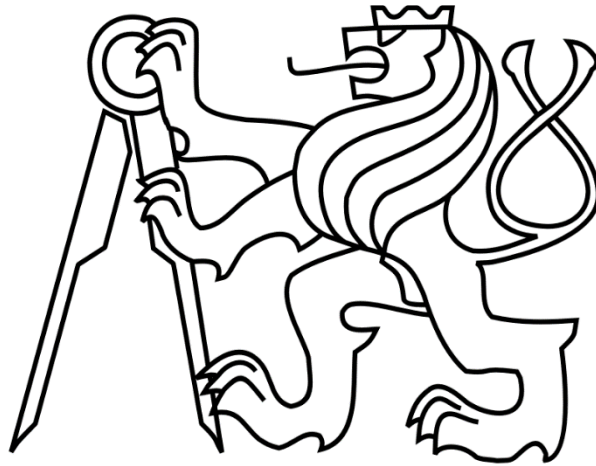


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

Zpracování trendovacího diagnostického měření portálového  
obráběcího centra MCU 700 VT-5X

2021

Jakub Ullrich

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ullrich** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **483943**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Zpracování trendovacího diagnostického měření portálového obráběcího centra MCU 700 VT-5X**

Název bakalářské práce anglicky:

**Processing of trending diagnostic measurement of the gantry machining center MCU 700 VT-5X**

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Vibrace na vřetení stroje jsou projevem charakterizujícím stav vřetena, zejména jeho možného poškození. Pro určení stavu vřetena se vibrace dlouhodobě monitorují a vyhodnocuje se změna naměřených hodnot v čase. Trendování naměřených hodnot je tedy základním diagnostickým nástrojem. Cílem práce je zpracování a vyhodnocení dat z reálného stroje MCU 700 VT-5X RAPID, která jsou již naměřena. Pro zpracování naměřených dat bude student trendovat mohutnost kmitání, případně vybraných spektrálních složek. Osnova práce: Popis teoretického poznání v oblasti. Převzetí naměřených dat. Zpracování vlastních i poskytnutých naměřených dat a jejich vyhodnocení. Rozsah grafické části: 0 stran; Rozsah textové části: 40-60 stran.

Seznam doporučené literatury:

[1] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Miroslav Janota, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS**

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

**Ing. David Burian, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS**

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Miroslav Janota, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém 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 25.7.2021

.....

podpis

## **Poděkování**

Úvodem bych rád poděkoval Ing. Miroslavu Janotovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky, ochotu a čas, který mi byl při psaní této práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat odbornému konzultantovi Ing. Davidu Burianovi, Ph.D. a konstruktérskému týmu KOVOSVIT MAS Machine Tools, a.s. za spojení s výrobcem vřetene GF Machining Solutions, AG, který se poté ochotně podělil o technické informace. Nakonec také děkuji své rodině za podporu a trpělivost během celého studia.

## ANOTACE

Autor:	Jakub Ullrich
Název BP:	Zpracování trendovacího diagnostického měření portálového obráběcího centra MCU 700 VT-5X
Rozsah práce:	66 str., 51 obr., 10, tab.
Školní rok vyhotovení:	2021
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Výrobní stroje a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D.
Konzultant:	Ing. David Burian, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS, Ú12135
Využití:	Trendování je základní diagnostický nástroj umožňující posouzení technického stavu stroje.
Klíčová slova:	trendování, prediktivní údržba, technická diagnostika, vibrodiagnostika, měření vibrací, kondice ložisek
Anotace:	Cílem této práce bylo zpracovat trendovací měření a na jeho základě vyhodnotit technický stav stroje. Teoretická část práce se zabývá obecným úvodem do problematiky. Praktická část obsahuje návrh vhodných deskriptorů, postup při tvorbě skriptu pro zpracování naměřených dat a samotné vyhodnocení technického stavu stroje.

## ANNOTATION

Author:	Jakub Ullrich
Title of bachelor dissertation:	Processing of trending diagnostic measurement of the gantry machining center MCU 700 VT-5X
Extent:	66 p., 51 fig., 10, tab.
Academic year:	2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D.
Consultant:	Ing. David Burian, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU FME, D12135
Application:	Trending is a basic diagnostic tool for evaluation of the technical condition of the machine.
Key words:	trend analysis, predictive maintenance, technical diagnostics, vibrodiagnostics, bearing condition
Annotation:	The aim of this thesis were to evaluate technical condition of the machine on the basis of trending. Trends were created from processed data of measured vibration. The theoretical part deals with general introduction to the topic. The practical part contains the selection of suitable descriptors, the process of creating a script for data processing and evaluation of technical condition of the machine.

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
BPFI	frekvence odpovídající závadě vnitřního kroužku
BPFO	frekvence odpovídající závadě vnějšího kroužku
BSF	frekvence odpovídající závadě valivého tělíska
DAQ	data acquisition – převod analogového signálu snímačů na digitální
FFT	rychlá Fourierova transformace
FTF	frekvence odpovídající závadě klece ložiska
ICP	IEPE snímače patentované firmou PCB Piezotronics, Inc., (Integrated Circuit-Piezoelectric)
IEPE	označení piezoelektrického snímače s převodníkem signálu piezoelektrického materiálu na napětí (Integrated Electronics Piezo-Electric)
MEMS	mikroelektronika s integrovanými snímači, převodníky a dalšími elektronickými nebo mechanickými komponenty (Micro-Electro-Mechanical Systems)
RMS	efektivní hodnota dané veličiny (root mean square)

## Seznam použitých veličin a symbolů

Značka	Veličina	Popis
$a$	$\text{m/s}^2$	zrychlení
$A_a$	$\text{m/s}^2$	amplituda zrychlení vibrací
$A_v$	$\text{m/s}$	amplituda rychlosti vibrací
$A_x$	$\text{m}$	amplituda výchylky vibrací
$BD$	$\text{m}$	průměr válečku nebo kuličky
$e$	1	počet valivých elementů v ložisku
$f$	$\text{Hz}$	frekvence
$f_{BPFI}$	$\text{Hz}$	frekvence závady vnitřního kroužku
$f_{BPFO}$	$\text{Hz}$	frekvence závady vnějšího kroužku
$f_{BSF}$	$\text{Hz}$	frekvence závady valivého tělíska
$f_{FTF}$	$\text{Hz}$	frekvence závady klece
$f_r$	1	frekvence daná relativními otáčkami
$n$	$\text{min}^{-1}$	otáčky
$N$	1	maximální počet vzorků
$n_{max}$	$\text{min}^{-1}$	největší otáčky vřetene
$n_{min}$	$\text{min}^{-1}$	minimální otáčky vřetene
$PD$	$\text{m}$	roztečný průměr
$q$	$\text{min}^{-1}$	hodnota rozdílu mezi sousedními otáčkami
$v$	$\text{m/s}$	rychlost
$v_{ef}$	$\text{m/s}$	RMS rychlosti
$x$	$\text{m}$	výchylka vibrací
$\beta$	$^\circ$	úhel dotyku
$\varphi$	$^\circ$	fázový posun
$\omega$	$\text{rad/s}$	úhlová rychlost



# Obsah

Seznam použitých zkratk	7
Seznam použitých veličin a symbolů	8
Obsah	9
1 Úvod	11
2 Cíl práce	12
3 Řešená problematika	13
3.1 Trendování	13
3.2 Vibrodiagnostika	13
3.2.1 Definice pojmů pro technickou diagnostiku [2]	14
3.2.2 Vibrace	15
3.2.3 Parametry vibrací	17
3.2.4 Veličiny vibrací	17
3.3 Normy	19
3.3.1 ČSN 20 0065	19
3.3.2 ISO 10 816-3	20
3.3.3 Alternativní normy	22
3.4 Diagnostické přístroje a systémy	22
3.4.1 Snímače	22
3.4.2 Diagnostické přístroje nabízené na trhu	24
3.4.3 Diagnostické systémy	29
3.5 Zpracování signálu	30
3.5.1 Mohutnost vibrací	30
3.5.2 Převod časového signálu do frekvenční oblasti	30
3.5.3 Frekvenční oblast	31
3.5.4 Defekty na kluzných nebo valivých ložiskách	33
4 Vlastní řešení	35
4.1 Popis měřeného stroje	35
4.2 Popis měření	36
4.2.1 Použité měřicí přístroje a snímače	37

4.2.2	Uspořádání měření.....	38
4.2.3	Podmínky měření .....	39
4.3	Návrh diagnostických deskriptorů .....	40
4.3.1	Mohutnost vibrací .....	40
4.3.2	RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci .....	40
4.3.3	RMS rychlosti vibrací při poruchové frekvenci ložisek.....	41
4.4	Zpracování dat do formy diagnostických deskriptorů .....	42
4.4.1	Vstupní data .....	43
4.4.2	Výpočet mohutnosti vibrací a RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci.....	43
4.4.3	Výpočet RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích ložisek ....	47
4.4.4	Ukládání dat .....	47
4.4.5	Zobrazení trendu .....	48
4.5	Vyhodnocení naměřených dat.....	49
4.5.1	Vyhodnocení mohutnosti vibrací dle ČSN 20 0065.....	49
4.5.2	Trend mohutnosti vibrací.....	50
4.5.3	Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci.....	55
4.5.4	Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích ložisek.....	57
4.6	Zhodnocení experimentu.....	59
4.6.1	Shrnutí dosavadních zjištění .....	59
4.6.2	Vyhodnocení technického stavu stroje.....	59
5	Závěr.....	60
	Seznamy .....	61
	Seznam použité literatury .....	61
	Seznam obrázků .....	62
	Seznam tabulek.....	65
	Seznam elektronických příloh .....	65
	Seznam použitých software .....	66

# 1 Úvod

V technické praxi je snaha držet stroj dlouhodobě v dobré kondici, tedy v technicky bezvadném stavu. K tomu je zapotřebí znát podrobný technický stav stroje, aby bylo možné provést včasnou údržbu a vyhnout se tak případným budoucím závadám a s nimi spojeným komplikacím. Vyhodnocením technického stavu stroje se zabývá obor technická diagnostika. Pro samotné vyhodnocení jsou potřeba informace o stroji, které přímo souvisí s jeho technickým stavem. Velmi výraznou veličinou, která je přímo ovlivněna stavem stroje jsou vibrace [11]. Vibracemi se zabývá podobor technické diagnostiky, který se nazývá vibrodiagnostika. Vibrodiagnostikou se rozumí zjišťování technického stavu stroje z analýzy naměřených vibrací. Tímto způsobem se nejčastěji diagnostikují ložiska a převodovky.

Při dlouhodobém měření vibrací a pozorování vývoje jejich hodnot v čase, můžeme sledovat nežádoucí zhoršení stavu stroje. Tento nástroj technické diagnostiky se nazývá trendovací diagnostika neboli trendování. Jedná se o jeden ze základních nástrojů prediktivní údržby, jejíž cíl je včasné předpovězení závady a správné načasování údržby. Principem je tedy dlouhodobé sledování měřených veličin v čase a jejich změn. Díky tomu je možné sledovat např. vývoj potencionální závady od jejího počátku, i když se viditelně zatím neprojevuje. Cílem této práce je zpracování naměřených dat vibrací, navrhnutí vhodných deskriptorů, které lze dlouhodobě a efektivně sledovat a sestavení jednotlivých trendů, na jejichž základě provést vyhodnocení technického stavu obráběcího centra MCU 700VT-5X.



Obrázek 1.1 - Obráběcí centrum MCU 700VT-5X - výrobce KOVOSVIT MAS [20]

## 2 Cíl práce

Obsahem práce je vypracování rešerše pro získání nutných teoretických znalostí, získání povědomí o dané problematice, nastudování norem souvisejících s vibrační diagnostikou a porovnání parametrů diagnostických přístrojů, které jsou uvedeny na trhu. Na základě rešerše je nutné stanovit jeden, případně více diagnostických deskriptorů, tedy parametrů, do kterého budou naměřená data zpracována a to tak, aby z nich bylo možné provést vyhodnocení stavu stroje.

Měření probíhá od konce roku 2019, část dat byla již naměřena a předána. Měření probíhalo nadále i v průběhu samotného vypracování. Následně byl vypracován skript v programu GNU Octave, který naměřená data zpracuje a zpracované navržené deskriptory ukládá tak, aby z nich bylo možné sestavit trend.

Poslední fází této práce je zkoumání zpracovaných hodnot a trendů, na jejichž základě se provede vyhodnocení technického stavu obráběcího centra.

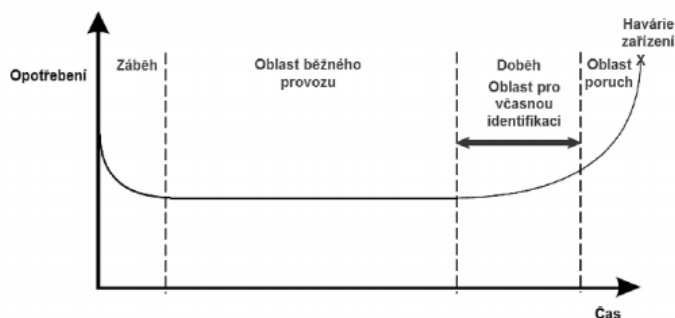
## 3 Řešená problematika

V následujících kapitolách je shrnuta teorie potřebná k základnímu porozumění problematice trendování, vibrodiagnostiky a dalších souvisejících témat.

### 3.1 Trendování

Tato práce se zabývá trendovací diagnostikou. Jak bylo řečeno v úvodu, trendováním je v této práci myšleno dlouhodobé sledování naměřených hodnot vibrací.

Bez údržby je nemožné, aby se technický stav dlouhodobě nezhoršoval, očekává se tedy, že v ideálním případě budou naměřené hodnoty dlouhodobě konstantní. Při výskytu závady dochází ke zvýšení hodnot a v té chvíli se začíná tvořit vzrůstající trend.



Obrázek 3.1 - Průběh opotřebení [10]

V prediktivní údržbě se pomocí vytyčení závislosti naměřených hodnot na čase snažíme o včasné zjištění a identifikaci závady. Po záběhu stroje měříme hodnoty vibrací, ve kterých je stroj v pořádku, bez závad. Tyto hodnoty vibrací se použijí jako referenční hladina. Vzrůstající trend odchylující se od referenčních hladiny signalizuje možnou závadu.

Závada musí být následně identifikována a na základě jejího vyhodnocení musí být provedeny potřebné další kroky a opatření. Průběh opotřebení je vyobrazen na obrázku 3.1.

Samotným zpracováním a měřením vibrací se zabývá vibrodiagnostika.

### 3.2 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika je podobor technické diagnostiky zabývající se vibracemi. Cílem je získání povědomí o stavu stroje z naměřených hodnot vibrací a jejich následnou

analýzou. Vibrodiagnostika je pro rotační stroje nejběžnější metodou pro získání informací o technickém stavu stroje. Důvodem je, že z naměřených vibrací je možné identifikovat široké spektrum závad, od poruchy ložiska až po vyvážení součásti.

### 3.2.1 Definice pojmů pro technickou diagnostiku [2]

**Diagnostika** – vyhodnocení okamžitého technického stavu objektu. Z hlediska názvosloví spolehlivosti se jedná o vyhodnocení provozuschopnosti za daných podmínek. Základními úkoly diagnostiky jsou:

- a) Detekce vady nebo poruchy – identifikace vady, úplné nebo částečné poruchy
- b) Lokalizace vady nebo poruchy – určení místa vady nebo poruchy

**Technická diagnostika** – obor zabývající se stanovením technického stavu objektu pomocí bezdemontážních a nedestruktivních metod a možnými prostředky.

**Porucha** – jev způsobující ukončení provozuschopnosti objektu.

**Provozuschopnost** – schopnost objektu vykonávat stanovené funkce dle technických podmínek.

**Funkčnost** – schopnost objektu vykonávat konkrétní funkci dle daných technických podmínek. Lze tedy mít funkční, ale neprovozuschopný objekt.

**Vada** nebo **závada** – stav, při kterém dochází k postupnému odchylování hodnot jednoho nebo více měřených parametrů bez příčinné souvislosti, zároveň ale nejsou překročeny předepsané meze v technických podmínkách.

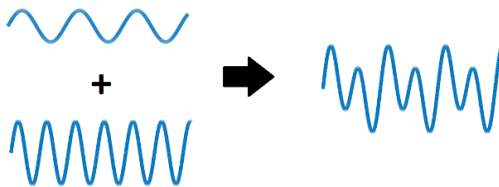
**Mohutnost vibrací** – efektivní hodnota rychlosti vibrací v rozmezí 10-1000 Hz dle ČSN 20 0065.

**Harmonické vibrace** - periodické vibrace obsahující pouze jedinou frekvenci. Pro harmonické vibrace stačí tedy stanovit jedinou z určujících veličin (výchylku, rychlost nebo zrychlení) a zbyvající členy lze dopočítat. Harmonické vibrace jsou dány předpisem:

$$x = A_x \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.1)$$

**Složené vibrace** - vibrace dané superpozicí různých časových signálů, mohou být jak periodické tak neperiodické. Periodické složené vibrace vzniknou součtem jednotlivých

harmonických vibrací, jejichž periody jsou v poměrech daných racionálními čísly. Je-li jediný poměr složek složených vibrací iracionální, vibrace jsou neperiodické. Na obrázku 3.2 je vyobrazen složený signál ze dvou harmonických signálů o různé frekvenci.



Obrázek 3.2 - Složený signál z dvou harmonických signálů

### 3.2.2 Vibrace

Vibrace (ekvivalent mechanického kmitání) je dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy. Kmitání tělesa je důsledek působení budící síly (může působit jak externě, tak interně). V případě nulového působení sil na objekt se těleso ustálí v rovnovážné poloze. [2]

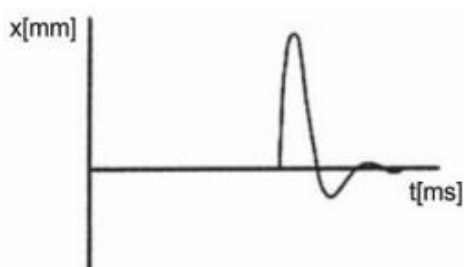
Vibrace jsou u strojů buzeny dynamickými rázy způsobenými výrobní nepřesností jednotlivých součástí, valením a třením mezi jednotlivými komponenty mechanismu, nevyvážeností rotačních a posuvných součástí a provozní vůlí. Vznikají při provozu strojů a většinou se jedná o nežádoucí jev, kterému se nelze vyvarovat. [1]

Vibrace se tedy vyskytují jak u strojů s rotačním, tak rovinným pohybem. Rovinný pohyb u průmyslových strojů je téměř vždy tvořen převodem rotačního pohybu vycházejícího z elektromotoru, takže se zde setkávají oba případy.

Vibrace (kmitání) můžeme také rozdělit na tři základní druhy dle působení budící síly. Těmito základními druhy kmitání je kmitání volné, kmitání buzené a kmitání samobuzené.

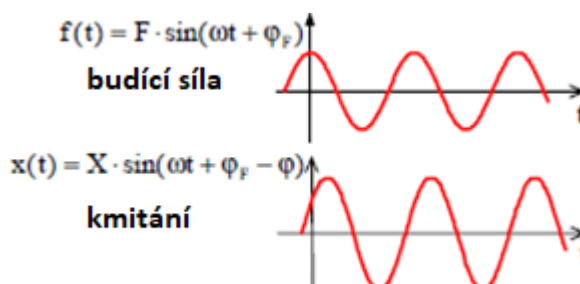
O volné kmitání se jedná v případě vychýlení soustavy z rovnovážné polohy vnější silou, která následně na soustavu přestává působit. Vychýlení z rovnováhy nastane, pokud udělíme tělesu výchylku nebo rychlost, popř. obojí. Vnější silou (vybuzením) je myšlen např. mechanický ráz. [9]

Ráz je kmit, jehož výskyt je v určitém časovém úseku ojedinělý a je rychle utlumen (viz obrázek 3.3). Je buzen impulsem síly, která má velmi krátké trvání a následně mizí. Vybuzený kmit dosáhne své maximální výchylky a následně je vlivem působení jiných vnějších i vnitřních sil utlumen. [8]



Obrázek 3.3 - Ráz [8]

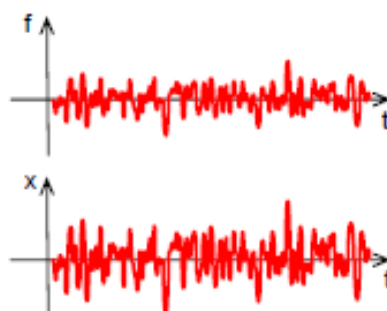
Buzené (též vynucené) kmitání vzniká vyvoláním pohybu, který je následně udržován účinkem budících sil (vnitřních nebo vnějších) nebo kinematickým buzením. Typickým představitelem buzeného kmitání je ustálené buzené kmitání, vyvolané účinkem periodických sil (viz obr. 3.4). [9]



Obrázek 3.4 - Vynucené kmitání za působení harmonické budící síly [11]

Dle průběhu buzení můžeme buzené kmitání rozdělit [2][9]:

- Deterministické buzení – velikost budící síly v čase odpovídá funkčnímu předpisu (nejčastěji periodický a kvaziperiodický předpis)
- Stochastické (náhodné) buzení – náhodné, nepředvídatelné, viz obr. 3.5

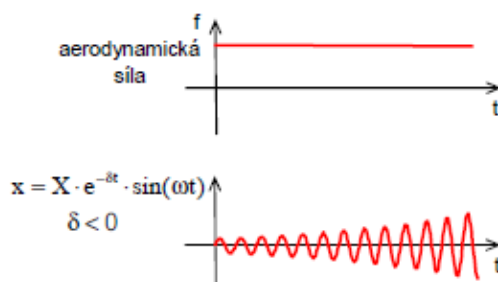


Obrázek 3.5 - Stochastické (náhodné) buzení [11]

Samobuzené kmitání ke svému vybuzení potřebuje zdroj energie, který sám o sobě nemá oscilační vlastnosti, ze kterého si soustava energii sama odebírá. Samobuzené kmitání tedy nepotřebuje ke svému vzniku vnější působící sílu. Samobuzené kmitání



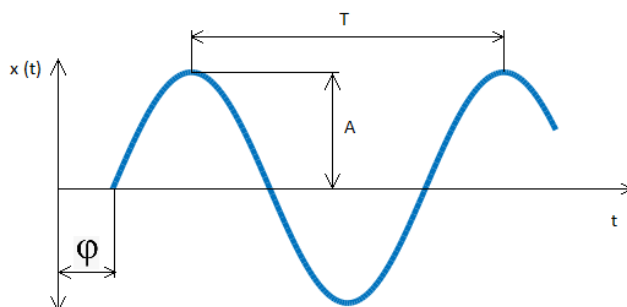
zanikne spolu s utlumením zdroje energie. Zdroj energie může být například konstantní proud vzduchu (viz obr. 3.6) či vody. [9]



Obrázek 3.6 - Samobuzené kmitání - konstantní proud vzduchu [11]

### 3.2.3 Parametry vibrací

- Amplituda – maximální hodnota určující veličiny
- Frekvence (kmitočet) – převrácená hodnota periody, počet period za sekundu
- Perioda – nejkratší doba, za kterou se hodnota periodické veličiny (průběh vibrací) pravidelně opakuje
- Fáze (též fázový posun) – posun dvou periodických veličin v rozmezí 0 až  $2\pi$



Obrázek 3.7 - Parametry vibrací

### 3.2.4 Veličiny vibrací

Při uvažování vibrací vzniklých při rotačním pohybu stroje za konstantních otáček je časový průběh periodický. Při uvažování pouze jedné vibrační složky, tedy harmonických vibrací, se získá sinusový průběh, ze kterého lze mezi sebou jednotlivé veličiny dopočítat. Těmito veličinami jsou výchylka, rychlost a zrychlení.

**Výchylka** – Měření výchylky není časté, protože platí obecné pravidlo, že s narůstajícími frekvencemi se výchylka snižuje. Uplatnění je tedy vhodné pro nízkofrekvenční děje (např. měření vůlí). [7]

Harmonický signál odchylky lze zapsat jako obecnou rovnici sinusoidy:

$$x(t) = A_x \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (3.2)$$

**Rychlost** – Rychlost je definována jako změny výchylky za čas. RMS rychlosti je nejpoužívanější hodnota pro měření závažnosti vibrací. To je dáno tím, že rychlost vibrací přímo souvisí s jejich energií, RMS je tedy měřítkem škodlivosti, případně „ničivého účinku“ vibrací. [4]

Derivací známého průběhu odchylky ( $x$ ) lze získat průběh rychlosti:

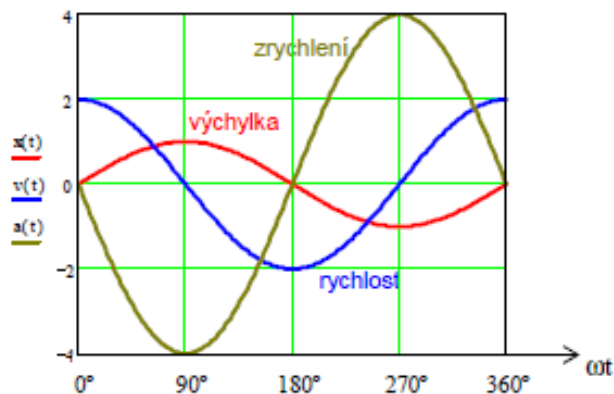
$$v(t) = \frac{dx}{dt} = 2\pi f A_x \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) = 2\pi f A_x \cdot \sin\left(2\pi f t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.3)$$

**Zrychlení** – Měření zrychlení je vhodné pro vysokofrekvenční měření, kde je hodnota zrychlení největší.

Druhou derivací známého průběhu odchylky ( $x$ ) lze získat průběh zrychlení:

$$a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = -4\pi^2 f^2 A_x \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (3.4)$$

Porovnání průběhu těchto veličin pro  $A_x = 1$  a  $f = 1 \text{ Hz}$  je na obrázku 3.8:



Obrázek 3.8 - Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením [11]

Z rovnic (3.2), 3.3 a 3.4 je možné vyjádřit závislost amplitud pro jednotlivé veličiny. To je vhodné využít v případě, kdy je dostačující znát hodnotu amplitudy signálu jednotlivých veličin a průběh není potřeba.

Pokud je naměřen např. průběh zrychlení vibrací:

$$a(t) = A_a \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (3.5)$$

Lze ze známých parametrů  $A_a$  a  $f$  vyjádřit amplitudu rychlosti  $A_v$ :

$$|A_v| = \frac{|A_a|}{2\pi f} \quad (3.6)$$

Analogicky lze vyjádřit ze známého průběhu  $a(t)$  velikost amplitudy odchyly  $A_x$ :

$$|A_x| = \frac{|A_a|}{4\pi^2 f^2} \quad (3.7)$$

### 3.3 Normy

Vzhledem k různorodosti typů strojů a míst měření bylo nutné vyhodnocení měření normalizovat. Normy většinou definují, jaké minimální vlastnosti by měli měřicí nástroje splňovat (např. frekvenční rozsahy, požadovaná měřicí přesnost apod.), na jakých místech, jakým způsobem by měl být stroj měřen a především jakým způsobem z naměřených hodnot vyhodnotit technický stav. Dále v praktické části bylo nastavení otáček při měření a samotné vyhodnocení provedeno dle normy ČSN 20 0065.

#### 3.3.1 ČSN 20 0065

Norma ČSN 20 0065, celým názvem *Obráběcí stroje na kovy. Metody měření a hodnocení mechanického kmitání. Mezní hodnoty kmitání*. Norma je zaměřená na širokou základnu obráběcích strojů. Měření a vyhodnocení lze provést pro různé druhy soustruhů, obráběcích center, frézek, brusek i vrtaček.

Pro každý typ stroje je definované místo měření a podmínky měření. Pro obráběcí se snímače umísťují na vřeteník v místě uložení ložiska. Jednou z podmínek jsou správně nastavené otáčky, při kterých se provádí měření. Pro výpočet otáček vřetene pro měření norma udává vztah [12]:

$$q = \frac{n_{max} - n_{min}}{4} \quad (3.8)$$

kde  $n_{max}$  ... největší otáčky vřetene

$n_{min}$  ... minimální otáčky vřetene

$n_i$  ... otáčky použité při měření

$q$  ... rozdíl mezi sousedními otáčkami

otáčky použité při měření [12]:

$$n_1 = n_{max} \quad (3.9)$$

$$n_2 = n_{max} - q \quad (3.10)$$

$$n_3 = n_{max} - 2q \quad (3.11)$$

$$n_4 = n_{max} - 3q \quad (3.12)$$

$$n_5 = n_{max} - 4q = n_{min} \quad (3.13)$$

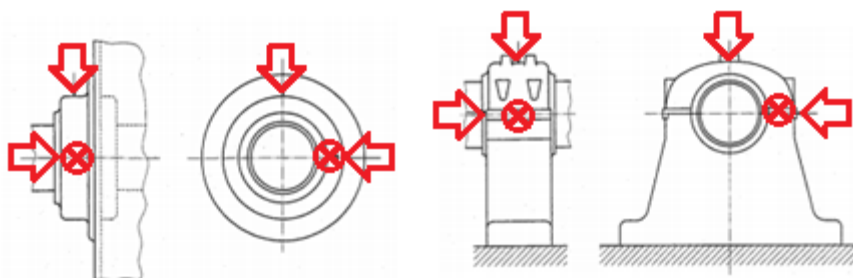
Dle normy se u obráběcích strojů měří RMS rychlosti kmitání – již v kapitole 3.2.1 zmíněná mohutnost vibrací. Pro vyhodnocení norma poskytuje pouze mezní hodnoty vibrací.

### 3.3.2 ISO 10 816-3

Norma ISO 10 816-3, celým názvem *Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min a 15 000 1/min při měření in situ.*

Tato norma podobně jako norma ČSN 20 0065 vyhodnocuje stroj na základě mohutnosti vibrací. Stroje zde norma rozděluje podle typu, jmenovitého výkonu a tuhosti uložení.

Měřicími místy (viz obr. 3.9) jsou zpravidla vnější lehce dostupné nerotační části stroje. Na rozdíl od normy ČSN 20 0065 není přesně určené místo, ale je kladen důraz na zajištění přiměřené citlivosti na dynamické síly stroje a také na to, aby umístění snímačů nebylo ovlivněno místní rezonancí nebo zesílením.



Obrázek 3.9 - Příklady měřících bodů na elektrickém stojanu, tělese ložiska a ložiskovém stojanu [13]

Hodnocení naměřených hodnot se stanovuje dle dvou kritérií. Prvním kritériem je hodnocení dle velikosti vibrací. Norma udává mezní hodnoty pro stroje, které jsou rozřazeny podle stavu do čtyř pásem [13]:

Pásmo A – obvykle vibrace nové přejímaných strojů

Pásmo B – vibrace v tomto pásmu jsou přirovnávány ke strojům, které jsou považovány za provozuschopné po neomezeně dlouhou dobu

Pásmo C – stroje s vibracemi v tomto pásmu jsou obvykle považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý provoz

– stroje jsou za těchto podmínek provozovány do té doby, než nastane vhodná příležitost k údržbě

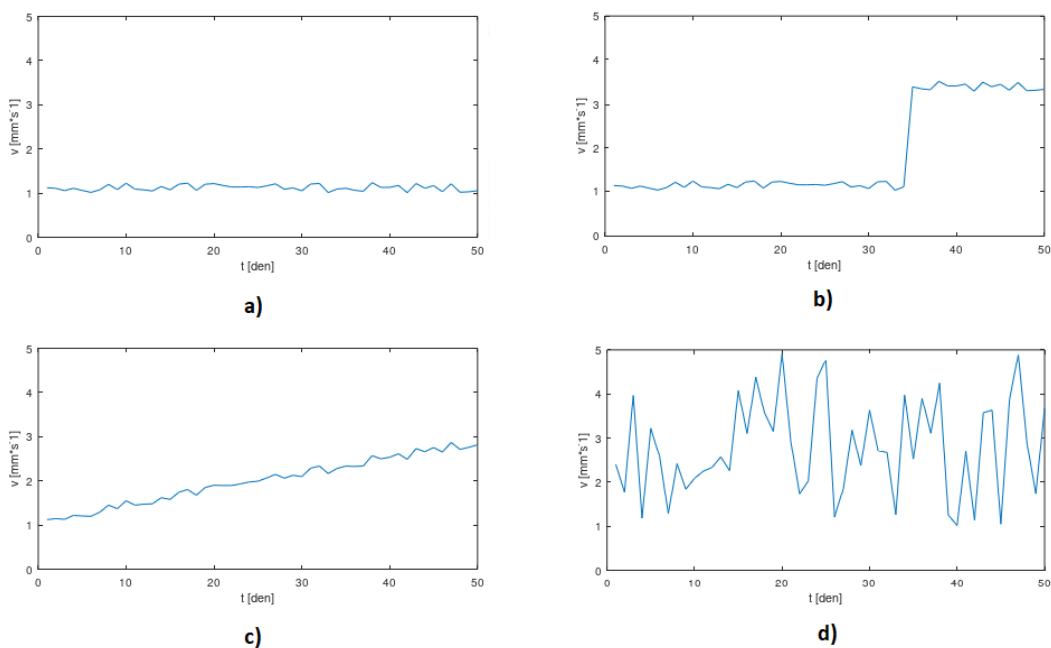
Pásmo D – kritické hodnoty vibrací, které mohou způsobit poškození

Mezní hodnoty pro vyhodnocení středně velkého stroje udává následující tabulka:

*Tabulka 3.1 - Klasifikace pásem mohutnosti vibrací pro stroje skupiny 2: Stroje o střední velikosti od 15 kW do 300 kW [13]*

Klasifikace uložení	Hranice pásma	Efektivní hodnota výchylky [ $\mu\text{m}$ ]	Efektivní hodnota rychlost [ $\text{mm/s}$ ]
Tuhé	A/B	22	1,4
	B/C	45	2,8
	C/D	71	4,5
Pružné	A/B	37	2,3
	B/C	71	4,5
	C/D	113	7,1

Druhým kritériem pro vyhodnocení je změna vibrací. Zde sledujeme při dlouhodobém měření výchylky hodnot od referenční hodnoty (viz kapitola 3.1). Výchylky sledujeme a dělíme jednotlivé trendy na dlouhodobě dobrý stav, náhlou změnu vlivem poruchy, trend typický pro dlouhodobé poškození a nestandardní trend.



*Obrázek 3.10 - Trendy hodnot vibrací - a) dlouhodobě dobrý stav, b) náhlá změna vlivem poruchy, c) opotřebení, d) nestandardní trend (podle [11])*

Dlouhodobě dobrý stav je stav bez závady. Náhlá změna signalizuje poruchu, případně odlomení některé součásti stroje. Trend typický pro dlouhodobé poškození je nutné sledovat a v pravý čas naplánovat údržbu. Nestandardní trend může být

způsoben špatným uchycením snímače, nevhodným místem, případně vadným snímačem (viz obr. 3.10).

### 3.3.3 Alternativní normy

Nepodařilo se najít mezinárodní normy, které by se zabývaly měřením a vyhodnocením vibrací přímo obráběcích strojů. Takové normy se vyskytují spíše na národní úrovni, příkladem může být švédská norma SS728000-1, která je svým obsahem téměř shodná s českou normou ČSN EN 20 0065 s tím rozdílem, že se vyhodnocují naměřené zrychlení vibrací.

Normy související s danou problematikou:

ISO 20 816 – obecné postupy pro měření a hodnocení vibrací na strojích

ISO 13 373 – monitorování stavu a diagnostika nástrojů a strojů

ISO 13 374 – obsahem navazuje na ISO 13 373

ISO 17 359 – monitorování stavu a diagnostika strojů

## 3.4 Diagnostické přístroje a systémy

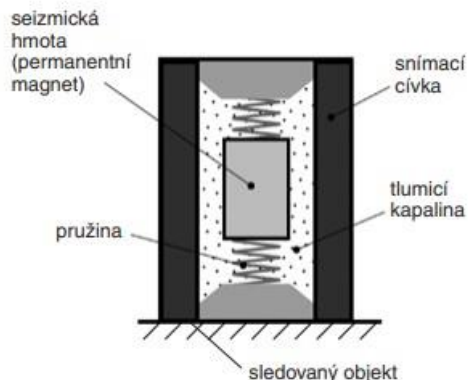
Pro samotnou vibrodiagnostiku je potřeba nejprve vibrace změřit. Vibrace se měří pomocí snímačů, které jsou umístěné na stroji. Výstupem snímače je signál, který je dále potřeba zpracovat a k tomu slouží diagnostické přístroje, také označované jako analyzátoři. Diagnostické přístroje se dělí na dvě kategorie – přístroje pro offline měření a online měření. Offline měřící přístroje jsou přenosné a jsou určeny především pro občůzky nebo zařízení, které není potřeba často monitorovat. Vyobrazení je buď přímo na displeji nebo na příslušeném PC softwaru. Druhou kategorií jsou zařízení pro online měření. Online měření probíhá tak, že snímače jsou trvale připevněny na stroji a data vyhodnocuje diagnostický systém.

### 3.4.1 Snímače

K měření vibrací jsou využívány snímače, které dělíme dle měřené veličiny na snímače výchylky, snímače rychlosti (též velometr) a snímač zrychlení (též akcelerometr).

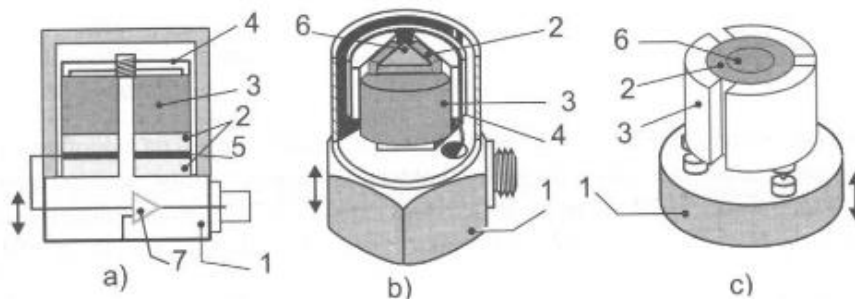
Snímače výchylky měří relativní výchylky nebo posunutí (např. kmitání hřídele vůči ložisku). Lze využít snímače na principu indukčním, indukčnostním, kapacitním a magnetickým. V současné době se nejčastěji využívají snímače indukčnostní, které pracují na principu závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. [6]

Snímač rychlosti vibrací měří absolutní rychlost pohybu tělesa. Vzhledem k vnitřnímu uspořádání (viz obr. 3.11) dochází k vzájemnému pohybu magnetu a cívky, tím dochází k indukci napětí na cívce. Magnetický tok je úměrný rychlosti vibrací. [2][6]



Obrázek 3.11 - Snímač rychlosti vibrací [2]

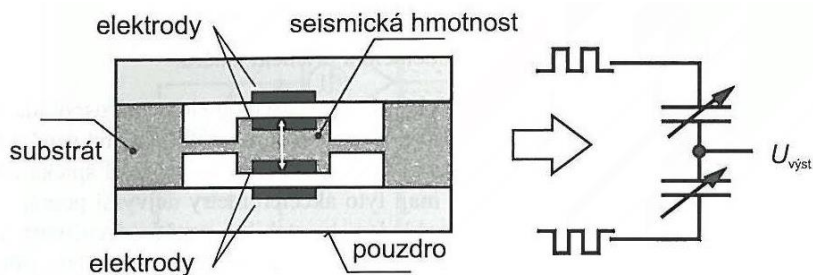
Akcelerometry snímají absolutní zrychlení vibrací. Nejužívanějším typem je akcelerometr piezoelektrický. Jejich podstatou je piezoelektrický jev – při deformaci krystalů či polykrystalů vzniká elektrický náboj. Krystal je často namáhán smykově, méně často tlakově. [1][2][6]



Obrázek 3.12 - Piezoelektrický snímač - a) s tlakovou b) se stříhovou c) se stříhovou deformací [2]

Podobně fungují akcelerometry piezorezistivní. Fungují na principu piezorezistivního jevu – při deformaci krystalické mřížky dochází ke změně měrného odporu. Díky stabilitě napěťové citlivosti jsou vhodné k dlouhodobým testům, nevýhodou je ale teplotní závislost. [2]

Dalším typem jsou kapacitní akcelerometry. Při pohybu seismické hmotnosti se jedna kapacita zmenšuje, druhá zvyšuje (viz obr. 3.13). Vyhodnocuje se rozdíl těchto hodnot kapacit.



Obrázek 3.13 - Uspořádání kapacitního akcelerometru [2]

Snímače lze také rozdělit dle technologie, a to na [18]:

- **IEPE/ICP® technologie** - Nejpoužívanější typ pro průmyslové aplikace. Jedná se o snímače založené na piezoelektrickém jevu s vysokou šířkou měřicího pásma a výstupní citlivostí. Díky uzavřeným pouzdrům je vhodný i do náročných prostředí a je vysoce odolný proti vibracím a rázům. Tím, že snímač funguje na principu piezoelektrického jevu, nepotřebuje externí napájení.
- **MEMS technologie** – V porovnání s IEPE se jedná o levnější snímače vyskytující se v běžné elektronice. Jsou opatřeny mikroelektronikou, takže potřebují být při měření připojeny ke zdroji elektrické energie. Na rozdíl od IEPE snímačů dokáží snímat už od frekvence 0 Hz, nevýhodou ale může být omezený dynamický rozsah a horší poměr signál-šum.

### 3.4.2 Diagnostické přístroje nabízené na trhu

V praktické části této bakalářské práce nebyl využit přístroj ani software určený přímo pro vibrodiagnostiku. Namísto toho byla využita karta pro sběr dat - tzv. DAQ karta, která umožňuje převedení analogového signálu ze snímače do digitálního signálu pro PC. Signál byl dále zpracován pomocí skriptu vytvořeným v GNU Octave. Z důvodu nepoužití komerčních přístrojů byl proveden průzkum trhu nabízených měřících přístrojů a systémů, aby se zjistilo, jakými parametry komerční přístroje disponují.

Výrobci na trhu se nachází mnoho a ještě pestřejší je jejich nabídka. Pro „průřez“ nabídkou diagnostických přístrojů byly vybráni výrobci Adash, Brüel & Kjær a Rockwell Automation. Vzhledem k tomu, že spousta výrobců nabízí více přístrojů v různých cenových hladinách, popřípadě přístroje s možností dokoupení různých rozšíření a dalších funkcí, je téměř nemožné trh jednoduše shrnout. Za zmínku ale stojí fakt, že téměř každý výrobce dodává kompletní sadu k měření, tedy jak diagnostický přístroj s příslušenstvím, tak snímač a software.



### Adash A4900 Vibrio Ex

Sice se jedná o jeden ze základních přístrojů, který výrobce nabízí, ale přesto obsahuje velké množství funkcí, a tím se z něj stává univerzální přístroj vhodný jak pro pravidelné obchůzky v menších firmách, tak pro méně časté aplikace jako je například vyvažování.

Základní parametry a funkce [14]:

- Počet kanálů: 1x ICP® akcelerometr
- Frekvenční rozsah: 1 až 16 k Hz (zrychlení)
- Software: DDS (Adash)
- Prostředí: neprašné prostředí, standartní teploty

Další funkce:

- spočtení hodnoty mohutnosti vibrací
- zobrazení frekvenčního spektra
- základní vyhodnocení závad
- stetoskopie



Obrázek 3.14 - Adash A4900 Vibrio Ex [14]

### Rockwell Automation Dynamix 2500

Univerzální diagnostický přístroj, jehož příslušenství si lze nakonfigurovat na míru. Mezi volitelné prvky patří ochranné pouzdro proti prachu, ochranné pouzdro proti nárazu, pouzdro pro převoz, dokovací stanice, 2-kanálový adaptér a další.

Základní parametry a funkce [15]:

- Počet kanálů: 4x ICP® akcelerometr  
+ DC for process values  
+ tachosonda
- Frekvenční rozsah: 2 Hz až 80 kHz
- Software: Emonitor (Rockwell Automation)
- Prostředí: standartní prostředí (IP65), standartní teploty  
volitelně pro ATEX Zone 2 (střední riziko – plyn, výpary)

Další funkce:

- možnost připojení senzoru tlaku
- možnost připojení senzoru teploty
- 4-kanálové zobrazení
- volitelně - bump test
- volitelně – FRF analýza
- volitelně – vyvažování



Obrázek 3.15 - Rockwell Automation Dynamix 2500 [15]

### Adash A4500 VA5 Pro

Přístroj Adash A4500 VA5 pro je jedním z nejkompexnějších diagnostických přístrojů nabízených na trhu. Vzhledem k mnoha funkcím se už nejedná o standartní přístroj pro vibrodiagnostiku, ale o univerzální diagnostický nástroj.

Základní parametry a funkce [16]:

- Počet kanálů: 4x ICP® akcelerometr  
4x DC for process values  
1x tachosonda
- Frekvenční rozsah: 1x 0,35 až 90 kHz (zrychlení – vysokofrekvenční měření)  
4x 0,35 až 25 kHz (zrychlení)
- Max. vz. frekvence: 64 kHz  
194 kHz (pro vysokofrekvenční měření)
- Software: DDS (Adash), možnost vlastní
- Prostředí: neprašné prostředí, standartní teploty

Další funkce:

spočtení hodnoty mohutnosti vibrací  
zobrazení frekvenčního spektra  
4-kanálové zobrazení  
základní vyhodnocení závad  
stetoskopie  
termokamera, IR kamera, focení  
vyvažování  
analýza zvuku  
bump test  
a další...



Obrázek 3.16 - Adash A4500 pro [16]

## Brüel & Kjær VIBROPORT 80

Diagnostický přístroj VIBROPORT 80 od firmy Brüel & Kjær pokrývá všechny potřebné funkce pro diagnostiku. Využit lze pro analýzu, vyvažování a sbírání dat.

Základní parametry a funkce [17]:

- Počet kanálů: 4x ICP® akcelerometr  
+ DC for process values  
1x tachosonda
- Frekvenční rozsah: 1x 0,18 až 80 kHz (zrychlení – vysokofrekvenční měření)  
1x 0,18 až 40 kHz (zrychlení)  
2x 0,18 až 20 kHz (zrychlení)
- Max. vz. frekvence: 64 kHz
- Software: Examiner (B&K Vibro)
- Prostředí: standartní prostředí, standartní teploty  
volitelně pro ATEX Zone 2 (střední riziko – plyn, výpary)

Další funkce:

spočtení hodnoty mohutnosti vibrací

4-kanálové zobrazení

zobrazení frekvenčního spektra

základní vyhodnocení závad

vyvažování

FRF analýza

acceptance test



Obrázek 3.17 - Brüel & Kjær VIBROPORT 80 [17]

### Porovnání

Všechny přístroje umí důležité funkce jako je výpočet RMS z vybraných hodnot, výpočet mohutnosti vibrací, zobrazení frekvenčního spektra a všichni z výrobců nabízejí nějakou formu základního vyhodnocení naměřených hodnot. Pokročilé přístroje jako je zmíněný A4500 VA5 pro a VIBROPORT 80 obsahují již v základní verzi funkce pro vybalancování. Dynamix 2500 jej v základní verzi nenabízí a základnější přístroje jako A4900 Vibrio Ex tuto funkci nenabízí vůbec. Možností je na trhu bezpočet a výběr záleží na konkrétní aplikaci, existují výrobci přístrojů specializující se například na použití v důlním nebo chemickém průmyslu. Porovnání základních parametrů vybraných diagnostických přístrojů je v následující tabulce:

Tabulka 3.2 - Porovnání vybraných diagnostických přístrojů [14][15][16][17]

	Adash A4900 Vibrio Ex	Rockwell Automation Dynamix 2500	Adash A4500 VA5 Pro	Brüel & Kjær VIBROPORT 80
<b>Kanály</b>	1x AC	4x AC/DC	4x AC/DC 1x tach	4x AC/DC 1x tach
<b>Frekvenční rozsah (připojení akcelerometru)</b>	1 Hz až 16 kHz	2 Hz až 80 Hz	4x 0,35 Hz až 25 kHz 1x 0,35 Hz až 90 kHz	1x 0,18 Hz až 80 kHz 1x 0,18 Hz až 40 kHz 2x 0,18 Hz až 20 kHz
<b>Max. vzorkovací frekvence</b>	- kHz	64 kHz	64 kHz 194 kHz pro ultrazvuk	64 kHz
<b>Software</b>	DDS	Emonitor®	DDS/vlastní	Examiner

### 3.4.3 Diagnostické systémy

Diagnostický systém je souhrn všech diagnostických metod, prostředků a obsluhy fungující v celém procesu. Tedy vše, co se podílí na měření, sběru, přenosu a zpracování dat, vyobrazení měření, vyhodnocení a doporučení dalšího postupu. [19]

Diagnostické systémy poskytují dostačující informace o měřeném objektu pro prediktivní údržbu a vyhodnocení aktuálního stavu.

Diagnostické systémy lze rozdělit na [19]:

- Součást řídicího systému stroje
- Separátní měřicí systém nezávislý na řídicím systému
  
- Offline diagnostický systém
- Online diagnostický systém

Nejběžněji se na strojích nachází základní diagnostický systém přímo od výrobce, ale často bývá v praxi stroj napojen na stávající diagnostický systém firmy, ať už online nebo offline. [19]

### 3.5 Zpracování signálu

Po měření je potřeba naměřený průběh zpracovat. Průmyslové přístroje a analyzátoři (viz kapitola 3.4.2) tuto činnost provedou samy a uživatel často ani nepotřebuje znát hlubší podrobnosti. Při absenci tohoto přístroje, popřípadě při tvorbě vlastního skriptu pro zpracování naměřeného signálu je důležité vědět, jakým způsobem a do jaké formy signál zpracovat.

#### 3.5.1 Mohutnost vibrací

Už několikrát zmíněná mohutnost vibrací je základní veličinou pro měření vibrací a vyhodnocení technického stavu stroje. Norma ISO 10 816 mohutnost vibrací definuje jako efektivní hodnotu rychlosti vibrací z frekvenčního pásma 10-1000 Hz. Efektivní hodnotu spočteme z libovolného signálu dle vztahu:

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (3.14)$$

Pro tuto konkrétní aplikaci ale nelze spočítat efektivní hodnotu z naměřeného signálu, protože potřebujeme zvolit frekvenční pásmo. Pokud je signál převeden do oblasti frekvenčních spekter a následně nepotřebné frekvence vyfiltrovány, můžeme pro efektivní hodnotu rychlosti a tedy i mohutnosti vibrací využít vztah:

$$v_{ef} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k^2(t) \quad (3.15)$$

kde  $x(t)$  je určující veličina vibrací (většinou rychlost nebo zrychlení, v této práci rychlost);  $T$  je časový interval pro  $v(t)$ ;  $v_k(t)$  jsou diskrétní hodnoty veličiny a  $N$  je celkový počet hodnot [2].

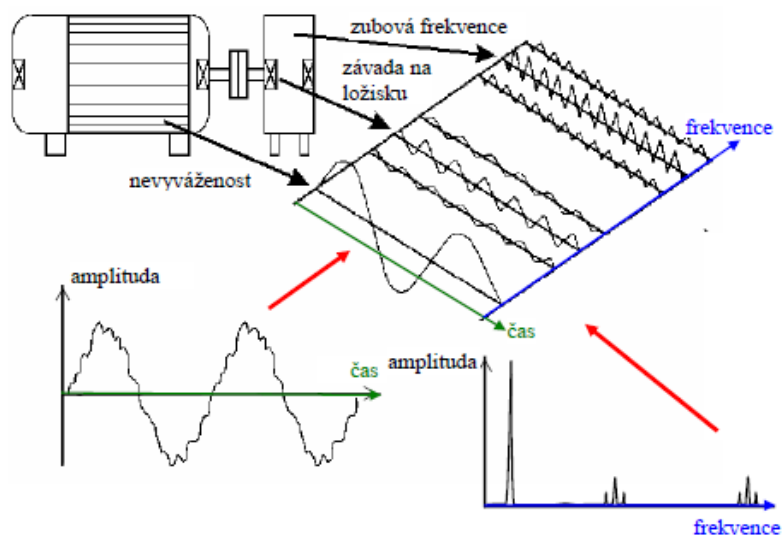
#### 3.5.2 Převod časového signálu do frekvenční oblasti

Převodem časového signálu do frekvenční oblasti lze vidět, z jakých frekvenčních složek se změřený signál skládá. V podstatě se jedná o rozložení časového signálu

na jednotlivé harmonické složky (viz obr. 3.18). Naměřený signál, který je již diskretní lze převést pomocí diskretní Fourierovy transformace [2]:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(j) e^{-\frac{i2\pi kj}{N}} \quad (3.16)$$

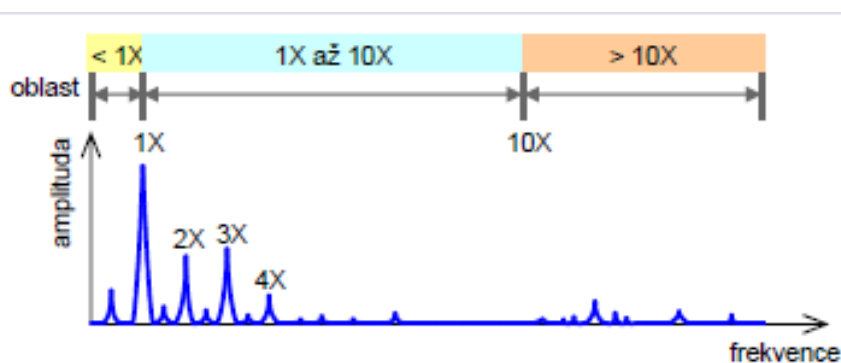
Kde  $i$  je imaginární jednotka,  $k = 0, 1, \dots$  až  $N - 1$ ,  $N$  je počet vzorků,  $j$  je vzorek a  $x(j)$  je hodnota vzorku.



Obrázek 3.18 - Vyobrazení naměřeného signálu v časové a frekvenční oblasti [11]

### 3.5.3 Frekvenční oblast

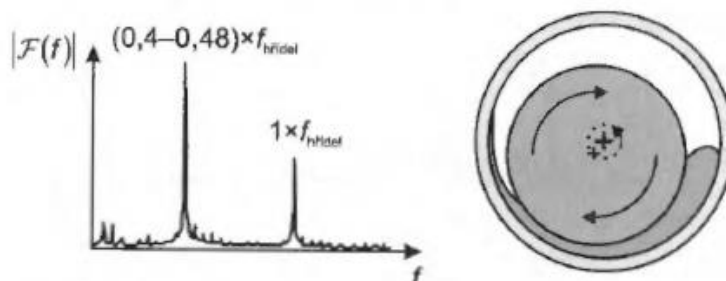
Výsledkem Fourierovy transformace je oboustranné symetrické spektrum, dále tedy stačí pracovat pouze s jeho jednou polovinou. Spektrum je vhodné rozdělit na 3 hlavní části, ve kterých se vyskytují různé příznaky [11]:



Obrázek 3.19 - Frekvenční spektrum (1X je označena otáčková frekvence hřídele) [11]

### 1. Oblast pod otáčkovou frekvencí

Tuto oblast (žlutě značená na obrázku 3.19) nazýváme subsynchronní, velké špičky jsou v této oblasti obvykle nebezpečné. Typicky se zde projevuje **víření olejového filmu**, které generuje u kluzného ložiska radiální kmity. [2][11]



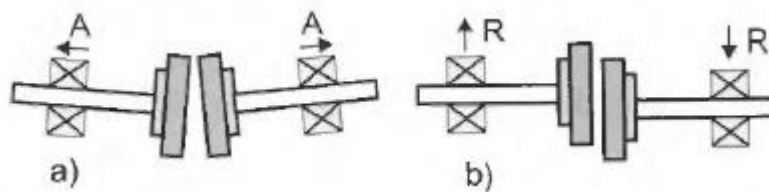
Obrázek 3.20 - Frekvenční spektrum - velká špička v subsynchronní oblasti způsobená vířením olejového filmu u kluzného ložiska [2]

### 2. Oblast nízkofrekvenčních událostí

Tato oblast (modře značená na obrázku 3.19) se uvažuje od 40% do několikanásobku otáčkové frekvence, obvykle se uvažuje desetinásobek. V této oblasti se vyskytují příznaky všech základních mechanických závad [2][11]:

- **Nevyváženost hřídele/rotoru** - Vznikají vibrace převládající v radiálním směru a to převážně na otáčkové frekvenci a jejím dvojnásobku, amplituda složek vibrací roste s kvadrátem vibrací.
- **Nesouosost hřídelů** – Nesouosost se může vyskytnout rovnoběžná a úhlová (viz obr. 3.21). Při nesouososti jsou charakteristické vibrace v axiálním směru fázově posunuty přes spojku o 180°. Typická je složka dvojnásobku otáčkové frekvence pro rovnoběžnou nesouosost a složka otáčkové frekvence pro nesouosost úhlovou.
- **Prohnutý hřídel** – Otáčková a dvojnásobek otáčkové frekvence.
- **Mechanické vůle** – Mechanické vůle, uvolnění součástí a deformace základů generují násobky (až do dvacetinásobku) harmonických a subharmonických (zlomek otáčkové frekvence) složek otáčkové frekvence.
- **Trhlina v hřídeli** – Výskyt na komplexním frekvenčním spektru (Nyquistova křivka) při otáčkové a dvojnásobku otáčkové frekvence, a to při rozběhu nebo doběhu.





Obrázek 3.21 - Nesouosost hřídelů - a) úhlová, b) rovnoběžná (paralelní) [2]

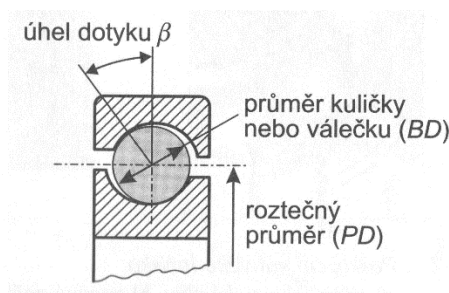
### 3. Oblast vysokofrekvenčních událostí

Tato oblast (oranžově na obrázku 3.19) se obvykle uvažuje nad desetinásobek otáčkové frekvence. V této oblasti se vyskytují následující důležité frekvence [2][11]:

- **Zubové frekvence ozubených kol** – Mezi základní detekovatelné závady patří opotřebení stykové plochy zubu, nestejnou šíří zubu, vyštípnutý nebo zlomený zub, kavitační jevy a excentricitu uložení.
- **Frekvence závad na elektrických motorech** – Může se jednat o prasklé nebo uvolněné tyče u indukčních motorů.
- **Poruchové frekvence ložisek** – viz další kapitola.

#### 3.5.4 Defekty na kluzných nebo valivých ložiskách

U ložisek dochází k pittingu, korozi, rýhování, prohlubeninám a poruchám klece. Chceme-li zjistit stav ložiska pomocí vibrací, musíme znát charakteristické frekvence jednotlivých elementů ložiska, na nichž se poruchy projevují. Tyto poruchové frekvence ložisek lze spočítat z parametrů ložiska pomocí následujících vztahů [2]:



Obrázek 3.22 Rozměry ložiska

- **BPFO (Ball Pass Frequency – Outer Race)** – frekvence odpovídající závadě vnějšího kroužku

$$f_{BPFO} = \frac{e}{2} f_r \left( 1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (3.17)$$



- **BPFI (Ball Pass Frequency – Inner Race)** – frekvence odpovídající závadě vnitřního kroužku

$$f_{BPFI} = \frac{e}{2} f_r \left( 1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (3.18)$$

- **BSF (Ball Spin Frequency)** – frekvence odpovídající závadě kuličky nebo válečku

$$f_{BSF} = \frac{PD}{2BD} f_r \left[ 1 - \left( \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (3.19)$$

- **FTF (Fundamental Train Frequency)** – frekvence odpovídající závadě klece

$$f_{FTF} = \frac{1}{2} f_r \left( 1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right), \quad (3.20)$$

kde  $PD$  je roztečný průměr,  $BD$  průměr válečku nebo kuličky,  $e$  počet valivých elementů,  $f_r$  frekvence daná relativními otáčkami vnějšího a vnitřního kroužku a  $\beta$  úhel dotyku.

## 4 Vlastní řešení

Cílem vlastního řešení práce bylo zpracování dat z diagnostických měření a na jejich základě vyhodnocení technického stavu stroje.

### 4.1 Popis měřeného stroje

Měřeným strojem bylo pětiosé obráběcí centrum MCU 700VT-5X RAPID od českého výrobce KOVOSVIT MAS a.s., které se od konce roku 2019 nachází v dílenských prostorách Ústavu výrobních strojů a zařízení.



Obrázek 4.1 - Obráběcí centrum MCU 700VT-5X v prostorách Ústavu výrobních strojů a zařízení

Jedná se o profesionální pětiosé obráběcí centrum, koncipované jako portálové centrum s horním gantry, které spolu s litinovými prvky nosné konstrukce zaručují vysokou tuhost, teplotní stabilitu i tlumení. Disponuje otočně sklopným (kolébkovým) stolem a řídicím systémem Heidenheim iTNC 640. [20]

Základní parametry obráběcího centra jsou shrnuty v tabulce 4.1.

*Tabulka 4.1 - Další vybrané parametry obráběcího centra MCU 700VT-5X [20]*

Vřeteno		
Kužel vřetene		HSK 63
Výrobce		Step-Tec
Typ vřetena		HPC 190-X-26-2.9/24-PFD-HSK-T63
Parametry vřetene		
Maximální otáčky	[min <sup>-1</sup> ]	24000
Maximální kroutící moment	[Nm]	67/87
Výkon vřetena (S1/S6)	[kW]	20/26
Brzdný moment	[Nm]	500

Pomocí konstruktérského týmu firmy KOVOSVIT MAS, a.s. byl kontaktován výrobce výše uvedeného vřetene, který poskytl parametry předního i zadního ložiska vřetene (viz tabulka 4.2), ze kterých byly později vypočteny poruchové frekvence ložisek.

*Tabulka 4.2 - Parametry předního a zadního ložiska vřetene*

Přední ložisko		
e	počet valivých elementů	25
BP	průměr válečku	9,52 mm
PD	roztečný průměr	90 mm
β	úhel dotyku	25 °
Zadní ložisko		
e	počet valivých elementů	11
BP	průměr válečku	8 mm
PD	roztečný průměr	65 mm
β	úhel dotyku	0 °

## 4.2 Popis měření

První měření proběhlo 11.11.2019, tedy přibližně v době, kdy bylo obráběcí centrum na pracovišti ustaveno a zprovozněno. Měření od počátku zprovoznění stroje je zásadní, protože umožňuje stanovení referenční hladiny sledovaných hodnot. Další měření probíhalo přibližně každých 14-21 dní.

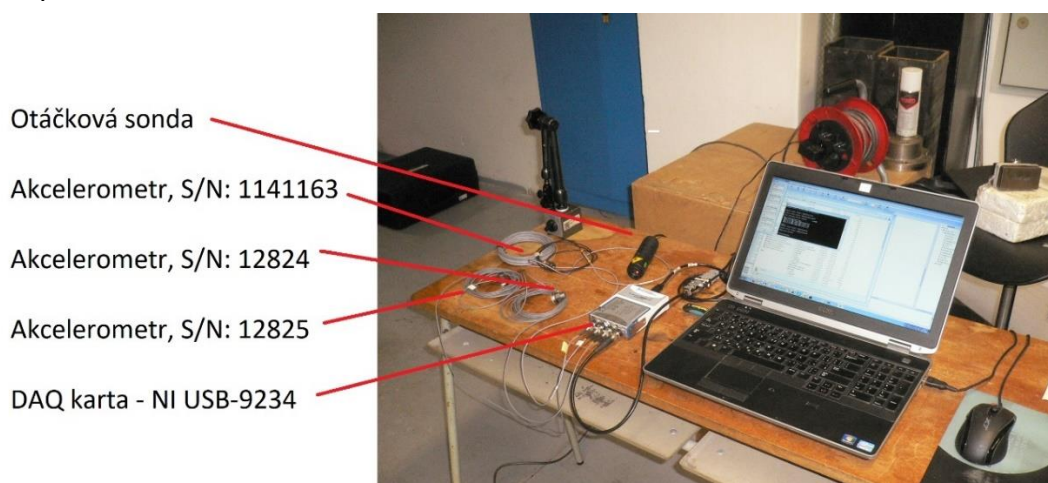
#### 4.2.1 Použité měřicí přístroje a snímače

K měření nebyl využit průmyslový diagnostický přístroj a ani analyzátor, ale tzv. DAQ karta, pomocí které bylo možné zaznamenat analogový napěťový signál vycházející z použitých snímačů do počítače.

Tabulka 4.3 - Seznam použitých měřících přístrojů a snímačů

Číslo	Název	Výrobce	Typ	S/N
1	Notebook	DELL	E6530	9XKGLX1
2	Analyzátor NI USB-9234	NI	NI USB-9162 NI 9234	146D6E0 17E0BD7
3	Otáčková sonda	Compact	VLS5/D/I	1006470
4	Jednoosý akcelerometr Kabel: 10-32UNF → BNC	Endevco Brüel&Kjaer	751-10 AO 0531	12824 2001 x
5	Jednoosý akcelerometr Kabel: 10-32UNF → BNC	Endevco Brüel&Kjaer	751-10 AO 0531	12825 2001 y
6	CCLD konvertor Jednoosý akcelerometr Kabel: 10-32UNF → BNC	Brüel&Kjaer Brüel&Kjaer Brüel&Kjaer	2647 A 4369 AO 0531	2826684 1141163 2001 z

Při měření byly použity tři akcelerometry zároveň, a to z důvodu měření zrychlení vibrací ve třech směrech. Dva ze tří akcelerometrů použitých při měření byly shodné (viz tabulka 4.3), třetí byl od jiného výrobce – nepředpokládal se žádný vliv na výsledky měření. V tabulce 4.3 lze také vidět, že při měření se používala i otáčková sonda (tachosonda), jejíž naměřené hodnoty ale nebyly při této práci zpracovány ani nijak využity.



Obrázek 4.2 - Použité snímače a DAQ karta

### 4.2.2 Uspořádání měření

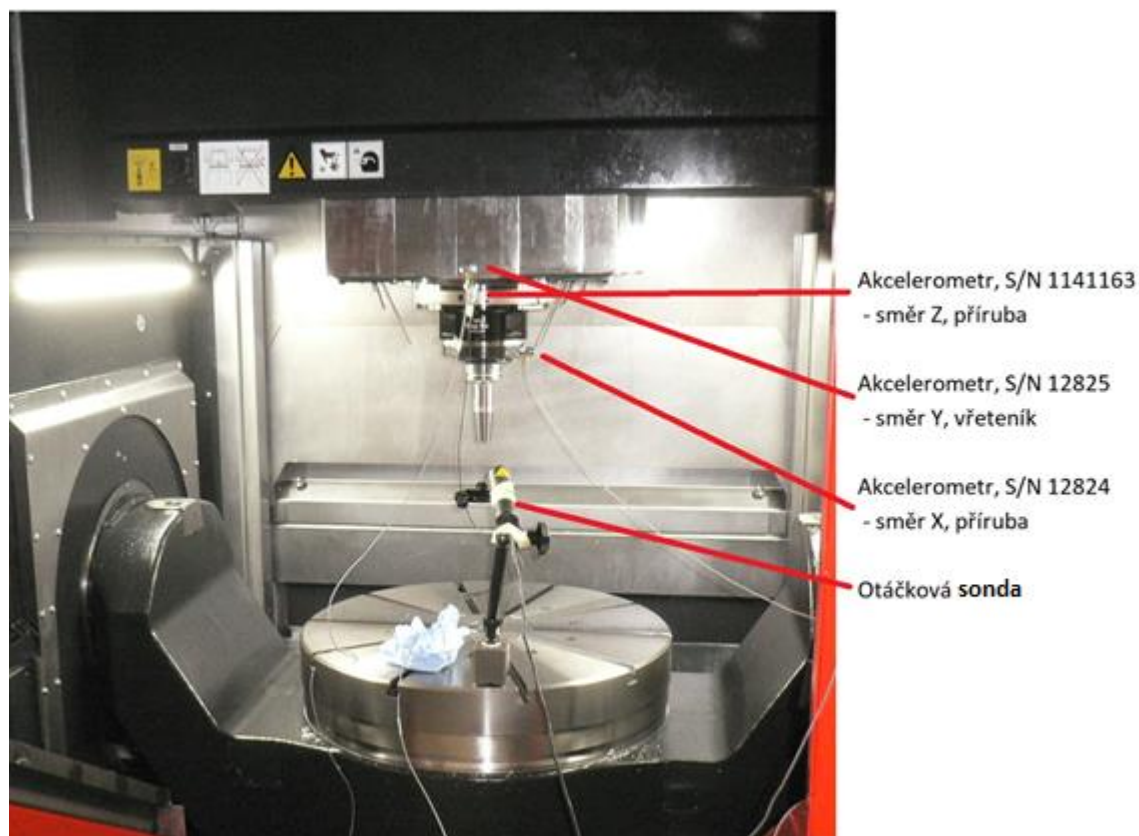
Měření probíhalo vždy dvakrát, a to z důvodu použití dvou různých uspořádání snímačů při měření na stroji.

Tabulka 4.4 - Uspořádání snímačů při měření

Snímač	Výrobce	S/N	Směr	Umístění snímačů	
				1. uspořádání	2. uspořádání
Otáčková sonda	Compact	1006470		stůl	stůl
Jednoosý akcelerometr	Endevco	12824	x	vřeteník	tubus
Jednoosý akcelerometr	Endevco	12825	y	vřeteník	vřeteník/tubus*
Jednoosý akcelerometr	B&K	1141163	z	příruba	příruba

\*původně se měřil vřeteník, od 15. února 2021 se při 2. uspořádání měří na tubusu

Nejprve se tedy naměřily průběhy zrychlení (viz dále podkapitola 4.2.3), následně se snímače přemístily a proběhlo měření druhé.



Obrázek 4.3 - Měření - 2. uspořádání - pohled do pracovního prostoru stroje

V tabulce 4.4 lze vidět umístění senzorů pro obě uspořádání. Akcelerometr (S/N 12824) měřil při 1. uspořádání ve směru  $x$  a byl umístěn na boku vřeteníku. při 2. uspořádání byl snímač přesunut na zkosenou část tubusu vřetene ve stejném směru. Důvod, proč se ve směru  $Y$  začalo měřit na tubusu později byl ten, že na válcové ploše nelze snímače uchytit pomocí magnetů a byla potřeba např. včelí vosk. Pro dlouhodobé měření se z tohoto důvodu původně usoudilo, že tento snímač zůstane ponechán na stejném místě, tedy na čele vřetena. Od 15. února 2021 se ale začal při 2. měření snímač umisťovat na tubus vřetena pomocí včelího vosku, aby se mohly hodnoty mezi směrem  $X$  a  $Y$  porovnat, protože hodnoty ve směru  $X$  začaly narůstat.

#### 4.2.3 Podmínky měření

Měření probíhalo za otáček stanovených normou ČSN 20 0065. Otáčky, při kterých měření probíhalo byly stanoveny dle vztahů v kapitole 3.3.1.

Lze dosadit maximální otáčky vřetene  $n_{max} = 24000$  a uvažované minimální otáčky  $n_{min} = 200$  do rovnice 3.8, známé z kapitoly 3.3.1. Výsledkem je hodnota rozdílu mezi sousedními otáčkami  $q = 5950 \text{ min}^{-1}$ .

Dosazením této hodnoty  $q$  a  $n_{max}$  do rovnic (3.9), (3.10), (3.11), (3.12) a 3.13 se získaly jmenovité otáčky, při kterých byly provedeny všechny měření:

$$n_1 = 24000 \text{ min}^{-1}$$

$$n_2 = 18050 \text{ min}^{-1}$$

$$n_3 = 12100 \text{ min}^{-1}$$

$$n_4 = 6150 \text{ min}^{-1}$$

$$n_5 = 200 \text{ min}^{-1}$$

Dále byl na pracovišti čistě pro účely měření vyčleněn nástrojový držák HAIMER A63.144.12 (viz obr. 4.4). Tento držák byl upnut při každém měření, aby se zachovaly konstantní podmínky.

Pokud stroj před měřením nebyl spuštěný, provedl se zahřívací cyklus, aby stroj nebyl měřen za studena a neovlivnilo se tím měření. V případě naměření výrazných parazitních špiček nebo velkých neopodstatněných výkmitů se měření při stejných otáčkách opakovalo.



Obrázek 4.4 - Nástrojový držák HAIMER A63.144.12

### 4.3 Návrh diagnostických deskriptorů

Bylo nutné navrhnout diagnostický deskriptor, tedy parametr, který by bylo možné dlouhodobě a efektivně sledovat. Tento deskriptor by měl reflektovat technický stav stroje. Z kapitoly 3.5.3 je již známo, že při zkoumání frekvenční oblasti signálu lze zjistit všechny základní mechanické závady. Zkoumat tedy frekvenční oblast každého naměřeného signálu, sledovat velikost a vývoj jednotlivých frekvenčních složek se může zdát jako ideální varianta. Při vysokém počtu naměřených signálů je ale tento přístup časově velmi neefektivní a téměř nereálný. Pro dlouhodobé trendovací měření je vhodné navrhnout deskriptor, který dostatečně reflektuje technický stav a zároveň je vyjádřen jako jediná hodnota. Proto byly jako diagnostické deskriptory navrženy a dále použity mohutnosti vibrací a RMS rychlosti vibrací při otáčkové a poruchové frekvenci ložisek.

#### 4.3.1 Mohutnost vibrací

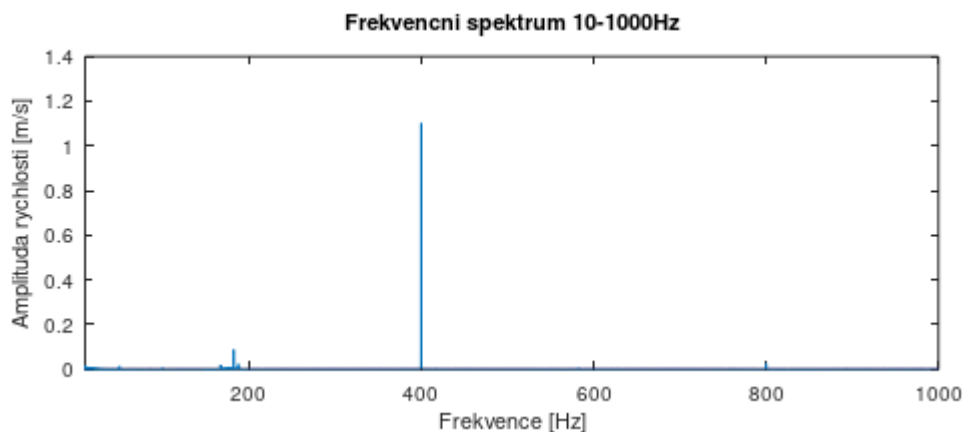
Pro dlouhodobé sledování vývoje vibrací byla navržena mohutnost vibrací. Vzhledem k definici tohoto parametru se jedná o ideální deskriptor. Jedná se o jednu hodnotu, kterou lze přiřadit ke každému naměřenému směru a umístění při daných otáčkách.

#### 4.3.2 RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci

Další parametr, který byl navržen, se velmi podobá mohutnosti vibrací. Stejně jako u mohutnosti vibrací se jedná o RMS rychlosti vibrací, rozdíl je ale ve frekvenčním pásmu. Tento deskriptor sleduje frekvenční pásmo pouze při otáčkové frekvenci.



Sledované frekvenční pásmo musí být dostatečně úzké, aby při počítání RMS nebyla započítána špička jiné frekvence, zároveň ale musí být dostatečně široké, aby pojmulu případné drobné odchylky otáčkové frekvence. Toto pásmo lze stanovit relativně v procentech nebo absolutně v konkrétních hodnotách.



Obrázek 4.5 - Frekvenční oblast - směr X, vřeteník, 19.10.2019

Po prozkoumání frekvenčních oblastí lze na první pohled spatřit dominantní otáčkovou frekvenci (viz obr. 4.5). Nebyl tedy shledán důvod věřit, že by blízké frekvenční špičky výrazně narušily výpočet. Pro výpočet byly navrženy následující frekvenční pásma (viz tabulka 4.5).

Tabulka 4.5 - Frekvenční pásma pro výpočet RMS rychlosti vibrací

Otáčky [min <sup>-1</sup> ]	Otáčková frekvence [Hz]	Frekvenční pásmo pro výpočet RMS rychlosti vibrací [Hz]
24000	400,0	395 až 405
18050	300,8	295 až 305
12100	201,7	195 až 205
6150	102,5	100 až 105
200	3,3	2 až 4

#### 4.3.3 RMS rychlosti vibrací při poruchové frekvenci ložisek

Tento parametr byl navrhnout z důvodu výskytu vzrůstajícího trendu mohutnosti vibrací při maximálních otáčkách ve směru X. Předpoklad byl, že pokud je takový vzrůst způsoben postupným opotřebením ložisek, měl by se vzrůstající trend projevit i při sledování jejich poruchových frekvencích. RMS rychlosti vibrací se tedy zpracovávalo pouze pro 24000RPM ve směru X.

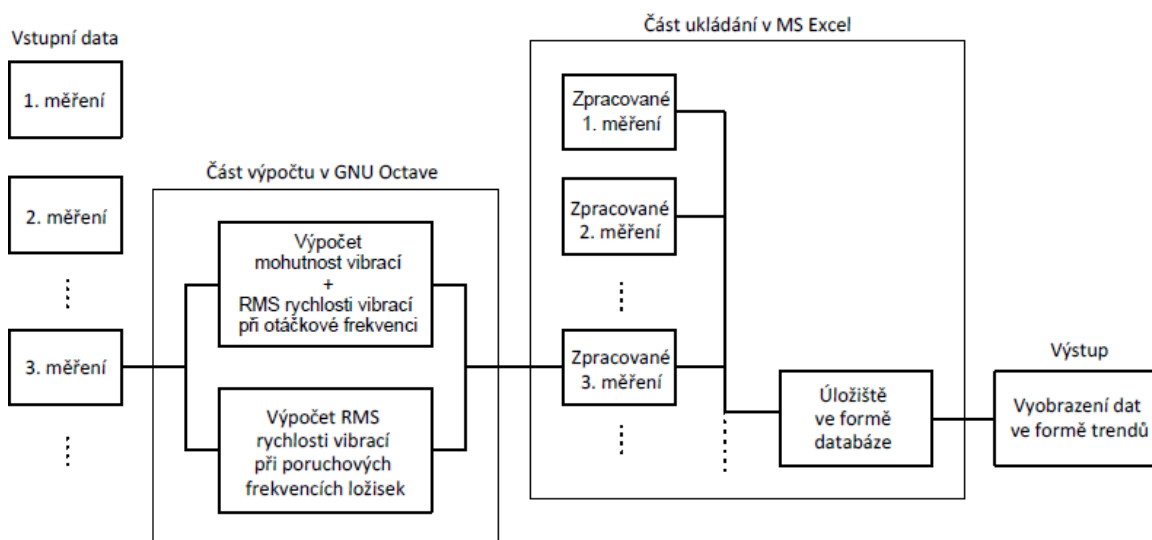
Parametry předního i zadního ložiska byly postupně z tabulky 4.2 dosazeny do vztahů pro výpočet poruchových frekvencí jednotlivých prvků ložiska (3.17), (3.18), (3.19) a 3.20 a vypočteny (viz tabulka 4.6).

Tabulka 4.6 - Vypočtené poruchové frekvence pro pření i zadní ložisko

Přední ložisko			
Ozn.	Název	Frekvence [Hz]	Vyšetřované pásmo [Hz]
BPFO	frekvence závady vnějšího kroužku	<b>4521</b>	4516 - 4526
BPMF	frekvence závady vnitřního kroužku	<b>5479</b>	5474 - 5484
BSF	frekvence závady valivého tělíska	<b>1873</b>	1868 - 1878
FTF	frekvence závady klece	<b>181</b>	176 - 186
Zadní ložisko			
Ozn.	Název	Frekvence [Hz]	Vyšetřované pásmo [Hz]
BPFO	frekvence závady vnějšího kroužku	<b>1929</b>	1924 - 1934
BPMF	frekvence závady vnitřního kroužku	<b>2471</b>	2466 - 2476
BSF	frekvence závady valivého tělíska	<b>1600</b>	1595 - 1605
FTF	frekvence závady klece	<b>175</b>	170 - 180

## 4.4 Zpracování dat do formy diagnostických deskriptorů

Ke zpracování dat z měření do formy navržených diagnostických deskriptorů byly vytvořeny dva samostatné skripty v programu GNU Octave. Jednotlivé zpracované deskriptory byly následně exportovány do dílčích souborů MS Excel (viz obr. 4.6), které byly pomocí funkce PowerQuery propojeny s hlavním excelovským úložištěm, kde se hodnoty ukládaly ve formě databáze.



Obrázek 4.6 - Schéma zpracování naměřených dat až po vyobrazení ve formě trendů

MS Excel byl k uchování vypočtených dat zvolen pro svou jednoduchost. Pro vyobrazení trendů (grafů) se spustí skript, který si nahraje veškerá data z hlavního excelovské úložiště, ty vyfiltruje a vyobrazí.

#### 4.4.1 Vstupní data

Vstupními daty se rozumí soubor .dat datového typu *int32*, který obsahuje diskretizované hodnoty jednotlivých naměřených signálů, vytvořených pomocí DAQ. Měření na obráběcím centru probíhalo dlouhodobě a vstupní data byly průběžně dodávány spolu s poznámkami z měření. V poznámkách z měření lze nalézt důležité informace - např. při jakém dílčím měření byly nastaveny jaké otáčky, umístění senzorů, opakování měření, zahřívací cyklus stroje apod.

#### 4.4.2 Výpočet mohutnosti vibrací a RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci

Pro výpočet deskriptorů byly vytvořeny dva skripty. Výpočet mohutnosti vibrací a RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci proběhl v jednom (zdrojový kód uveden v elektronické příloze *Program\_acc2vel\_RMS.m*) a RMS vibrací při poruchových frekvencích ložisek v druhém (viz elektronická příloha *Program\_acc2vel\_loziskova.m*).

Z důvodu parazitních signálů a šumů, které se mohly při měření vyskytnout bylo důležité naměřené signály nejprve prohlédnout. Skript byl navrhnut tak, aby postupně vyobrazil průběhy naměřených signálů a nabídnul možnost poupravit časovou oblast a frekvenční pásmo, ze kterého se dále deskriptory počítaly. Poté skript spočítal ze všech naměřených signálů požadované deskriptory, ty pak spolu s dalšími informacemi roztřídil do finálního tvaru, ve kterém byly data exportována do souboru MS Excel.

#### Popis jednotlivých částí výpočtu (viz obr. 4.7):

##### Načtení a převod dat

Tato část skriptu byla převzata a upravena pro potřeby této práce. Slouží k načtení binárních dat ze souboru vytvořeného pomocí DAQ, převodu datového typu (z *int32* na reálná čísla *float64* a znaky *char*) a vytvoření struktury, se kterou se dále pracovalo.

Zdrojový kód v elektronické příloze – *fordat2mat.m*.

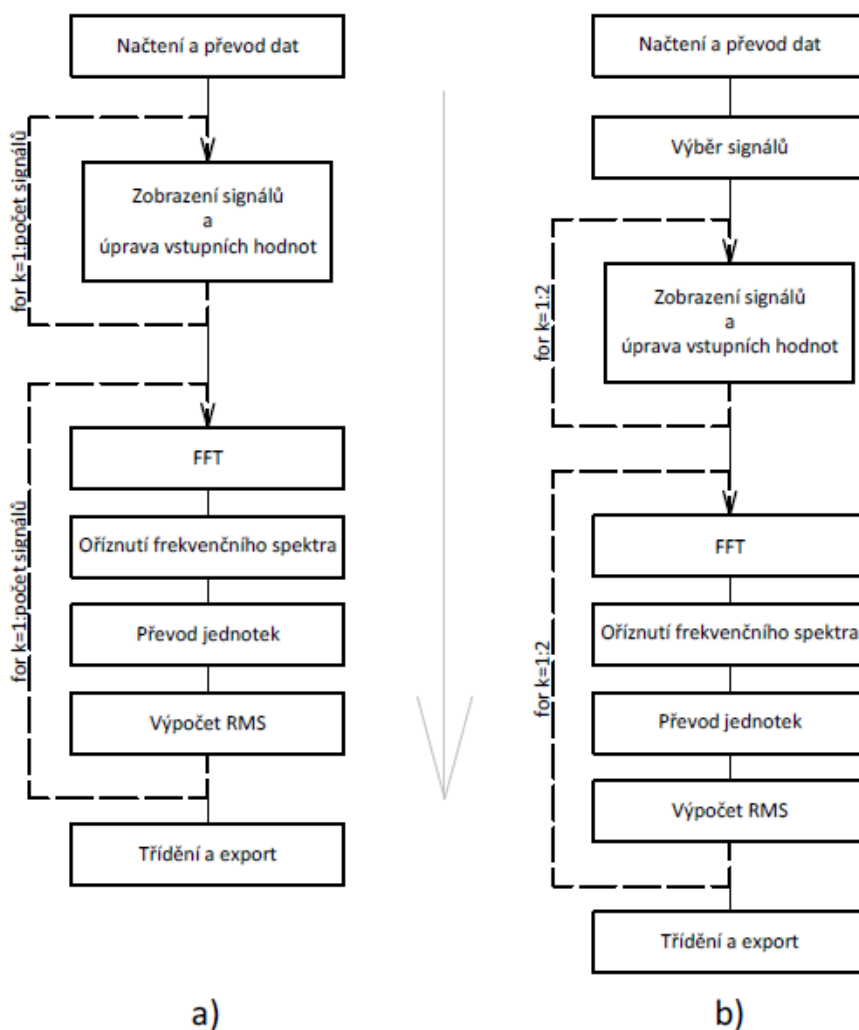
##### Zobrazení signálů a úprava vstupních hodnot

Při měření se z neznámých důvodů vyskytovaly šumy a náhodné parazitní signály. I když se při jejich výskytu měření opakovalo za cílem získání čistého naměřeného

signálů, bylo potřeba signály postupně zkontrolovat a v případě výskytu „nečistot“ upravit časovou oblast, ze které se bude dále deskriptor počítat.

Tato potřeba byla vyřešena tak, že skript postupně zobrazuje naměřené signály spolu s možností změny vstupních parametrů (časové oblasti a frekvenčního pásma) pro právě zobrazený signál. Při pohledu na schéma celého výpočtu (viz obr. 4.7) by se mohlo zdát, že se zbytečně skládá ze dvou *for* cyklů, když by mohl být jeden. Důvodem, proč je výpočet takto rozdělen do dvou *for* cyklů je nepříjemnost, kdy při jednom *for* cyklu se po odsouhlasení vstupního požadavku provede celý výpočet, který způsobí na několik desetin, maximálně jednotek sekund zpomalení programu a tím i zpoždění vyobrazení dalšího signálů. Po vypočtení několika signálů bylo toto zpomalení nepříjemné a začínalo být znát na celkovém času této nutné manuální operace.

Zdrojový kód je součástí hlavního skriptu – viz elektronická příloha *Program\_acc2vel\_RMS.m*.

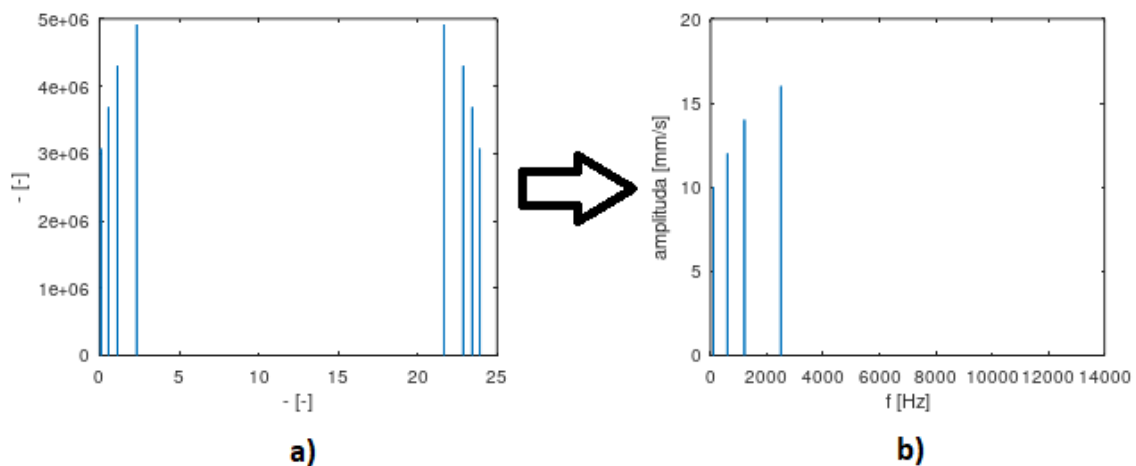


Obrázek 4.7 - Schématicky znázorněný výpočet deskriptorů pro - a) mohutnosti vibrací a RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, b) RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích ložisek

### FFT - fast Fourier transform

FFT byla popsána v kapitole 3.5.2. při využití FFT dle rovnice 3.16 je ale výsledkem komplexně sdruženě symetrické spektrum. pro získání velikosti amplitud je tedy nutné výsledek vyjádřit v absolutní hodnotě. při vyobrazení v rovině frekvence-amplituda bylo získáno spektrum symetrické kolem jeho poloviny. Běžně se pracuje s jeho jednou polovinou, vyobrazuje se tedy pouze polovina spektra. Následně bylo potřeba přepočítat hodnoty na obou osách, aby odpovídaly skutečné amplitudě a frekvenci, viz obr. 4.8. Vznikne frekvenční spektrum tak, jak je známo.

Zdrojový kód v elektronické příloze *furiertans.m*.



Obrázek 4.8 - Výpočet frekvenčního spektra pomocí FFT - a) hrubý výsledek FFT, spektrum je v polovině symetrické; b) jednostranné frekvenční spektrum, přepočtené osy

### Oříznutí frekvenčního spektra

Slouží k oříznutí frekvenčního spektra tak, aby zbyly pouze požadované frekvence, ze kterých se bude dále počítat požadovaný deskriptor. Pro mohutnost vibrací to je defaultních 10 až 1000 Hz. Pro RMS rychlosti vibrací v blízkosti otáčkové frekvence je spektrum oříznuto podle vstupních hodnot.

Zdrojový kód v elektronické příloze *specrange.m*.

### Převod jednotek

Signál, který se zpracovává, je naměřený průběh zrychlení vibrací. V kapitole 3.2.2 byl zmíněn význam rychlosti vibrací a následně v kapitole 4.3 byly vybrány deskriptory, pro které potřebujeme znát rychlost vibrací. Je tedy nutné převést průběh zrychlení vibrací na průběh rychlosti vibrací.

Při tvorbě byly vyzkoušeny převody jednotek pomocí derivací a integrálů již v časové oblasti signálu, ale tato volba nebyla příliš úspěšná. Při integraci se z důvodu neznámé

integrační konstanty průběh viditelně posouval v ose y. Při derivaci se z diskretizovaných hodnot jedna vytratí, což lze vyřešit odhadem a doplněním ztracené hodnoty nebo odstraněním poslední hodnoty z časové oblasti, ale nic z toho není ideální řešení. O něco lépe se dařilo při vyzkoušení MATLABovských funkce *cumtrapz* (Cumulative trapezoidal numerical integration). Nakonec bylo zvoleno velmi prosté řešení s využitím úvahy rovnice 3.6, kdy k převodu jednotek dochází až ve frekvenční oblasti pouhým vydělením hodnoty zrychlení příslušnou hodnotou úhlové frekvence.

Zdrojový kód je součástí elektronické přílohy *Program\_acc2vel\_RMS.m*.

### Výpočet RMS

V této fázi je vše připraveno na výpočet efektivní hodnoty z frekvenčního spektra. Jestli výstupem bude mohutnost vibrací nebo RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci záleží na zadaných vstupních parametrech.

Při tvorbě byl otestován i výpočet RMS z časové oblasti signálu, kdy se provedla reverzní FFT oříznutého frekvenčního spektra a byl získán časový průběh složený pouze z požadovaných spektrálních složek. Zde je nutné mít na paměti, že pro reverzní FFT je vždy nutné dosazovat hodnoty amplitud v původním, tedy komplexně sdruženém tvaru. Toho lze docílit ponecháním hodnot amplitud v komplexně sdruženém tvaru již od převodu z časové do frekvenční oblasti. Poté v oříznout frekvenční spektrum na požadované pásmo, převést jednotky a následně provést reverzní FFT. Výsledky obou postupů se shodovaly, ale z důvodu menšího počtu operací a přehlednosti skriptu byl zvolen výpočet RMS přímo z frekvenčního spektra podle rovnice 3.15.

Zdrojový kód je součástí elektronické přílohy *Program\_acc2vel\_loziskova.m*.

### Třídění a export

Ke každé vypočtené hodnotě je nutné přiřadit další informace. Tato operace byla vytvořena s cílem co nejvíce automatizovat přiřazování těchto informací. Např. z názvu signálu *2020-11-30-M06-(24x)-MCU-casacc.dat* lze získat datum měření, označení snímače, měřící směr a datum měření. Ze zadání vstupních parametrů při kontrole naměřeného signálů jsou známy časové úseky a frekvenční pásma, ze kterých byl výpočet proveden. Tato operace všechny tyto hodnoty shrne v jedné tabulce, která je následně exportována do souboru MS Excel.

Při výskytu parazitních signálů a šumu se měření při stejných podmínkách opakovalo a později byly přidány i další dílčí měření v rámci jednoho měřícího dne (některé souvisely s touto prací, některé ne). Z toho důvodu nebylo možné trvale přiřadit otáčky vřetene a umístění senzorů k pořadí signálů, protože se mění. Skript vytvoří prázdné

sloupce a po exportu je nutné manuálně s poznámkami z měření doplnit otáčky a umístění senzorů, případně další poznámky.

Zdrojový kód v elektronické příloze *ukladani\_mohutnosti.m*.

#### 4.4.3 Výpočet RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích ložisek

Při pohledu na zjednodušené schéma skriptu (viz obr. 4.7, 4.8) lze usoudit, že se oba skripty pro výpočet deskriptorů velmi podobají. Princip i podprogramy jsou prakticky stejné s kapitolou 4.4.2, rozdílem je pouze výběr signálů, jejich vstupní parametry a rozdílné popsání vypočtených hodnot při tvorbě tabulky.

Hodnoty vypočtených poruchových frekvencí ložisek z tabulky 4.6 byly vepsány do zdrojového kódu skriptu (viz el. příloha *Program\_acc2vel\_loziskova.m*), pro jiné ložiska je tedy nutné poruchové frekvence přepsat přímo ve zdrojovém kódu.

##### Výběr signálů

Výpočet probíhá pouze z 24000RPM a směru X. Nebylo tedy nutné tvořit skript, který spočítá všechny signály. Po načtení naměřených dat stačí vybrat oba signály (při 24000RPM a směru X se měří na vřeteníku i a tubusu), se kterými se bude nadále pracovat.

Zdrojový kód je součástí elektronické přílohy *Program\_acc2vel\_loziskova.m*.

##### Třídění a export

Princip této operace je stejný jako v kapitole 4.4.2, nyní ale lze definovat směr měření a umístění snímače. Při vybírání signálů vždy první z nich odpovídá první konfiguraci snímačů, takže bylo možné natvrdo definovat i umístění signálů.

Zdrojový kód v elektronické příloze *ukladani\_loziskova.m*.

##### Ostatní operace

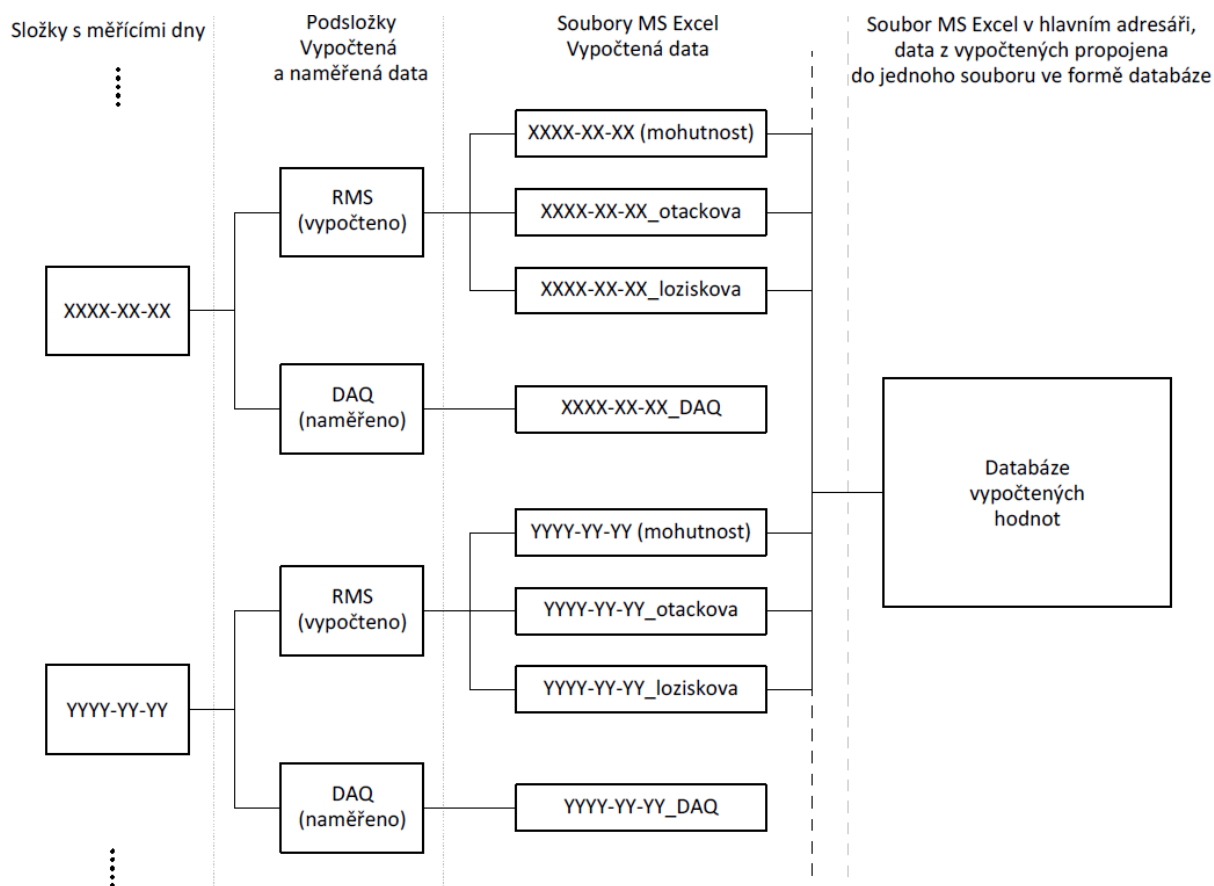
Ostatní operace jsou shodné s kapitolou 4.4.2 a skriptem *RMS\_acc2vel\_RMS.m*. Výpočet je shodný, rozdíly jsou dány zadanými vstupními parametry.

#### 4.4.4 Ukládání dat

Data jsou exportována do automaticky vytvořené složky, do které se exportují i další vypočtená data (viz obr. 4.9). Vytvořené soubory MS Excel se následně automaticky pomocí funkce PowerQuery propojí se souborem v hlavním adresáři, který obsahuje všechny vypočtená data ve formě databáze.

Původně byl zamýšlen export do jednoho společného souboru, kdy při každém dalším exportu budou vypočtená data přidána na další řádky. Po připsování řádků se ale někdy nedařilo soubor otevřít, protože hlásil chybu a potřeboval být obnoven. Po obnovení se většina uložených dat ztratila. Nebylo zjištěno, proč se tak dělo. Z tohoto důvodu bylo navrženo exportování do dílčích souborů, jejichž data se později sjednotí tak, jak je schematicky naznačeno na obr. 4.9. Toto řešení je zároveň výhodné při ručním dopisování otáček a umístění senzorů. Pokud by totiž došlo k chybnému přepsání buňky, chyba se bude nacházet pouze v tomto dílčím souboru.

Databáze vypočtených hodnot je s vypočtenými daty propojena pomocí PowerQuery. Tím se vylučuje vytvoření chyby při prohlížení databázového souboru, protože dílčí soubory s vypočtenými daty jsou definované jako zdroje, ze kterých databáze čerpá data. Při aktualizaci databáze jsou totiž data znovu načtena.



Obrázek 4.9 - Struktura ukládání dat vypočtených pomocí GNU Octave do složek a schéma propojení do jedné databáze

#### 4.4.5 Zobrazení trendu

Pro prezentaci naměřených dat zobrazením trendu měl pro svou jednoduchost sloužit MS Excel. Problém nastal ve chvíli, kdy bylo potřeba určitě hodnoty zobrazit



v závislosti na dalších sloupcích. Touto funkcí MS Excel sice nedisponuje, ale lze požadovaného výsledku docílit pomocí Power Query. Toto řešení ale bylo značně komplikované, neflexibilní a jakýkoliv zásah by byl časově náročný. Proto byl vytvořen v GNU Octave skript, který trendy přehledně zobrazí, zároveň úprava zdrojového kódu umožňuje lepší manipulaci a úpravy grafu než samotný MS Excel.

Zdrojový kód v elektronické příloze *zobrazeni\_trendu.m*.

## 4.5 Vyhodnocení naměřených dat

Diagnóza stroje byla provedena pomocí porovnání posledních naměřených mohutností vibrací s příslušnou normou a posouzením trendu vývoje stanovených deskriptorů.

### 4.5.1 Vyhodnocení mohutnosti vibrací dle ČSN 20 0065

Poslední aktualizace norma ČSN 20 0065 je sice z roku 1992, zato se ale na rozdíl od ISO 10 816 zaměřuje přímo na obráběcí stroje, které rozděluje stroje do kategorií podle velikosti, technologie a koncepce.

*Tabulka 4.7 - Mezní hodnoty mohutnosti vibrací pro kategorii strojů Obráběcí centra se svislou osou pro rotační obrobky dle ČSN 20 0065 [12]*

Největší průměr obrobku D (mm)		do 3000	nad 3000
mezní hodnoty	$v_{e \text{ mez}} \text{ (mm} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	1,8	2,8
	$s_{e \text{ mez}} \text{ (}\mu\text{m)}$	16	25

Měřený stroj spadá do kategorie *Obráběcí centra se svislou osou pro rotační obrobky*, ve které se mezní hodnoty liší podle největšího průměru obrobku. Výrobce udává největší možný průměr obrobku 1000 mm [20]. Dle normy byly zjištěny mezní hodnoty (viz tabulka 4.7) pro mohutnost vibrací  $1,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Norma udává i alternativní způsob vyhodnocení podle výchylky, v této práci ale nebylo s výchylkou pracováno.

V tabulce 4.8 lze vidět naměřené mohutnost vibrací z posledního měření, provedeného 28.6.2021. Samotná tabulka a výpočet aritmetických hodnot byl inspirován normou. Při pohledu na výsledné aritmetické průměry hodnot mohutnosti vibrací a porovnání s mezní hodnotou lze usoudit, že obráběcí centrum je dle normy ČSN 20 0065 v dobrém technickém stavu.

*Tabulka 4.8 - Naměřené hodnoty mohutnosti vibrací dne 28.6.2021*

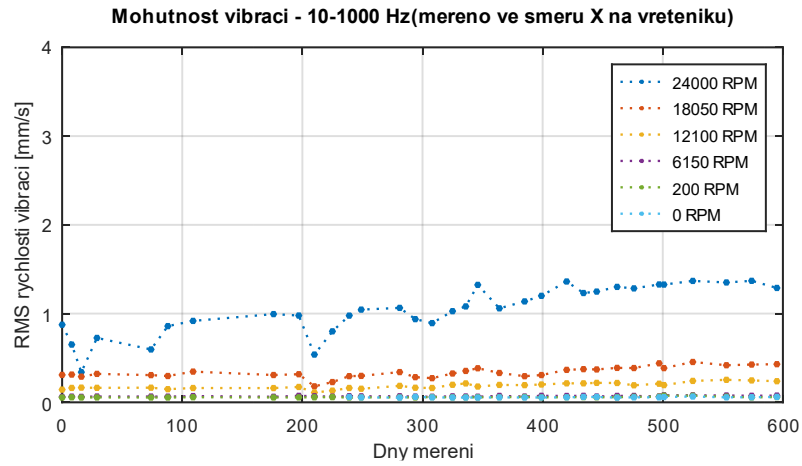
		Místo a směr umístění snímače					
		1. konfigurace			2. konfigurace		
		X <sub>vřeteník</sub>	Y <sub>vřeteník</sub>	Z <sub>příruba</sub>	X <sub>tubus</sub>	Y <sub>tubus</sub>	Z <sub>příruba</sub>
		V <sub>e</sub>	V <sub>e</sub>	V <sub>e</sub>	V <sub>e</sub>	V <sub>e</sub>	V <sub>e</sub>
šum snímače	0 min <sup>-1</sup>	0,061	0,053	0,019	0,054	0,049	0,018
n <sub>1</sub>	200 min <sup>-1</sup>	0,059	0,056	0,019	0,050	0,050	0,019
n <sub>2</sub>	6150 min <sup>-1</sup>	0,076	0,068	0,039	0,114	0,120	0,038
n <sub>3</sub>	12100 min <sup>-1</sup>	0,238	0,292	0,092	0,367	0,411	0,093
n <sub>4</sub>	18050 min <sup>-1</sup>	0,429	0,691	0,152	0,614	0,868	0,155
n <sub>5</sub>	24000 min <sup>-1</sup>	1,289	0,530	0,179	1,559	0,834	0,184
Výsledné aritmetické průměry		<b>0,418</b>	<b>0,327</b>	<b>0,096</b>	<b>0,541</b>	<b>0,457</b>	<b>0,098</b>
Mezní hodnota V <sub>e mez</sub>		<b>1,8 mm·s<sup>-1</sup></b>					

#### 4.5.2 Trend mohutnosti vibrací

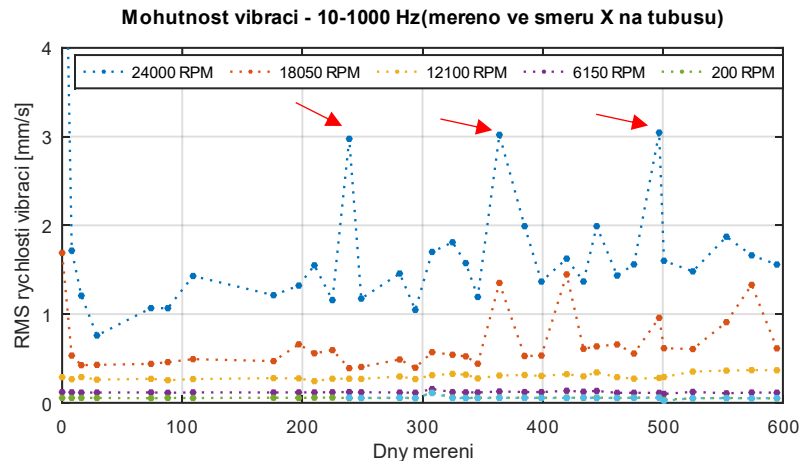
I když dle normy ČSN 20 0065 byly mohutnosti vibrací v pořádku a celkové vibrace relativně hluboko pod mezní hodnotou, jejich trend byl poněkud neobvyklý.

Ve směru X se na vřeteníku i na tubusu projevil při 24000RPM vzrůstající trend (viz obr. 4.10), který by mohl signalizovat postupný vývoj mechanické závady, ale také stále trvající zabíhání stroje. Ve směru X na tubusu se při maximálních otáčkách kromě vzrůstu trendu vyskytl chaotický průběh (viz obr. 4.11), kdy některé z hodnot byly oproti ostatním zvýšené. V záznamu měření lze vyčíst, že signál v některé měřící dny obsahoval různé parazitní signály, šum, či podivný chvilkový úskok signálu. Při výskytu těchto vad signálu se dílčí měření opakovalo a při jeho zpracování byly ještě signály zkontrolovány. V případě vady signálu byly upraveny vstupní hodnoty pro výpočet – časový úsek, ze kterého se daný deskriptor počítal. Vzhledem k tomu, že k měření nedocházelo v pravidelné dny a pravidelné hodiny, před samotným měřením byl na stroji spuštěn zahřívací cyklus za účelem zajištění co nejvíce podobných podmínek měření.

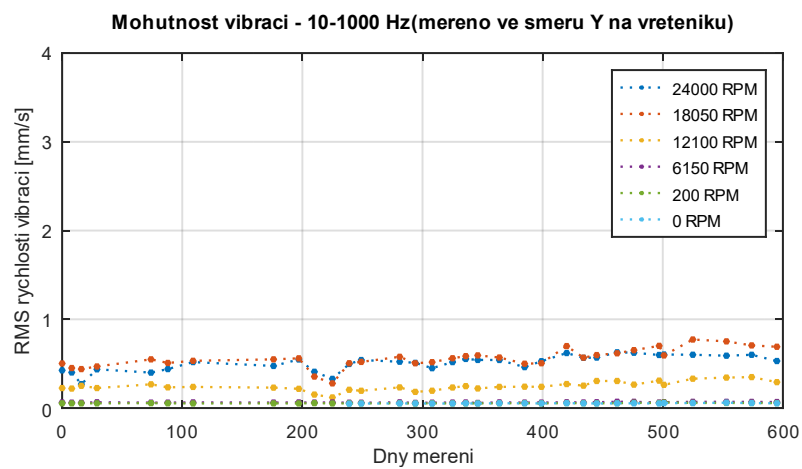
Přinejmenším je zvláštní, že ke vzrůstajícímu trendu dochází pouze při 24000RPM (viz obr. 4.10 a 4.11). Pokud by byl vzrůstající trend důsledkem vývoje mechanické závady, očekával by se viditelný vzrůst i při ostatních otáčkách. Vzrůst by sice měl být v porovnání s vyššími otáčkami menší, ale stále viditelný. Zároveň je očekávaný vzrůstající trend i ve směru Y, k tomu ale nedošlo (viz obr. 4.22).



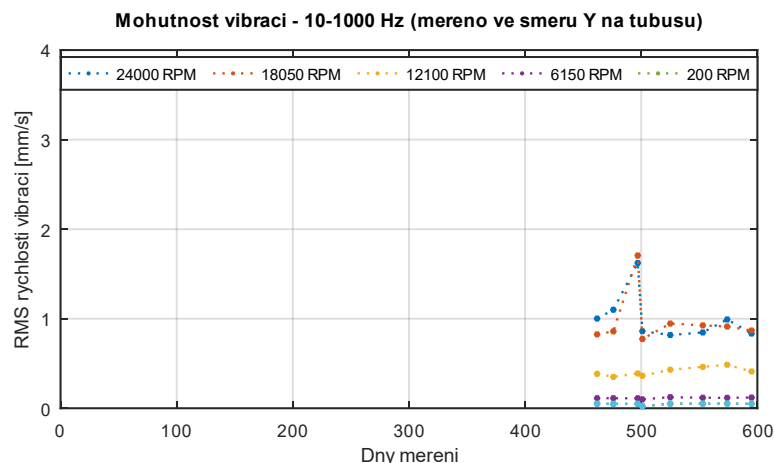
Obrázek 4.10 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru X na vřeteníku



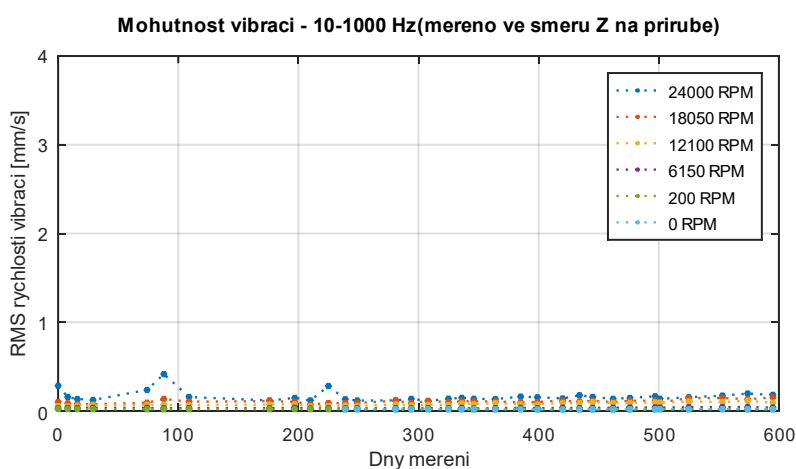
Obrázek 4.11 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru X na tubusu s vyznačenými zvýšenými hodnotami



Obrázek 4.12 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru Y na vřeteníku



Obrázek 4.13 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru Y na tubusu



Obrázek 4.14 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru Z na přírubě

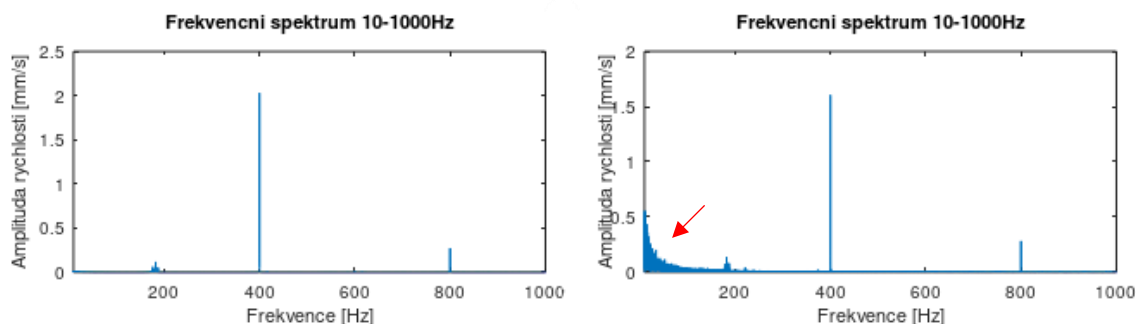
Ve směru Y lze na vřeteníku pozorovat konstantní hodnoty mohutnosti vibrací po celý čas měření (viz obr. 4.12). Pokud by se ve směru X nevyskytoval neobjasněný vzrůstající trend, bylo by možné tyto konstantní hodnoty označit jako referenční hladinu mohutnosti vibrací. Na tubusu se začalo měřit později, z toho důvodu je naměřeno výrazně méně hodnot (viz obr. 4.13). Ze zatím naměřeného trendu se zdá, že směr Y je na tubusu klidnější než směr X.

Ve směru Z byl očekáván klidný průběh a taky tak se ukázal (viz obr. 4.14). Při rotaci dochází ke kmitání především v radiálním směru, proto jsou hodnoty mohutnosti vibrací v tomto směru výrazně menší.

### **Zvýšené hodnoty na tubusu ve směru X**

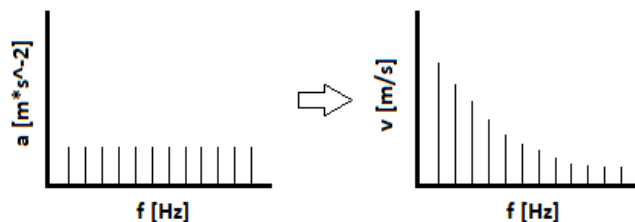
Při vyobrazení časových oblastí signálu zvýšených hodnot vyskytujících se na tubusu ve směru X (viz obr. 4.11) nebyl upozorován žádný neobvyklý průběh (např. clipping, kdy při přebuzení dojde k oříznutí vyšších hodnot zrychlení). Při vyobrazení frekvenční

oblasti zvýšených hodnot mohutnosti vibrací byly zpozorovány zvýšené hodnoty spektrálních složek na nízkých frekvencích (viz obr. 4.15).



Obrázek 4.15 – Porovnání frekvencní spektra mohutnosti vibrací ve směru X na tubusu – ne zvýšené hodnoty ze dne 19.4.2021 (vlevo), zvýšené hodnoty ze dne 11.9.2020 (vpravo)

Po bližším prozkoumání byl zpozorován zvýšený širokopásmový šum ve frekvencní oblasti zrychlení. Tento šum následně při převodu ze zrychlení na rychlost vibrací způsobí zvýšení jednotlivých nízkofrekvenčních spektrálních složek signálu (viz obr. 4.16). Takto zvýšené spektrální složky se promítnou do velikosti mohutnosti vibrací, protože zasahují do frekvencního pásma, ze kterého se mohutnost vibrací počítá.



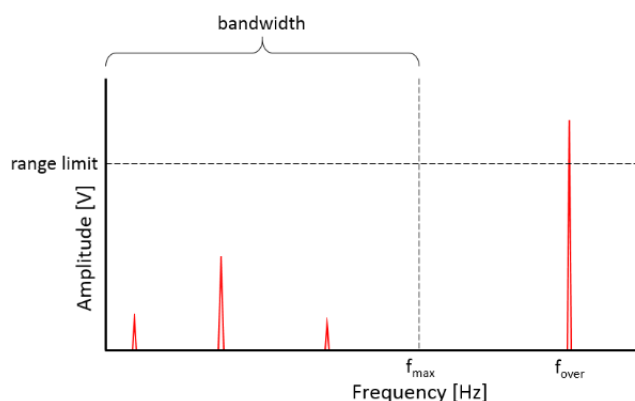
Obrázek 4.16 - Schematicky znázorněný převod zrychlení na rychlost ve frekvencní oblasti

Pro pochopení, proč k tomuto jevu dochází byla provedena další rešerše soustředící se na tzv. troubleshooting při měření vibrací. Nejprve byla pomocí Hannova okna zkontrolována chyba únikem, k té nedošlo. Standardní přebuzení bylo vyloučeno, protože nebyl v časové oblasti signálu zpozorován clipping. V kladném případě by osekuté špičky v signálu připomínaly obdélníkové vlny, které se po FFT ve frekvencním spektru vyobrazí jako postupně klesající liché spektrální složky. Tyto spektrální složky jsou tedy na nízkých frekvencích zvýšeny již ve frekvencním spektru zrychlení. Z povahy převodu zrychlení na rychlost (viz obr. 4.16) dojde na nízkých frekvencích ještě k jejich zvýšení. Výsledkem je jev, známý jako tzv. ski-slope (viz obr. 4.17), kdy nízké frekvence jsou několikrát vyšší než otáčková frekvencní složka. Tato varianta byla tedy vyloučena.



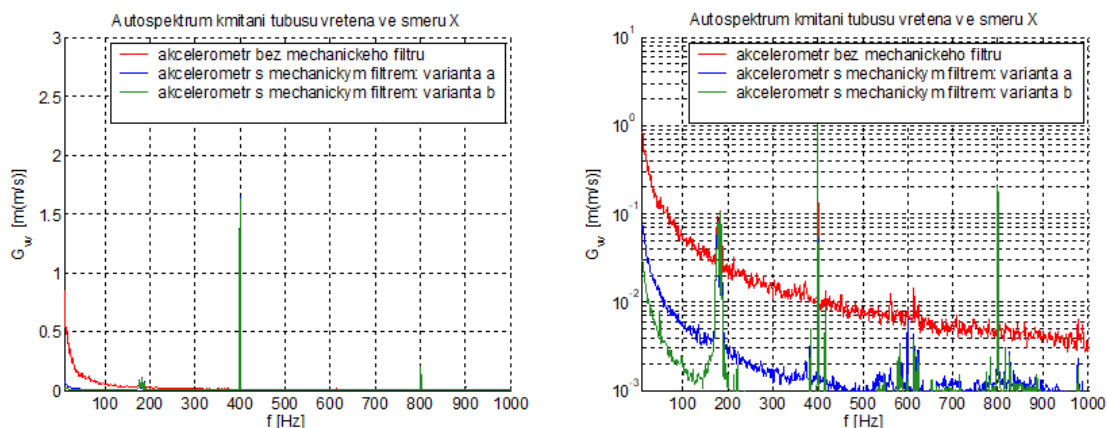
Obrázek 4.17 - Ski-slope, bývá několikrát větší než otáčková frekvenční složka [21]

Na základě další rešerše bylo zjištěno, že se jedná o tzv. „out-of-band“ přebuzení, kdy k přebuzení dojde na větší frekvenci, než je maximální frekvence měřeného pásma [22] (viz obr. 4.18). To způsobí širokospektrální šum v měřeném frekvenčním pásmu, které po převodu zrychlení na rychlost způsobí zvýšení frekvenčních složek na nízkých frekvencích, a ty zvýšení hodnoty mohutnosti vibrací. Jedná se o jev, který se obecně špatně odhaluje. Vzhledem k tomu, že byla při měření využívána DAQ karta, která neobsahuje indikátor přebuzení, nebyl tento jev z počátku identifikován a vzhledem k tomu, že se vyskytoval společně se vzrůstajícím trendem, předpokládalo se, že se jedná spíše o počátek projevující se závady na stroji.



Obrázek 4.18 - "Out-of-band" přebuzení, k přebuzení dojde nad měřeným frekvenčním pásmem [22]

K odstranění tohoto jevu je nutné použít vhodný mechanický filtr. Komerční mechanické filtry jsou ale drahé, navíc je potřeba filtr vyzkoušet, zda tlumí vibrace tak, jak je potřeba. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik experimentů, na jejichž základě byla vybrána vhodná alternativa ke komerčním mechanickým filtrům – *latexová membrána*. Ostatní testované alternativy sice vhodně potlačily vyšší frekvence, ale zároveň potlačily zkoumané složky v měřeném frekvenčním pásmu. Na obr. 4.19 lze vidět porovnání autospektra rychlosti vibrací vzniklého při měření bez mechanického filtru, se 2 vrstvami latexové membrány a se 4 vrstvami latexové membrány. V logaritmickém měřítku lze zpozorovat výrazné utlumení. To znamená, že zvýšený širokospektrální šum byl již při zrychlení utlumen.

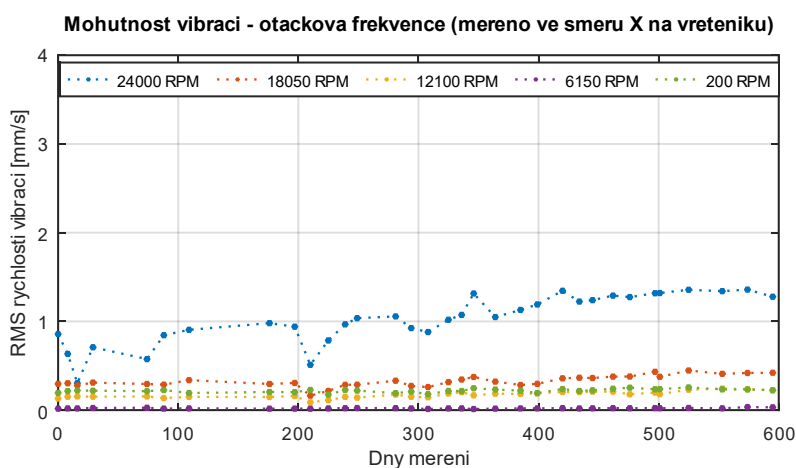


Obrázek 4.19 - Autospektrum kmitání na tubusu ve směru X v měřítku (vlevo) a v logaritmickém měřítku (vpravo); červeně – bez filtru, modře – 2 vrstvy latexové membrány, zeleně – 4 vrstvy latexové membrány

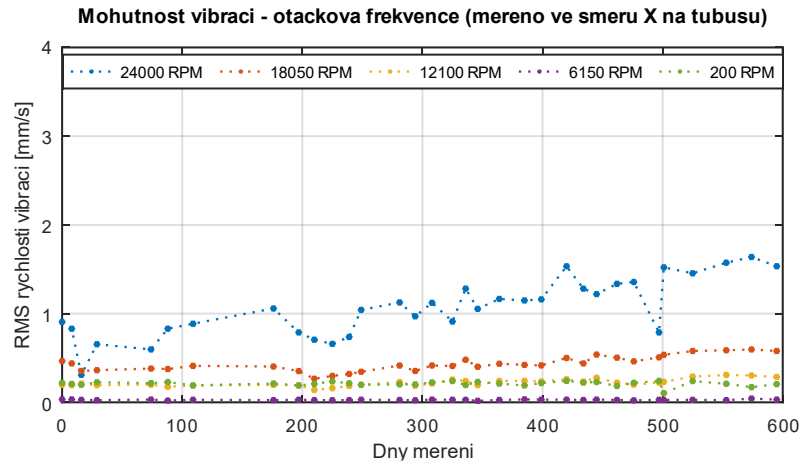
### 4.5.3 Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci

Zaměření se na frekvenční pásmo při otáčkové frekvenci umožňuje sledovat RMS rychlosti vibrací otáčkové frekvence. Ta sice nezahrne mechanické závady projevující se na ostatních frekvencích, ale vyvíjející závada může způsobit zvětšení amplitudy otáčkové spektrální složky. Zároveň se očekává klidnější průběh, protože tento deskriptor neobsahuje tak široké frekvenční pásmo jako mohutnost vibrací. Z tohoto důvodu se „out-of-band“ přebuzení projevilo pouze u mohutnosti vibrací a ostatní deskriptory tímto jevem nebyly dotčeny.

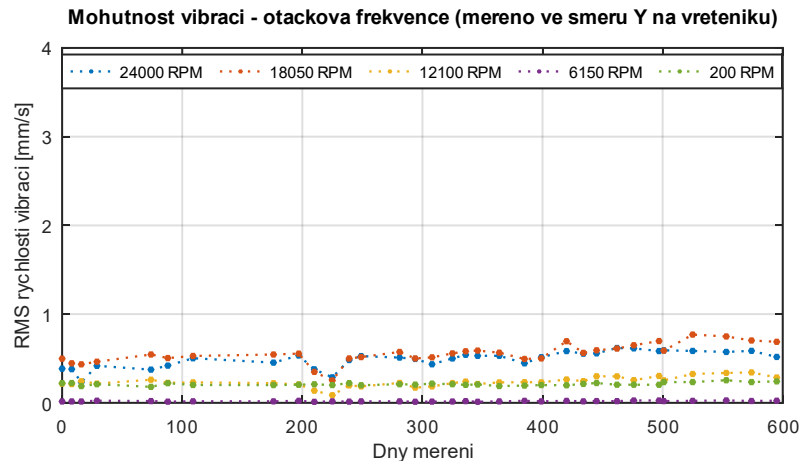
Na trendu (viz obr. 4.20) lze vidět ve směru X vzrůst podobný tomu, který vznikl při vyobrazení mohutnosti vibrací ve stejném směru. Opět se zde vyskytl znepokojivý vzrůstající trend při 24000RPM. Při nižších otáčkách hodnoty zůstávají v konstantní hladině. Na tubusu (viz obr. 4.21) lze zpozorovat hodnoty trendu celkově nižší a bez větších skoků.



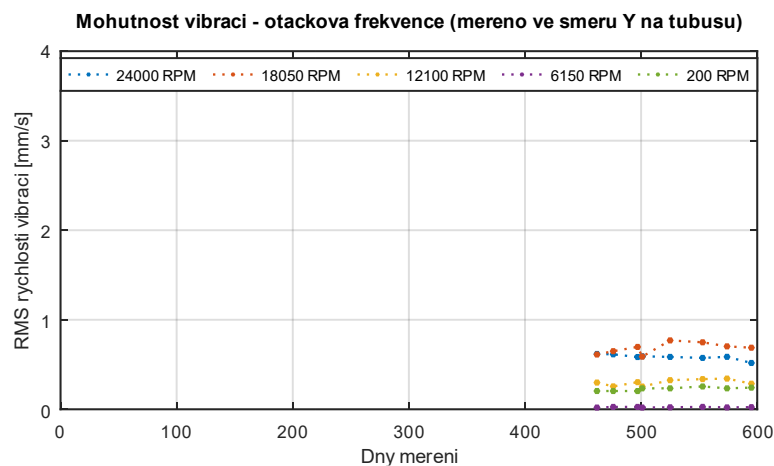
Obrázek 4.20 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru X na vřeteníku



Obrázek 4.21 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru X na tubusu

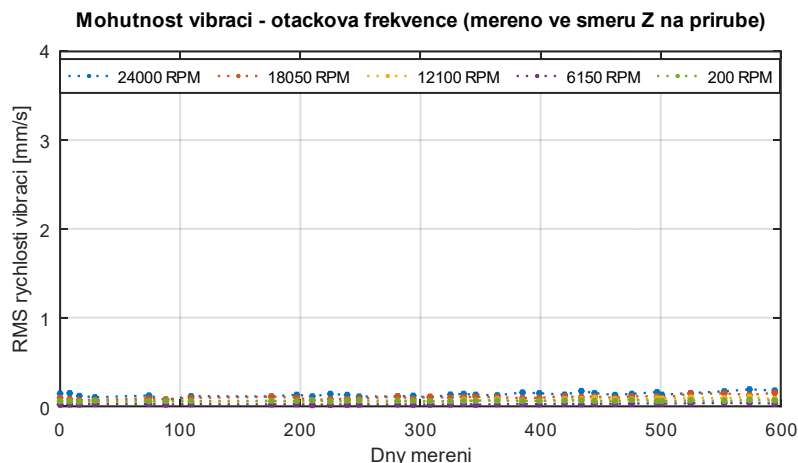


Obrázek 4.22 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru Y na vřeteníku



Obrázek 4.23 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru Y na tubusu





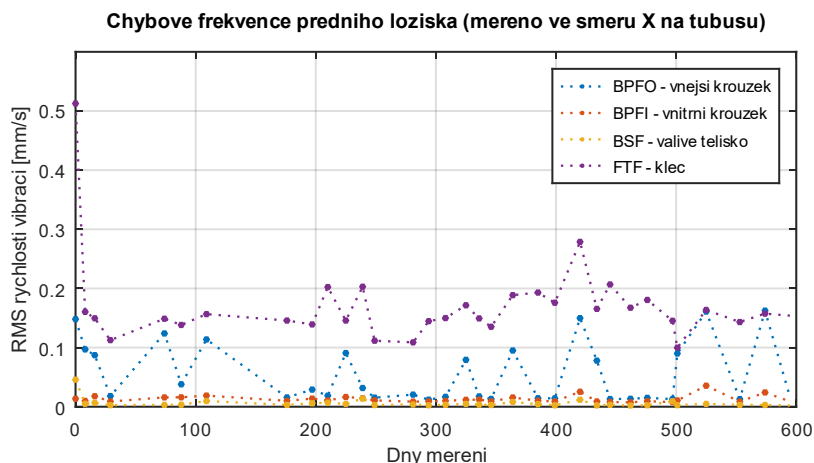
Obrázek 4.24 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru Z na přírubě

Směr Y je na vřeteníku shodně s mohutností vibrací klidný. Na otáčkové frekvenci se výrazněji projevil pokles při měření na 225. dni, který byl zaznamenán i v ostatních směrech a není mu přikládán značný význam. Hodnoty na tubusu jsou ve směru Y přibližně shodné s hodnotami na vřeteníku. Na směru Z se drží na nízkých hodnotách konstantní hladina.

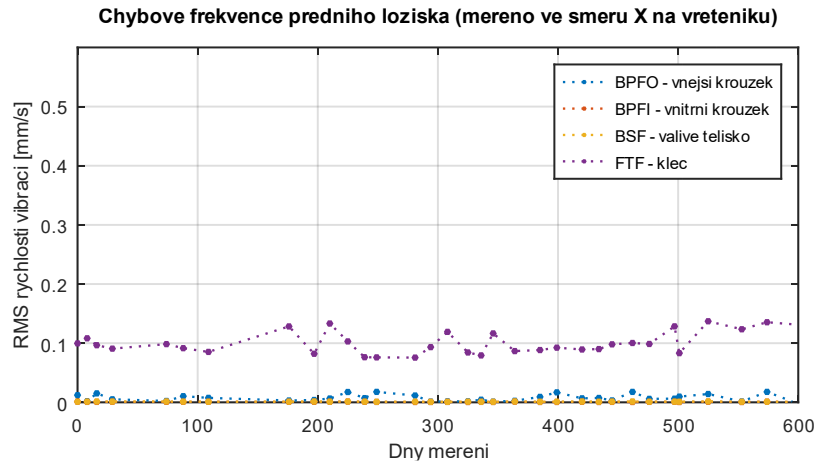
#### 4.5.4 Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích ložisek

Vzhledem k vzrůstajícímu trendu ve směru X při 24000RPM se očekávalo, že pokud by vzrůstající trend byl způsoben postupným opotřebením stykových ploch ložisek, měl by se vzrůstající trend objevit i na poruchových frekvencích ložisek právě při těchto otáčkách v a tomto směru.

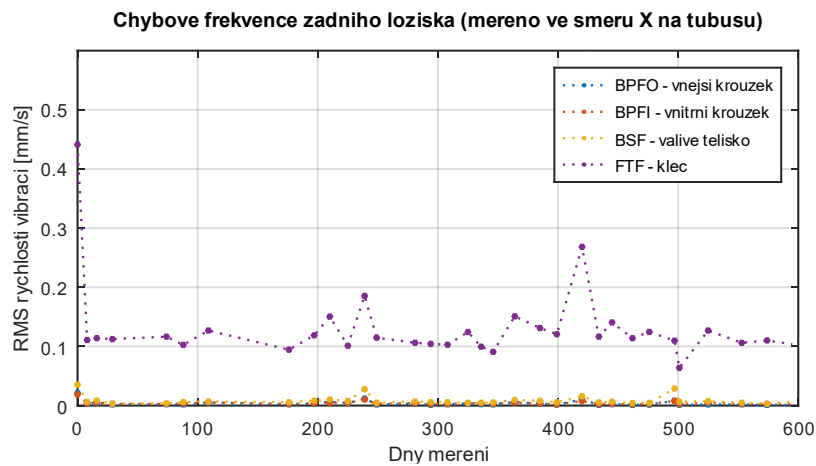
Při pohledu na vyobrazené trendy (viz obr. 4.25, 4.26, 4.27 a 4.28) lze variantu s postupným opotřebením ložisek vyloučit. K nárůstu trendu nedošlo a hodnoty deskriptorů se drží po celou dobu měření přibližně na stejné hladině.



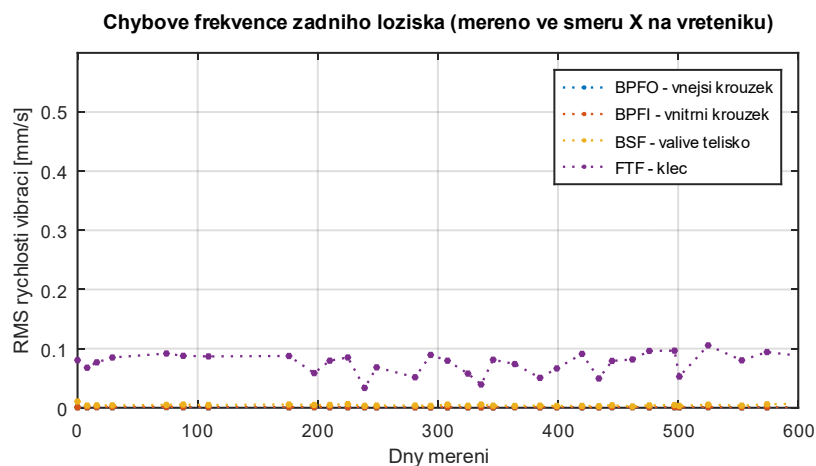
Obrázek 4.25 - Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích předního ložiska, měřeno ve směru X na tubusu při 24000RPM



*Obrázek 4.26 - Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích předního ložiska, měřeno ve směru X na vřeteníku při 2400RPM*



*Obrázek 4.27 - Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích zadního ložiska, měřeno ve směru X na tubusu při 2400RPM*



*Obrázek 4.28 - Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích zadního ložiska, měřeno ve směru X na vřeteníku při 2400RPM*

## 4.6 Zhodnocení experimentu

### 4.6.1 Shrnutí dosavadních zjištění

První ze zjištění, ze kterých bude následně provedeno vyhodnocení technického stavu stroje, je vyhodnocení stavu stroje dle normy ČSN 20 0065. Tato norma vyhodnocuje technický stav stroje jako bezvadný. Druhé zjištění je výskyt vzrůstajícího trendu ve směru X při 24000RPM, který by sice mohl být způsobem vyvíjející se mechanickou závadou, ale pouze v případě, že by se projevovala ve směru X a ve směru Y nikoliv. V případě závady je tento projev nepravděpodobný, neboť při otáčení vřetene by se závada projevující se v radiálním směru měla projevit jak ve směru X, tak ve směru Y, k tomu ale nedošlo. Třetím zjištěním je, že se na žádném ložisku neprojevil vzrůstající trend a ani výrazně zvýšené hodnoty. Naopak po celou dobu měření byly sledované deskriptory ve stejné hladině. To podporuje úvahu, že vzrůstající trend ve směru X nemusí být nutně způsoben závadou.

Minimálně za zmínku strojů i výskyt „out-of-band“ přebuzení, protože díky tomu lze usoudit, že mohutnost vibrací nemusí být vždy vhodný deskriptor. Mohutnost vibrací nejlépe vypovídá o technickém stavu při jednorázovém měření, kdy není známa její historická ani referenční hodnota, ale lze tyto hodnoty porovnat s normou. Při dlouhodobém měření může ale být tento deskriptor zkreslen. Mohutnost vibrací se počítá z relativně širokého frekvenčního pásma, které v případě výskytu zvýšeného šumu vykazuje falešně zvýšené hodnoty.

### 4.6.2 Vyhodnocení technického stavu stroje

Na základě dostupných dat shrnutých v kapitole 4.6.1, lze usoudit, že vzrůstající trend ve směru X je s největší pravděpodobností způsoben stálým zabíháním stroje. Přesto by bylo vhodné v trendovacím měření pokračovat i nadále a hlídat tento vzrůst. Na počátku měření byl stroj nový a zatím nebylo možné jednoznačně stanovit referenční hladinu deskriptorů v směru X.

Z dostupných dat lze bezpečně konstatovat, že ložiska nevykazují problematické chování a k výraznému opotřebením ložisek nedošlo. To je podpořeno vyhodnocením dle normy ČSN 20 0065, která přisuzuje naměřené hodnoty bezvadnému stavu stroji. Z těchto poznatků vycházejících z dostupných dat byl technický stav stroje shledán dobrým.

## 5 Závěr

Cílem práce bylo zpracování trendovacího měření, na jehož základě následně provést vyhodnocení technického stavu stroje. První část práce je zaměřena na obecný úvod do problematiky technické diagnostiky, vibrodiagnostiky a měření vibrací. Je zde shrnuta základní teorie k vibracím a vibrodiagnostice jako takové. Následují normy pro vyhodnocení vibrací a porovnání diagnostických přístrojů nabízených na trhu. Dále je vysvětlen princip převodu časového signálu do frekvenční oblasti, co je to frekvenční oblast a poruchové frekvence ložisek.

Druhou částí je část praktická. Nejprve bylo měřené obráběcí centrum MCU 700 VT – 5X popsáno spolu s použitými přístroji, snímači a podmínkami měření. Následoval návrh vhodných diagnostických deskriptorů, do jejichž formy bylo nutné naměřená data zpracovat. Zvolenými deskriptory se stala mohutnost vibrací, RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci a RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích ložisek. Ke zpracování byly vytvořeny dva samostatné skripty v programu GNU Octave, které deskriptory exportovaly do dílčích souborů MS Excel z jednotlivých měření. V hlavním adresáři byl vytvořen excelovský soubor, který si automaticky stahuje vypočtené hodnoty z dílčích měření pomocí funkce PowerQuery a uchová je ve formě databáze. V tomto excelovském souboru lze procházet všechny hodnoty, aniž by mohlo dojít k nechtěnému přepsání nebo vymazání některých dat. Pro vyobrazení trendů jednotlivých deskriptorů byl vytvořen další skript, který načítá data z databázového souboru, filtruje a vyobrazuje ve formě trendů.

Při vyobrazení grafů mohutnosti vibrací a mohutnosti při otáčkové frekvenci se objevil ve směru X na tubusu při maximálních otáčkách vzrůstající trend. Zároveň se na tubusu ve směru X vyskytly zvýšené hodnoty, které byly po bližším prozkoumání, další rešerši a experimentu přisouzeny tzv. „out of band“ přebuzení akcelerometru. Ze shrnutí všech zjištění (viz kapitola 4.6.1) vyplynulo, že je nepravděpodobné, aby byl zpozorovaný vzrůstající trend způsoben vyvíjející se závadou, ale že se s největší pravděpodobností stále jedná o zabíhání stroje. Dále na ložiskách nebyl zpozorován žádný vzrůstající trend a ani nevykázaly zhoršené chování. Spolu s vyhodnocením bezvadného stavu dle normy ČSN 20 0065 bylo ze všech těchto dostupných dat usouzeno, že aktuální technický stav stroje dobrý.

# Seznamy

## Seznam použité literatury

- [1] BRÜEL & KJÆR. *Measuring Vibration*. Nærum, Danmark, 1982, 40 s.
- [2] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [3] DØSSING, Ole. BRÜEL & KJÆR. *Structural testing: Part I: Mechanical mobility measurements*. Søborg, Denmark: Kjeld Larsen & Søn A/S, 1988, 49 s.
- [4] SKF RELIABILITY SYSTEMS. *Vibration Diagnostic Guide* [online]. SKF Reliability Systems, 2000, 31 s. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <http://edge.rit.edu/edge/P14453/public/Research/SKF%20VibrationGuide.pdf>
- [5] BROCH, Jens Trampe. BRÜEL & KJÆR. *Mechanical Vibration and Shock Measurements*. Søborg, Denmark: Kjeld Larsen & Søn A/S, 1984, 372 s. ISBN 8787355345.
- [6] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*. Automa [online]. Automa-časopis pro automatizační techniku, 2020, (1) [cit. 2020-12-02]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [7] NAVRÁTIL, P. *Vibrodiagnostika ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Klapka
- [8] WEIGL, M. Název: *Měření vibrací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 37 s. Vedoucí práce Ing. Martin Musil, Ph.D.
- [9] BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK. *Mechanické kmitání*. 1. vydání. Praha: Sobotáles, 1994. ISBN 80-901684-8-5.
- [10] HELEBRANT, František; HRABEC, Ladislav; BLATA, Jan. *Provoz, diagnostika a údržba strojů*. VŠB TU Ostrava, 2013, ISBN 978-80-248-3028-5.
- [11] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [12] ČSN 20 0065. *Obráběcí stroje na kovy. Metody měření a hodnocení mechanického kmitání. Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1992.
- [13] ISO 10 816-3. *Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min a 15 000 1/min při měření in situ*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2010.

- [14] Adash A4900 Vibrio Ex [online]. [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://adash.com/portable-vibration-devices/a4900-vibrio-ex-vibration-meter>
- [15] Rockwell Automation 1441 Dynamix 2500 [online]. [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.rockwellautomation.com/en-au/products/hardware/allen-bradley/condition-monitoring/1441-dynamix-2500.html>
- [16] Adash A4500 VA5 pro [online]. [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://adash.com/portable-vibration-devices/a4500-va5-vibration-analysis-thermal-imaging-ultrasound>
- [17] *Product specification VIBROTEST 80 & VIBROPORT 80* [online]. In: . [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: [https://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/Internet/Product\\_Specs/Portable\\_instruments/VX-80/Pspec\\_VT-80\\_VP-80\\_ABC\\_Allrounders\\_EN\\_20180717.pdf](https://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/Internet/Product_Specs/Portable_instruments/VX-80/Pspec_VT-80_VP-80_ABC_Allrounders_EN_20180717.pdf)
- [18] RYDEN, Bjorn. *Choosing The Proper Accelerometer For Measurement Success And Sanity* [online]. 2018 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.fierceelectronics.com/components/choosing-proper-accelerometer-for-measurement-success-and-sanity>
- [19] JANČÍK, Jaroslav a Jiří VACÁTKO. *Diagnostika v řídicích systémech*. In: *Automa časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha, 2008 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: [http://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/diagnostika-v-ridicich-systemech2008\\_02\\_36672\\_5719/](http://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/diagnostika-v-ridicich-systemech2008_02_36672_5719/)
- [20] Obráběcí centrum MCU700VT-5X. In: KOVOSVIT MAS [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.com/mcu-700vt-5x-next-generation-p39.html>
- [21] WILCOXON SENSING TECHNOLOGIES. Troubleshooting accelerometer installations [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: [https://wilcoxon.com/wp-content/uploads/2018/11/TN14\\_Troubleshooting-accelerometer-installation.pdf](https://wilcoxon.com/wp-content/uploads/2018/11/TN14_Troubleshooting-accelerometer-installation.pdf)
- [22] RICE, Charles. Overloads. Siemens PLM Community [online]. 29.08.2019 [cit. 2021-6-15]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/article/overloads>

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1 - Obráběcí centrum MCU 700VT-5X - výrobce KOVOSVIT MAS [20] .....	11
Obrázek 3.1 - Průběh opotřebení [10].....	13
Obrázek 3.2 - Složený signál z dvou harmonických signálů .....	15
Obrázek 3.3 - Ráz [8] .....	16
Obrázek 3.4 - Vynucené kmitání za působení harmonické budící síly [11] .....	16
Obrázek 3.5 - Stochastické (náhodné) buzení [11].....	16

Obrázek 3.6 - Samobuzené kmitání - konstantní proud vzduchu [11] .....	17
Obrázek 3.7 - Parametry vibrací .....	17
Obrázek 3.8 - Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením [11].....	18
Obrázek 3.9 - Příklady měřících bodů na elektrickém stojanu, tělese ložiska a ložiskovém stojanu [13].....	20
Obrázek 3.10 - Trendy hodnot vibrací - a) dlouhodobě dobrý stav, b) náhlá změna vlivem poruchy, c) opotřebení, d) nestandardní trend (podle [11]) .....	21
Obrázek 3.11 - Snímač rychlosti vibrací [2].....	23
Obrázek 3.12 - Piezoelektrický snímač - a) s tlakovou b) se stříhovou c) se stříhovou deformací [2] .....	23
Obrázek 3.13 - Uspořádání kapacitního akcelerometru [2] .....	24
Obrázek 3.14 - Adash A4900 Vibrio Ex [14] .....	25
Obrázek 3.15 - Rockwell Automation Dynamix 2500 [15].....	26
Obrázek 3.16 - Adash A4500 pro [16].....	27
Obrázek 3.17 - Brüel & Kjær VIBROPORT 80 [17] .....	28
Obrázek 3.18 - Vyobrazení naměřeného signálu v časové a frekvenční oblasti [11] .....	31
Obrázek 3.19 - Frekvenční spektrum (1X je označena otáčková frekvence hřídele) [11] .....	31
Obrázek 3.20 - Frekvenční spektrum - velká špička v subsynchronní oblasti způsobená vířením olejového filmu u kluzného ložiska [2].....	32
Obrázek 3.21 - Nesouosost hřídelů - a) úhlová, b) rovnoběžná (paralelní) [2] .....	33
Obrázek 3.22 Rozměry ložiska .....	33
Obrázek 4.1 - Obráběcí centrum MCU 700VT-5X v prostorách Ústavu výrobních strojů a zařízení.....	35
Obrázek 4.2 - Použité snímače a DAQ karta .....	37
Obrázek 4.3 - Měření - 2. uspořádání - pohled do pracovního prostoru stroje .....	38
Obrázek 4.4 - Nástrojový držák HAIMER A63.144.12 .....	40
Obrázek 4.5 - Frekvenční oblast - směr X, vřeteník, 19.10.2019 .....	41
Obrázek 4.6 - Schéma zpracování naměřených dat až po vyobrazení ve formě trendů	42

Obrázek 4.7 - Schématicky znázorněný výpočet deskriptorů pro - a) mohutnosti vibrací a RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, b) RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích ložisek .....	44
Obrázek 4.8 - Výpočet frekvenčního spektra pomocí FFT - a) hrubý výsledek FFT, spektrum je v polovině symetrické; b) jednostranné frekvenční spektrum, přepočtené osy .....	45
Obrázek 4.9 - Struktura ukládání dat vypočtených pomocí GNU Octave do složek a schéma propojení do jedné databáze .....	48
Obrázek 4.10 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru X na vřeteníku .....	51
Obrázek 4.11 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru X na tubusu s vyznačenými zvýšenými hodnotami.....	51
Obrázek 4.12 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru Y na vřeteníku .....	51
Obrázek 4.13 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru Y na tubusu .....	52
Obrázek 4.14 - Trend mohutnosti vibrací, měřeno ve směru Z na přírubě.....	52
Obrázek 4.15 – Porovnání frekvenčního spektra mohutnosti vibrací ve směru X na tubusu – nezvýšené hodnoty ze dne 19.4.2021 (vlevo), zvýšené hodnoty ze dne 11.9.2020 (vpravo) .....	53
Obrázek 4.16 - Schematicky znázorněný převod zrychlení na rychlost ve frekvenční oblasti .....	53
Obrázek 4.17 - Ski-slope, bývá několikrát větší než otáčková frekvenční složka [21]....	54
Obrázek 4.18 - "Out-of-band" přebuzení, k přebuzení dojde nad měřeným frekvenčním pásmem [22].....	54
Obrázek 4.19 - Autospektrum kmitání na tubusu ve směru X v měřítku (vlevo) a v logaritmickém měřítku (vpravo); červeně – bez filtru, modře – 2 vrstvy latexové membrány, zeleně – 4 vrstvy latexové membrány .....	55
Obrázek 4.20 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru X na vřeteníku.....	55
Obrázek 4.21 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru X na tubusu.....	56
Obrázek 4.22 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru Y na vřeteníku.....	56



Obrázek 4.23 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru Y na tubusu .....	56
Obrázek 4.24 - Trend RMS rychlosti vibrací při otáčkové frekvenci, měřeno ve směru Z na přírubě .....	57
Obrázek 4.25 - Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích předního ložiska, měřeno ve směru X na tubusu při 24000RPM.....	57
Obrázek 4.26 - Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích předního ložiska, měřeno ve směru X na vřeteníku při 24000RPM .....	58
Obrázek 4.27 - Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích zadního ložiska, měřeno ve směru X na tubusu při 24000RPM .....	58
Obrázek 4.28 - Trend RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích zadního ložiska, měřeno ve směru X na vřeteníku při 24000RPM .....	58

## Seznam tabulek

Tabulka 3.1 - Klasifikace pásem mohutnosti vibrací pro stroje skupiny 2: Stroje o střední velikosti od 15 kW do 300 kW [13].....	21
Tabulka 3.2 - Porovnání vybraných diagnostický přístrojů [14][15][16][17] .....	29
Tabulka 4.1 - Další vybrané parametry obráběcího centra MCU 700VT-5X [20] .....	36
Tabulka 4.2 - Parametry předního a zadního ložiska vřetene .....	36
Tabulka 4.3 - Seznam použitých měřících přístrojů a snímačů.....	37
Tabulka 4.4 - Uspořádání snímačů při měření.....	38
Tabulka 4.5 - Frekvenční pásma pro výpočet RMS rychlosti vibrací .....	41
Tabulka 4.6 - Vypočtené poruchové frekvence pro pření i zadní ložisko.....	42
Tabulka 4.7 - Mezní hodnoty mohutnosti vibrací pro kategorii strojů Obráběcí centra se svislou osou pro rotační obrobky dle ČSN 20 0065 [12] .....	49
Tabulka 4.8 - Naměřené hodnoty mohutnosti vibrací dne 28.6.2021 .....	50

## Seznam elektronických příloh

Program_acc2vel_RMS.m – skript pro výpočet mohutnosti vibrací
Program_acc2vel_loziskova.m – skript pro výpočet RMS rychlosti vibrací při poruchových frekvencích ložisek

fordat2mat.m – podprogram pro načtení a převod datového typu

furiertans.m – podprogram pro FFT

specrange.m – podprogram pro oříznutí frekvenčního pásma

ukladani\_loziskova.m – podprogram pro třídění a export

ukladani\_mohutnosti.m – podprogram pro třídění a export

zobrazeni\_trendu.m – skript pro zobrazení trendů z vypočtených dat

## Seznam použitých software

GNU Octave

Microsoft Excel

Autodesk Inventor

Inkscape