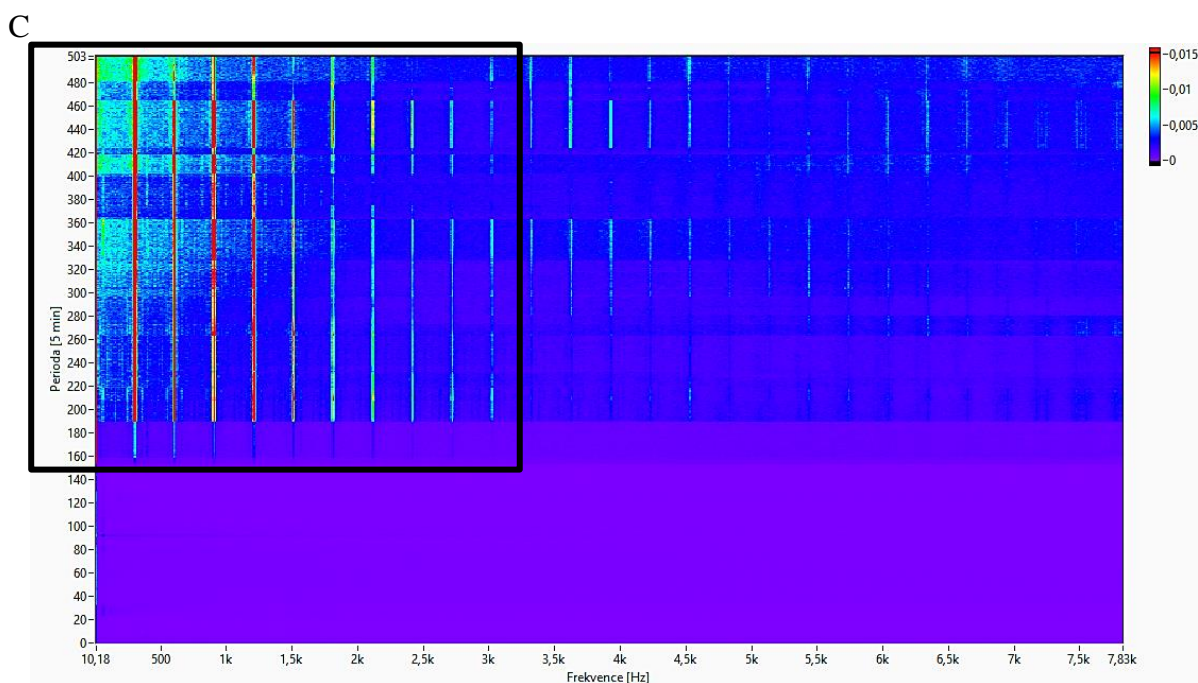


Obr. 8.15: Spektrální mapa pro snímač Dakel MDK-13 (53 - 68 kHz) v zatíženém stavu

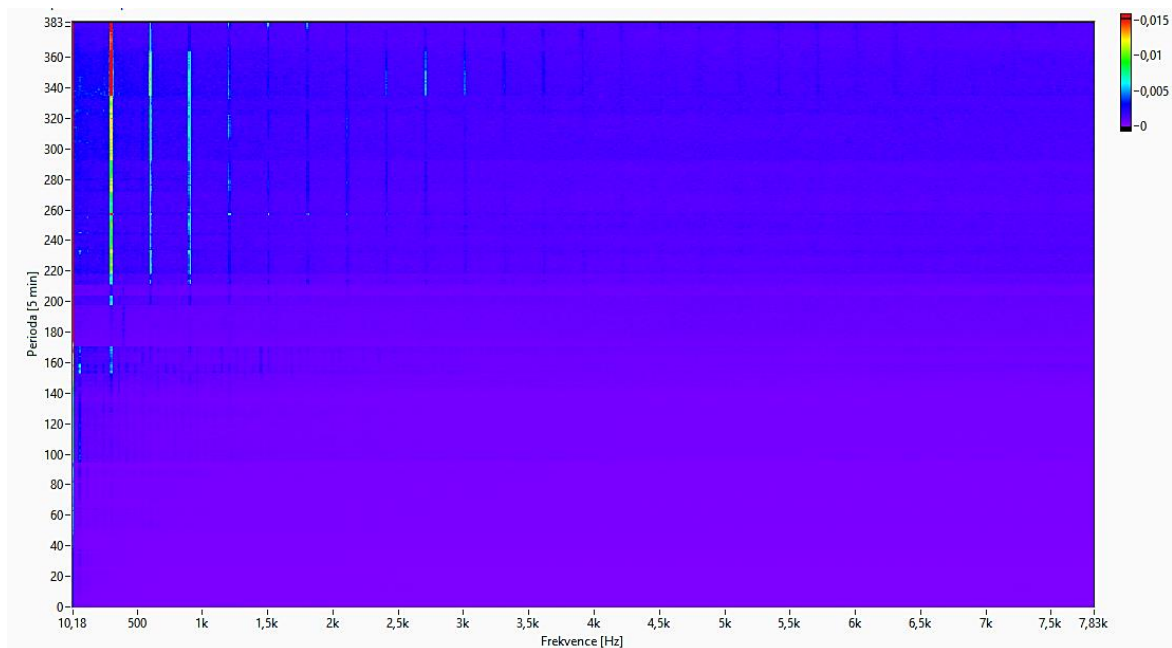
Spektrální mapa signálu snímače Boteg UST400BNC se nejlépe zobrazila ve frekvenčním rozsahu 15 – 30 kHz (Obr. 8.16 – 8.18). Indikace poškození se objevila kolem 25. hodiny (300. odečet) a výrazná porucha kolem 37. hodiny měření (440. odečet, oblast B). Rozdíly mezi odlehčeným a zatíženým stavem byly převážně v intenzitě zaznamenaných vibrací, kdy v zatíženém stavu byly patrné pouze tři harmonické násobky, ovšem u odlehčeného stavu byly patrné až do 3 kHz (oblast C). Opět došlo k potlačení 2. a 3. harmonické frekvence (oblast A). V odlehčeném stavu bylo navíc patrné širokospektrální šumové pozadí až do 1,5 kHz a výrazný pokles amplitud při 370. odečtu.



Obr. 8.16: Spektrální mapa pro snímač Boteg UTS400BNC (15 - 30 kHz) v zatíženém stavu

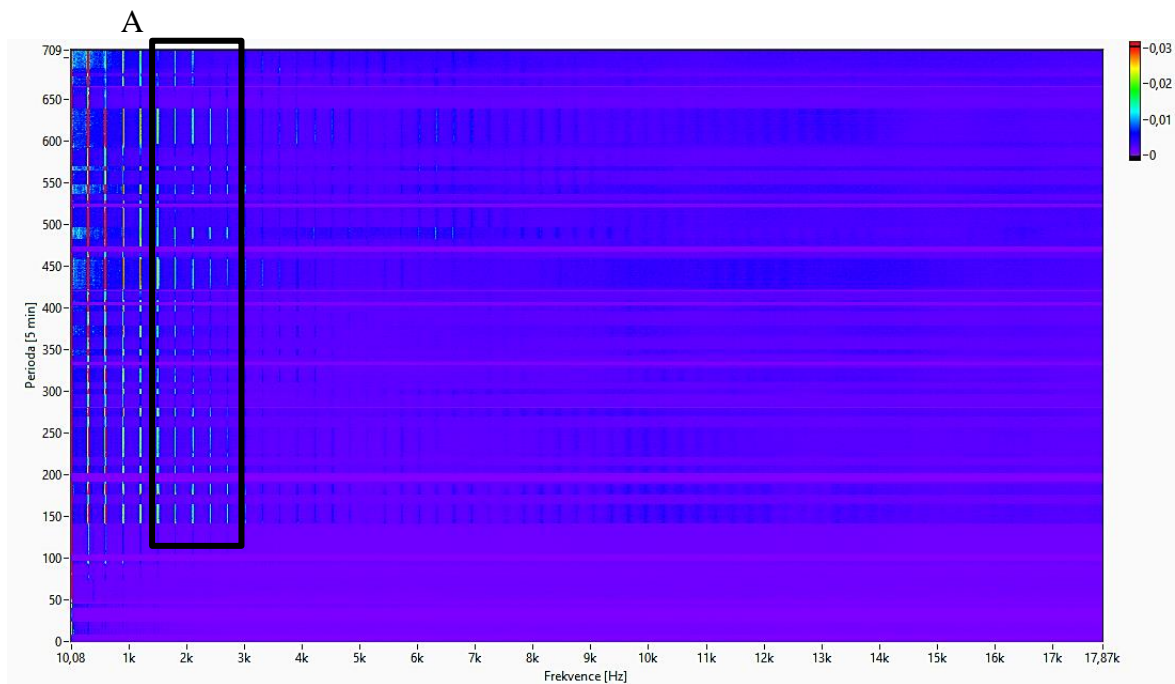


Obr. 8.17: Spektrální mapa pro snímač Boteg UTS400BNC (15 - 30 kHz) v odlehčeném stavu

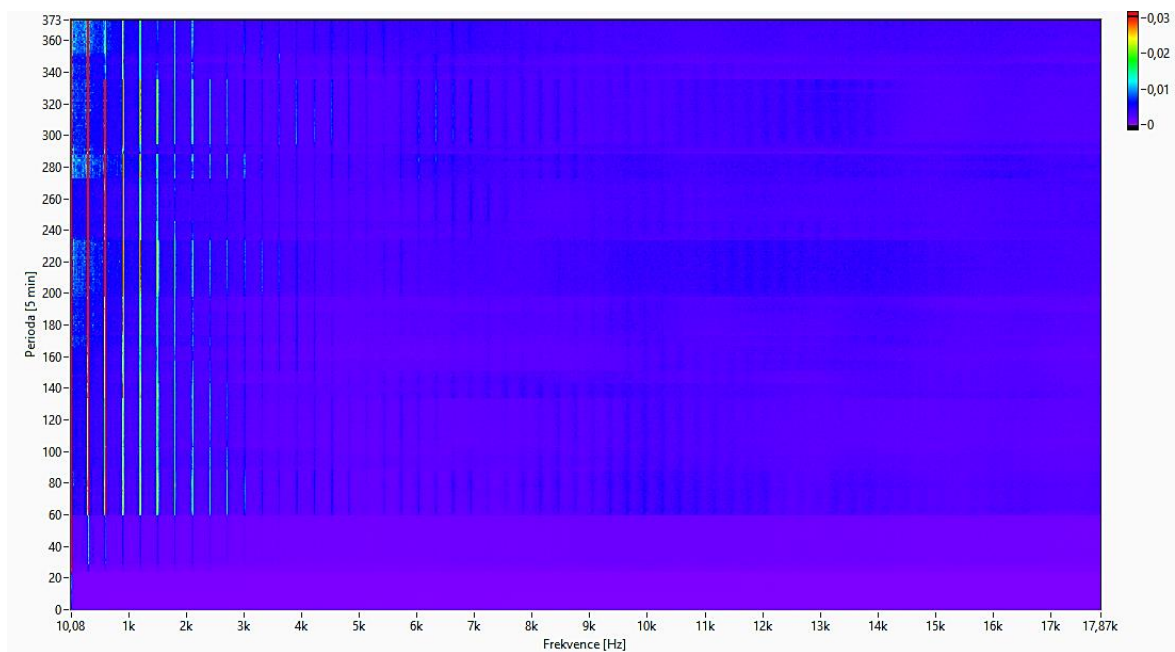


Obr. 8.18: Spektrální mapa pro snímač Boteg UTS400BNC (15 - 30 kHz) v zatíženém stavu

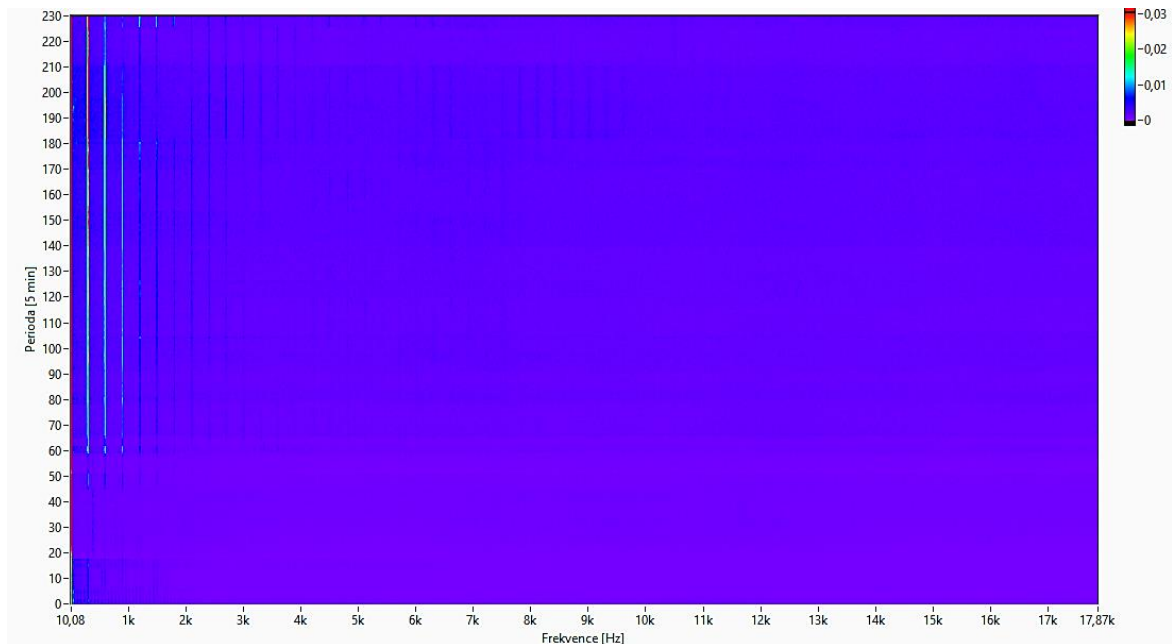
Pro signál snímače Artis Marpos AE-C, umístěný při šestém měření (25. hodina měření, 296. odečet) na spodní levou část ložiskového domku, se jako nejvhodnější ukázala obálka s frekvenčním rozsahem 11 – 45 kHz. Umístění snímače se projevilo intenzivnějšími hodnotami při odlehčení. V tomto stavu byly patrné harmonické násobky až do sedmého řádu, přičemž od druhého násobku se objevily poklesy amplitud v závěru měření. Rozvoj poškození byl zaznamenán kolem 20. odečtu, což vzhledem k pozdějšímu zapojení snímače odpovídalo 25. hodině měření. Výrazná porucha se pak v spektrální mapě projevila opět kolem 35. hodiny (140. odečet). Oproti ostatním snímačům nebylo v průběhu měření patrné širokospektrální šumové pozadí, ovšem od frekvence 2 kHz se objevilo výrazné kolísání hodnot na harmonických násobcích (Oblast A). Přehled spektrálních map viz Obr. 8.19 – 8.21.



Obr. 8.19: Spektrální mapa pro snímač Artis Marpos AE-C (BmLt, 11 - 45 kHz)

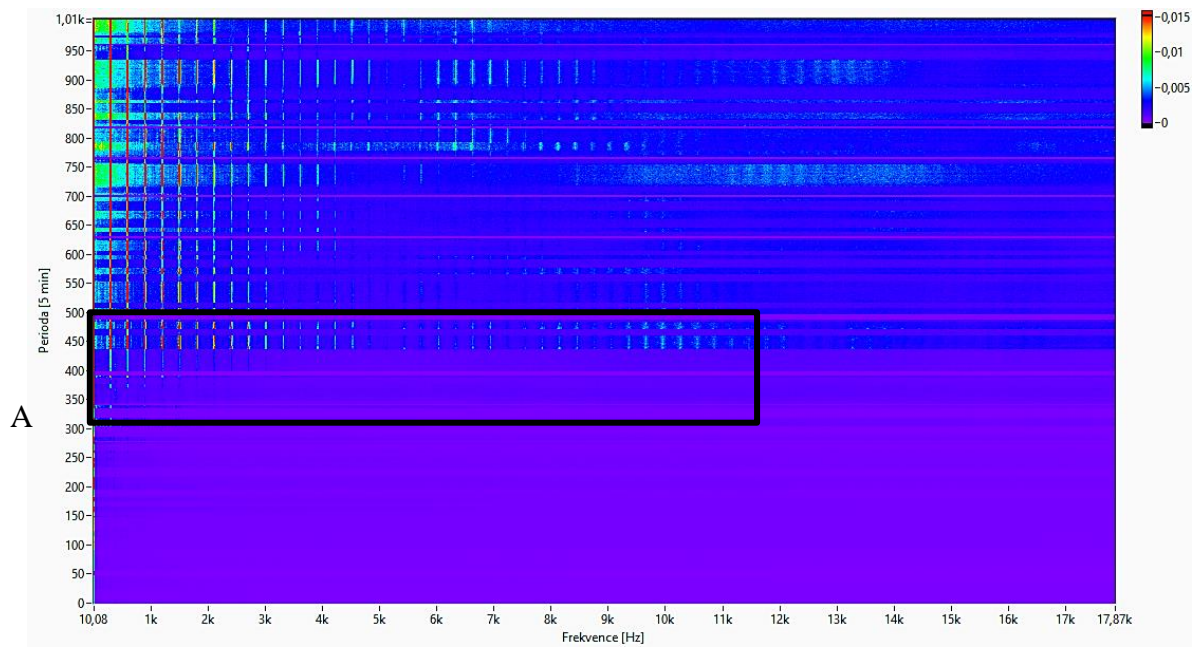


Obr. 8.20: Spektrální mapa pro snímač Artis Marpos AE-C (BmLt, 11 - 45 kHz) v odlehčeném stavu

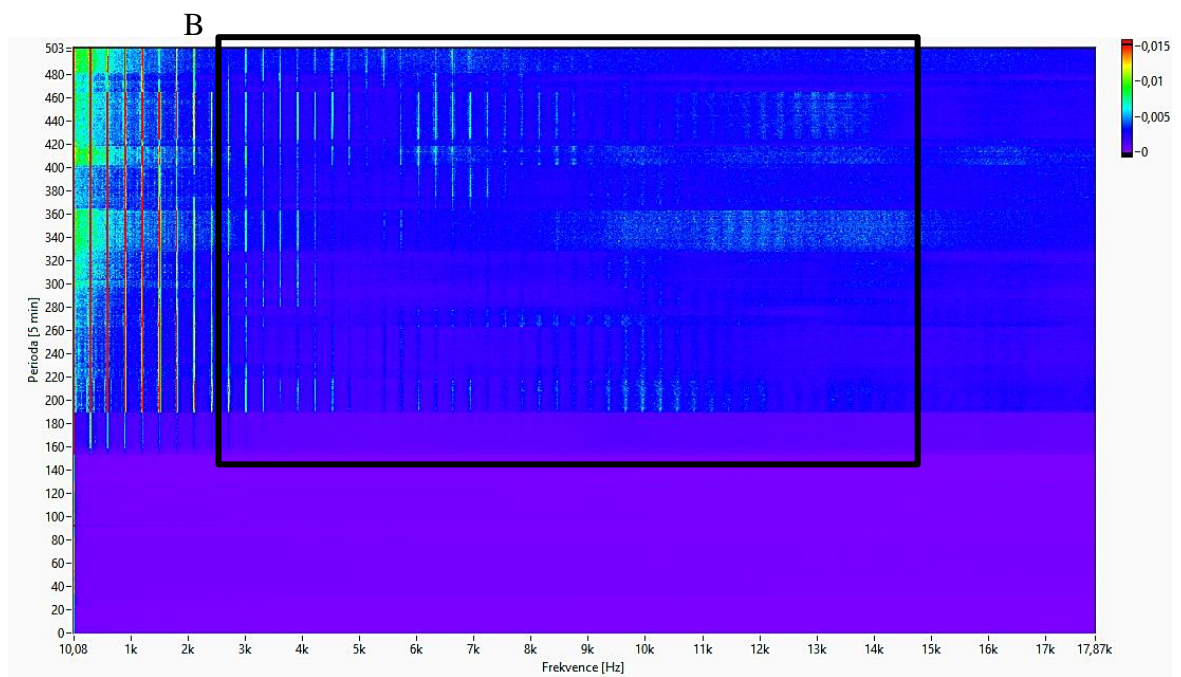


Obr. 8.21: Spektrální mapa pro snímač Artis Marpos AE-C (BmLt, 11 - 45 kHz) v zatíženém stavu

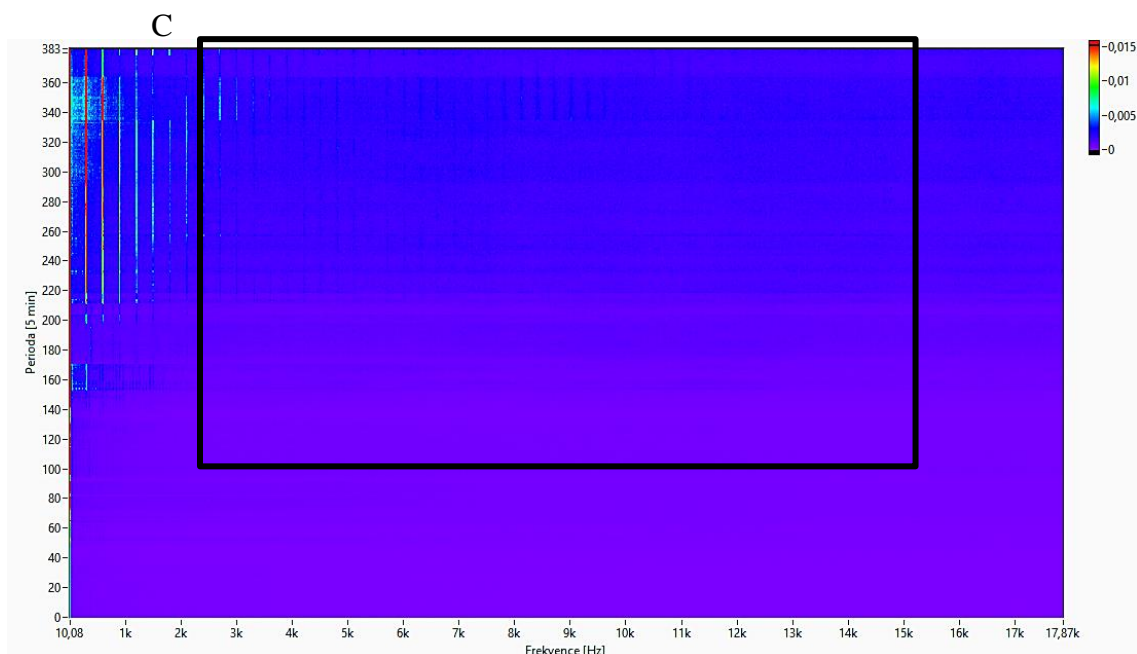
Pro signál snímače Artis Marpos AE-C, umístěný na pravé straně ložiskového domku, se jako nejvhodnější ukázala obálka s frekvenčním rozsahem 11 – 45 kHz (Obr. 8.22 – 8.24). Umístění snímače se ve spektrálních mapách projevilo výraznějšími hodnotami při odlehčení. Vyskytlo se více násobků harmonické frekvence a širokospektrální šumové pozadí do hodnoty 3 kHz (porovnání oblastí B a C). Rozvíjející poškození bylo detekováno po 25 hodinách (300. odečet, oblast A) a výrazné poškození opět po 35 hodinách měření (420. odečet). Viditelný byl také útlum druhé harmonické frekvence v závěru měření. V odlehčeném stavu byly patrné výrazné amplitudy v celém frekvenčním rozsahu, oproti tomu při zatížení bylo spektrum od 3,5 kHz čisté.



Obr. 8.22: Spektrální mapa pro snímač Artis Marpos AE-C (Rt, 11 - 45 kHz)



Obr. 8.23: Spektrální mapa pro snímač Artis Marpos AE-C (Rt, 11 - 45 kHz) v odlehčeném stavu



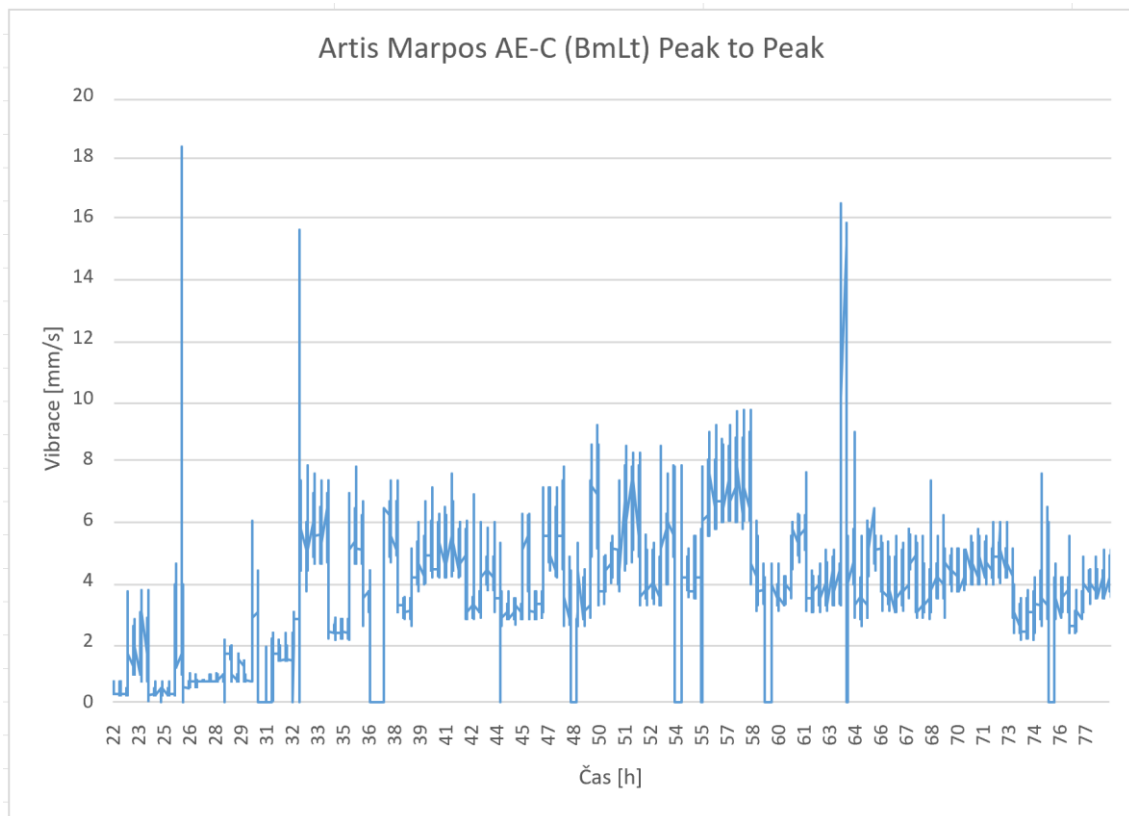
Obr. 8.24: Spektrální mapa pro snímač Artis Marpos AE-C (Rt, 11 - 45 kHz) v zatíženém stavu

Spektrální mapy signálů z vysokofrekvenčních akcelerometrů a snímačů akustických emisi se na první pohled příliš nelišily. Při bližším pohledu a zaměření se na podobné frekvenční rozsahy obálek bylo však patrné, že snímače AE zaznamenaly počátek poškození o několik hodin dříve. Při porovnání MDK-13 (13 – 28 kHz) a MMF-KS78 (12 – 22 kHz) se konkrétně jednalo o 5,8 hodiny. Dále se u snímačů AE objevilo více postranních pásem a harmonické frekvence byly čitelnější a výraznější do vyšších řádů. Přehled stručných výsledků z jednotlivých obálek viz *Tab. 8.1*.

Tab. 8.1: Přehled analýz pro jednotlivé obálky

snímač	obálka (kHz)	indikace poruchy (h)	projev poruchy	citlivost zatíženého / odlehčeného stavu
MMMF 78	0,5-2,5	31	skokový nárůst amplitudových špiček	zatížený stav vyšší hodnoty amplitud, vývoj šumu
	5,5-10,5	29	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	zatížený stav větší projevy šumu
IMI 622	0,5-2,5	31	postupný nárůst amplitudových špiček	zatížený stav vyšší hodnoty amplitud, vývoj šumu
	4-8	31	postupný nárůst amplitudových špiček	zatížený stav více harm. násobků
	12-22	31	postupný nárůst amplitudových špiček, v závěru šum do 1,4 kHz	odlehčený stav více harm. násobků (útlum 2.)
	22-25,6	37	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	odlehčený stav více har. násobků, vývoj šumu
WR 997	0,5-2,5	25	postupný nárůst amplitudových špiček	zatížený stav výraznější hodnoty amplitud
	4-12	26	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	zatížený stav více har. násobků, vývoj šumu
	12-22	24	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	odlehčený stav více har. násobků, vývoj šumu
	22-23	25	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	odlehčený stav více har. násobků, vývoj šumu
	0,5-32	29	postupný nárůst amplitudových špiček	zatížený stav lépe čitelné harm. frekvence
	0,5-2,5	23	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	zatížený stav vyšší hodnoty amplitud, vývoj šumu
MMMF 78	4-12	25	postupný nárůst amplitudových špiček, konstatntí šum	zatížený stav více harm. násobků
	12-22	21	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	odlehčený stav vyšší hodnoty amplitud, vývoj šumu
	22-44	25	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	podobná citlivost, útlum 2. harm. frekvence
	0,5-44	26	postupný nárůst amplitudových špiček	zatížený stav lépe čitelné harm. násobky
Dakel MDK-13	13-28	20	postupný nárůst amplitudových špiček, konstatntí šum	odlehčený stav více harm. násobků, více šumu
	28-53	25	postupný nárůst amplitudových špiček	odlehčený stav více harm. násobků (útlum 2.)
	53-68	27	postupný nárůst amplitudových špiček	zatížený stav více harm. násobků
	77-92	30	postupný nárůst amplitudových špiček, konstatntí šum	odlehčený stav více harm. násobků (útlum 2.)
	12-103	22	postupný nárůst amplitudových špiček, konstatntí šum	odlehčený stav vyšší hodnoty amplitud
	0,01-15	22	postupný nárůst amplitudových špiček, konstatntí šum	zatížený stav více harm. násobků, více šumu
Boteg UTS400BNC	15-30	21	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	odlehčený stav více harm. násobků
	30-60	25	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	podobná citlivost, útlum 2. harm. frekvence
	0,01-60	23	postupný nárůst amplitudových špiček, konstatntí šum	podobná citlivost
	0,01-11	25	postupný nárůst amplitudových špiček, konstatntí šum	zatížený stav více harm. násobků, více šumu
Artis Marpos AE-C (Rt)	11-45	30	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	odlehčený stav více harm. násobků
	45-85	30	šum se postupně vyvíjí společně se špičkami	podobná citlivost
	0,01-100	25	postupný nárůst amplitudových špiček	zatížený stav více harm. násobků
Artis Marpos AE-C (BmLt)	0,01-11	23	postupný nárůst amplitudových špiček	zatížený stav více harm. násobků
	11-45	25	postupný nárůst amplitudových špiček	odlehčený stav. Více harm. násobků
	45-85	28	postupný nárůst amplitudových špiček	zatížený stav více harm. násobků
	0,01-100	25	postupný nárůst amplitudových špiček, konstatntí šum	zatížený stav více harm. násobků

Dále byly zpracovávány výsledky měření z STT souborů (viz kapitola 5.1, str. 38), a to konkrétně efektivní hodnoty (RMS) a špičkové hodnoty (Peak to Peak), které nesly informace o změně vibrací pro každý kanál (snímač vibrací). Jako příklad uvádím snímač AE Artis Marpos AE-C (Rt) (Obr. 8.25).



Obr. 8.25: Graf závislosti vibrací na čase pro snímač Artis Marpos AE-C (BmLt) při analýze P-P

Graf znázorňuje vývoj vibrací od 22. hodiny, kdy se začaly zaznamenávat hodnoty Peak to Peak, až do konce měření. Střídavé utahování a povolování šroubu se projevilo skokovými změnami amplitud. Patrné jsou také poklesy na nulové hodnoty při odstavení standu, které zapříčinilo překročení některé z bezpečnostních mezí. Intenzivnější projevy poškození se projevily kolem 26. hodiny, kdy došlo k postupnému nárůstu hodnot a po dalších šesti hodinách k výraznému skoku na hodnotu 6 mm/s. Při sledování AE (spektrální mapy) se tato indikace projevila o více než hodinu dříve.

V následující tabulce jsou znázorněny indikace poruchy při sledování efektivních (RMS) a špičkových (Peak to Peak) hodnot u jednotlivých snímačů (Tab. 8.2).

Tab. 8.2: Přehled analýzy pro soubory STT

snímač	analýza	indikace poruchy (h)
Boteg UTS400BNC (250 kHz)	RMS	25,8
	P-P	25,6
Artis Marpos AE-C (BmLt) (250 kHz)	RMS	25,8
	P-P	26,1
Artis Marpos AE-C (Rt) (250 kHz)	RMS	26,5
	P-P	26,4
MMF-KS78 (102,4 kHz)	RMS	26,5
	P-P	26,3
Dakel MDK-13 (250 kHz)	RMS	27,7
	P-P	26,7
WR997 (102,4 kHz)	RMS	29,1
	P-P	27,5
IMI622 (51,2 kHz)	RMS	31,1
	P-P	31,4
MMF-KS78 (51,2 kHz)	RMS	32,8
	P-P	31,1

Z výsledků je patrný vliv umístění snímače a kvalita přenosové cesty mezi sledovanou strojní součástí a senzorem na přesnost měření. U snímače Artis Marpos umístěného ve spodní levé části ložiskového domku byly projevy poruchy patrné o 40 minut dříve než u stejného snímače umístěného v pravé části (v případně sledování hodnot RMS).

Nejrychleji detekoval poruchu ultrazvukový senzor Boteg UTS400BNC, a to při sledování hodnot špičkových hodnot Peak to Peak.

9 Závěr

V rešeršní části této práce byly popsány metody vibrodiagnostiky, podrobněji pak vysokofrekvenční metody. Vzhledem k získaným informacím z literatury byla pro experiment vybrána metoda sledování akustických emisí, jelikož se jedná o jednu z nejpřesnějších vysokofrekvenčních metod, která dokáže odhalit poškození již v počátečním stádiu a lze díky ní určit i místo poškození.

Při měření byly využity tři typy snímačů vibrací: akcelerometry se standardním a vysokofrekvenčním měřicím rozsahem a snímače akustických emisí. Pro analýzu signálu vibrací byly sledovány hodnoty RMS a Peak to Peak v závislosti na čase. Zpracování dat proběhlo v softwarové aplikaci LabView. Vytvořeny byly dva programy, jeden pro obalkování signálu (s nastavitelnou pásmovou propustí) a metodu FFT a druhý pro vizualizaci zpracovaných dat prostřednictvím kaskádních grafů, spektrálních map a frekvenčních spekter.

Celkem proběhlo 15 měření, která v součtu čítala 84 hodin čistého času a 152 GB dat. První známky poškození se objevily během 20. hodiny měření. Při průběžném sledování a porovnávání hodnot se během experimentu vyskytlo několik komplikací, které byly operativně vyřešeny. Došlo například k překročení teploty stanovené výrobcem u některých snímačů. Náprava byla zajištěna přidáním dalšího a výkonnějšího ventilátoru.

S narůstajícím časem měření se ve spektrálních mapách projevilo rozvíjející se poškození, které se u různých typů snímačů projevilo odlišně. Na základě signálů z akcelerometrů se standardním frekvenčním rozsahem došlo k detekci skokových nárůstů amplitudových špiček. U akcelerometrů s vysokofrekvenčním měřicím rozsahem se porucha projevila vyššími násobky harmonické frekvence a jejich postupným vyvíjením společně se širokospektrálním šumovým pozadím. U signálů ze snímačů AE často v závěru měření docházelo k útlumu druhého harmonického násobku a k výskytu konstantního šumu při detekci výrazného defektu. Obecně na první harmonické frekvenci narůstala hodnota amplitud téměř lineárně. Oproti tomu v závěru měření docházelo u většiny snímačů AE k potlačení amplitudy druhého harmonického násobku. U vyšších harmonických násobků se ve spektrálních mapách objevily nárůsty a poklesy amplitud.

Vzhledem k intenzivnímu zatěžování za pomoci radiálně umístěného šroubu, který tímto způsobem vyvíjel vyšší tlak na vnější kroužek, byla předpokládána porucha této komponenty ložiska. Pro utvrzení bylo potřeba porovnat vypočtené poruchové frekvence ložiska FK 6008-2RS se zpracovanými daty. Při analýze spektrálních map se u všech snímačů objevily výrazné harmonické násobky frekvence 300 Hz. V porovnání s vypočtenými kinematickými frekvencemi se tato hodnota nejvíce podobala frekvenci BPFO (poruchová frekvence vnějšího kroužku ložiska), která vyšla 299,1 Hz. Tyto frekvence byly nalezeny v demodulovaném spektru obálky akustické emise. Potvrdil se tedy předpoklad, že obálkovou analýzu lze na tyto signály (AE) využít. Tím lze získat jednak rychlejší identifikaci poruchy, ale zároveň možnost identifikovat její zdroj (vnější kroužek).

Analýza dat z obdržených STT souborů skalárních veličin při porovnávání efektivních RMS a špičkových hodnot Peak to Peak poukázala na vliv umístění snímače. Trend skalárních hodnot snímače Artis Marpos, umístěného na ložiskovém domku ve spodní levé části, pomohl detekovat iniciaci poškození o 30 minut dříve než u totožného snímače umístěného v pravé části. Na základě analýzy signálů ze snímačů AE bylo odhaleno poškození dříve než při použití ostatních akcelerometrů.

Analýza dat ve frekvenční oblasti ukázala, že nejrychleji byla porucha odhalena při sledování akustických emisí, u kterých lze ve spektrálních mapách pozorovat rozvíjející se poškození přibližně o pět hodin dříve než u akcelerometrů s vysokofrekvenčním měřicím rozsahem a téměř o sedmáct hodin dříve než u akcelerometrů se standardním frekvenčním rozsahem. Ve spektrálních mapách vytvořených ze signálů snímačů AE bylo detekováno velké množství čitelných harmonických násobků, a to i ve vysokých frekvencích. První známky poruchy byly viditelné ve spektrální mapě snímače AE od společnosti Dakel (MDK-13) s frekvenčním rozsahem 13 – 103 kHz přibližně po 13 hodinách měření.

Témata, která by byla zajímavá pro další zpracování, týkající se návaznosti na tuto práci, by se mohla týkat provedení měření a porovnání mezi různými typy vysokofrekvenčních metod, například mezi AE, SPM a SEE, aplikaci jedné z rozebraných metod při sledování strojní součásti odlišné od valivého ložiska, případně využití AE při sledování dalších jevů.

Seznamy

Seznam zdrojů a použité literatury

[1] Diagnostika valivých ložisek [online]. 2009 [cit. 2020-10-31]. Čeština. Dostupné z: www.adash.cz

[2] KREIDL M., ŠMÍD R.: Technická diagnostika, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6

[3] BILOŠ, Jan; BILOŠOVÁ, Alena. Vibrační diagnostika. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1

[4] JANOUŠEK, Ivo, KOZÁK, Josef, TARABA, Oldřich. Technická diagnostika. Praha: SNTL, 1988

[5] ČSN ISO 10816-1. *Vibrace-Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

[6] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. Technická diagnostika a spolehlivost. II., Vibrodiagnostika. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.

[7] SKF Group [online]. 2019 [cit. 2020-10-27]. Rolling bearings. Dostupné z: www.skf.com.

[8] *High Frequency Vibration Analysis* [online]. Emerson, 2017, 16 [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-high-frequency-vibration-analysis-ams-en-39104.pdf>.

[9] Condition Monitoring Techniques: What is Shock Pulse Monitoring (SPM)? *Marine insight* [online]. 9. října 2019 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.marineinsight.com/guidelines/condition-monitoring-techniques-what-is-shock-pulse-monitoring-spm/>

[10] *Nedestruktivní metody testování: Akustické emise* [online]. AF MENDEL [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6390&typ=html

[11] What Does Spike Energy in Vibration Analysis Mean? *Machinery Lubrication* [online]. , 1 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29779/vibration-oil-analysis>.

[12] PŘIBÁN, M. Metoda akustické emise I: Obecná část – základní principy. Česká společnost pro NDT, Brno 2012

[13] SPM Instruent [online]. [cit. 2021-1-26]. Dostupné z: <https://www.spminstrument.com/products-and-services/portable-instruments/bearingchecker/>

[14] Rolling element gearing. Faluts handbook [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://sielearning.tafensw.edu.au/toolboxes/TurningForce/tools/fman/manuals/faults/page16.htm>

[15] SKF Group: Vibration Diagnostic Guide [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <http://edge.rit.edu/edge/P14453/public/Research/SKF%20VibrationGuide.pdf>

Seznam tabulek, rovnic a obrázků

TAB. 2.1: PŘEPOČET VELIČIN CHARAKTERIZUJÍCÍ VIBRACE [2]	11
TAB. 5.1: PŘEHLED MĚŘENÍ A VYTVOŘENÝCH STT SOUBORŮ	39
TAB. 6.1: PŘEHLED OBÁLEK PRO JEDNOTLIVÉ SNÍMAČE	47
TAB. 8.1: PŘEHLED ANAÝZ PRO JEDNOTLIVÉ OBÁLKY	66
TAB. 8.2: PŘEHLED ANAÝZ PRO SOUBORY STT	68
ROVNICE 2.1: VÝCHYLKA KMITÁNÍ.....	11
ROVNICE 2.2: RYCHLOST KMITÁNÍ.....	11
ROVNICE 2.3: ZRYCHLENÍ KMITÁNÍ.....	11
ROVNICE 2.4: VÝPOČET EFEKTIVNÍ HODNOTY.....	12
ROVNICE 2.5: VÝPOČET STŘEDNÍ HODNOTY.....	12
ROVNICE 2.6: ZÁPIS KONEČNÉ FOURIEROVI ŘADY PRO DISKRETIZOVANOU FUNKCI	15
ROVNICE 3.1: ROVNICE KINEMATICKÉ FREKVENCE VNĚJŠÍHO KROUŽKU LOŽISKA	20
ROVNICE 3.2: ROVNICE KINEMATICKÉ FREKVENCE VNITŘNÍHO KROUŽKU LOŽISKA.....	20
ROVNICE 3.3: ROVNICE KINEMATICKÉ FREKVENCE VALIVÉHO ELEMENTU	20
ROVNICE 3.4: ROVNICE KINEMATICKÉ FREKVENCE KLECE	21
ROVNICE 6.1: ARITMETICKÝ PRŮMĚR.....	42
OBR. 2.1: VYTVOŘENÍ OBÁLKY ZRYCHLENÍ [6]	16
OBR. 3.1: OMEZENÍ PŘI MĚŘENÍ [3].....	17
OBR. 3.2: GEOMETRIE KULIČKOVÉHO LOŽISKA [2]	20
OBR. 3.4: ETAPY POŠKOZENÍ LOŽISKA [14]	21
OBR. 4.1: PRŮBĚH HODNOT CARPET VALUE PŘI POŠKOZENÍ MAZACÍHO FILMU [6]	24
OBR. 4.2: PRŮBĚH HODNOT MAX VALUE PŘI POŠKOZENÍ LOŽISKOVÉHO ELEMENTU [6].....	25
OBR. 4.3: GRAF VYHODNOCOVÁNÍ STAVU LOŽISKA METODOU HF [1]	26
OBR. 4.4: SPIKE ENERGY PEAK-TO-PEAK DETEKCE [11]	27
OBR. 4.5: PARAMETRY NESPOJITÉHO (IMPULZNÍHO) SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE (U_{MAX} JE MAXIMÁLNÍ AMPLITUDA SIGNÁLU) [2]	29
OBR. 4.6: PRŮBĚH SPOJITÉHO SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE S PEVNÝM PRAHEM (PRÁH 1) A PLOVOUCÍM PRAHEM (PRÁH 2) [2].....	30
OBR. 4.7: PRINCIP SNÍMÁNÍ A ZOBRAZENÍ VLN AE [12]	31
OBR. 5.1: SCHÉMA MĚŘÍČÍHO STANDU	32
OBR. 5.2: SCHÉMA UMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ NA LOŽISKOVÉM DOMKU.....	33
OBR. 5.3: SCHÉMA ZAPOJENÍ MĚŘÍČÍ APARATURY	34
OBR. 5.4: ZAPOJENÍ MĚŘÍČÍ APARATURY.....	35
OBR. 5.5: ANALYZÁTOR PRO MĚŘENÍ AKCELEROMETRY	35

OBR. 5.6: ANALYZÁTOR PRO MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH EMISÍ	36
OBR. 5.7: PRŮBĚH MĚŘENÍ	36
OBR. 5.8: SCHÉMA ZATĚŽOVÁNÍ LOŽISEK V LOŽISKOVÉM DOMKU	37
OBR. 5.9: GRAF ZÁVISLOSTI VIBRACÍ A TEPLoty NA ČASE PRO SNÍMAČ IMI622 A PT100	38
OBR. 6.1: BLOKOVÝ DIAGRAM PRO ZPRACOVÁNÍ DAT	41
OBR. 6.2: BLOKOVÝ DIAGRAM PRO VIZUALIZACI ZPRACOVANÝCH DAT	43
OBR. 6.3: POSTUPNÉ NAČÍTÁNÍ ČASOVÝCH ZÁZNAMŮ S PŘEKRYTÍM 50 %	44
OBR. 6.4: KASKÁDNÍ GRAF VYUŽITÝ PRO TVORBU OBÁLEK U SNÍMAČE ARTIS MARPOS AE-C	46
OBR. 6.5: SPEKTRÁLNÍ MAPA VYUŽITÁ PRO TVORBU OBÁLEK U SNÍMAČE ARTIS MARPOS AE-C	47
OBR. 8.1: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ MMF-KS78 (5,5-10,5 KHZ)	50
OBR. 8.2: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ MMF-KS78 (5,5-10,5 KHZ) V ODLEHČENÉM STAVU	51
OBR. 8.3: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ MMF-KS78 (5,5-10,5 KHZ) V ZATÍŽENÉM STAVU	51
OBR. 8.4: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ IMI62 (12-22 KHZ)	52
OBR. 8.5: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ IMI62 (12-22 KHZ) V ODLEHČENÉM STAVU	52
OBR. 8.6: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ IMI62 (12-22 KHZ) V ZATÍŽENÉM STAVU	53
OBR. 8.7: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ MMF-KS78 (12-22 KHZ)	54
OBR. 8.8: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ MMF-KS78 (12-22 KHZ) V ODLEHČENÉM STAVU	54
OBR. 8.9: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ MMF-KS78 (12-22 KHZ) V ZATÍŽENÉM STAVU	55
OBR. 8.10: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ WR997 (12-22 KHZ)	56
OBR. 8.11: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ WR997 (12-22 KHZ) V ODLEHČENÉM STAVU	56
OBR. 8.12: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ WR997 (12-22 KHZ) V ZATÍŽENÉM STAVU	57
OBR. 8.13: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ DAKEL MDK-13 (53-68 KHZ)	58
OBR. 8.14: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ DAKEL MDK-13 (53-68 KHZ) V ODLEHČENÉM STAVU	58
OBR. 8.15: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ DAKEL MDK-13 (53-68 KHZ) V ZATÍŽENÉM STAVU	59
OBR. 8.16: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ BOTEg UTS400BNC (15-30 KHZ)	60
OBR. 8.17: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ BOTEg UTS400BNC (15-30 KHZ) V ODLEHČENÉM STAVU ..	60
OBR. 8.18: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ BOTEg UTS400BNC (15-30 KHZ) V ZATÍŽENÉM STAVU	61
OBR. 8.19: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ ARTIS MARPOS AE-C (BMLT, 11-45 KHZ)	62
OBR. 8.20: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ ARTIS MARPOS AE-C (BMLT, 11-45 KHZ) V ODLEHČENÉM STAVU	62
OBR. 8.21: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ ARTIS MARPOS AE-C (BMLT, 11-45 KHZ) V ZATÍŽENÉM STAVU	63
OBR. 8.22: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ ARIT MARPOS AE-C (RT, 11-45 KHZ)	64
OBR. 8.23: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ ARIT MARPOS AE-C (RT, 11-45 KHZ) V ODLEHČENÉM STAVU	64
OBR. 8.24: SPEKTRÁLNÍ MAPA PRO SNÍMAČ ARIT MARPOS AE-C (RT, 11-45 KHZ) V ZATÍŽENÉM STAVU.	65
OBR. 8.25: GRAF ZÁVISLOTI VIBRACÍ NA ČASE U SNÍMAČE ARTIS MAPROS AE-C (BMLT) PŘI ANALÝZE P-P	67

Seznam použitého softwaru

LabView 2020

Seznam příloh

Textové přílohy

Použité přístroje při laboratorní úloze

Snímače vibrací

Laserové otáčkové sondy

Analogově digitální moduly

Chassis

Grafické zobrazení zpracovaných dat

Zpracování signálů měřených pomocí akcelerometrů se standardním frekvenčním rozsahem (vzorkovací frekvence 51,2 kHz)

Zpracování signálů měřených pomocí akcelerometrů s vysokofrekvenčním měřicím rozsahem (vzorkovací frekvence 102,4 kHz)

Zpracování signálů měřených pomocí snímačů akustických emisí (vzorkovací frekvence 250 kHz)