

Bakalářská práce

HLUKOVÁ A VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

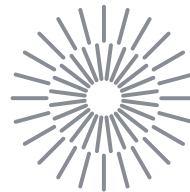
Autor práce:

Petr Šourek

Vedoucí práce:

doc. Dr. Ing. Elias Tomeh
Katedra vozidel a motorů

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

HLUKOVÁ A VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA

<i>Jméno a příjmení:</i>	Petr Šourek
<i>Osobní číslo:</i>	S21000119
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra vozidel a motorů
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

Zásady pro vypracování:

Rešeršní práce zaměřená na možnosti posouzení technického stavu strojů a zařízení v průmyslových závodech.

1. Proveďte rešerši současného uplatnění hlukové a vibrační diagnostiky aplikované na stroje a zařízení v průmyslových závodech a popište současnou používanou měřicí techniku pro měření vibrací a hluku.
2. Uveďte požadavky kladené na hlučnost a vibrace strojů a zařízení v průmyslových závodech a proveďte rozbor dynamických poměrů náhonu vybraného stroje a vypočítejte jeho hlavní zdroje buzení.
3. Popište používané varianty řešení pomocí hlukové a vibrační diagnostiky, vyhodnocení a porovnání naměřených hodnot, zhodnoťte klady a zápory navržených řešení.
4. Analýza provedených měření, projev výrobních závad strojů a zařízení v průmyslových závodech ve vibračních spektrech a návrh pro jejich odstranění z výroby za účelem snižování vibrací a hluku.
5. Cílem bakalářské práce je použitelnost výsledků v laboratoři KVM.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy: 40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] Kreidl, M. – Šmíd, R.: Technická diagnostika. Praha 2006.
- [2] Tomeh, E.: Diagnostic Methodology of Rolling Element and Journal Bearings. /Skripta TU v Liberci/, TUL Liberec, 2007.
- [3] Tomeh, E.: Hlučnost a vibrace automobilových převodovek v souvislosti s identifikovanými závadami obráběcích strojů. Habilitační práce TU v Liberci 2008.
- [4] Tomeh, E.: Technická diagnostika, vibrační diagnostika strojů a zařízení. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN: 978-80-7494-174-0.
- [5] Katalog firem zabývajících technickou diagnostikou.
- [6] SKF [online]. Sweden: SKF Group Headquarters, b.r. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring-systems/surveillance-systems>
- [7] User Manual. In: SKF [online]. Sweden: SKF Reliability Systems, 2014 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: https://www.skf.com/binary/87-158307/0901d19680326e0b-AptitudeObserver-v9_1-User-Manual.pdf.
- [8] Jens Trampe Broch, Mechanical vibration and shock measurements. Brüel a Kjaer, Denmark, 1984.
- [9] Časopisy a katalogy firem (SKF, CMMS, Brüel a Kjaer,).
- [10] Potřebné normy.

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Elias Tomeh
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání práce: 9. listopadu 2023

Předpokládaný termín odevzdání: 9. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 9. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

HLUKOVÁ A VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA

Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na technickou diagnostiku, zejména na vibrodiagnostiku a hlukovou diagnostiku. V úvodní části práce je nejprve obecně popsána technická diagnostika včetně prostředků a metod, s důrazem na vibrodiagnostiku. Tato metoda je klíčovým prvkem prezentované bakalářské práce, a proto tvoří hlavní část teoretické části. Teoretická část se také zaměřuje na současné uplatnění těchto měřících metod, jejich snímače a způsoby upevnění snímačů. V rámci této práce bylo provedeno měření vibrací CNC obráběcího stroje GOODWAY GTS-200 a měření hluku na zařízení Stand od firmy Bruel & Kjaer v laboratoři katedry KVM strojní fakulty. Díky těmto metodám bude možné sledovat stav vibrací strojů, což umožní hodnocení stavu strojů a včasné rozpoznání vznikajících závad. Tím se zajistí dostatečná časová rezerva pro plánování provedení oprav stroje s minimálními náklady a minimalizací ztrát ve výrobě.

Klíčová slova

Diagnostika, vibrodiagnostika, hluk, frekvence, snímače, ložiska, měření vibrací, vyhodnocení vibrací

NOISE AND VIBRATION DIAGNOSTICS

Abstract

The bachelor thesis focuses on technical diagnostics, especially vibrodiagnostics and noise diagnostics. In the introductory part of the thesis, technical diagnostics is first described in general, including means and methods, with emphasis on vibrodiagnostics. This method is a key element of the presented bachelor thesis and therefore forms the main part of the theoretical part. The theoretical part also focuses on the current application of these measurement methods, their sensors and the methods of mounting the sensors. Within the scope of this thesis, vibration measurements of a GOODWAY GTS-200 CNC machine tool and noise measurements on a Stand machine from Bruel & Kjaer were carried out in the laboratory of the KVM department of the Faculty of Mechanical Engineering. With these methods, it will be possible to monitor the state of vibration of the machines, which will allow the evaluation of the condition of the machines and early detection of emerging faults. This will ensure sufficient time reserve for planning the execution of machine repairs with minimum cost and minimizing production losses.

Keywords

Diagnostics, vibrodiagnostics, noise, frequency, sensors, bearings, vibration measurement, vibration evaluation

Poděkování

Děkuji tímto mému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Dr. Ing. Eliasi Tomehovi za trpělivost, cenné připomínky a věcné rady. Panu prof. Dr. Ing. Pavlu Němečkovi děkuji za pomoc při měření hluku. Dále bych rád poděkoval firmě KNOMI, která mi velkoryse poskytla stroj na měření vibrací pro účely této bakalářské práce.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1	TECHNICKÁ BEZDEMONTÁŽNÍ DIAGNOSTIKA.....	11
2.1.1	Metody provozní technické diagnostiky	11
2.2	PREDIKTIVNÍ ÚDRŽBA.....	13
2.3	VIBRODIAGNOSTIKA.....	13
2.3.1	Současné uplatnění vibrodiagnostiky.....	13
2.3.2	Snímače vibrací	14
2.3.2.1	Snímače výchylky	16
2.3.2.2	Senzory rychlosti.....	17
2.3.2.3	Snímače zrychlení	18
2.3.2.4	Uchycení snímače	19
2.4	HLUKOVÁ DIAGNOSTIKA	21
2.4.1	Akustické veličiny.....	21
2.4.1.1	Akustické vlnění.....	21
2.4.1.2	Akustický tlak	21
2.4.1.3	Akustická rychlost.....	21
2.4.2	Snímače hluku	22
2.4.2.1	Zvukoměry	23
2.4.3	Zdroje hluku ve strojích	24
2.5	VYUŽITÍ VIBRAČNÍ A HLUKOVÉ DIAGNOSTIKY V PRŮMYSLOVÝCH ZÁVODECH	25
2.6	GOODWAY GTS – 200.....	26
2.7	BUDÍCÍ FREKVENCE HLAVNÍCH ZDROJŮ VIBRACÍ OBRÁBĚČÍHO STROJE	27
2.7.1	Rotorové buzení	28
2.7.2	Buzení řemenových převodů.....	29
2.7.3	Buzení valivých ložisek	29
2.7.3.1	Metoda obáلكové analýzy.....	32
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST A DISKUSE VÝSLEDKŮ	33
3.1	VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA	33
3.1.1	Příprava měření	33
3.1.2	Vyhodnocení vibrací	34
3.2	MĚŘENÍ HLUKU	39
3.2.1	Vyhodnocení hluku	40
4	ZÁVĚR	44
	POUŽITÁ LITERATURA	45
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	47

Seznam zkratek a symbolů

- F_b – budící síla [N]
b – součinitel tlumení [-]
n – otáčky [min⁻¹]
z – počet zubů ozubeného kola [-]
f_R – rotorová frekvence [Hz]
f_r – řemenová frekvence [Hz]
D₁, D₂ – průměr hnací a hnané řemenice [mm]
L_r – délka řemene [mm]
f_{Li} = BPFi – frekvence vad vnitřního oběžného kroužku ložiska [Hz]
f_{Lo} = BPFO – frekvence vad vnějšího oběžného kroužku ložiska [Hz]
f_{Lv} = BSF – frekvence vad valivého tělíska ložiska [Hz]
f_{Lk} = FTF – frekvence vad klece valivého ložiska [Hz]
z – počet valivých těles ložiska [-]
D – průměr vnějšího kroužku [mm]
d – průměr vnitřního kroužku [mm]
d_s – střední průměr [mm]
d_o – průměr valivého tělesa [mm]
α - stykový úhel valivého tělesa s oběžnou dráhou ložiska [°]
f_{ES} – frekvence statoru [Hz]
f_s – síťová frekvence [Hz]
f_{R1L} – frekvence buzení levé, první hřídele [Hz]
f_{R2L} – frekvence buzení levé, druhé hřídele [Hz]
f_{R1P} – frekvence buzení pravé, první hřídele [Hz]
f_{R2P} – frekvence buzení pravé, druhé hřídele [Hz]
f_{R1} – frekvence buzení první hřídele zařízení Stand Bruel & Kjaer [Hz]
f_{R2} – frekvence buzení druhé hřídele zařízení Stand Bruel & Kjaer [Hz]
L – celková energie hlukového signálu [dB]
A – celková energie hlukového signálu váženo filtrem A [dB]

1 Úvod

V průmyslovém odvětví hraje technická bezdemontážní diagnostika klíčovou roli při udržení provozu strojů na optimální úrovni. Zavádění metod prediktivní údržby, jako je vibrodiagnostika a hluková diagnostika, nabízí efektivní nástroje pro identifikaci a prevenci poruchových stavů, čímž významně přispívá k minimalizaci výrobních ztrát a nákladů na opravy.

Vibrodiagnostika se specializuje na analýzu vibrací strojů, která poskytuje informace o stavu jejich rotačních součástí, jako jsou například valivá a kluzná ložiska, ozubená kola, průchody lopatek u hydrodynamických a aerodynamických strojů, řemenové a řetězové převody, a problémy střídavých elektromotorů. Na druhou stranu, hluková diagnostika se specializuje na analýzu zvukových signálů, což umožňuje sledovat chod a stav strojů a zařízení. Tyto moderní diagnostické metody se stávají nezbytnými nástroji pro průmyslová odvětví, kde je klíčové minimalizovat výrobní výpadky a maximalizovat efektivitu provozu.

Tato práce si klade za cíl posoudit současné využití vibrodiagnostiky a hlukové diagnostiky v průmyslovém prostředí a zhodnotit jejich výhody a nevýhody. V první části práce jsou proto detailně rozebrány nejen metody technické diagnostiky a prediktivní údržby, ale i specifika vibrodiagnostiky a hlukové diagnostiky. Dále je věnována pozornost problematice snímačů vibrací, jejich principům fungování a možnostem uchycení. Hluková diagnostika je rovněž popsána, včetně akustických veličin a používaných snímačů.

V rámci experimentální části práce je provedena analýza vibrací na CNC obráběcím stroji GOODWAY GTS-200 ve firmě KNOMI, která je známá svou kvalitní výrobou hydraulických rychlospojek a strojírenského šroubení. Firma KNOMI disponuje širokým strojovým parkem, zahrnujícím jak jednovřetenové automaty, tak i šestivřetenové CNC automaty. Kromě toho vlastní pětiosé obráběcí centrum a stroje na ohýbání trubek. Tato spolupráce umožní získat konkrétní data a poznatky o stavu stroje a jeho provozu, které budou důležité pro posouzení efektivity a využitelnosti vibrační diagnostiky v praxi. Ložiska obráběcího stroje jsou vyhodnocována metodou obálkové analýzy.

Hluková diagnostika je prováděna na zařízení Stand od firmy Bruel & Kjaer v laboratoři katedry KVM strojní fakulty.

Cílem je posoudit stav stroje a praktické využití hlukové a vibrační diagnostiky v průmyslové praxi, přičemž se zvláštním zájmem je sledování výhod a nevýhod těchto diagnostických metod a jejich aplikovatelnost v konkrétních průmyslových odvětvích.

2 Teoretická část

2.1 Technická bezdemontážní diagnostika

Technická diagnostika je klíčovým oborem, který se zabývá metodami a prostředky pro bezdemontážní a nedestruktivní stanovení technického stavu objektů. Jeho cílem je systematické sledování a včasné detekování fyzikálních změn a procesů, které ovlivňují spolehlivost technických zařízení. Základem spolehlivého provozu a údržby je pochopení průběhu opotřebení a stanovení objektivní zbytkové životnosti zařízení, což umožňuje monitorování aktuálního technického stavu v reálném čase pomocí měřicích a vyhodnocovacích metod. [1, 2]

Technická bezdemontážní diagnostika je proces, během kterého se posuzuje aktuální stav objektů na základě objektivního vyhodnocení příznaků získaných prostřednictvím měřicí techniky. Bezdemontážní diagnostika strojů, která zahrnuje měření, analýzu a porovnání dat, je důležitou oblastí technických aktivit zaměřených na monitorování stavu strojů bez jejich demontáže. [1, 3]

Významnou výhodou technické diagnostiky je schopnost identifikovat a odstranit příčiny zhoršení technického stavu, což přispívá k efektivní údržbě a minimalizaci havárií. Moderní technologie umožňují automatizaci diagnostických procesů a rychlou aktualizaci technických prostředků a programového vybavení, což zvyšuje jejich účinnost. [2]

Celkově lze konstatovat, že technická diagnostika hraje klíčovou roli v průmyslových procesech a přispívá k zajištění spolehlivého provozu technických zařízení. Její uplatnění umožňuje nejen identifikovat stávající problémy, ale také předcházet jejich vzniku pomocí preventivních opatření založených na skutečném stavu strojů a zařízení.

2.1.1 Metody provozní technické diagnostiky

Diagnostické metody se odlišují podle monitorování rozmanitých fyzikálních veličin, což je klíčem k určení vhodných kritérií týkajících se provozního stavu sledovaného objektu. [1, 4]

- **vibrodiagnostika** – v důležitých bodech sledovaného objektu se analyzují a interpretují mechanické oscilace
- **hluková diagnostika** – intenzita a frekvenční spektrum šumu se měří na klíčových místech sledovaného objektu
- **termodiagnostika** – v kritických místech sledovaného objektu se měří teplota a její změny
- **tribodiagnostika** – u strojů se provádí analýza maziv a olejů
- **elektrodiagnostika**
- **ultrazvuková diagnostika**
- aj.

Máme mnoho druhů údržby, tyto metody jsou využity v prediktivní údržbě.

Tab. 1 Zdroje vibrací a jejich identifikace různými metody technické diagnostiky [1]

Závada	Tribo diagnostika	Hluková diagnostika	Vibro diagnostika	Termo diagnostika	Ultrazvuková diagnostika	Elektro diagnostika
Nevyváženost	-	-	X	-	-	-
Nesouosost	-	-	X	-	-	-
Excentricita	-	-	X	-	-	-
Prohnutý hřídel	-	-	X	-	-	-
Trhlina v hřídeli	-	-	X	-	-	-
Mechanické uvolnění	-	-	X	-	-	-
Rezonance	-	-	X	-	-	-
Závady kluzných ložisek	X	X	X	X	X	-
Závady valivých ložisek	X	X	X	X	X	-
Rotorové tření	X	-	X	-	-	-
Turbulence	-	X	X	-	-	-
Kavitace	-	X	X	-	-	-
Závady elektrických strojů		-	X	-	-	X
Závady ozubených soukolí	X	X	X		X	-

Vibrační bezdemontážní diagnostika se jeví jako nejlepší metoda, protože dokáže identifikovat všechny závady strojů a zařízení, a to z následujících důvodů: [1]

- Je univerzální
- Je lokalizační
- Je preventivní
- Má v České republice dlouhou tradici
- Opírá se o logické principy (matematika, fyzika, mechanika)
- Využívá špičkovou měřicí techniku
- Má kvalitní metodické zázemí
- Navazuje na využití lidských smyslů
- Umožňuje zapojení do systému trvalého sledování
- Má množství odvozených metod

2.2 Prediktivní údržba

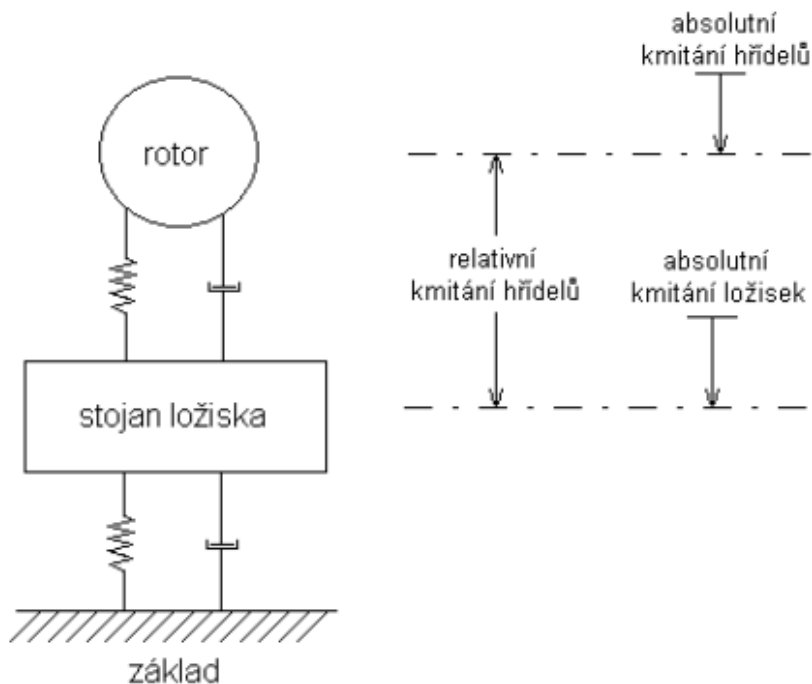
Prediktivní údržba optimalizuje servisní odstávky tak, aby přicházely v ideálním okamžiku a minimalizovaly vliv na výrobní proces. Ekonomicky nejvýhodnější je údržba podle skutečného stavu, která využívá technickou diagnostiku k plánování odstávek a výměn součástí na základě stavu a opotřebenosti stroje. Tato metoda vyžaduje průběžné monitorování provozních parametrů a umožňuje předem určit termíny údržby s největší účinností a úsporou nákladů. [1, 5]

2.3 Vibrodiagnostika

2.3.1 Současné uplatnění vibrodiagnostiky

Vibrodiagnostika, jakožto bezdemontážní a nedestruktivní metoda, se zabývá snímáním a vyhodnocováním mechanického kmitání objektu. Tento termín se vztahuje k periodickému pohybu hmotných bodů nebo celého tělesa kolem své rovnovážné polohy. Klíčovými charakteristikami vibrací jsou budící síla, směr a frekvence kmitání. Měření probíhá obvykle v reálném čase, umožňující okamžitou analýzu vibrací. [2]

Vibrodiagnostika zaujímá významné místo mezi obory technické diagnostiky a je klíčovou součástí prediktivní údržby strojů. Během let se stala vibrace diagnostickou metodou nejvyšší účinnosti pro kontrolu stavu strojů. Přístroje určené pro diagnostiku vibrací umožňují předvídatí možných poruch strojů. Díky aplikaci prediktivní údržby a pravidelnému monitorování strojů lze zjišťovat potenciální závady již v raných fázích vývoje, což umožňuje přijímat adekvátní opatření k jejich odstranění. Tímto způsobem lze předejít nečekaným výpadkům strojů a minimalizovat potřebu výměny součástí, které jsou stále v dobrém stavu. [6]



Obr. 1 Absolutní a relativní kmitání hřídele [7]

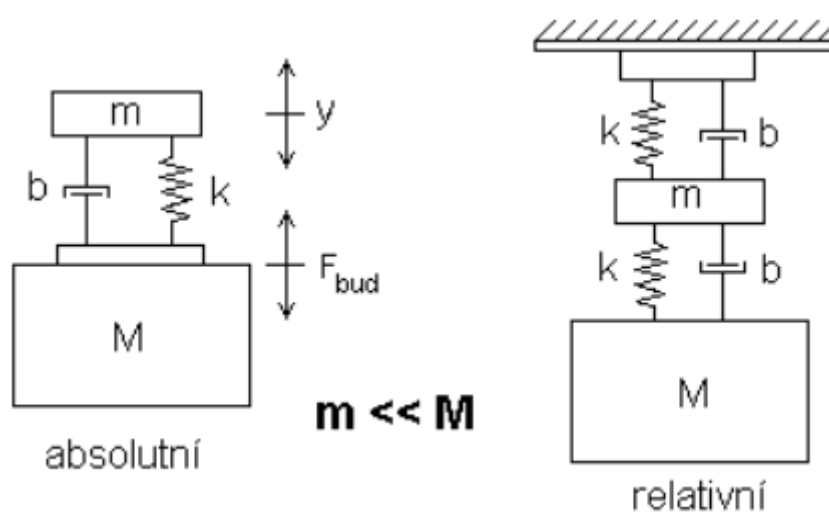
2.3.2 Snímače vibrací

V termínech technického jazyka lze pojem "senzor" považovat za ekvivalent pojmu "snímač" nebo "detektor". Citlivá část senzoru, která přijímá vstupní signál, je někdy označována jako "čidlo". Senzor, fungující jako hlavní zdroj informací, detekuje sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a na základě určitého definovaného principu ji přeměňuje na měřenou veličinu, obvykle elektrickou. [7]

Senzory kmitání můžeme rozdělit na: [8]

- senzory absolutní
- senzory relativní

Snímače obou typů jsou znázorněné (viz. Obr. 2)



Obr. 2 Mechanický model absolutního a relativního snímače vibrací [8]

Diferenciální rovnice, kterou lze popsat zjednodušeně kmitání seismické hmoty snímače nabývá podoby: [8]

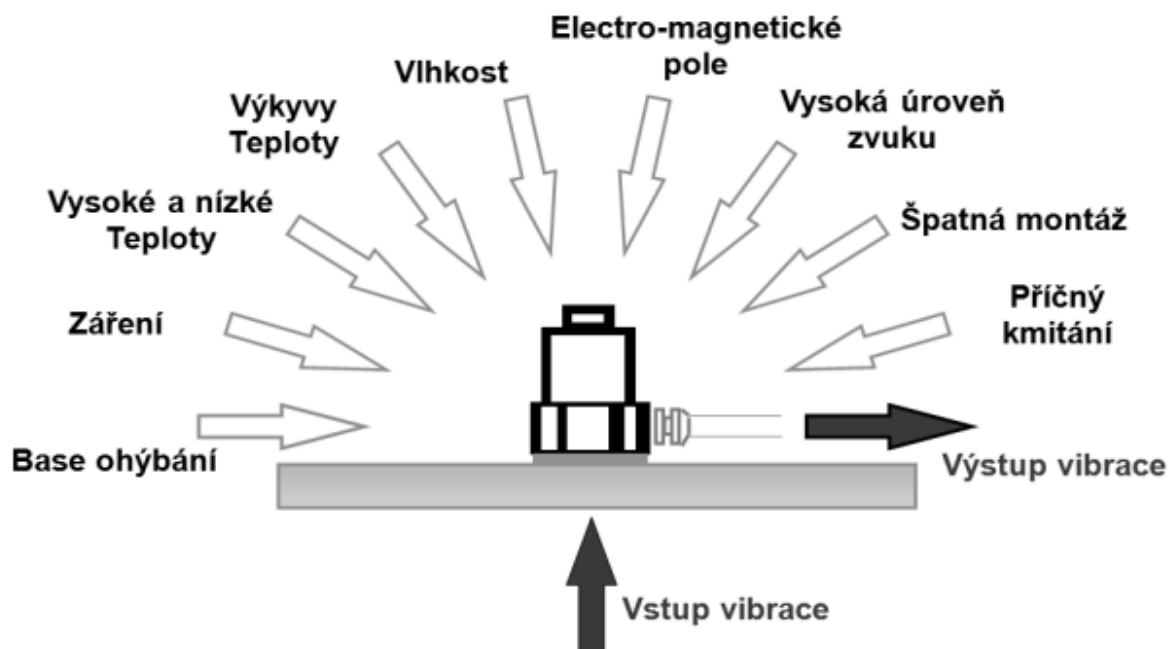
$$my'' + by' + ky = Mx'' = F_b \quad [8] \quad (1)$$

Kde:	m	hmotnost seismického snímače
	M	hmotnost objektu
	y	výchylka
	y'	rychlost
	y''	zrychlení
	x''	zrychlení objektu
	k	tuhost pružiny
	b	součinitel tlumení
	F _b	budící síla

Podle typu měřené veličiny se snímače dělí na: [9]

- snímače výchylky
- snímače rychlosti (velometry)
- snímače zrychlení (akcelerometry)

Rozmanitost použitelných frekvenčních a dynamických rozsahů variuje mezi jednotlivými typy senzorů. Dynamický rozsah senzoru představuje rozsah amplitud měřeného signálu, který je možné zaznamenat daným senzorem. Výběr vhodného typu senzoru závisí jak na konkrétním účelu aplikace (například jestli měříme vibrace hřídele či vibrace skříně stroje), tak i na požadovaném frekvenčním rozsahu. Bezkontaktní senzory výchylky dosahují své horní frekvence kolem 2000 Hz. Avšak již v rozmezí 1000 až 2000 Hz jsou měření pomocí bezkontaktních senzorů výchylky problematická, neboť není možné adekvátně eliminovat vliv nerovností povrchu hřídele, které jsou srovnatelné s naměřenými výchylkami. [9]



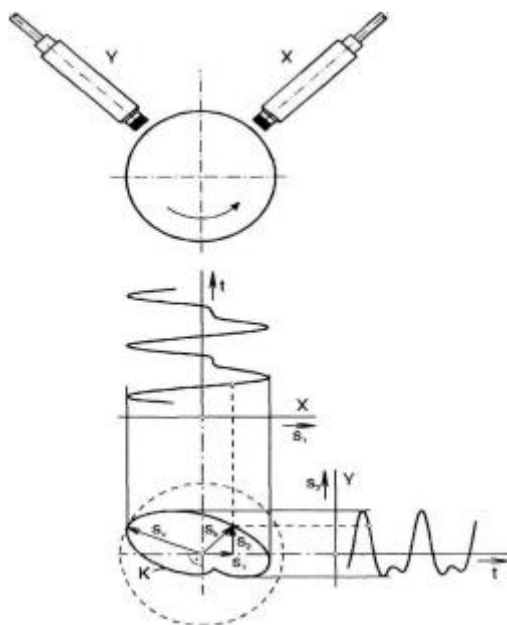
Obr. 3 Vstupy do akcelerometru [1]

2.3.2.1 Snímače výchylky

Senzory výchylky, polohy a posuvu jsou implementovány pomocí různých principů, včetně indukčního, indukčnostního, kapacitního, magnetického a dalších. Mezi senzory využívané především v oblasti vibrodiagnostiky patří senzory pracující na indukčnostním principu. Tyto senzory, kvůli své vysoké frekvenci, vykazují citlivost na parazitní vlivy, jako je například délka kabelu spojujícího měřící obvody nebo vnější elektromagnetická pole. Z tohoto důvodu jsou často vyráběny jako integrované jednotky, které obsahují jak cívku, tak i základní elektronické komponenty, umístěné v kovovém stíněném krytu. Typicky mají tyto senzory kmitočtový rozsah od 0 do 10 000 Hz.[8]

Snímače výchylky často excelují ve vysoké hmotnosti při nízké tuhosti a útlumu. I když jsou často používány v praxi, v této kategorii senzorů lze nalézt i ostatní typy senzorů posuvu, což je klíčový parametr například při monitorování délkových tepelných dilatací energetických zařízení. Existuje několik typů senzorů určených pro měření výchylky, vzdálenosti nebo polohy. Mezi nejstarší patří pravděpodobně kontaktní mechanická kluzátka. Nicméně v současné době je častěji používaným typem bezkontaktní senzor založený na principu vířivých proudů, který využívá změny Foucaultových proudů v důsledku změny odporu prostředí s vzdáleností. Kromě toho existují i další typy senzorů, jako jsou laserové, ultrazvukové, kapacitní a indukční senzory. [8]

Senzory výchylky tvoří relativně komplexní systém, a proto jsou v současnosti využívány především pro monitorování vibrací hřídelů. Tyto senzory měří relativní vibrace hřídele vzhledem k pevné části, obvykle vzhledem k ložisku (viz. Obr. 4) [1, 9]

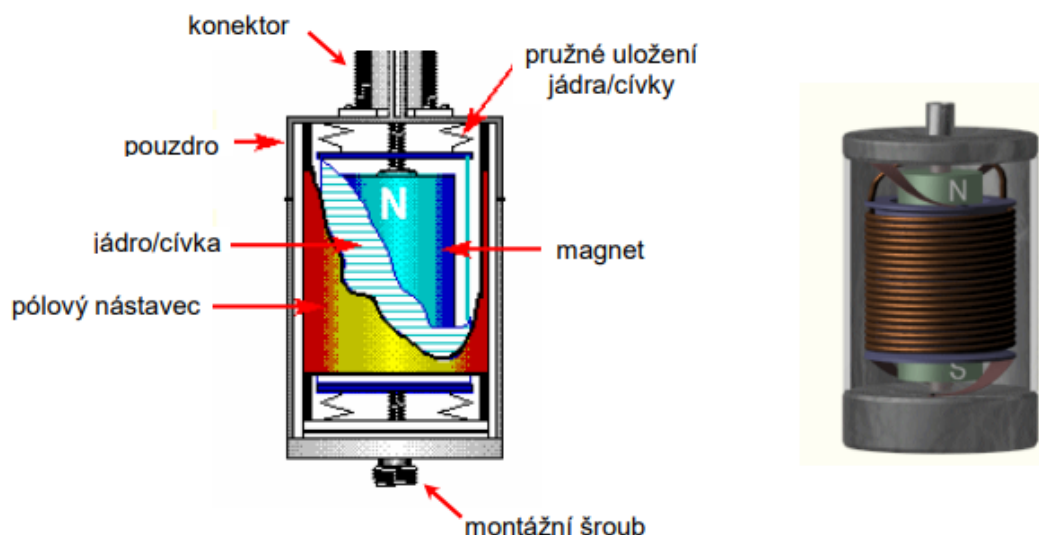


Obr. 4 Kinematická dráha (tzv. orbita) rotujícího hřídele. K – kinematická dráha hřídele. (s_1, s_2 – okamžité hodnoty výchylky, S_k – okamžitá kinematická výchylka hřídele) [1]

Senzory výchylky pracující na principu vířivých proudů měří vzdálenost mezi špičkou senzoru a vodivým povrchem. Tento měřicí systém se skládá z vlastního senzoru a tzv. proximity. Oscilátor v proximity generuje vysokofrekvenční střídavý proud, který prochází cívku zabudovanou ve snímači a vytváří v okolí špičky senzoru vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Tyto elektromagnetické pole indukuje ve vodivém materiálu vířivé proudy, které odvádějí energii ze systému, což má za následek změnu impedance cívky. Okamžitá vzdálenost cílové plochy se moduluje na tento signál a poté se demoduluje. Vzhledem k vysoké frekvenci elektromagnetického pole je celý proces měření silně ovlivněn celkovým odporem (ohmickým, indukčním a kapacitním). Kabley vedoucí vysokofrekvenční signál musí být vyráběny s přesnou tolerancí těchto elektrických vlastností a jejich délka nemůže být upravena. Jakékoliv poškození kabelu nebo jeho stínění ohrožuje kvalitu měření. Po ovlivnění nosné vlny a vířivých proudů proměnnou vzdáleností cílové plochy při vibracích se signál vrací do demodulátoru a poté – již jako nízkofrekvenční signál – je přiveden do vyhodnocovací jednotky. [9]

2.3.2.2 Senzory rychlosti

Snímače rychlosti, dlouhodobě využívané jako snímače vibrací u rotačních strojů, operují na principu elektromagnetické indukce. Základním principem fungování těchto snímačů je využití elektromagnetické indukce, kdy pohybující se cívka v magnetickém poli generuje napětí na svých vývodech. Tento jev je způsoben přenosem energie z magnetického pole do cívky, přičemž velikost indukovaného napětí je přímo úměrná relativní rychlosti mezi cívku a magnetickým polem. Konstrukce snímače rychlosti je navržena tak, aby tato relativní rychlost odpovídala rychlosti vibrací měřeného stroje. Konstrukce snímače rychlosti je znázorněna na Obr. 5. [9]



Obr. 5 Snímač rychlosti [9]

Při instalaci je nutné zohlednit citlivou osu snímače. Snímače určené pro montáž ve vertikálním směru musí být konstruovány odlišně kvůli působení gravitační síly ve srovnání se snímači pro horizontální směr. Snímače rychlosti jsou výrazně citlivé na boční vibrace, které nejsou ve směru citlivé osy. V takovém případě může dojít k přímému kontaktu mezi cívkou a pouzdem snímače a potenciálně k jeho poškození. Místo pro umístění snímače musí být adekvátně upraveno tak, aby mělo rovný povrch a bylo o něco větší než základna samotného snímače. [9]

Během oscilačního pohybu přenášeného z měřeného objektu na pouzdro senzoru vzniká v cívce indukované elektrické napětí: [1]

$$U = B \cdot l \cdot v \quad (2)$$

Kde: B indukce magnetického pole v prostoru vzduchové mezery
 L délka vodiče cívky
 v rychlost kmitání pouzdra senzoru

2.3.2.3 Snímače zrychlení

Akcelerometry představují senzory využívané k detekci statického či dynamického zrychlení v široké škále aplikací. Tyto zařízení detekují změny rychlosti nebo orientace tím, že snímají síly zrychlení, které na ně působí. Konstrukčně mohou akcelerometry měřit zrychlení v jedné, dvou nebo třech osách. Často nalézají využití v průmyslových odvětvích, jako je automobilový a letecký průmysl, spotřební elektronika či zdravotnictví, kde jsou využívány k monitorování vibrací, detekci pohybu a měření úhlů náklonu. [10, 11]

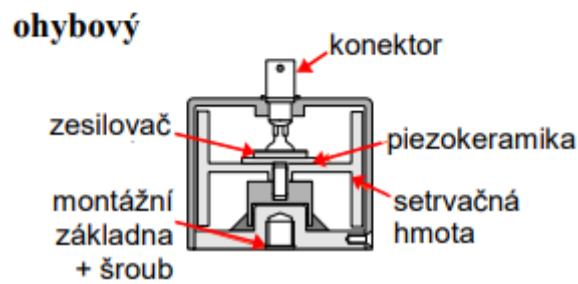
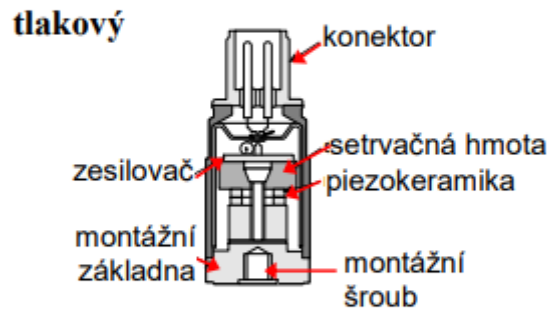
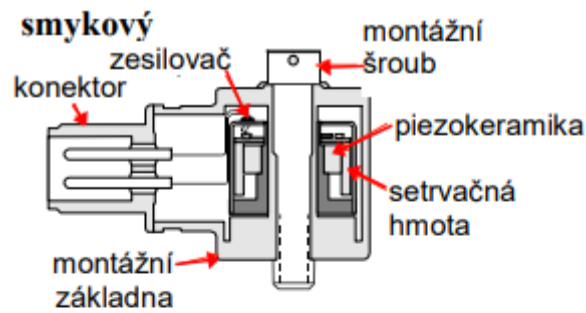
Podle principu fungování existují různé typy akcelerometrů, např.:

Piezoelektrické akcelerometry: Piezoelektrické akcelerometry pracují na principu piezoelektrického jevu, který spočívá v tom, že určité materiály při mechanickém namáhání generují elektrický náboj. Při deformaci piezoelektrického materiálu vzniká elektrický dipólový moment, který indukuje elektrické napětí. Tato změna způsobí elektrickou polarizaci senzoru. Velikost generovaného náboje závisí na velikosti a směru deformace materiálu. [10, 11]

Piezoelektrické akcelerometry využívají této vlastnosti k měření zrychlení. K výrobě krystalů v těchto snímačích se běžně používají materiály jako křemen, piezokeramika nebo piezoelektrické polymery. Když je snímač vystaven zrychlení, piezoelektrický materiál se deformuje, což vede k elektrickému signálu odpovídajícímu zrychlení. [2, 11]

Základní konstrukce piezoelektrických akcelerometrů zahrnuje piezoelektrický materiál pro měření zrychlení a seismickou hmotu, která převádí hodnotu zrychlení na sílu podle Newtonova zákona ($F = m \cdot a$). Piezoelektrické akcelerometry jsou tak schopny přesně měřit zrychlení a používají se v různých aplikacích, jako je monitorování vibrací, detekce pohybu a vesmírná navigace. [1, 11]

Akcelerometry se vyrábějí ve trojím provedení – tlakový, ohybový a smykový typ. (viz. Obr. 6) [9]



Obr. 6 Typy akcelerometrů [9]

2.3.2.4 Uchycení snímače

Uchycení senzorů je klíčové pro správné a spolehlivé měření vibrací a zrychlení v rámci vibrodiagnostiky. Správné uchycení senzorů zajišťuje přesné a konzistentní výsledky měření. Existuje několik způsobů, jak lze senzory uchytit k měřenému objektu [1, 12]

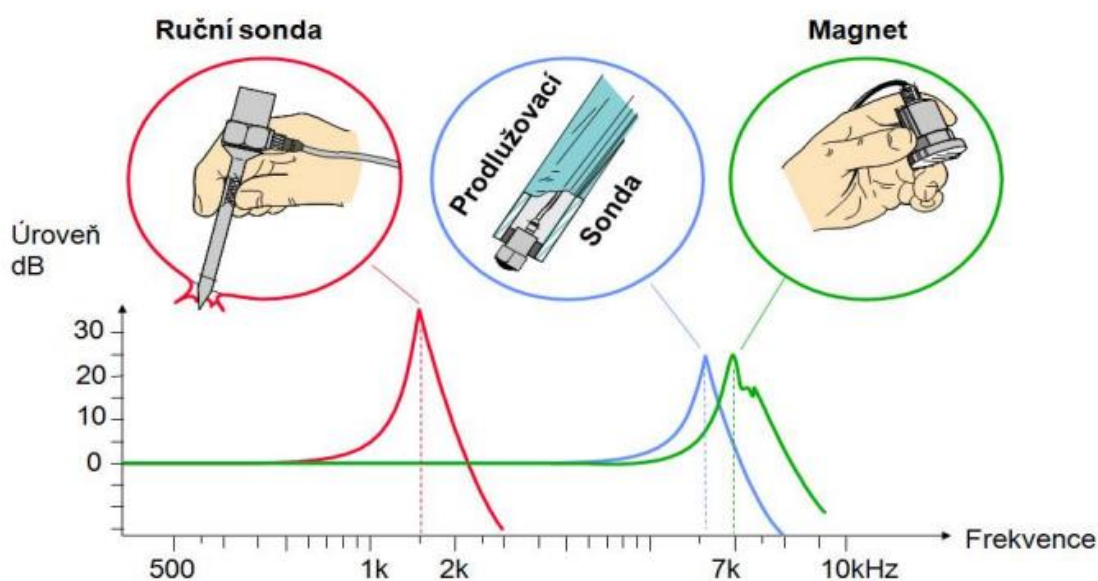
Včelí vosk – Pro rychlou montáž a demontáž snímače vibrací lze efektivně využít včelí vosk, což je metoda vhodná zejména pro zkoušky s velkým počtem měřicích bodů. Tento způsob upevnění je oblíbený pro svou jednoduchost a relativní bezpečnost, neboť minimalizuje riziko poškození snímače, například nepřiměřeným utažením či poškozením závitu. Vosk se aplikuje tenkou vrstvou mezi zkoušený povrch a základnu snímače, který se následně přitlačí s přiměřenou silou za současného torzního pohybu. [12]

Lepidlo – Další možností je využití lepidla, zejména u menších snímačů. Při demontáži je nutné být opatrný, aby nedošlo k poškození snímače. Důležitým faktorem je tuhost vytvrzeného lepidla, nejlepší volbou je kyanoakrylátové lepidlo. Kovové podložky se závitovým čepem mohou být přilepeny ke zkoušenému povrchu a na ně se poté připevní snímač. Lepidlo je obvykle použitelné do teploty 80 °C, ale existují i speciální vysokoteplotní varianty pro teploty až 200°C. Další alternativou jsou tenké oboustranné lepicí pásky nebo samolepicí upevňovací disky. [12]

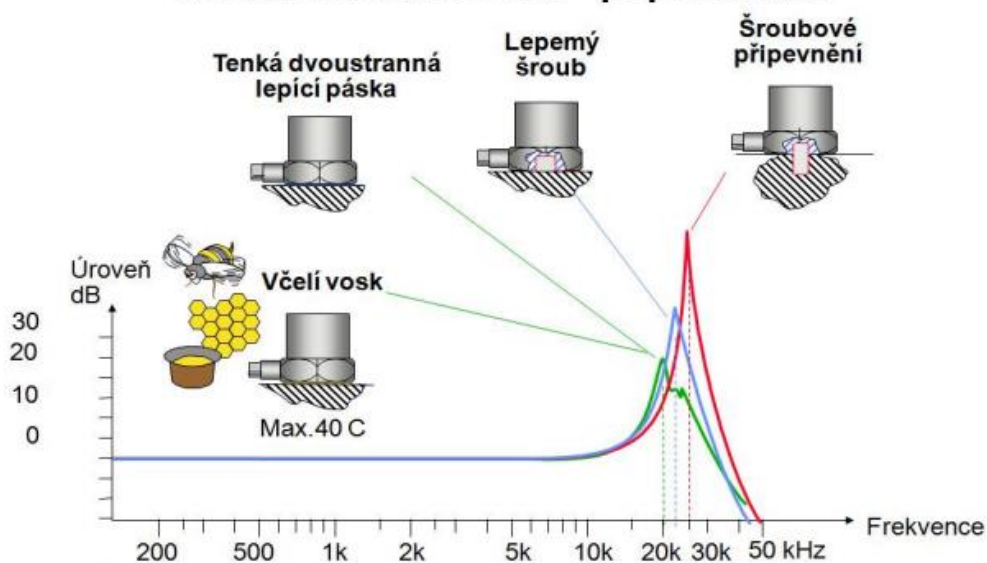
Magnet – Pro rychlou montáž a demontáž snímače lze využít upevnění pomocí permanentního magnetu, což je výhodné při zkouškách s velkým počtem měřicích bodů. Tento přístup však vyžaduje určitá omezení ohledně vlastností měřeného povrchu, který musí být hladký, rovný a feromagnetický. Dynamický rozsah zkoušky je také omezen přítlačnou silou použitého magnetu. [13]

Šroubový spoj – Tento způsob montáže je považován za nejefektivnější, protože zaručuje optimální přenos pohybu mezi zkušebním povrchem a samotným snímačem. Pro dosažení nejvyšší úrovně kontaktu snímače s povrchem lze snímač jednoduše podmazat silikonovým tukem. Tento tuk zaplní mikroskopické dutiny způsobené drobnými nedokonalostmi montážního povrchu, což napomáhá k dosažení dokonalého spojení mezi snímačem a povrchem. [14]

Montáž akcelerometrů - přidržení rukou



Montáž akcelerometrů - připevňování



Obr. 7 Způsoby uchycení akcelerometru [1]

2.4 Hluková diagnostika

Hluková diagnostika je bezdotyková diagnostická metoda, která se zaměřuje na analýzu vibrací strojů a energetických toků přenášených ve formě hluku do okolí. Tato metoda se zabývá nežádoucím zvukem v rozmezí frekvencí od 20 Hz do 20 kHz, který vzniká v důsledku kmitání pružného prostředí stroje. [2]

Tato metoda může být využita k detekci opotřebení součástí, nevyváženosti rotujících částí, poruch ložisek nebo jiných problémů spojených s provozem zařízení. [2]

Jednou z výzev hlukové diagnostiky je zpracování signálů v prostředí s více zvukovými zdroji a odrazy zvuku, což může ztížit identifikaci konkrétního zdroje hluku. Nicméně správná analýza zvukových signálů může poskytnout cenné informace pro údržbu a bezpečný provoz strojů. [1, 2]

Hluk může pocházet z libovolného předmětu nebo zařízení, ve kterém vzniká akustická energie. Tato energie se pak přenáší z místa zdroje hluku do okolí. Hluk může být považován za diagnostický faktor, který lze kvantifikovat pomocí numerických hodnot. [2, 15]

2.4.1 Akustické veličiny

2.4.1.1 Akustické vlnění

Pro vznik a šíření zvuku je nezbytná přítomnost hmotného prostředí, ve kterém se akustická energie může šířit formou akustického vlnění, které přenáší energii. Toto vlnění může být buď podélné nebo příčné. Podélné vlnění způsobuje, že částice prostředí kmitají ve směru šíření vlny, zatímco při příčném šíření kmitají kolmo k tomuto směru. Pokud se všechny kmity odehrávají v jedné rovině, mluvíme o lineárně polarizovaném vlnění. S postupem akustické vlny se částice prostředí střídavě zhutňují a zředňují, přičemž kmitají kolem svých rovnovážných poloh, aniž by se zásadně pohybovaly se šířící se vlnou. [15]

2.4.1.2 Akustický tlak

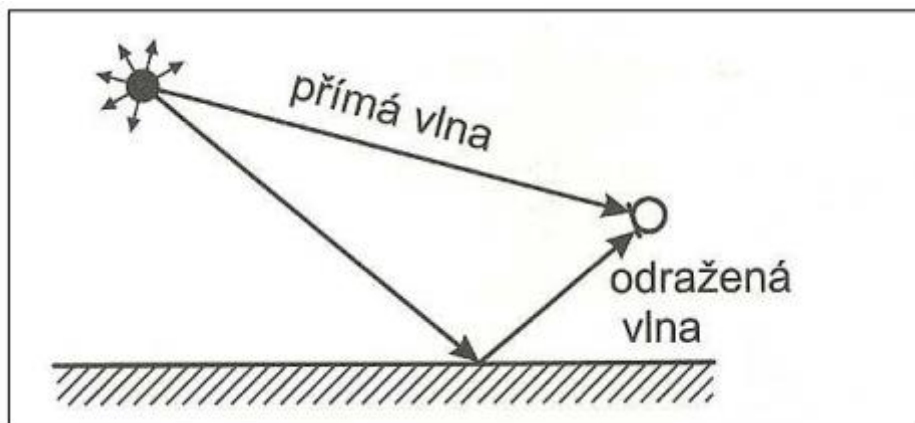
Akustický tlak je mírou intenzity zvuku, kterou vnímáme v určité vzdálenosti od zdroje zvuku. Jde o změnu tlaku ve vzduchu, kterou způsobuje zdroj hluku a která ovlivňuje vnímání hlasitosti lidským uchem. [16]

2.4.1.3 Akustická rychlost

Akustická rychlost, též známá jako částicová rychlost, určuje, jak rychle se jednotlivé částice v médium pohybují pod vlivem akustického tlaku. Tyto částice oscilují kolmo k rovině šíření akustické vlny. Jejich pohyb má směr a intenzitu, což ji definuje jako vektorovou veličinu. Je to klíčový parametr v akustice, který se liší od rychlosti šíření zvuku a obvykle je mnohem menší. [15]

2.4.2 Snímače hluku

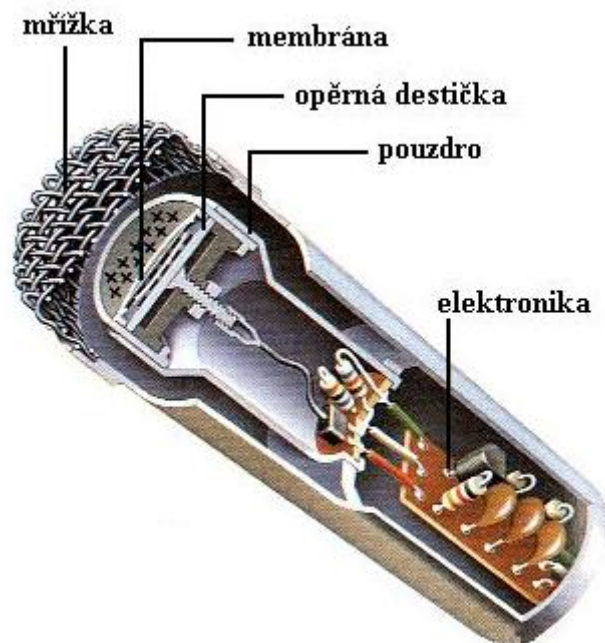
Pro účely hlukové diagnostiky jsou často využívány zvukoměry nebo mikrofony, přičemž nejběžnějším typem jsou mikrofony s kondenzátorovým principem. Pro dosažení větší přesnosti v určování polohy zdroje zvuku se často používají dva mikrofony umístěné souose, které umožňují nejen stanovit energetické toky, ale i určit směry šíření zvuku. Nicméně, hlavním problémem při využití hlukové metody může být interference vln, což může narušit přesnost získaných dat (viz Obr. 8).



Obr. 8 Interferenční jev [2]

Mikrofon je zařízení, které transformuje akustické signály na signály elektrické. Existuje široká škála variant a principů, na nichž mikrofony pracují [17, 18]:

- magnetoelektrický
- uhlíkový
- elektretový
- páskový
- kapacitní (tyto mikrofony jsou preferovány pro lineární charakteristiku a konstantní citlivost, neboť tyto vlastnosti přispívají k přesnějším a konzistentnějším měřením akustických signálů) – Obr. 9



Obr. 9 Kapacitní mikrofon [14]

2.4.2.1 Zvukoměry

Zvukoměr, což je přesné elektrické zařízení, reaguje na zvuk podobně jako lidský sluch a umožňuje objektivní a reprodukovatelné měření hladin hluku. Konstrukce a provedení zvukoměrných zařízení se může od výrobce k výrobcu lišit v detailu, ale všechna tato zařízení obsahují mikrofon, systém zpracování signálu a indikační prvek. [19]

2.4.3 Zdroje hluku ve strojích

Ve strojírenské praxi jsou často používané elektrické pohony, jejichž důležitou částí jsou elektrické stroje. Pro potřeby této práce byla pozornost věnována právě hluku těchto strojů. Dnes jsou nejvíce rozšířené z elektrických strojů asynchronní motory. U těchto točivých elektrických strojů je vždy přítomen hluk, způsobený částmi daného stroje.

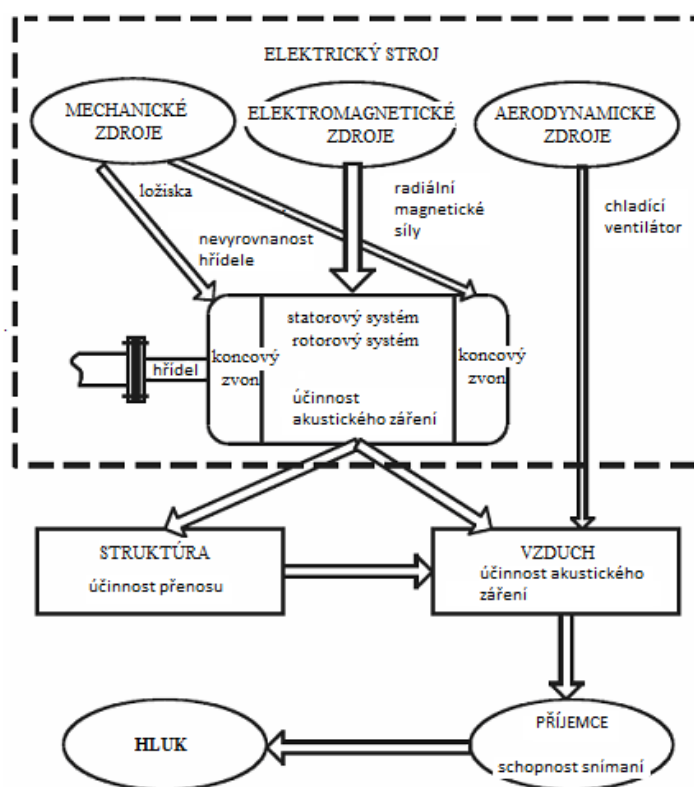
Nejvíce dominantní jsou tři skupiny hluku, a to: [15]

hluk mechanického původu: způsobený ložisky, třením kartáčů či nevyvážením rotujících částí

hluk elektromagnetického původu: způsobený magnetostrickými neboli změnou rozměru materiálu při zmagnetování

hluk ventilačního původu: způsobený rotujícími lopatkami ventilátoru a následným prouděním vzduchu.

Tyto skupiny, jejich vznik a šíření jsou zobrazeny v Obr. 10.



Obr. 10 Vznik, přenos a zachycení hluku v el. strojích [15]

Dalším významným zdrojem hluku může být hluk tvořený v transformátorech, jehož plechy vibrují v důsledku magnetostrickce. [15]

Zdroje hluku v důsledku zatížení stroje jsou: [15]

- hluk způsobený nevyrovnaností hřídele, výtahovou kladkou s lany, převodem uskutečněným přes hnací pásy, ozubenými koly, spojkou apod.
- hluk způsoben montáží stroje na nevhodný podklad nebo jinou konstrukci.

2.5 Využití vibrační a hlukové diagnostiky v průmyslových závodech

„Ochrana před nepříznivým působením hluku a vibrací je obecně upravena zákonem č. 258/2000 Sb. a zákoníkem práce, oba v platném znění. Nejvyšší přípustné hodnoty hluku a vibrací jsou stanoveny v navazujícím nařízení vlády č. 272/2011 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Vlastní metody měření a hodnocení hluku a vibrací jsou obsaženy v českých technických normách ČSN EN ISO 9612 a ČSN ISO 7196. Požadavky na zvukoměry, které podle zákona č. 505/1990 Sb. v platném znění spadají do skupiny tzv. stanovených měřidel podléhajících typové zkoušce a pravidelnému ověření jednou za dva roky, jsou upraveny českými technickými normami ČSN EN 61672-1 ED.2, ČSN EN 61672-2 ED.2 a ČSN EN 61672-3 ED.2.“ [20]

Měření vibrací bude vyhodnocována normou ČSN ISO 20816. [1]

- **pásmo A** - (0,71 - 1,8 mm*s⁻¹)
V této kategorii by měly být vibrace strojů, které jsou právě instalovány či přijímány do provozu
- **pásmo B** - (1,8 - 4,5 mm*s⁻¹)
Stroje jsou obvykle provozovány po neomezeně dlouhou dobu, což znamená, že jsou v provozu kontinuálně bez časového omezení.
- **pásmo C** - (4,5 - 9,3 mm*s⁻¹)
Stroje jsou za normálních okolností považovány za nevhodné pro dlouhodobý a trvalý provoz. Obecně je možné stroje za těchto podmínek provozovat až do doby, kdy je nalezena možnost jejich opravy.
- **Pásmo D** - (9,3 - 14,7 mm*s⁻¹)
Hodnoty vibrací jsou považovány za natolik významné, že mohou způsobit poškození stroje.

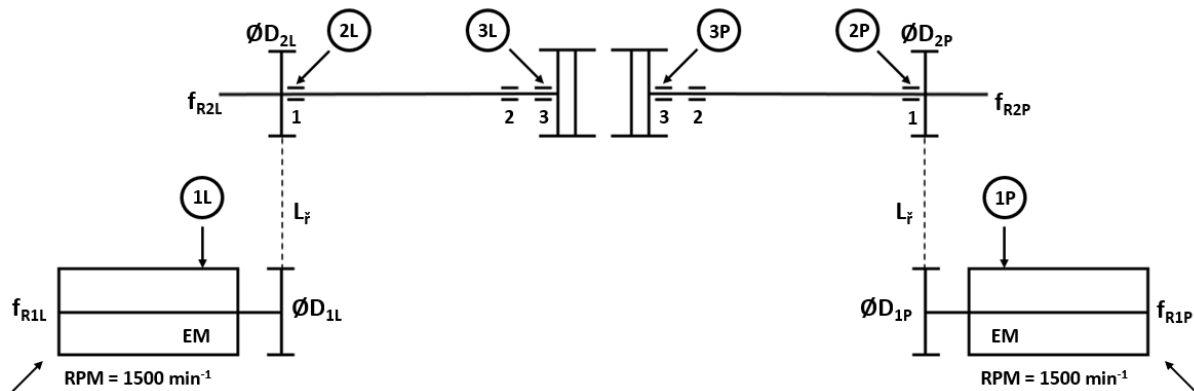
2.6 Goodway GTS – 200



Obr. 11 Obráběcí stroj GOODWAY GTS- 200

CNC (Computer Numerical Control) obráběcí stroj Goodway je zařízení používané při výrobě komponentů pro hydraulické rychlospojky, které umožňuje automatizované obrábění materiálu. Toto zařízení je schopné obrábět tyčový materiál nebo ocelové výkovky. CNC soustruhy Goodway jsou vybaveny počítačem, který řídí pohyb nástroje a materiálu podle přesných instrukcí uložených v programu. Tato zařízení umožňují vytvářet složité geometrické tvary s vysokou přesností a opakovatelností.

2.7 Budící frekvence hlavních zdrojů vibrací obráběcího stroje



Obr. 12 Označení měřicích míst

Kde: EM – Pohonný elektromotor AC 11KW 15HP

$n=1500$ [min^{-1}]

ØD_{1L} , ØD_{1P} = 140 [mm]

L_r = 2300 [mm]

ØD_{2L} , ØD_{2P} = 190 [mm]

1 – ložisko válečkové – NO. BN03018H- spec. NN3018KP5

2- ložisko kuličkové – NO. BH100ADB - spec. BH100BA10XDB

3- ložisko válečkové – NO. BN03020B - spec. NN3020KP5

Mezi obvyklé zdroje vibrací patří především: [1]

- Nevyváženost
- Nesouosost
- Excentricita
- Prohnutý hřídel
- Trhlina v hřídeli
- Mechanické uvolnění
- Rezonance
- Závady kluzných ložisek
- Závady valivých ložisek
- Rotorové tření
- Kavitace
- Turbulence
- Závady elektrických strojů
- Závady ozubených soukolí

2.7.1 Rotorové buzení

Rotorové buzení je výsledkem různých faktorů, jako jsou nedokonalosti ve struktuře materiálu, geometrické nepřesnosti, nevyváženost rotoru nebo nepříhodné pracovní podmínky. Tyto aspekty mohou vyvolat vibrace v rotoru stroje. [1, 9]

Rotorové frekvence:

Základní: Odpovídá budícím frekvencím součástí strojů.

$$f_{R1L} = \frac{n}{60} \quad (3)$$

$$f_{R1P} = \frac{n}{60} \quad (4)$$

$$f_{R2L} = f_{R1L} * \frac{D_1}{D_2} \quad (5)$$

$$f_{R2P} = f_{R1P} * \frac{D_1}{D_2} \quad (6)$$

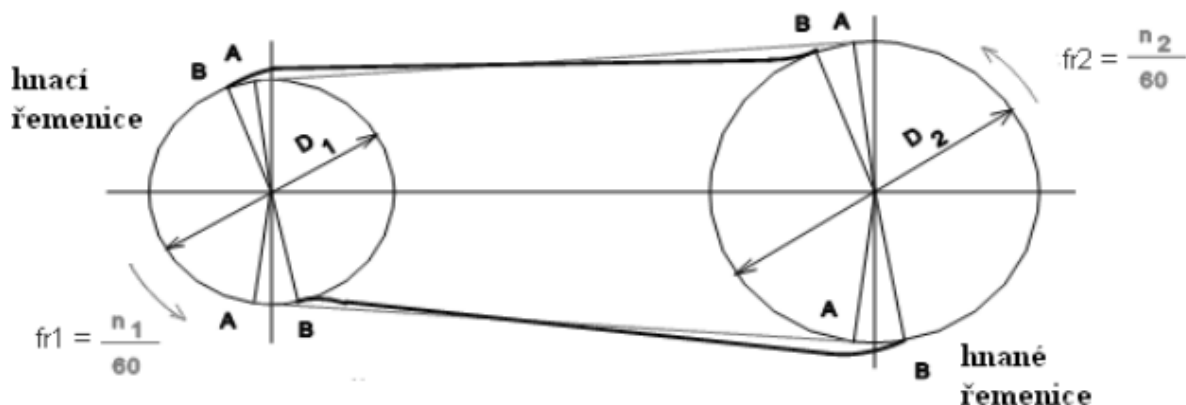
Tab. 2 Rotorové frekvence

	[Hz]
f_{R1L}	25
f_{R1P}	25
f_{R2L}	18,42
f_{R2P}	18,42

2.7.2 Buzení řemenových převodů

Buzení řemenových převodů je jev, který může nastat v důsledku různých faktorů spojených s řemeny používanými k přenosu pohybu a síly mezi hřídeli. Některé z hlavních příčin buzení řemenových převodů zahrnují:

Úchytky příčného průřezu klínového řemene: Nepárované řemeny mohou mít různé úchytky ve svém průřezu, což může vést k nerovnováze a vibracím při provozu stroje. [1]



Obr. 13 Klínový řemen (A – body teor. dotyku, B – body skut. dotyku) [1]

Úchytky příčného průřezu klínového řemene (nepárované řemeny)

$$f_{\check{r}} = f_{R1L} * \frac{\pi * D_1}{L_{\check{r}}} = f_{R2L} * \frac{\pi * D_2}{L_{\check{r}}} = 4,78 \text{ [Hz]} \quad (7)$$

Kde: D_1, D_2 průměr hnací a hnané řemenice
 f_{R1L}, f_{R2L} rotorová frekvence hnací a hnané řemenice
 $L_{\check{r}}$ délka řemenu

2.7.3 Buzení valivých ložisek

Valivá ložiska zajišťují spojení mezi hřídelem a ložiskem prostřednictvím valivých těles, jako jsou kuličky, válečky nebo kuželíky, což umožňuje pohyb s minimálním třením. Tyto ložiska jsou charakterizována svou schopností snášet jak radiální, tak axiální zatížení a mají dlouhou historii použití ve strojírenství. V porovnání s kluznými ložisky mají valivá ložiska menší ztráty tření, menší mezeru a spotřebu maziva, což z nich činí nenáročné na údržbu. [1, 21]

Valivá ložiska mají větší vnější rozměr, jsou citlivější na rázy a mohou být hlučnější. Jejich montáž vyžaduje přesnější tolerance a může být obtížnější. Typické valivé ložisko se skládá z vnějšího (skříňového) kroužku, vnitřního (hřídelového) kroužku, valivých těles (kuliček, válečků, kuželíků nebo soudečků) a klece. [21, 22]

Existuje celá řada důvodů, které mohou způsobit defekt na ložisku, jako je nedostatečné mazání, znečištěné mazivo, přemazání, znečištění, nesprávná montáž atd. Nicméně, mnoho defektů na ložiscích má svůj původ v jiných závadách, jako je nesouosost, nevyváženost, přetížení apod. Tato komplexnost stavu vyžaduje pečlivé posouzení. [1]

Frekvenční analýza může odhalit, zda se jedná o mechanické poškození ložiska, nebo jen o přetížení způsobené nesouosostí, nedostatečným mazáním apod. Vibrace závisí na části valivého ložiska, kde se defekt vyskytuje. Frekvence těchto vibrací, nazývané poruchové frekvence, lze vypočítat buď pomocí známých rozměrů ložiska, nebo pomocí specializovaného softwaru, který vyžaduje znalost typu valivého ložiska. [1]

Frekvence vad vnitřního kroužku f_{Li}

Frekvence vad vnějšího oběžného kroužku f_{Lo}

Frekvence vad valivého tělíska ložiska f_{Lv}

Frekvence vad klece valivého ložiska f_{Lk}

z Počet valivých tělísek

f_r Rotorová frekvence

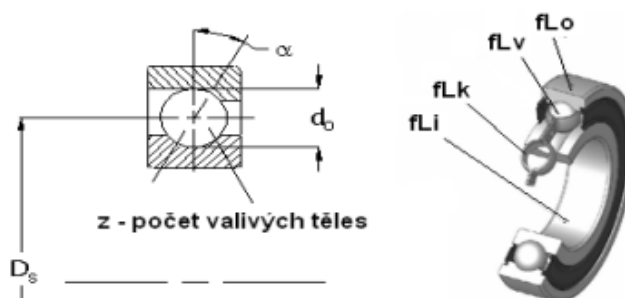
$\varnothing D$ - vnější průměr

$\varnothing d$ - vnitřní průměr

$\varnothing d_s$ - střední průměr

$\varnothing d_o$ - průměr valivých tělísek

α - kontaktní úhel



Obr. 14 Vnitřní rozměry valivého ložiska [1]

α - stykový úhel, který lze určit z hodnoty e

$$\alpha = \arctan \frac{e}{1,5} \quad (8)$$

d_s – střední průměr

$$rd_s = \frac{D+d}{2} \quad (9)$$

d_o – průměr valivého tělesa

$$d_o = q1 * (D - d) \quad (10)$$

z – počet valivých tělísek v jedné řadě

$$z = q2 * \frac{D+d}{d_o} [1] \quad (11)$$

Součinitelé $q1$ a $q2$ jsou uvedeny v tabulce 3 pro jednotlivé typy valivých ložisek.

Tab. 3 Součinitelé q1 a q2 [1]

Druh ložiska	q₁ od - do	q₂ od - do
RADIÁLNÍ LOŽISKA		
Kuličková 1- řada	0.216 – 0.330	0.99 – 0.89
Kuličková dvouřadá	0.200 – 0.280	1.39 – 1.19
Kuličková s kosoúhlým stykem jednořadá	0.250 – 0.320	1.40 – 1.24
Kuličková s kosoúhlým stykem dvouřadá	0.241 – 0.290	1.48 – 1.25
Kuličková naklápěcí	0.217 – 0.238	1.33 – 1.07
Válečková	0.205 – 0.257	1.24 – 0.97
Soudečková	0.259 – 0.289	1.36 – 1.15
Soudečková naklápěcí	0.233 – 0.278	1.40 – 1.15
Kuželíková	0.220 – 0.280	1.60 – 1.30
Jehlová bez klece	0.130 – 0.210	1.57 – 1.57
Jehlová s klecí	0.130 – 0.210	0.78 – 1.00
AXIÁLNÍ LOŽISKA		
Kuličková	0.318 – 0.386	1.42 – 1.19
Naklápěcí soudečková	0.237 – 0.253	1.12 – 1.07
Axiální s kosoúhlým stykem kuličková	0.340 – 0.380	1.41 – 1.23
Válečková	0.270 – 0.350	0.85 – 1.20

Frekvence vad vnitřního kroužku

$$f_{Li} = \frac{z}{2} f_{R2L} \left(1 + \frac{d_o}{d_s} \cos \alpha \right) \quad (12)$$

Frekvence vad klece ložiska

$$f_{Lk} = \frac{z}{2} f_{R2L} \left(1 - \frac{d_o}{d_s} \cos \alpha \right) \quad (13)$$

Frekvence vad vnějšího kroužku

$$f_{Lo} = \frac{z}{2} f_{R2L} \left(1 - \frac{d_o}{d_s} \cos \alpha \right) \quad (14)$$

Frekvence vad valivých těles

$$f_{Lv} = f_{R2L} \frac{d_s}{2d_o} \left[1 - \left(\frac{d_o}{d_s} \cos \alpha \right)^2 \right] [1] \quad (15)$$

Tab. 4 Parametry valivých ložisek obráběcího stroje GOODWAY

Ložisko	D [mm]	d [mm]	d_s [mm]	d_o [mm]	z [-]	α [°]	q1 [-]	q2 [-]
1	140	90	115	11,5	44	61,11	0,230	1,10
2	150	100	125	17,5	36	61,11	0,350	1,30
3	150	100	125	11,5	48	61,11	0,230	1,10

Tab. 5 Výsledky frekvencí vad valivých ložisek

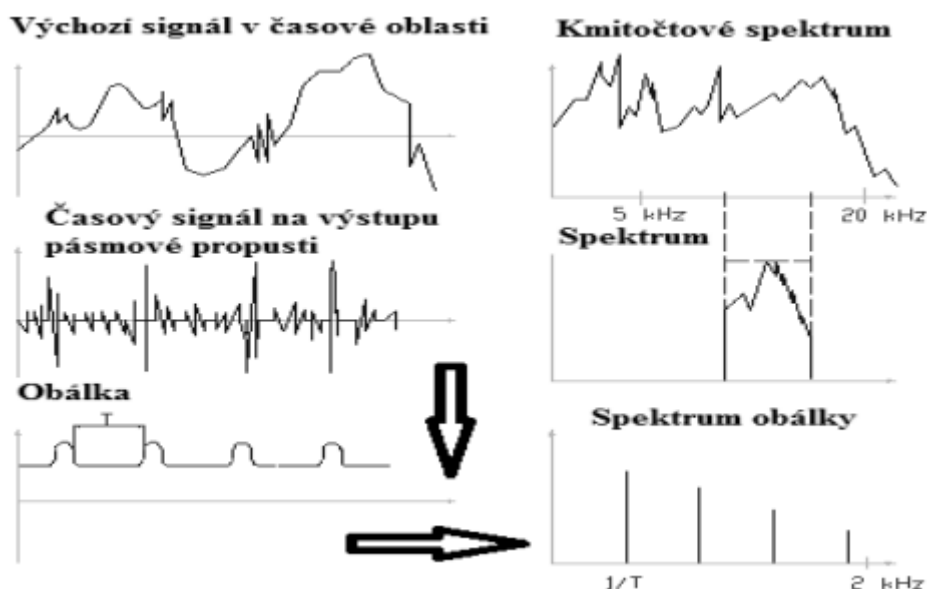
Ložisko	f_{Li} [Hz]	f_{Lo} [Hz]	f_{Lv} [Hz]	f_{Lk} [Hz]
1	424,82	385,66	91,88	8,77
2	353,98	309,13	65,48	8,59
3	461,73	422,43	99,91	8,80

Valivá ložiska jsou měřena pomocí obávkové metody a výsledky jsou znázorněny obávkovou analýzou.

2.7.3.1 Metoda obávkové analýzy

V současnosti existuje mnoho metod diagnostiky valivých ložisek. Pro naše měření bude použita metoda obávkové analýzy.

Princip obávkové analýzy spočívá v tom, že různé části ložiska (vnější a vnitřní kroužek, valivé elementy, klec atd.) mají různé relativní rychlosti vzhledem k hřídeli stroje. Poruchy v těchto komponentech se projevují na specifických frekvencích, které lze identifikovat pomocí analýzy obálky spektra. [1]



Obr. 15 Základní princip detekce a analýzy obálky [1]

3 Experimentální část a diskuse výsledků

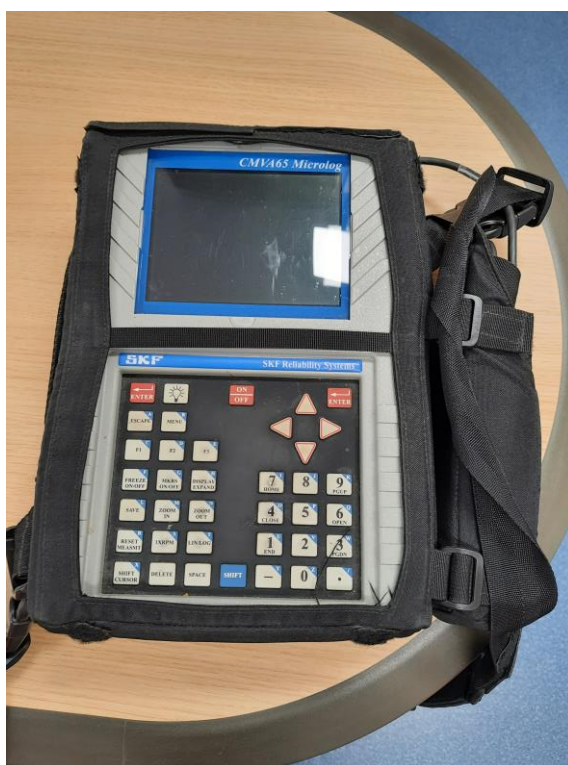
Praktická část bakalářské práce se zaměřuje na využití rešerše provedené v oblasti vibrační a hlukové diagnostiky strojů.

3.1 Vibrační diagnostika

3.1.1 Příprava měření

Samotné měření bylo prováděno na obráběcím stroji GOODWAY model GTS-200. Po uvedení elektromotorů do chodu se obě vřetena roztočila na 1500 min^{-1} .

K měření byl využit analyzátor vibrací Microlog CMVA 65 od společnosti SKF, který měří s chybou v rozmezí $\pm 0,01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (viz. Obr. 16). Tento přístroj je vybaven piezoelektrickým snímačem zrychlení, který se na očištěný povrch připevní pomocí magnetu (Obr. 17). Na obráběcím stroji GOODWAY byly vybrány měřící místa pro měření frekvenčních spekter vibrací (Obr. 12) dle pravidel pro volbu měřících míst dle [1].



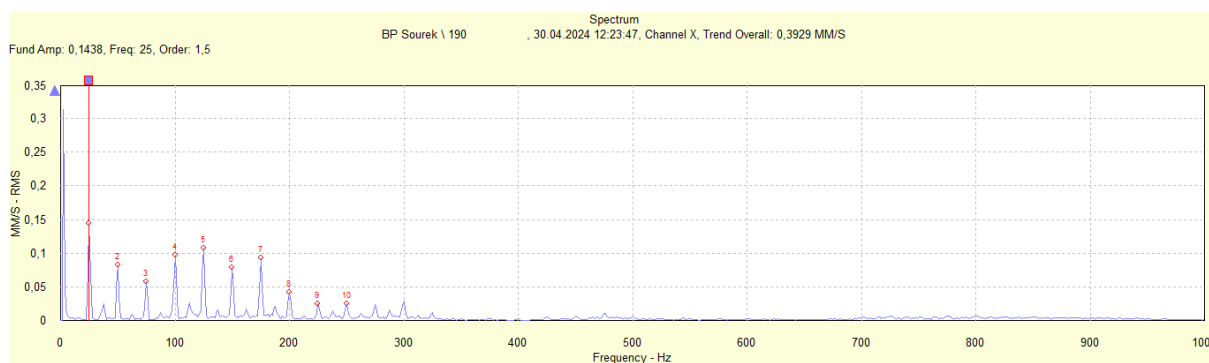
Obr. 16 Analyzátor vibrací SKF Microlog CMVA 65



Obr. 17 Uchycení piezoelektrického snímače v místě měření 3L magnetickým způsobem

3.1.2 Vyhodnocení vibrací

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.5 měření bude vyhodnocováno podle normy

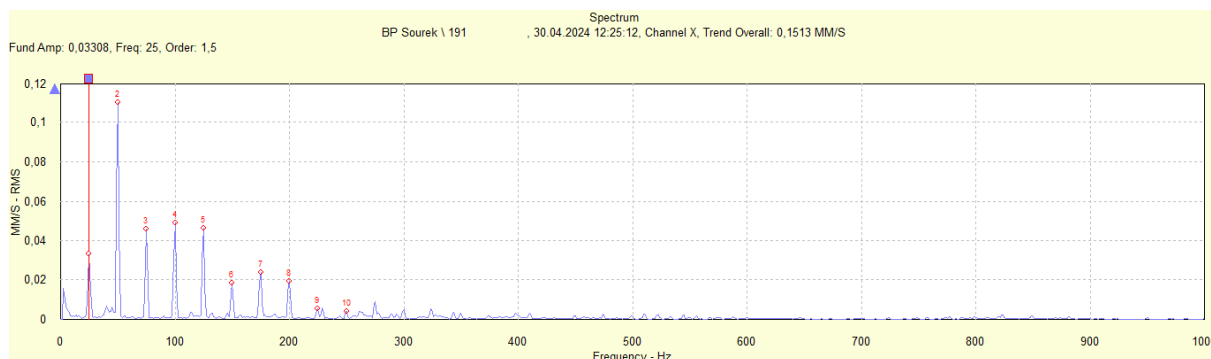


Obr. 18 Frekvenční spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 2L – Levá horní řemenice. RMS = 0,39 mm*s⁻¹.

Na Obr. 18 je patrný projev harmonických a interharmonických složek vibrací způsobených rotorem.

Harmonické složky jsou periodické oscilace nebo vibrace v určitém poměru k základní frekvenci. Tyto harmonické složky jsou typicky násobky základní frekvence a jsou často způsobeny neideálnostmi v konstrukci, jako jsou asymetrie rotoru nebo magnetické nerovnováhy. [2]

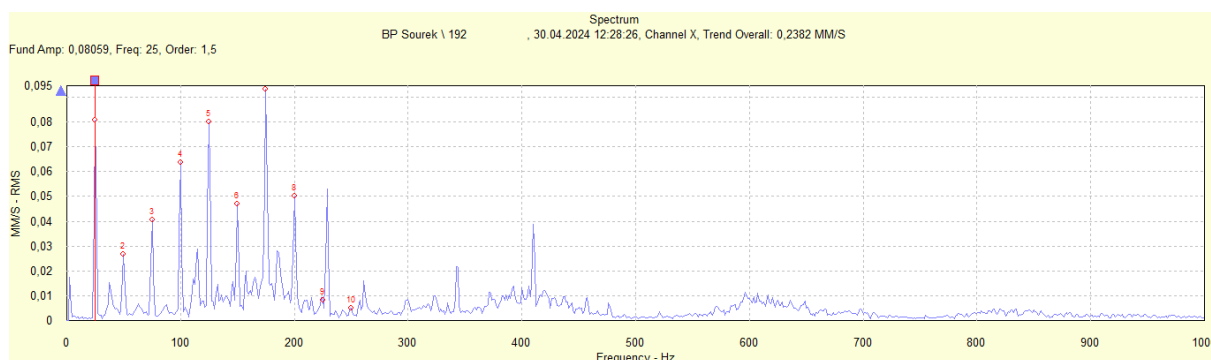
Na druhé straně interharmonické složky jsou frekvence, které nejsou celočíselnými násobky základní frekvence (0,5 fR, 1,5 fR, 2,5 fR, 3,5fR). Tyto složky jsou obvykle způsobeny nepravidelnostmi v chování systému, jako jsou zvětšené vůle nebo nestabilní provozní podmínky. [1, 2]



Obr. 19 Frekvenční spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 3L – Levé vřeteno. RMS = 0,15 mm*s⁻¹.

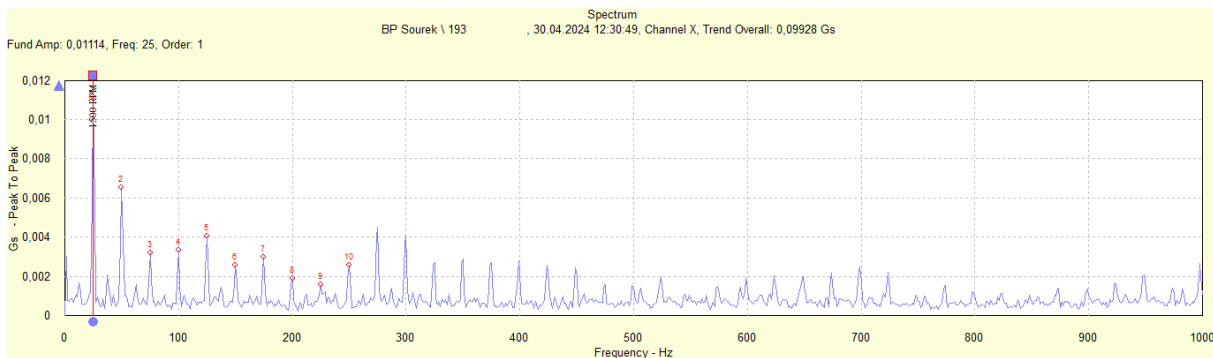
Na Obr. 19 je zobrazen projev harmonických složek vibrací vřetena, což je důsledek jeho rovnoběžné nesouososti, přičemž ve spektru dominuje druhá harmonická otáčková frekvence. [1]

Projev nesouososti naznačuje, že vřeteno nevykazuje dokonalou symetrii nebo rotační stabilitu. Tento jev může být způsoben mechanickými vadami, neideálním nastavením, opotřebením vřetena či jeho ložisek nebo nevyvážením upínací hlavy stroje, která je určená pro velké průměry kulatin nebo ocelových výkovek.



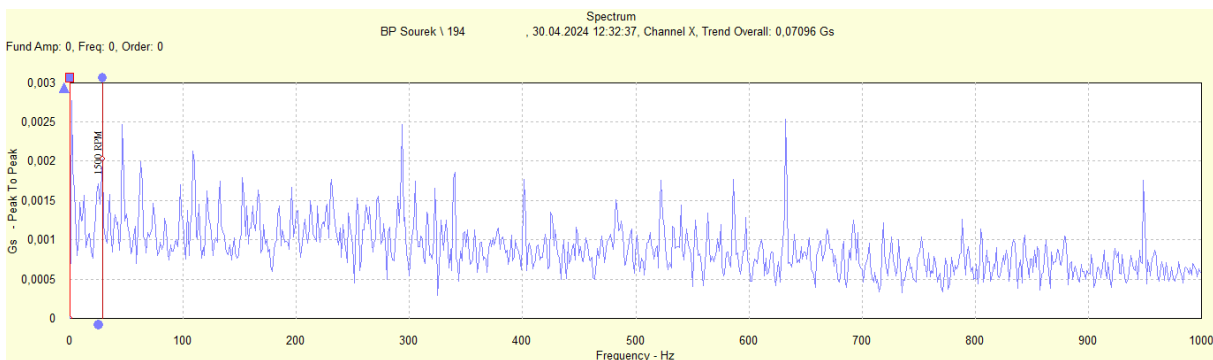
Obr. 20 Frekvenční spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 1L – Levá dolní řemenice. RMS = 0,23 mm*s⁻¹.

Na Obr. 20 je zobrazen projev harmonických složek vibrací od rotoru.

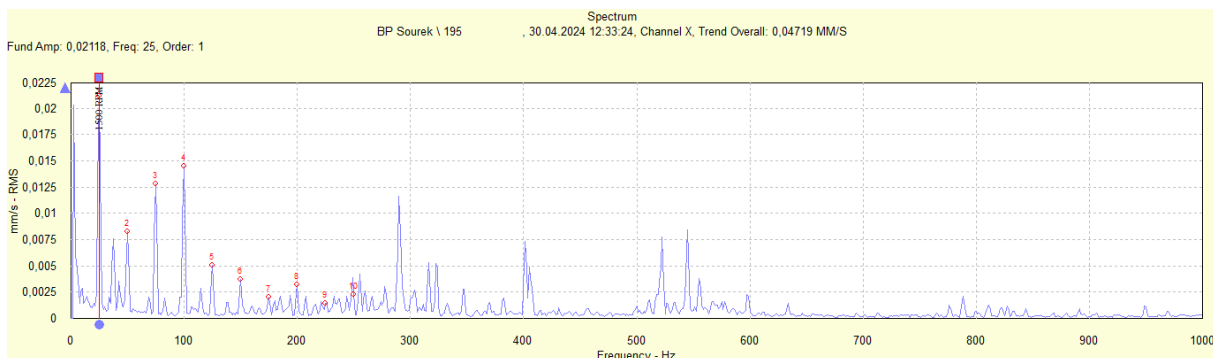


Obr. 21 Obálkové spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 3L – Levé vřeteno. RMS = 0,099 Gs.

Na Obr. 21 je zobrazen projev harmonických a interharmonických složek vibrací od rotoru. Tento projev nezahrnuje žádné frekvence, které by naznačovaly poruchu valivých ložisek. Analyzované vibrace jsou zřejmě ovlivněny faktory jinými než stavem těchto ložisek.



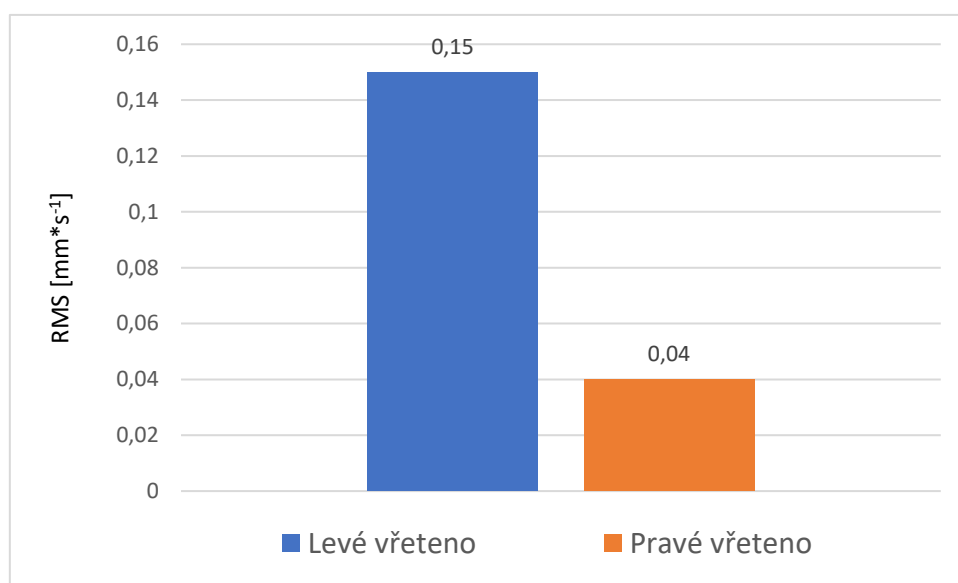
Obr. 22 Obálkové spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 3P – Pravé vřeteno. RMS = 0,07 Gs.



Obr. 23 Frekvenční spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 3P – Pravé vřeteno. RMS = 0,04 mm*s⁻¹.

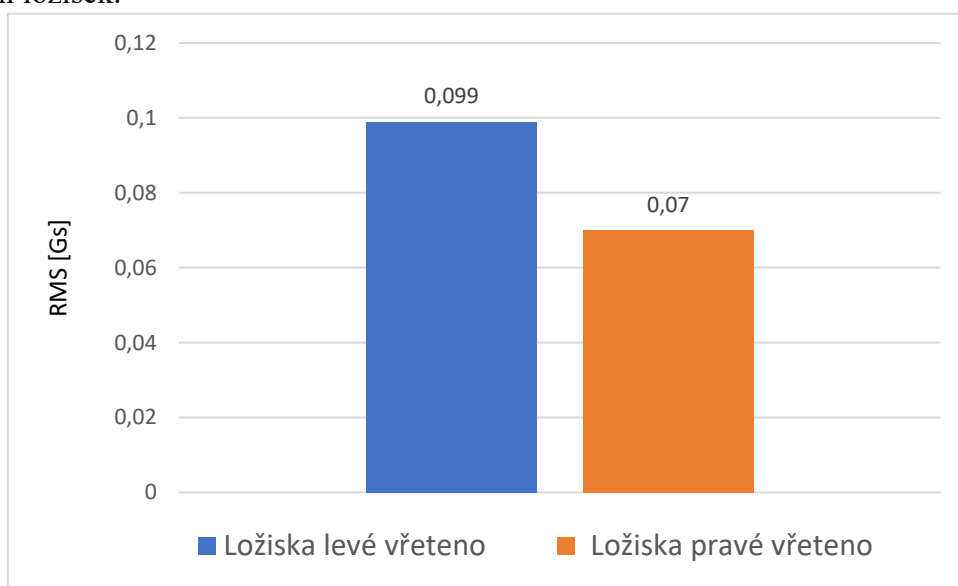
Na Obr. 23 je zobrazen projev harmonických složek vibrací od rotoru.

Celkově lze říci, že stroj GOODWAY GTS – 200, který byl uveden do provozu v roce 2008 je v dobrém stavu a dle normy ČSN ISO 20816 patří do pásma A - ($0,71 - 1,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$). V tomto pásmu mají být za obvyklých podmínek vibrace nově přejímaných strojů. Obě jeho vřetena neprojevují žádné zjevné známky extrémního mechanického poškození. Nicméně je patrné, že levé vřeteno vykazuje projevy nesouososti, jehož hodnota RMS je $0,15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, a to spolu s projevy harmonických a interharmonických složek vibrací způsobených rotorem. V kontrastu k tomu, pravé vřeteno vykazuje nižší hodnotu RMS ve výši $0,04 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (viz. Obr. 24).



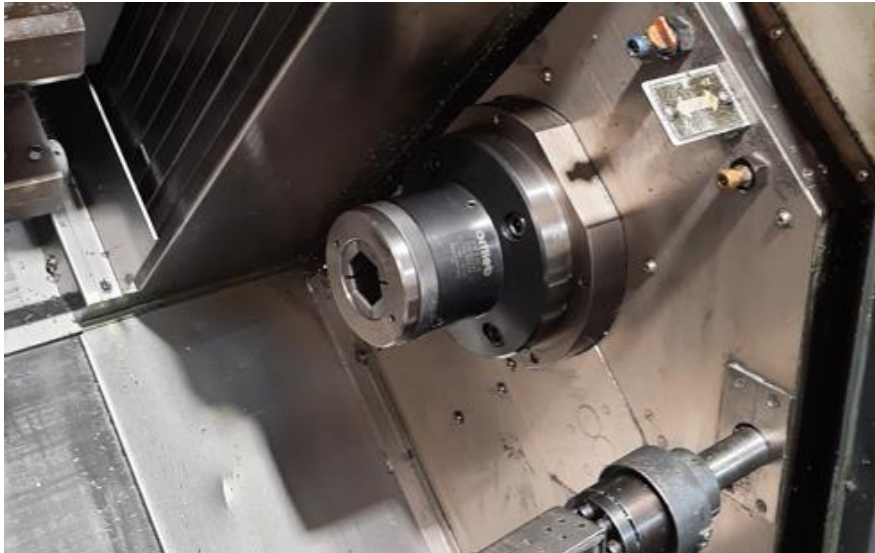
Obr. 24 Porovnání efektivních hodnot rychlosti vibrací levého a pravého vřetena

Také obálkové spektrum ukazuje na horší výsledky pro levé vřeteno, jehož hodnota RMS dosahuje $0,099 \text{ Gs}$, zatímco pro pravé vřeteno je tato hodnota $0,07 \text{ Gs}$. Tento rozdíl není tak markantní (viz. Obr. 25). Obě tato vřetena neprojevují výrazné známky opotřebení či poškození ložisek.



Obr. 25 Porovnání efektivních hodnot zrychlení vibrací valivých ložisek levého a pravého vřetena

Výsledky měření odpovídají předpokladům, že levé vřeteno bude vykazovat výraznější známky opotřebení. Tato očekávaná disproporce je pravděpodobně způsobena větší velikostí upínací hlavy levého vřetena ve srovnání s kleštinami pravého vřetena (viz. Obr. 26 a Obr. 27). U levého vřetena je upnuta celá tyč, což vede k vibracím během rotace. Naopak pravé vřeteno slouží pouze k obrábění již zformovaného obrobku. Dále je důležité vzít v úvahu, že na levém vřetenu se provádějí hrubovací a vrtací operace. Je nutné též zohlednit, že pokud je stroj využíván k obrábění ocelových výkovků, tento proces se obvykle realizuje pouze na levém vřetenu.



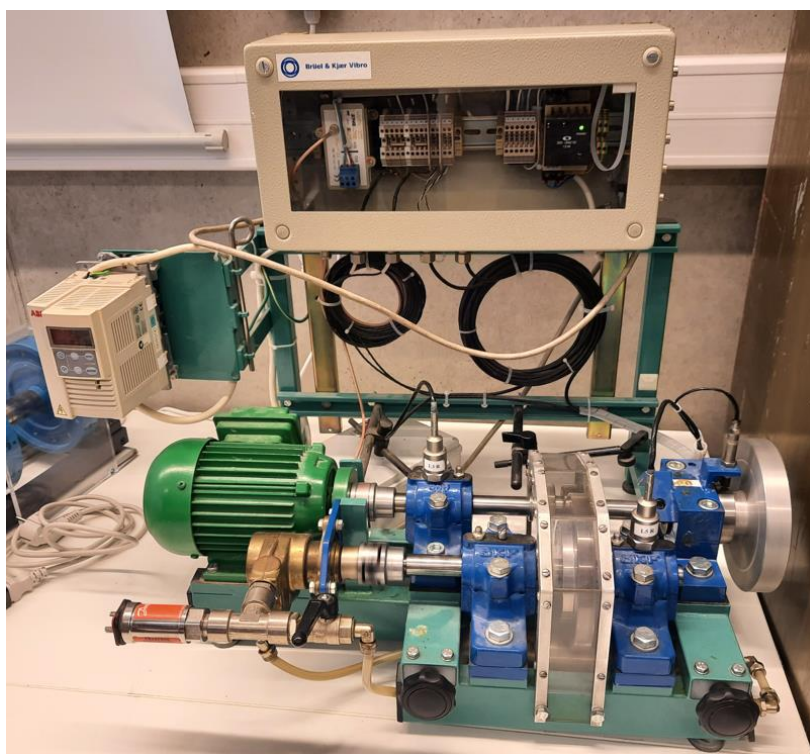
Obr. 26 Kleština pravého vřetena



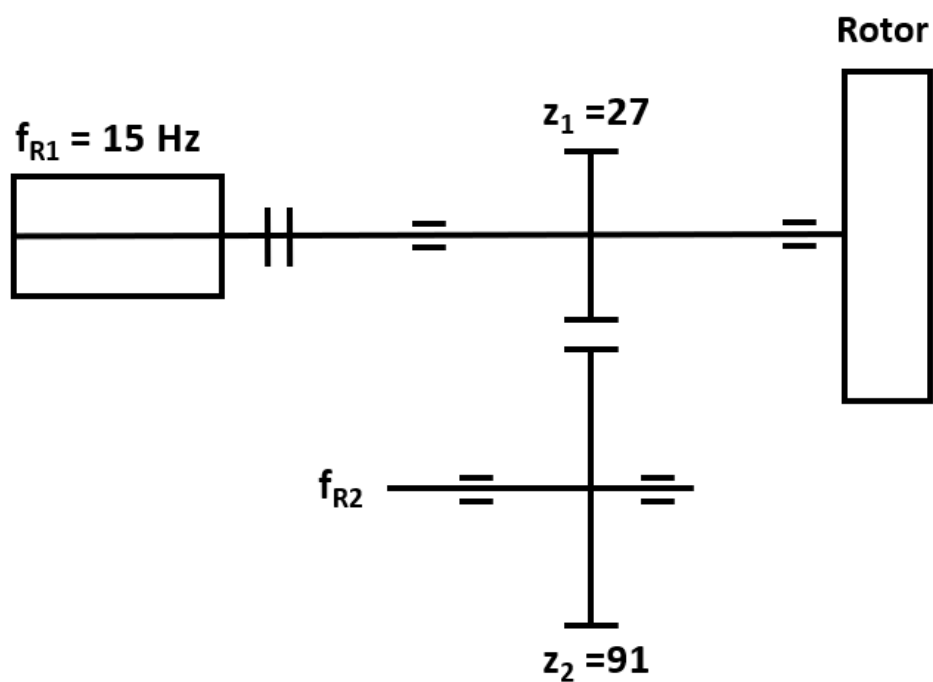
Obr. 27 Univerzální upínací hlava levého vřetena

3.2 Měření hluku

Měření hluku proběhlo na zařízení Stand od společnosti Bruel & Kjaer (viz. Obr. 28) v specializovaném pracovišti, které je určeno pro školení technických pracovníků.



Obr. 28 Zařízení Stand od společnosti Bruel & Kjaer v laboratoři katedry KVM



Obr. 29 Kinematické schéma zařízení Stand od společnosti Bruel & Kjaer

$$f_{R2} = f_{R1} * \frac{z_1}{z_2} = 15 * \frac{27}{91} = 4,45 \text{ Hz} \quad (16)$$

$$f_Z = f_{R1} * z_1 = f_{R2} * z_2 = 15 * 27 = 4,45 * 91 = 405 \text{ Hz} \quad (17)$$

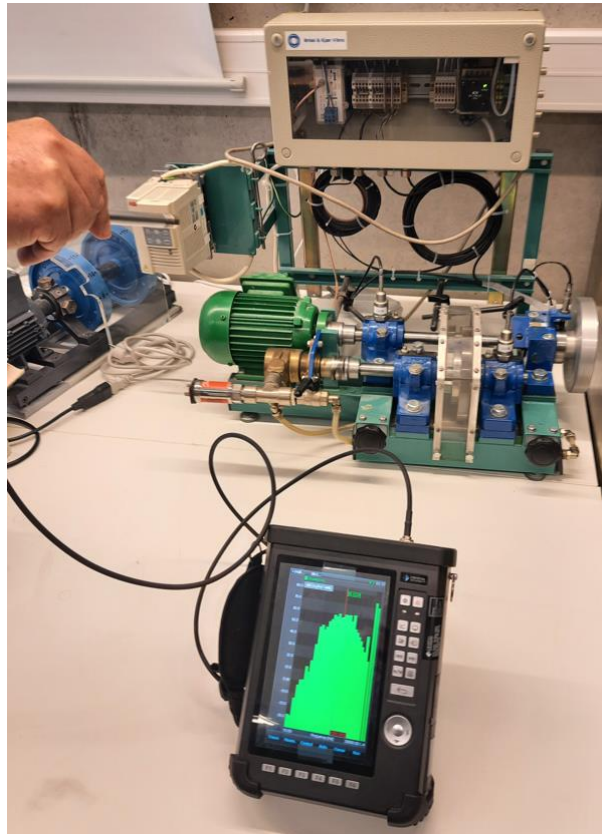
K měření hluku byl použit zvukový analyzátor od firmy CRYSTAL Instruments, který měří s chybou v rozmezí $\pm 0,1$ dB (viz. Obr. 30).



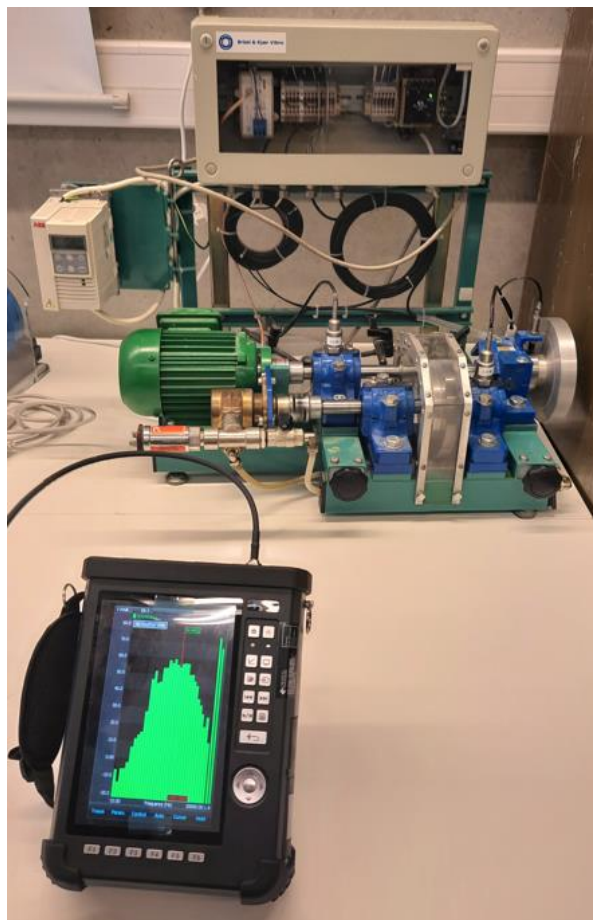
Obr. 30 Zvukový analyzátor od firmy CRYSTAL Instruments

3.2.1 Vyhodnocení hluku

Měření proběhlo ve dvou fázích. V prvním měření byl stroj provozován bez zatížení zubů, zatímco ve druhém měření byl stroj spuštěn s určitým zatížením zubů. Pro obě fáze měření byla frekvence elektrického motoru nastavena na hodnotu 15 Hz.



Obr. 31 Stroj se zatížením zubů

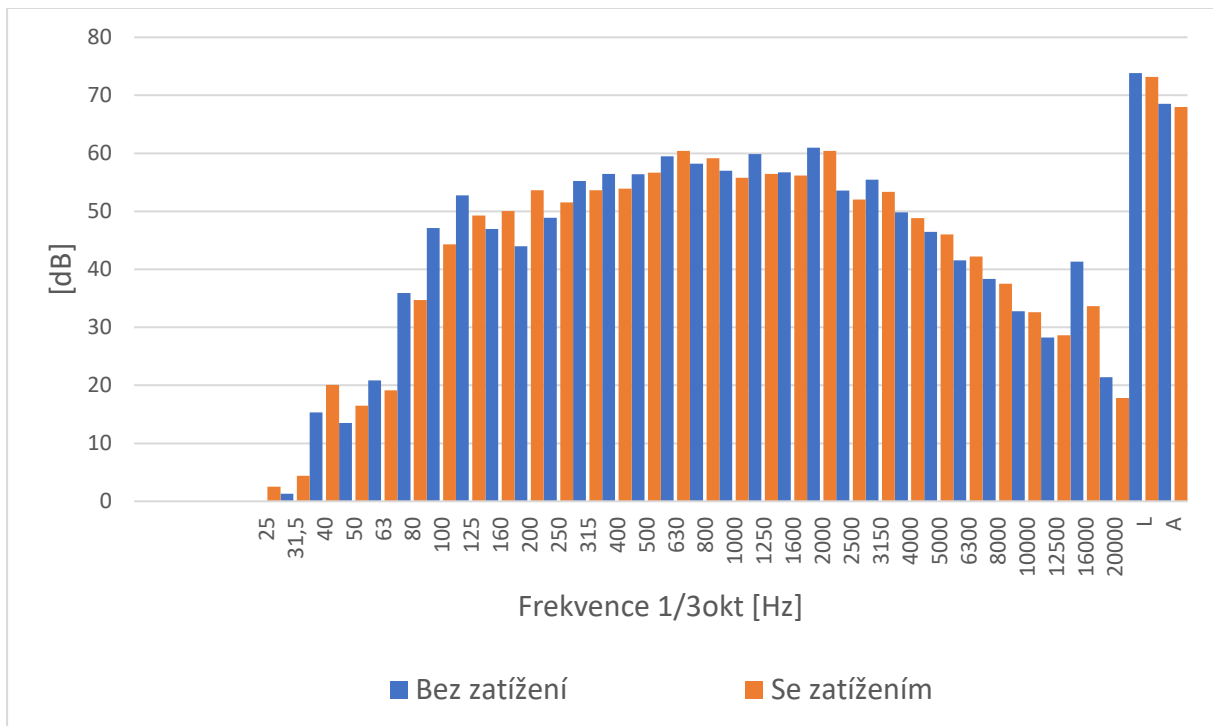


Obr. 32 Stroj bez zatížení zubů

Byla stanovena ekvivalentní hladina hluku lineárním průměrování za dobu 10 s, protože lze předpokládat, že signál byl stabilní.

Tab. 6 Hodnoty naměřené zvukovým analyzátozem

Frekvence [Hz]	Bez zatížení zubů [dB]	Se zatížením zubů [dB]
10	-31,39	-31,25
12,5	-20,17	-21,83
16	-19,76	-3,93
20	-8,10	-0,49
25	-3,14	2,50
31,5	1,33	4,38
40	15,32	20,05
50	13,50	16,49
63	20,87	19,12
80	35,92	34,69
100	47,13	44,31
125	52,77	49,29
160	46,95	50,05
200	44,00	53,65
250	48,87	51,54
315	55,23	53,64
400	56,45	53,89
500	56,38	56,65
630	59,50	60,43
800	58,20	59,15
1000	57,00	55,77
1250	59,87	56,42
1600	56,74	56,17
2000	60,96	60,42
2500	53,59	52,05
3150	55,48	53,34
4000	49,85	48,82
5000	46,45	46,02
6300	41,55	42,20
8000	38,34	37,50
10000	32,78	32,59
12500	28,25	28,62
16000	41,34	33,66
20000	21,41	17,83
L	73,82	73,19
A	68,52	68,00



Obr. 33 Třetinooktávové spektrum

Kde: L celková energie hlukového signálu
 A celková energie hlukového signálu váženo filtrem A

U tohoto zařízení pochází hlavní zdroj hluku od ozubeného převodu s frekvencí 405 Hz a její harmonickými složky. Buzení ozubenými převody může způsobit opotřebení zubů a převodových součástí, a může také ovlivnit účinnost a životnost stroje.[1]

Z Obr. 33 lze vyčíst, že při nižších frekvencích převládá hluk při měření bez zatížení. Nejvyšší hladiny hluku jsou zaznamenány přibližně při frekvencích ozubených kol 400 Hz a její harmonickými složkami f_z , $2 \cdot f_z$, $3 \cdot f_z$, $4 \cdot f_z$, kdy dosahuje hodnoty kolem 60 dB.

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši současného stavu hlukové a vibrační diagnostiky, včetně popisu současné měřicí techniky. Dále bylo provedeno a vyhodnoceno měření na reálném obráběcím stroji GOODWAY GTS-200 a na zařízení Stand od společnosti Bruel & Kjaer v laboratoři katedry vozidel a motorů strojní fakulty TU v Liberci.

V úvodní části bakalářské práce je obecně popsán technický princip bezdemontážní diagnostiky a jednotlivé diagnostické metody, jako například termodiagnostika, tribodiagnostika či elektrobiomechanika.

Další kapitola se podrobněji věnuje popisu vibrodiagnostiky, což je metoda často používaná při diagnostice rotačních strojů, v mém případě měření frekvenčních spekter na obráběcím stroji GOODWAY GTS-200, kde byl piezoelektrický snímač zrychlení upevněn pomocí magnetu. Poté byla popsána hluková diagnostika, její veličiny jako akustické vlnění, akustický tlak a akustická rychlost. Bylo vysvětleno, jak se hluk měří a co je jeho příčinou vzniku ve strojích pomocí měření třetinooktávového spektra.

V navazující kapitole jsou popsány a spočítány budící frekvence hlavních zdrojů vibrací obráběcího stroje GOODWAY GTS-200 jako jsou např. rotorové, řemenové buzení nebo buzení od valivých ložisek. Informace z teoretické části pak byly použity pro měření vibrací obráběcího stroje GOODWAY GTS-200. Při provozních otáčkách $\text{RPM} = 1500 \text{ min}^{-1}$ se měřilo frekvenční a obálkové spektrum obráběcího stroje. Vibrace ložisek byly vyhodnoceny podle metody obálkové analýzy.

Výsledkem měření nebylo zjištěno zásadní poškození valivých ložisek na obou vřetenech. Celková úroveň vibrací levého vřetene stroje ($\text{RMS} = 0,099 \text{ Gs}$) je horší než celková úroveň vibrací pravého vřetene stroje ($\text{RMS} = 0,07 \text{ Gs}$) viz. Obr. 25. Dále bylo zjištěno, že na měřicím místě 2L jsou patrné projevy harmonických a interharmonických složek vibrací způsobených asymetrií a vůlí rotoru nebo magnetické nerovnováhy rotoru. Na levém vřetenu v místě 3L byla zjištěna rovnoběžná nesouosost $\text{RMS} = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, zatímco na pravém vřeteni v místě měření 3P byly zjištěny pouze projevy harmonických složek vibrací od rotoru.

Všeobecně lze říci, že úroveň vibrací stroje GOODWAY GTS – 200, který byl uveden do provozu v roce 2008 je v dobrém technickém stavu a dle normy ČSN ISO 20816 ho můžeme zařadit do pásma A - ($0,71 - 1,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), tedy má parametry nově přejímaného stroje.

Při měření hluku na zařízení Stand od společnosti Bruel & Kjaer byla nastavena hodnota elektromotoru na 15 Hz. Byl proveden pokus měření při zatížení zubů stroje a bez zatížení zubů. Bylo zjištěno že nejvyšší hladiny hluku jsou zaznamenány u obou měření přibližně při frekvencích 400 Hz což odpovídá vypočítané zubových frekvencí, kdy dosahuje hodnoty kolem 56 dB. Celková energie hlukového signálu zařízení Stand je 73,8 dB.

Hluková diagnostika je schopna identifikovat pouze omezenou část příčin vibrací, zaměřuje se zejména na nejvyšší hodnotu frekvence např. od ozubených kol. Na druhou stranu, vibrodiagnostika je schopna identifikovat všechny příčiny vibrací (viz Tab. 1). Z tohoto důvodu by bylo vhodné preferovat vibrodiagnostiku jako primární metodu pro identifikaci zdrojů vibrací, zatímco ostatní metody by měly být použity jako doplňkové.

Doporučuji sledování obráběcích strojů v závodě KNOMI každých 6 měsíců pomocí metod vibrodiagnostiky, abychom včas odhalili závady a poruchy s minimálními a ztrátami.

Použitá literatura

- [1] TOMEH, Elias. *Technical diagnostics: vibration diagnostics of machines and equipment (Technická diagnostika: vibrační diagnostika strojů a zařízení)*. Liberec: Technical University of Liberec, 2015. ISBN 978-80-7494-174-0.
- [2] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 978-80-7300-158-2.
- [3] *Časopis Automa Diagnostika v řídicích systémech* [online]. [vid. 2024-02-29]. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/diagnostika-v-ridicich-systemech-2008_02_36672_5719/
- [4] *Technická diagnostika | MM Průmyslové spektrum*. www.mmspektrum.com [online]. [vid. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technicka-diagnostika>
- [5] *Prediktivní údržba | Deloitte Česká republika. Deloitte Czech Republic* [online]. [vid. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/cz/cs/pages/deloitte-analytics/solutions/predictive-maintenance.html>
- [6] *LTD, Adash. Vibrační diagnostika | Adash* [online]. [vid. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/vibracni-diagnostika/vibracni-diagnostika/>
- [7] *SDC_senzory.pdf* [online]. [vid. 2024-03-21]. Dostupné z: https://home.pf.jcu.cz/~ky-klop/SERYM/SDC/prednasky/pdf/SDC_senzory.pdf
- [8] *SPOLEHLIVOST A TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA - PDF Free Download* [online]. [vid. 2024-03-21]. Dostupné z: https://docplayer.cz/12193120-Spolehlivost-a-technicka-diagnostika.html#google_vignette
- [9] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [10] *VD_JANDOVA.ppt* [online]. [vid. 2024-02-29]. Dostupné z: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3A%2F%2Fwww.cdm.cas.cz%2Fczech%2Fhora%2Fvyuka%2Ftdk%2Fsem2006%2FVD_JANDOVA.ppt%23256%2C1%2CV&wdOrigin=BROWSELINK
- [11] *Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické | Automatizace.HW.cz* [online]. [vid. 2024-04-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [12] *SE, SUITU websites. Způsoby upevnění snímačů vibrací - 2.díl | svmtech.cz* [online]. [vid. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://svmtech.cz/blog/zpusoby-upevneni-snimacu-vibraci-2dil:26/>
- [13] *SE, SUITU websites. Způsoby upevnění snímačů vibrací - 3.díl | svmtech.cz* [online]. [vid. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://svmtech.cz/blog/zpusoby-upevneni-snimacu-vibraci-3dil:27/>
- [14] *SE, SUITU websites. Způsoby upevnění snímačů vibrací - 4.díl | svmtech.cz* [online]. [vid. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://svmtech.cz/blog/zpusoby-upevneni-snimacu-vibraci-4dil:28/>

- [15] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 978-80-01-02246-7.
- [16] *2020-10-01 154149.pdf* [online]. [vid. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://licon.cz/get-File/case:show/id:455919/2020-10-01%2015:41:49.000000>
- [17] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [18] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [vid. 2024-04-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [19] *Akustická diagnostika - ppt stáhnout* [online]. [vid. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12158745/>
- [20] *Hluk v pracovním prostředí. SZÚ | Oficiální web Státního zdravotního ústavu v Praze* [online]. [vid. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://szu.cz/temata-zdravi-a-bezpecnosti/pracovni-prostredi-a-zdravi/factory-pracovniho-prostredi/fyzikalni/hluk-prac/hluk-v-prac-prost/>
- [21] *Ložiska valivá a kluzná. Ložiska Vilim* [online]. [vid. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://loziskavilim.cz/loziska-valiva-a-kluzna/>
- [22] *Jaké existují druhy ložisek a jaký je mezi nimi rozdíl?* [online]. 10. leden 2022 [vid. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://www.mateza.cz/technicke-poradenstvi/aktuality-strojirenstvi-loziska/85-jake-existuji-druhy-lozisek-a-jaky-je-mezi-nimi-rozdil>

Při tvorbě bakalářské práce byl využit program ChatPDF pro vyhledávání textu v souborech PDF (OpenAI, 2022), a pro kontrolu gramatiky byl použit program ChatGPT (OpenAI, 2022).

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Absolutní a relativní kmitání hřídele [7].....	13
Obr. 2 Mechanický model absolutního a relativního snímače vibrací [8]	14
Obr. 3 Vstupy do akcelerometru [1].....	15
Obr. 4 Kinematická dráha (tzv. orbita) rotujícího hřídele. K – kinematická dráha hřídele. (s1, s2 – okamžité hodnoty výchylky, Sk – okamžitá kinematická výchylka hřídele) [1].....	16
Obr. 5 Snímač rychlosti [9].....	17
Obr. 6 Typy akcelerometrů [9].....	19
Obr. 7 Způsoby uchycení akcelerometru [1].....	20
Obr. 8 Interferenční jev [2]	22
Obr. 9 Kapacitní mikrofon [14].....	23
Obr. 10 Vznik, přenos a zachycení hluku v el. strojích [15].....	24
Obr. 11 Obráběcí stroj GOODWAY GTS- 200	26
Obr. 12 Označení měřicích míst.....	27
Obr. 13 Klínový řemen (A – body teor. dotyku, B – body skut. dotyku) [1].....	29
Obr. 14 Vnitřní rozměry valivého ložiska [1]	30
Obr. 15 Základní princip detekce a analýzy obálky [1]	32
Obr. 16 Analyzátor vibrací SKF Microlog CMVA 65.....	33
Obr. 17 Uchycení piezoelektrického snímače v místě měření 3L magnetickým způsobem....	34
Obr. 18 Frekvenční spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 2L – Levá horní řemenice. $RMS = 0,39 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	34
Obr. 19 Frekvenční spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 3L – Levé vřeteno. $RMS = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	35
Obr. 20 Frekvenční spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 1L – Levá dolní řemenice. $RMS = 0,23 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	35
Obr. 21 Obálkové spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 3L – Levé vřeteno. $RMS = 0,099 \text{ Gs}$	36
Obr. 22 Obálkové spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 3P – Pravé vřeteno. $RMS = 0,07 \text{ Gs}$	36
Obr. 23 Frekvenční spektrum obráběcího stroje GOODWAY v místě měření 3P – Pravé vřeteno. $RMS = 0,04 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	36
Obr. 24 Porovnání efektivních hodnot rychlosti vibrací levého a pravého vřetena.....	37
Obr. 25 Porovnání efektivních hodnot zrychlení vibrací valivých ložisek levého a pravého vřetena	37
Obr. 26 Kleština pravého vřetena.....	38
Obr. 27 Univerzální upínací hlava levého vřetena	38
Obr. 28 Zařízení Stand od společnosti Bruel & Kjaer v laboratoři katedry KVM	39
Obr. 29 Kinematické schéma zařízení Stand od společnosti Bruel & Kjaer.....	39
Obr. 30 Zvukový analyzátor od firmy CRYSTAL Instruments.....	40
Obr. 31 Stroj se zatížením zubů	41
Obr. 32 Stroj bez zatížení zubů	41
Obr. 33 Třetinooktávové spektrum	43

Tab. 1 Zdroje vibrací a jejich identifikace různými metody technické diagnostiky [1]	12
Tab. 2 Rotorové frekvence	28
Tab. 3 Součinitelé q_1 a q_2 [1]	31
Tab. 4 Parametry valivých ložisek obráběcího stroje GOODWAY	32
Tab. 5 Výsledky frekvencí vad valivých ložisek	32
Tab. 6 Hodnoty naměřené zvukovým analyzátozem.....	42