

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Užití vibrodiagnostiky pro optimalizaci řezných podmínek při frézování.

Milan Matyska

Bakalářská práce

2016

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2015/2016

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Milan Matyska  
Osobní číslo: D12366  
Studijní program: B3709 Dopravní technologie a spoje  
Studijní obor: Dopravní prostředky: Ochrana životního prostředí v dopravě  
Název tématu: Užití vibrodiagnostiky pro optimalizaci řezných podmínek při frézování.  
Zadávací katedra: Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Zásady pro vypracování:

- 1) Úvod
- 2) Současný stav
- 3 Experimentální část

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce  
Rozsah pracovní zprávy: 30-40 stran textu a přílohy  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná  
Seznam odborné literatury:

-JANOUSEK, I., KOZÁK, J., TARABA, O.: Technická diagnostika, SNTL, 1988  
-KREIDL, M., ŠMÍD, R.: Technická diagnostika, senzory metody- analýza signálu, BEN, Praha 2006  
-LÁNSKÝ, M.: Systémová diagnostika a její fenomenologie, Institut Jana Pernera, o.p.s., Praha 2011  
-Technická dokumentace CNC frézky  
-www.pjpk.cz

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Kukla, Ph.D.  
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: 25. února 2016  
Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2016



doc. Ing. Ivo Drahotský, Ph.D.  
děkan

L.S.



doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2016

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 01. 2. 2016

Milan Matyska

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Kuklovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné připomínky a asistenci při měření, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji doc. Ing. Pavlu Švandovi, Ph.D. za informace a asistenci při měření. V neposlední řadě děkuji touto cestou celé své rodině a přátelům za podporu.

## ANOTACE

Práce popisuje principy vibrodiagnostiky z odvětví technické diagnostiky a její prvky. Využívá jej k optimalizaci užívání frézovacího stroje.

## KLÍČOVÁ SLOVA

technická diagnostika, vibrodiagnostika, frézování, optimalizace, stroj, vibrace, frézka, snímač, obrábění.

## TITLE

Vibrodiagnostics use to optimize cutting conditions for milling.

## ANNOTATION

The work using the principles of vibrodiagnostics from technical diagnostics division to optimize the use of the milling machine.

## KEYWORDS

technical diagnostic, vibrodiagnostics, milling, optimization, machine, vibration, milling machine, sensor, metalworking

# Obsah

Úvod.....	9
1 Základní princip vibrodiagnostiky .....	10
2 Základní parametry.....	11
3 Vyhodnocení vibrací .....	13
3.1. Vyhodnocení vibrací v časové oblasti.....	13
3.2. Vyhodnocení vibrací ve frekvenční oblasti.....	14
3.3. Příčina závady podle kmitočtového spektra.....	15
4 Snímače vibrací .....	16
4.1. Uchycení snímačů .....	19
5 Řezné síly.....	20
6 Frézka .....	21
Obecná definice .....	21
7 Popis měření .....	22
7.1. Měřicí technika.....	22
7.2. Použitý snímač .....	22
7.3. Zesilovač / AD převodník .....	25
7.4. Zpracování číslicového signálu / Displej .....	26
7.5. CNC frézka FCM 16 .....	26
8 Naměřené hodnoty.....	28
8.1. Porovnání vibrací hliníkového a ocelového obrobku.....	29
8.2. Porovnání vibrací ve stejných osách za různých podmínek.....	30
8.3. Porovnání vibrací a řezných sil .....	32
9 Závěr.....	33
10 Seznam použitých zdrojů.....	34
11 Přílohy.....	36

## Seznam ilustrací a tabulek

Obrázek 1 Výchylka .....	11
Obrázek 2 Absolutní a relativní kmitání.....	12
Obrázek 3 Parametry časového oscilujícího průběhu.....	13
Obrázek 4 Rychlá Fourierova transformace .....	14
Obrázek 5 Delta Shear piezoelektrický akcelerometr.....	18
Obrázek 6 Vliv způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku .....	19
Obrázek 7 Blokové schéma číslicového měřícího řetězce.....	22
Obrázek 8 Snímač zrychlení PCB .....	22
Tabulka 1, Graf Technické parametry akcelerometru PCB 356A24.....	23
Obrázek 9 Uchycení snímače s vyznačením os .....	24
Obrázek 10 šasi NI PXIe-1073 .....	25
Obrázek 11 Analyzátor signálu NI PXIe-4499.....	25
Tabulka 2 Technické parametry analyzátoru PXIe 4499 <sup>13</sup> .....	25
Tabulka 3 Technické parametry CNC frézky FCM 16.....	26
Obrázek 12 Pracoviště CNC frézka FCM 16.....	27
Obrázek 13 Trajektorie řezu .....	27
Obrázek 14 Průběh obrábění.....	28
Tabulka 4 Výpis měření.....	28



## Teoretická část

### Úvod

Obsluha vozidel a strojů měla dříve dostatek informací o jejich technickém stavu, protože plnila funkci řízení a zároveň údržby. S rostoucím intenzitou provozu se vazby mezi obsluhou a strojem posléze uvolnily. Nastalo nezbytné zavádění standardů pro provoz a údržbu, původní osobní přístup založený na praktické zkušenosti se změnil, nebylo již nadále možné spravovat komplexní stroje svépomocí se základními znalostmi a vybavením. Řešením byl stanovený plán péče o zařízení od výrobců a fundovaný technik se širokou škálou technického vybavení. S neustále rostoucím technickým pokrokem, a stále se zvyšujícími nároky na spolehlivost užívaných technických zařízení, bylo třeba vyřešit problém provozování strojů až do jejich poruchy. Při provozu stroje až za hranici mezního stavu totiž následuje obyčejně nevyhnutelná delší odstávka porouchaného stroje, nezbytnost diagnostikovat vadu a posléze provést opravu, což je velmi neekonomické a časově náročné. Řešením je dostatek informací o reálném stavu technického objektu při provozu, jako měla obsluha prvních železničních vozů. Aktuální technický stav sledovaného objektu nám dnes zajišťuje rozvíjející se technická diagnostika. S technickou diagnostikou je možné předcházet dlouhým odstávkám strojů, které znamenají finanční ztráty. Její výhodou je také prodloužení životnosti jednotlivých prvků stroje a možnost zásahu až v okamžiku skutečně nezbytném. Eventuálně lze například optimalizovat provozní podmínky pro zvýšení bezporuchovosti stroje. To vede ke zvýšení jeho spolehlivosti, která je známkou kvality.

Informace o technickém objektu získáme měřením trvalým nebo, jak je uvedeno v praktické části práce, měřením jednorázovým s možností opakování. Pro různé situace a různá strojní zařízení používáme různé metody měření, společným jménem - technická diagnostika. Ta se dále dělí na vibrodiagnostiku, termodiagnostiku, měření ultrazvukem, tribodiagnostiku, defektoskopii a jiné diagnostické metody.

V této práci byla analýza vibrací použita pro posouzení zatížení obráběcího stroje při obrábění vzhledem k trajektorii. Na frézce byl za různých podmínek obráběn zkušební vzorek materiálu a byly vyhodnocovány vibrace, které při obrábění vznikaly. Vibrace byly měřeny na vřeteníku stroje.

# 1 Základní princip vibrodiagnostiky

Měření vibrací se řadí mezi významné a neustále se rozšiřující diagnostické metody. Technická diagnostika je definována jako nedestruktivní a bezdemontážní zjištění aktuálního stavu technického objektu. Vibrodiagnostika tak identifikuje hlavní příčiny mechanického chvění a hledá způsoby k jeho odstranění nebo přinejmenším omezení bez nutnosti demontáže, čímž významně přispívá k prodloužení životnosti objektu. Příčinou vibrací u stroje jsou dynamické síly, které mohou vznikat nepřesností mechanických dílů a součástí, vůle mezi pohyblivými součástkami, nevyvaha pohybujících se součástí. Chvění může vyvolávat také vzájemná rezonance součástí. Pro diagnostiku vibrací je nezbytné jejich přesné změření, jedině tak je později možné s vysokou pravděpodobností určit jejich zdroj a tím i případnou závadu objektu. Vibrace jsou produkovány kmitavým pohybem hmotného bodu (tělesa) kolem rovnovážné polohy.

Mechanické kmitání určují tři základní veličiny, které jsou navzájem závislé. Jak popisuje rovnice (1) jsou to výchylka, rychlost a zrychlení.<sup>1,2</sup>

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = F_b = M\ddot{x} \quad (1)$$

Kde

$y$  je výchylka,

$\dot{y}$  je rychlost,

$\ddot{y}$  je zrychlení seismické hmoty,

$\ddot{x}$  zrychlení objektu,

$m$  hmotnost seismické hmoty,

$M$  hmotnost objektu,

$k$  tuhost pružiny,

$b$  součinitel tlumení,

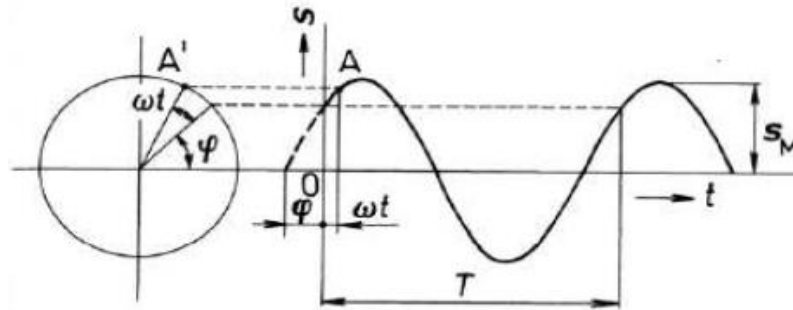
$F_b$  budící síla.

Na základě této rovnice lze vhodnou kombinací vytvořit snímač kterékoliv z veličin, což je vysvětleno v následující kapitole.

## 2 Základní parametry

### Výchylka

Výchylka určuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze.



Obrázek 1 Výchylka <sup>3</sup>

Kde:

$s_M$  je amplituda výchylky,

$\omega_t$  je úhlový kmitočet,

$\varphi$  je fázový posun.

Výchylka  $s$  [m] dosáhne své maximální hodnoty  $s_{max}$  a vrací se přes klidovou polohu do své záporné maximální výchylky a kontinuálně osciluje kolem své rovnovážné polohy. Výchylka je určena velikostí a směrem, jak potvrzuje rovnice (2).

$$s = s_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

### Rychlost

Měří se pohybovou rychlostí  $v$  [m/s] a je definována jako rychlost změny výchylky vibračního signálu.

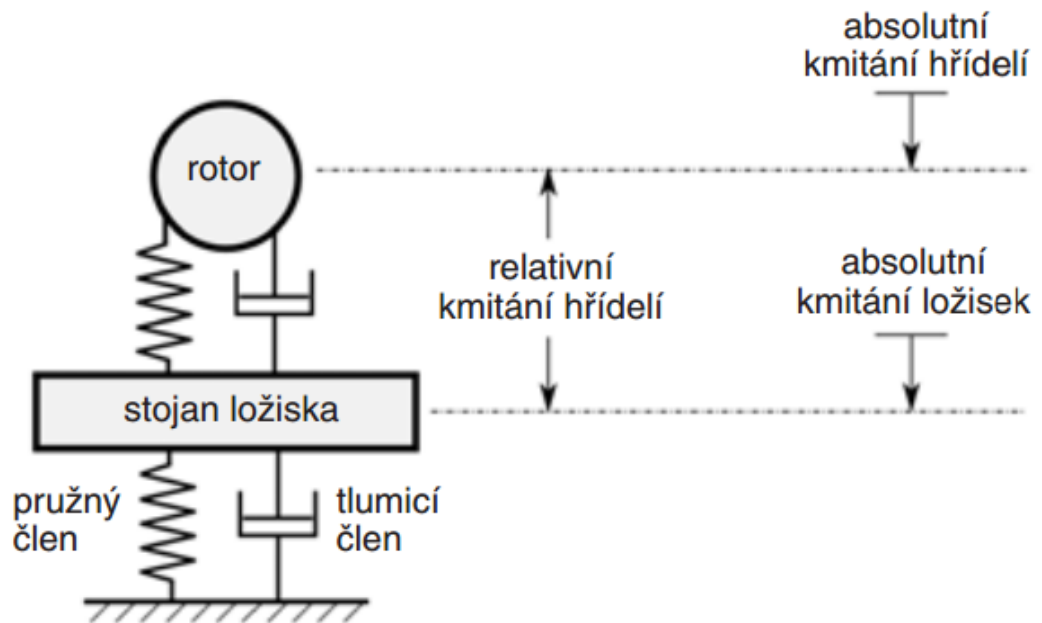
$$v = \frac{ds}{dt} = s_{max} \omega \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

### Zrychlení

Podle Newtonova zákona je zrychlení měřítkem síly  $F = m \cdot a$ , která na částici působí. Okamžité zrychlení je dáno časovou změnou rychlosti, a odvozeně druhou derivací okamžité výchylky podle času.

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = -s_{max} \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

Velmi důležitým parametrem při vibrodiagnostice je nutnost určit, zda se jedná o vibrace relativní anebo absolutní. Relativní kmitání jsou vibrace mezi dvěma reálnými body. Vztažný bod tak může být například náprava vozidla, tj. bod, který je také v pohybu. U absolutních vibrací je pohyb vztažen k pevnému, fixnímu bodu. Za takový bod můžeme považovat například zemský povrch.<sup>3</sup>



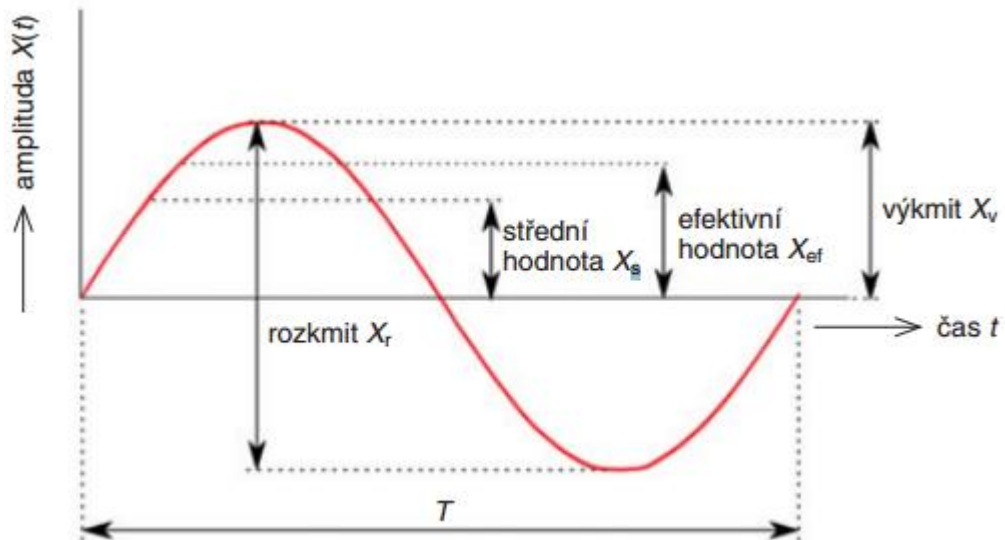
Obrázek 2 Absolutní a relativní kmitání<sup>1</sup>

### 3 Vyhodnocení vibrací

#### 3.1. Vyhodnocení vibrací v časové oblasti

##### Časový průběh

Hodnoty výše zmíněných veličin kmitavého pohybu z rovnice (1) se musí měnit v čase, neboť jde o rovnici dynamickou. Pro potřebu vyhodnocení postačuje výkmit nebo rozkmit a celkový energetický obsah signálu skrze průměrnou a efektivní hodnotu.



Obrázek 3 Parametry časového oscilujícího průběhu <sup>2</sup>

##### Celkové kmitání

Další variantou je hodnocení prostřednictvím celkového kmitání, které představuje jednodušší a rychlejší variantu vibrodiagnostiky. Pracovník údržby za použití jednoduššího přístroje získá hodnotu nesoucí informaci o okamžitém stavu stroje. Hodnota je porovnána s předpisem nebo normou, čímž je určen stav stroje. Tato metoda je rychlá a méně nákladná, ovšem mnohdy jsou informace pouze informativní. <sup>2, 5</sup>

##### Kinematická dráha

Snímače jsou zvoleny vzhledem k dostupnosti inkriminované části stroje, která je buď přímá, nebo popř. s využitím přenosu jejího chvění na dostupnější místo. Například kmity hřídele uložené v kluzných ložiskách utlumí mazivo, takže na těle ložiska, na rozdíl od uložení hřídele ve valivých ložiskách, sledované vibrace nelze změřit. K rotující hřídeli se umístí dva snímače pootočené o 90°. Z výchylky hřídele lze určit její dráhu tzv. orbitu, a také maximální výchylku. Hodnota je opět porovnána s předpisy. <sup>1, 2, 5</sup>

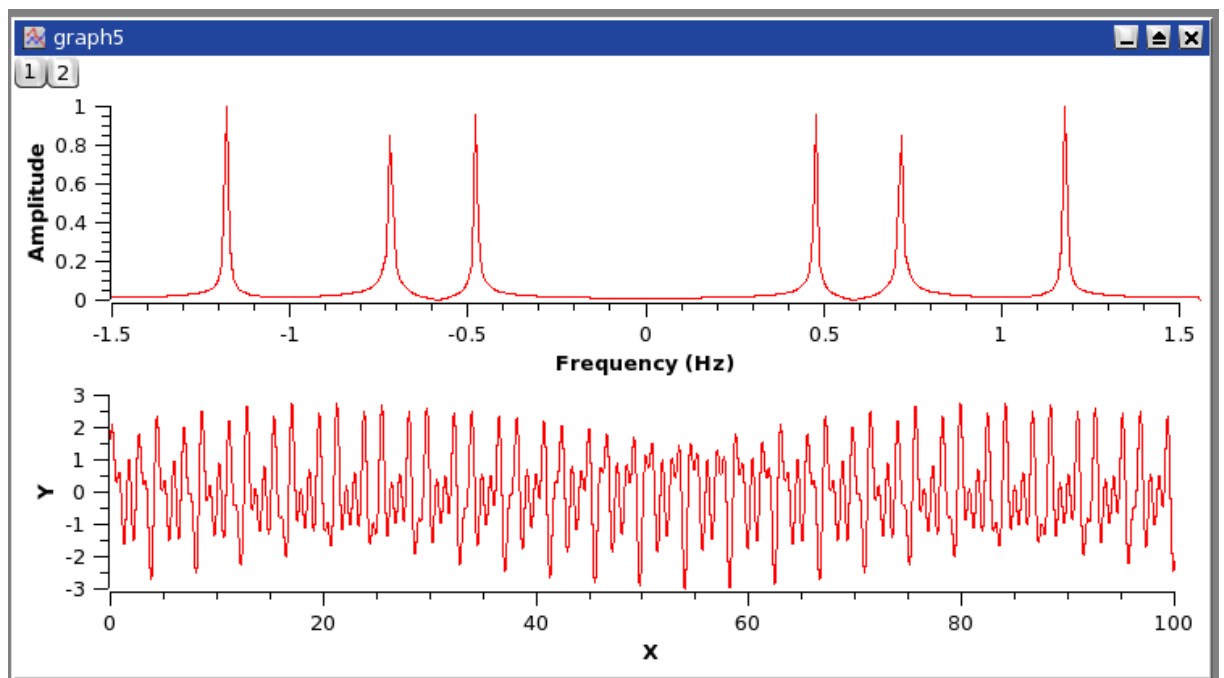
Analýza v časové oblasti je provedena v praktické části této práce.

### 3.2. Vyhodnocení vibrací ve frekvenční oblasti

#### Frekvenční analýza

Kmitavý pohyb může existovat teoreticky velmi jednoduchý a obsahovat pouze jedinou složku s jedním určitým kmitočtem, v praxi se ale setkáváme ve většině případů s pohybem složeným z většího počtu složek s rozdílnými kmitočty. Mechanické vibrace diagnostikovaného objektu zpravidla obsahují velký počet složek s odlišnými kmitočty. K jejich rozdělení a tím i možné identifikaci jejich zdrojů je nutné použít tzv. kmitočtovou analýzu. Kmitočtová analýza umožní rozložení signálu na jeho jednotlivé složky, grafické zobrazení tohoto rozkladu je tzv. spektrum signálu. Kmitočtová analýza signálu je fundamentem pro vibrodiagnostiku strojů. Umožňuje identifikaci zdrojů vibrací, pokud známe jejich eventuální budící frekvence. Na základě této identifikace se soudí stav jednotlivých prvků objektu a trend vývoje jejich vibrací.

Podstatou frekvenční analýzy jsou diskrétní Fourierova transformace (DFT) a rychlá Fourierova transformace (FFT).



Obrázek 4 Rychlá Fourierova transformace <sup>6</sup>

Při použití frekvenční analýzy lze odstranit nedostatky analýzy v časové oblasti. Tato metoda umožňuje lokalizovat vznikající poruchy jednotlivých elementů sledovaného objektu. Na Obrázku 4 je znázorněna transformace z časové oblasti do frekvenční oblasti za použití FFT. Frekvenční analýzou se získá amplitudové a fázové spektrum signálu. <sup>1, 2, 5</sup>

### 3.3.Příčina závady podle kmitočtového spektra

Výsledky frekvenční analýzy je nutno podrobit rozboru k identifikaci a lokalizaci poruchy. Rozbor je možné rozdělit do tří hlavních oblastí:

#### Oblast nízkých kmitočtů

Odpovídá kmitočtovému pásmu otáčení hřídele (kmitočtové spektrum 0,4 až 10 násobek základní frekvence hřídele). Podává nám informace týkající se nevyváženosti, ohybu a nesouososti hřídele, uvolnění mechanických vazeb, přesazením hřídelí atd. V této oblasti je důležitá také fáze veličiny, na jejím základě lze stanovit typ nevyváženosti (zda jde o statickou či dynamickou nevyváženost, ohyb hřídele...)

#### Oblast středních kmitočtů

Odpovídá kmitočtovému pásmu ozubených kol převodovek-zubová frekvence. Ty vznikají při záběru ozubených kol a závisí na počtu zubů kol a rychlosti jejich otáčení. Analyzováním těchto kmitočtů lze detekovat např. závady jako: opotřebení stykové plochy zubů, nestejněměrná šíře zubů, ohnutý hřídel s ozubeným kolem, vyštípaný zub ozubeného kola, uvolněné ozubené kolo. Pásmo středních frekvencí se nachází od oblastí nízkých frekvencí až po frekvence 1 až 5 kHz (podle otáček a typu převodů).

#### Oblast vysokých kmitočtů

Je ve spektru generována vadami ložisek (např. jamka v ložisku) nebo závadou na kleci. Poškozený prvek vytváří při styku s jiným prvkem mechanické rázy, těleso ložiska se tímto rozkmitá na vlastní frekvenci 5 až 20 kHz. U ložiska lze lokalizovat poškození jednotlivých elementů na základě charakteristických ložiskových frekvencí určených z geometrie ložiska.

1, 2, 5, 7

Nejčastější příklady detekovaných závad zvyšující vibrace<sup>7</sup>:

- Nevyváženost rotorů
- Nesouosost spojek, ložisek, převodů
- Různá mechanická uvolnění
- Poškození valivých ložisek
- Opotřebení převodů
- Hydraulické a aerodynamické problémy
- Zadírání
- Rezonance
- Deformace

## 4 Snímače vibrací

Snímače mají za úkol přeměnit fyzikální veličinu na elektrický signál, který je dále lépe zpracovatelný. Snímač je složen ze 4 částí. Styková část, zprostředkovává přenos fyzikální veličiny měřeného objektu na citlivý prvek. Citlivý prvek, např. deformovaný nosník, mění měřenou veličinu na veličinu zpracovatelnou senzorem. Senzor způsobí transformaci fyzikální veličiny citlivého prvku na výstupní signál. Následují vstupní/výstupní část, která zesiluje na vhodný elektrický signál.

Snímače lze dále rozlišovat podle požadavku napájení na aktivní a pasivní. Skupina aktivních snímačů napájení nepotřebuje, výstupní náboj vyplývá z principu fungování snímače (např. indukční, piezoelektrické). Druhá skupina pasivních snímačů je závislá na připojeném napětí z jiného zdroje.

### Snímače výchylky, polohy a posuvu

Snímače výchylky, polohy či posuvu kmitajícího tělesa mohou být sestaveny na principu indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém nebo optickém. Ve vibrodiagnostice se v současné době nejčastěji používají snímače indukčnostní, které využívají závislost indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Vířivé proudy způsobené vysokofrekvenčním magnetickým polem v elektricky vodivém materiálu zde vytvoří sekundární magnetické pole. Intenzita tohoto pole působí proti intenzitě pole budící cívky tj. v závislosti budící cívky od vodivého povrchu se intenzita pole cívky více nebo méně zeslabí. Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu jsou tyto senzory náchylné na parazitní vlivy, jako je například délka kabelu k měřicím obvodům, vnějším elektromagnetickým polím aj. Proto se tyto senzory vyrábějí jako integrované tj. v kovovém stínícím krytu je kromě vyčnívající cívky zabudována základní část elektroniky. Indukčnostní snímače mají obvykle kmitočtový rozsah 0 – 10kHz.



## Snímače rychlosti

Elektrodynamické snímače rychlosti využívají Faradayův zákon elektromagnetické indukce (rovnice 2).

$$U = Blv \quad (2)$$

„Změnou magnetického pole v okolí cívky se v cívce indukuje el. napětí a v uzavřeném obvodu prochází indukovaný proud. Směr proudu je závislý na směru změny magnetického pole a na orientaci pólů magnetu vůči cívce.“<sup>11</sup>

Velikost indukovaného napětí je pak přímo úměrná relativní rychlosti mezi cívkou a magnetickým polem. Snímače tohoto typu mají rezonanční frekvenci mezi 5 až 10 Hz.

V současnosti se používají spíše piezoelektrické akcelerometry s integrovanou elektronikou. Rychlost kmitavého pohybu se pak určuje integrací signálu.

## Snímače zrychlení - akcelerometry

Kromě nejužívanějších piezoelektrických akcelerometrů lze pro měření zrychlení kmitání použít integrované tenzometrické nebo kapacitní akcelerometry nebo i elektrodynamické senzory rychlosti doplněné derivačním obvodem. Pro měření vibrací frézky byl použit piezoelektrický akcelerometr, i z toho důvodu je proto v práci největší prostor věnován právě tomuto typu snímače.<sup>7, 5, 2, 1</sup>

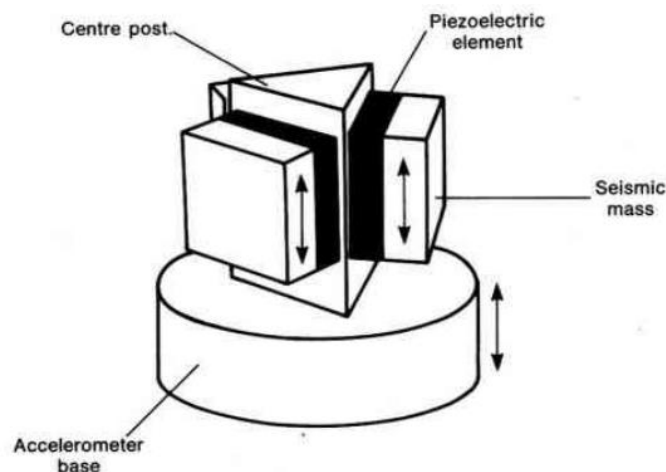
# Piezelektrické akcelerometry

## Princip akcelerometru

U snímačů se využívá nepřímého piezelektrického jevu. U některých dielektrik dochází ke změně elektrické polarizace mechanickou deformací krystalické mřížky. Piezelektrický akcelerometr je absolutním senzorem kmitání, tj. pracuje s vlastní seizmickou hmotou. Nestálý náboj a zároveň vysoká vnitřní impedance piezelektrického snímače vyžaduje speciální měřicí obvody. Parametry přívodních vodičů svou kapacitou a zesilovače svým odporem ovlivňují dolní mezní frekvenci frekvenčního rozsahu. Z tohoto důvodu se v současné době používají piezelektrické akcelerometry označované ICP (Integrated circuit Piezoelectric). Integrovaná elektronika odstraní impedanční problémy, unifikuje výstupní signál a odstraňuje problémy s koaxiálními kabelem. Jak již bylo uvedeno, obvykle obsahují integrační obvody pro získání rychlosti kmitání. <sup>7, 5, 2, 1</sup>

## Konstrukce použitého piezelektrického snímače zrychlení

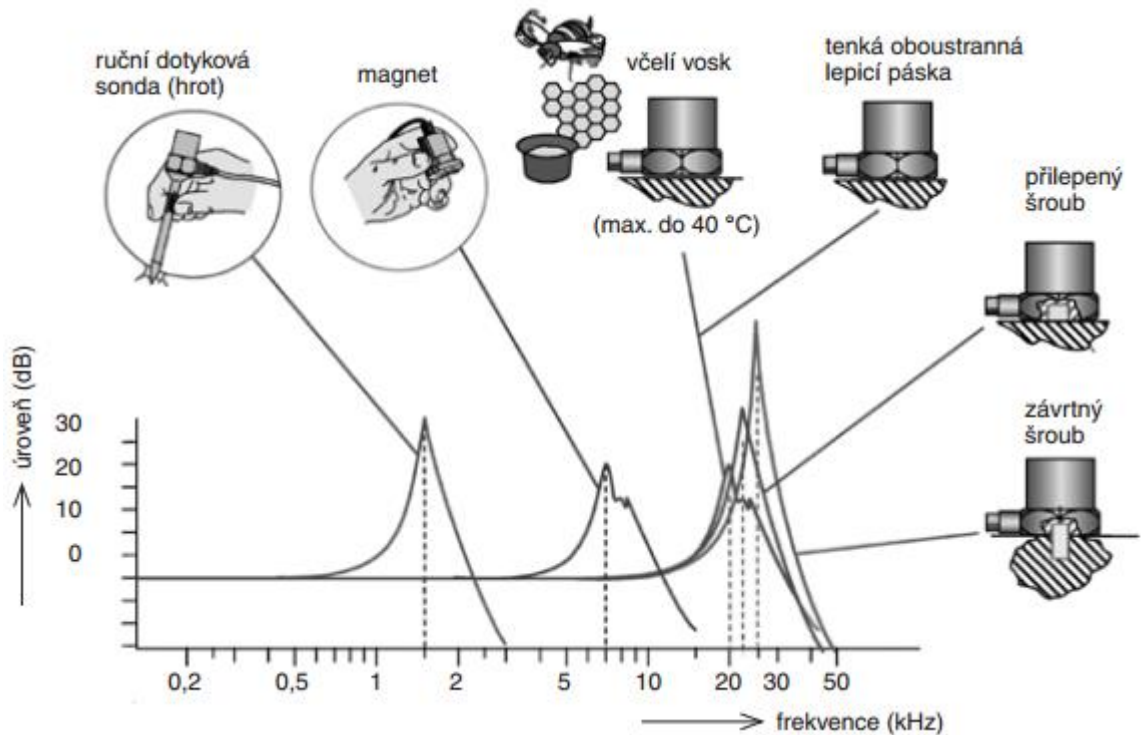
Konstrukčně jsou piezelektrické akcelerometry konstruovány velmi často se smykovým namáháním, jako v našem případě. Používá se konstrukce typu Delta Shear (Obrázek 5) se třemi dvojicemi piezelektrických elementů. Tyto elementy fungují jako pružiny spojující seizmickou hmotu a základnu akcelerometru přes tuhý trojúhelníkový střed. Tyto snímače se vyznačují vysokou citlivostí, malou hmotností a vysokou vlastní frekvencí. Další předností tohoto konstrukčního typu je oddělení základny snímače od vlastního snímacího mechanismu, což umožňuje vyrábět snímače, které se dají použít ve vysokých teplotách či s větší odolností proti mechanickému namáhání. <sup>16, 17</sup>



Obrázek 5 Delta Shear piezelektrický akcelerometr <sup>16</sup>

#### 4.1. Uchycení snímačů

Různé způsoby připevnění snímače na měřený objekt mají vliv především na frekvenční rozsah snímače posunováním rezonanční frekvence.



Obrázek 6 Vliv způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku <sup>2</sup>

Vůbec nejlepší upevnění, mající nejmenší vliv na posun rezonance, má závrtný šroub. Velmi dobrých výsledků dosáhneme při připevnění speciálním lepidlem nebo včelím voskem. Zde je výhoda proti šroubovému spojení, že lze bez jakýchkoliv známek snímač sejmout, adhezní síla však musí být dostatečná pro udržení. Nevýhoda ovšem může nastat při zahřívání objektu, kdy se vosk vlivem svých amorfních vlastností rozpouští. Nejproblematictější jsou snímače s ručním hrotem nebo magnetickou příchytkou. Tyto snímače však mají svůj význam při hledání vhodného měřicího místa.

## 5 Řezné síly

Současně s měřením vibrací na CNC frézce proběhlo i měření řezných sil za použití tenzometrů pro středoškolskou práci pod vedením doc. Pavla Švandy. Hodnoty byly převzaty za účelem porovnání a společného vyhodnocení. Z tohoto důvodu je v práci popsán i základní princip tenzometrů.

### Tenzometry

Využívají změny elektrického odporu v závislosti na mechanickém namáhání. Tenzometry se tedy používají především pro zjištění mechanického napětí jako citlivý prvek.

Elektrický odpor určuje vztah (3)

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3)$$

Kde

$\rho$  je rezistivita vodiče,

$S$  je obsah průřezu vodiče,

$l$  je délka vodiče.

Mechanické namáhání je odvozeno z Hookova zákona, přičemž tedy platí podmínka pouze pružné deformace, kdy normálové napětí je přímo úměrné relativnímu prodloužení. Hookův zákon (4)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

$\sigma$  je normálové napětí,

$E$  je konstanta úměrnosti, Youngův modul pružnosti,

$\varepsilon$  je relativní prodloužení.

Po odvození dostaneme základní vztah (5) pro odporové kovové tenzometry:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (5)$$

## 6 Frézka

### Obecná definice

Frézka je obráběcí stroj určený k mechanickému třískovému obrábění. Pomocí frézky se obrábí rovinné a tvarové plochy, jak vnější, tak vnitřní. Při použití zvláštního příslušenství i rotační plochy a závity. Při frézování se rozlišují dva způsoby pohybu. Hlavní pohyb, který je otáčivý a koná ho nástroj a vedlejší pohyb posuvný konaný stolem. Dle počtu opakování různých operací, lze rozdělit frézky na univerzální, speciální a jednoúčelové. Jednoúčelové frézky jsou konstruovány pro jednu operaci na onom obrobku, většinou je najdeme v sériové výrobě. Speciální frézky obrábí jeden druh obrobku, ale operace se mění. Univerzální frézka je nejčastěji pro kusovou výrobu, protože s ní lze vyrobit jakoukoliv součást. Hlavním rotačním nástrojem, který používá frézka je fréza, jedná se obvykle o vícebřítý nástroj. Obráběná součást (hmotné těleso) se nazývá obrobek, ten pak obvykle nevykonává žádný rotační pohyb (za účelem ubírání třísky, z hlediska další osy přísuvu ano). Bývá prováděn prostřednictvím mechanického posuvu, který může být prováděn i ručně nebo strojně. Strojní pohyb resp. posuv obrobku pak může probíhat hned v několika rovinách současně. Strojní posuv může být předem programován a může být řízen počítačem, pak je řeč o CNC frézkách.<sup>8</sup>

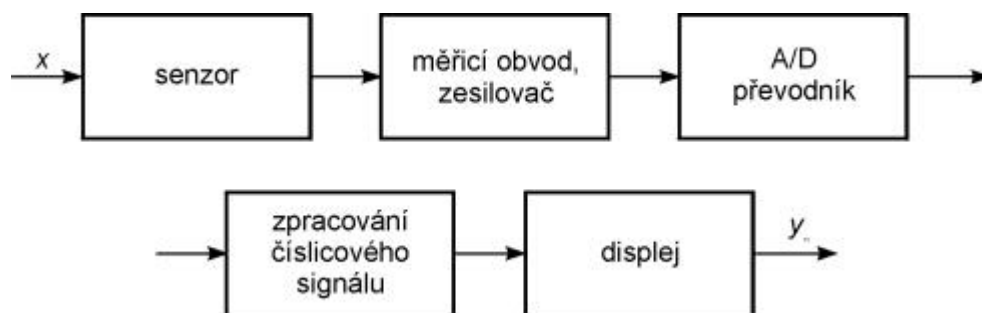
CNC je anglická zkratka „Computer Numerical Control“. Český ekvivalent pro tuto zkratku je „počítačově číslicové řízení“ a v oblasti obráběcích strojů pak může označovat počítačem řízený obráběcí stroj. K původním NC strojům tak byl přidán ještě počítač C (computer). Počítač výrazně zjednodušil a urychlil programování, řízení stroje a ukládání dat pro pozdější využití. Výroba se stala kvalitnější a výkonnější, klesla produkce zmetků, aj.<sup>9</sup>

## Praktická část

### 7 Popis měření

#### 7.1. Měřicí technika

Seznámení s použitými přístroji při měření je znázorněno analogicky k blokovému schématu číslicového zpracování signálu (Obrázek 7).



Obrázek 7 Blokové schéma číslicového měřicího řetězce <sup>10</sup>

#### 7.2. Použitý snímač

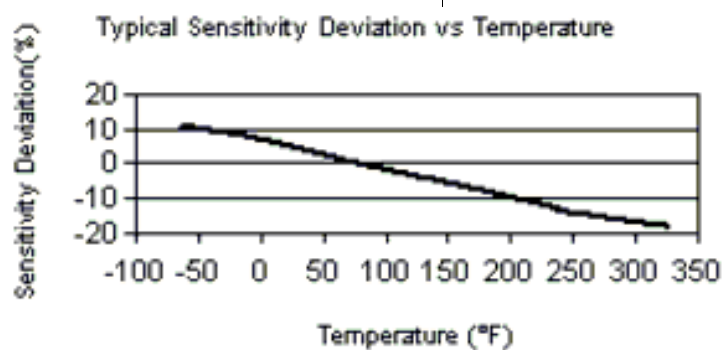
Na měření byl použit tříosý piezoelektrický akcelerometr PCB 356A24. Kompletní technické údaje snímače jsou vypsány v Tabulce 1.

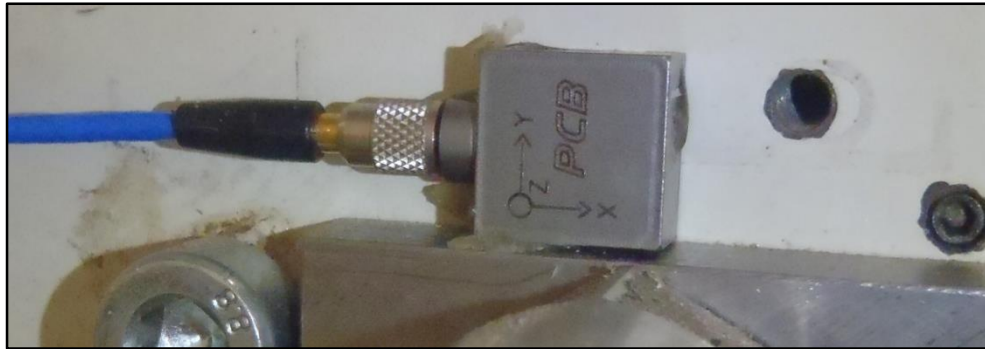


Obrázek 8 Snímač zrychlení PCB

Tabulka 1, Graf Technické parametry akcelerometru PCB 356A24 <sup>12</sup>

Citlivost	10 mV/g
Frekvenční rozsah ( $\pm 5\%$ )	1 až 9000 Hz
Frekvenční rozsah ( $\pm 10\%$ )	0,5 až 12000 Hz
Resonanční frekvence	$\geq 45$ kHz
Nelinearita	$\leq 1\%$
Příčná citlivost	$\leq 5\%$
Rozsah teplot	-54 až +121 °C
Teplotní citlivost	graf
Budící napětí	18 až 30 V DC
Budící proud	2 až 20 mA
Výstupní impedance	$\leq 200$ Ohm
Výstupní napětí	7 až 12 V DC
Doba ustálení	< 10 sec
Snímací element	keramický
Geometrie snímání	střih
Materiál pouzdra	titanium
Velikost (výška x délka x šířka)	7,0mm x 12,0mm x 12,0mm
Váha (bez kabelu)	3,1 g
Uchytení	adhezní





Obrazek 9 Uchycení snímače s vyznačením os

Snímač byl upevněn včelím voskem k vřeteníku. Působení včelího vosku na frekvenční charakteristiku byl popsán výše v teoretické části práce. Vzhledem k nezahřívání stroje, jeho nízké provozní teplotě a teplotě okolí, nebyl problém s rozpouštěním vosku i teplotní citlivostí snímače (Tabulka 1). Teplotní citlivost převzata ze stránek výrobce je udávána ve stupních Fahrenheitových. Přepočtení pro pokojovou teplotu v měřeném prostředí je poté  $22^{\circ}\text{C} = 72^{\circ}\text{F}$ , jak znázorňuje graf, teplota připadá takřka nulovému zkreslení.



### 7.3.Zesilovač / AD převodník



Obrázek 10 šasi NI PXIe-1073

Na Obrázku 8 je ilustrace šasi na PXI Express moduly. Obrázek 9 zobrazuje detail PXI karty analyzátor dat ze snímače. Technické parametry jsou popsány v tabulce 2.



Obrázek 11 Analyzátor signálu NI PXIe-4499

Tabulka 2 Technické parametry analyzátoru PXIe 4499 <sup>13</sup>

Analogové vstupy	16
Vstupní rozlišení	24bit
Maximální rozsah napětí; citlivost	-10V + 10V; 14 $\mu$ Vrms
Minimální rozsah napětí; citlivost	-316mV + 316mV; 1,1 $\mu$ Vrms
Počet rozsahů	4
Vestavěná paměť	4095 vzorků
Dynamický rozsah	114 dB
Úprava signálu	Anti-aliasing filtr,
Vzorkovací frekvence	Až 204,8 kSa/s

#### 7.4.Zpracování číslicového signálu / Displej

Výsledné zpracování bylo provedeno softwarem „SignalExpress“ rozšířen o knihovnu „Sound and Vibration“. Tento nástroj velmi rychle a efektivně vyhodnocuje data z měření, počínaje sběrem, on-line zobrazením a příslušnými analýzami. Posledním krokem bylo vyhodnocení v časové oblasti naměřených hodnot.

Hardwarové vybavení obstarával notebook DELL Latitude E 6530.

#### 7.5.CNC frézka FCM 16

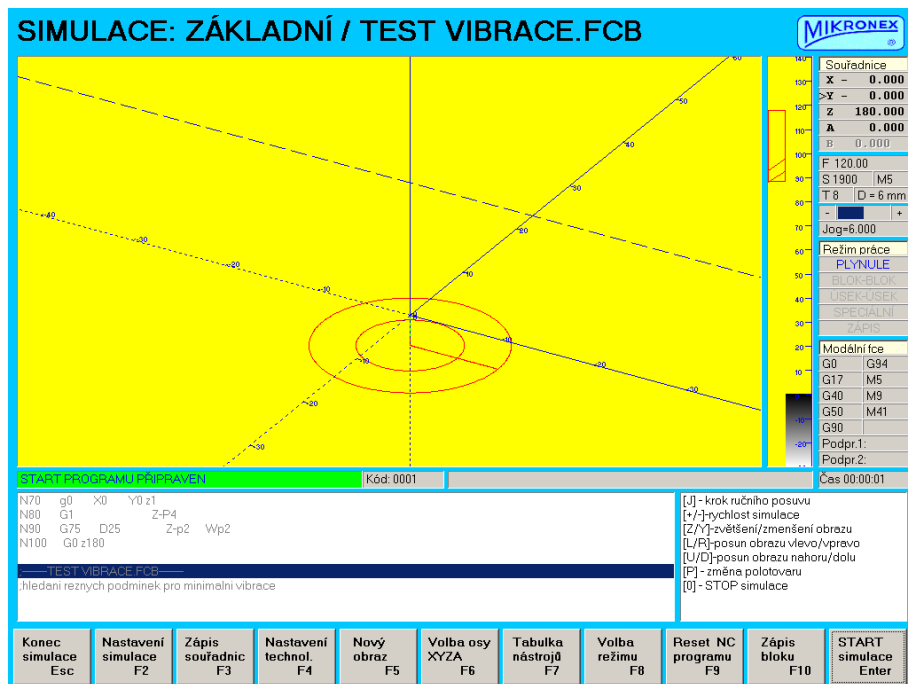
Frézky řady FCM jsou vhodné především k výrobě přesných a tvarově složitých součástí menších rozměrů, například k výrobě vstřikovacích forem, modelů, hloubících elektrod z mědi, či grafitu. Na litinovém loži s kalenými kluznými plochami chráněnými kryty, se pohybuje pracovní stůl. Svislý pohyb vykonává vřeteník, který se pohybuje po vedení stojanu. Pohony posuvů jsou ve všech osách řešeny krokovými servopohony. Vřeteník je poháněn třífázovým asynchronním elektromotorem, otáčky jsou regulovány frekvenčním měničem. Je možno volit mezi standardním a rychloběžným vřeteníkem. Vřetení je ukončeno strmým upínacím kuželem ISO 30. Výměna nástrojů je ruční s mechanickým nebo pneumatickým odepínáním. Řídicí systém MIKROPROG-F s plochým LCD barevným displejem a průmyslovou PC klávesnicí, je prostřednictvím otočného ramene připevněn k boku stroje. Na čelní straně ovládacího panelu jsou soustředěny všechny ovládací prvky řízení stroje. <sup>14</sup>

Tabulka 3 Technické parametry CNC frézky FCM 16 <sup>15</sup>

Vrtací kapacita	20/25mm
Kapacita čelního frézování	63mm
Kapacita obvodového frézování	16mm
Výsuv pinoly vřetene	50mm
Podélný pojezd stolu X	350/550mm
Příčný pojezd stolu Y	200mm
Natočení vřeteníku	+/-90°
Rozměry křížového stolu	600/800x180mm
Příkon	1000/1200W
Maximální vzdálenost konce vřetene od stolu Z	400mm
Kužel vřetene	MK3/R8/SK30
Otáčky vřetene	L: 50-1000ot/min H: 150-3000ot/min



Obrázek 12 Pracoviště CNC frézka FCM 16



Obrázek 13 Trajektorie řezu

Obrázek 8 ilustruje trajektorii pohybu řezného nástroje frézy. Osa Z je totožná s dráhou příjezdu vřetene. Po zavrtání na programovatelnou hloubku řezu se nástroj posune po ose X a vykrouží první, menší kružnici. Poté se opět posune po ose X a vyřeže druhou, větší kružnici. Zpracovaný a nezpracovaný obrobek lze porovnat na Obrázku 13.



Obrázek 14 Průběh obrábění

## 8 Naměřené hodnoty

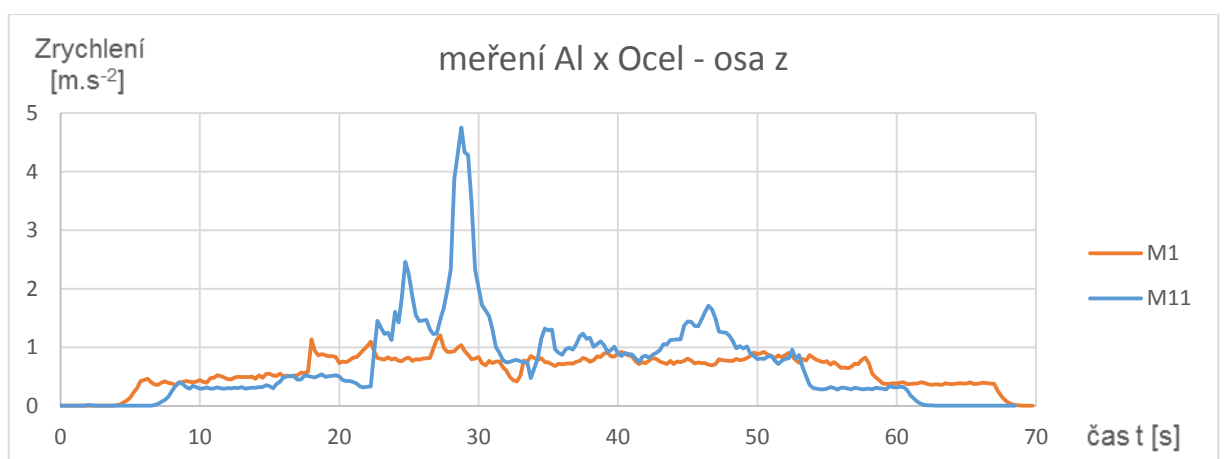
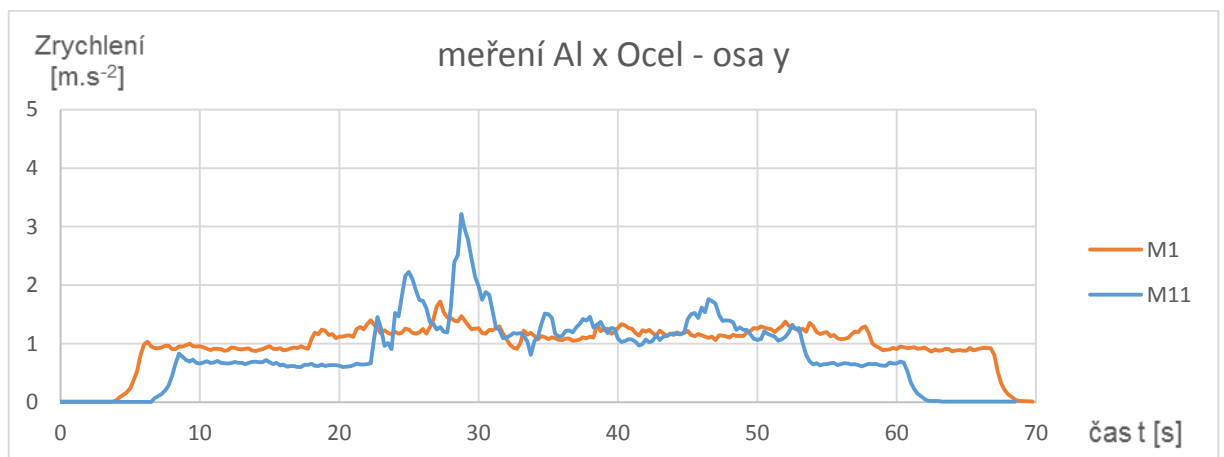
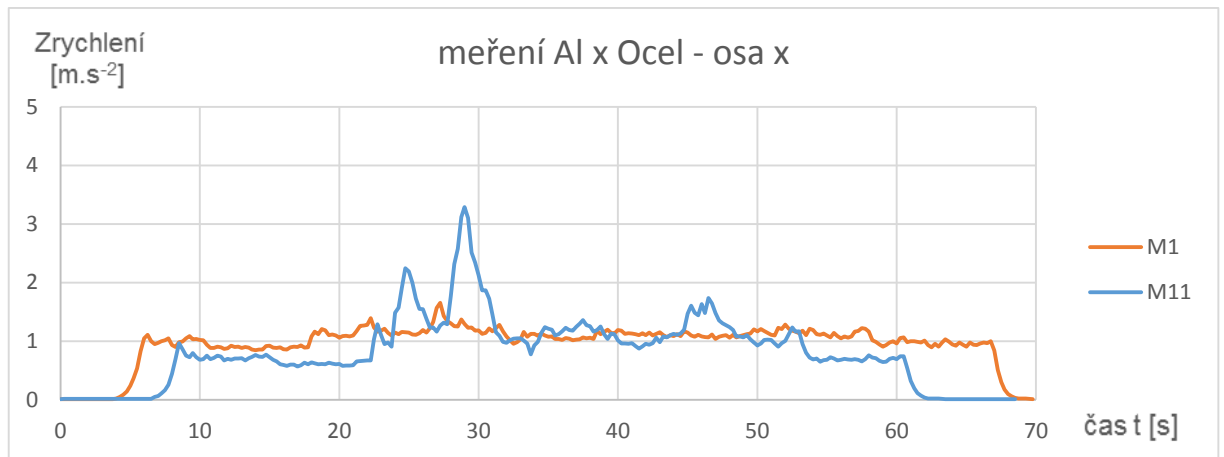
Celkem bylo provedeno 14 měření. Výpis všech měření a jejich parametry rozepisuje následující tabulka (Tabulka 4). Veškerých 14 měření bylo podruhé zopakováno pro vyloučení hrubých chyb. Metodika měření zůstala nezměněna. První 4 měření byly provedeny na hliníkovém obrobku. Následujících 10 měření byl použit obrobek z oceli. Kvůli rozsáhlému počtu grafů, jsou zde použity pouze porovnávací grafy. Všechny grafy jsou přiloženy jako příloha k této práci.

Tabulka 4 Výpis měření

	otáčky	posuv [mm/min]	hloubka řezu	pozn.
Hliník 6063				mazivo řezná kapalina
M1	1500	150	2	
M2	1500	300	2	
M3	3000	150	2	
M4	3000	300	2	
Ocel S235				mazivo řepkový olej
M5	1300	30	1	
M6	1300	60	1	
M7	1300	90	1	
M8	1300	120	1	doporučeno výrobcem
M9	1300	150	1	
M10	1300	200	1	
M11	1300	200	2	skrže materiál
M12	800	120	1	
M13	1050	120	1	
M14	1900	120	1	

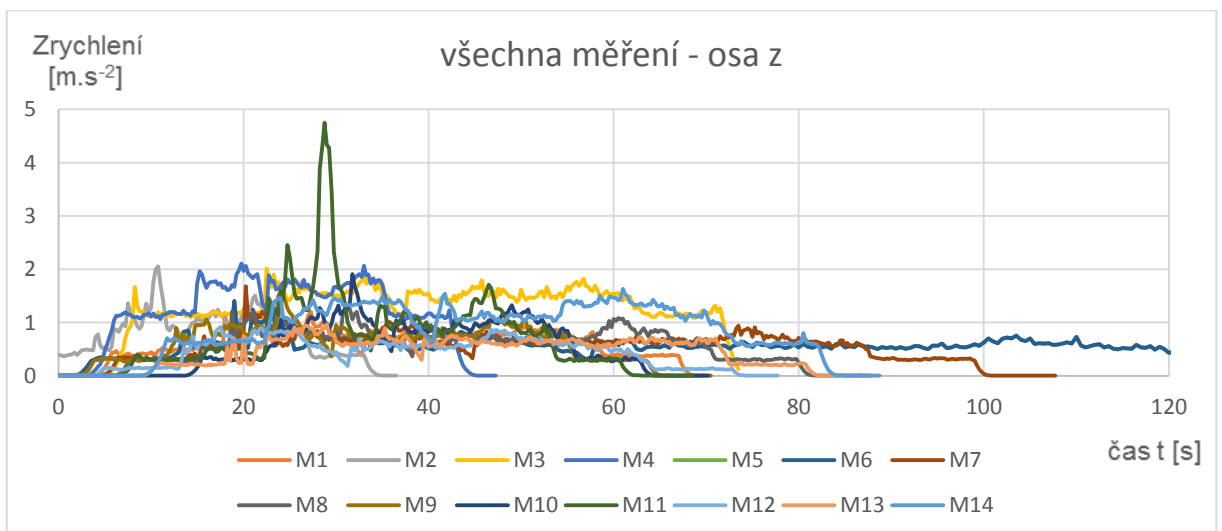
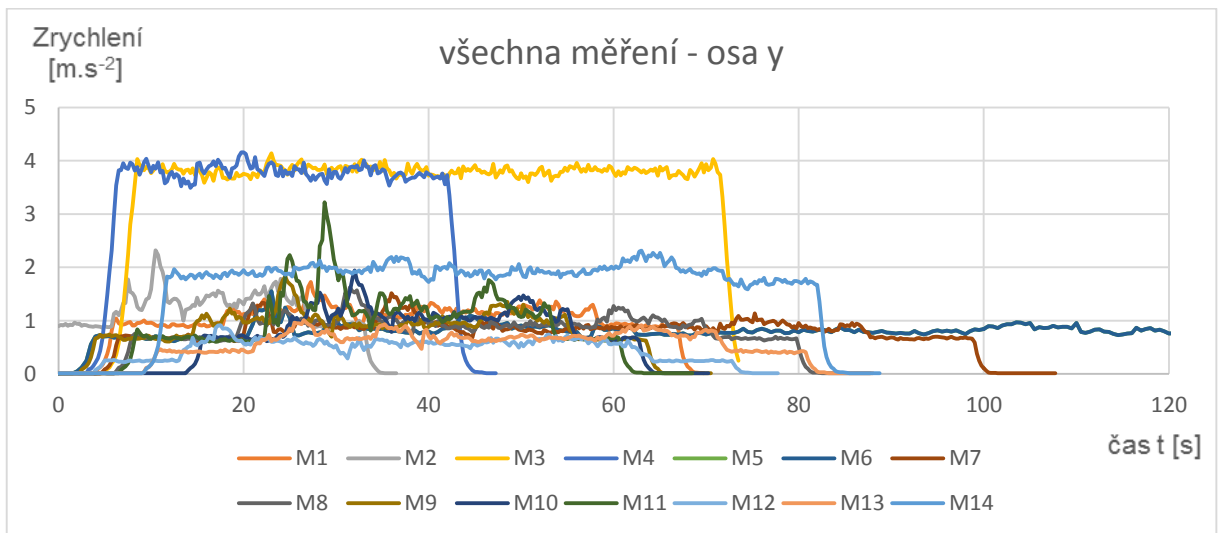
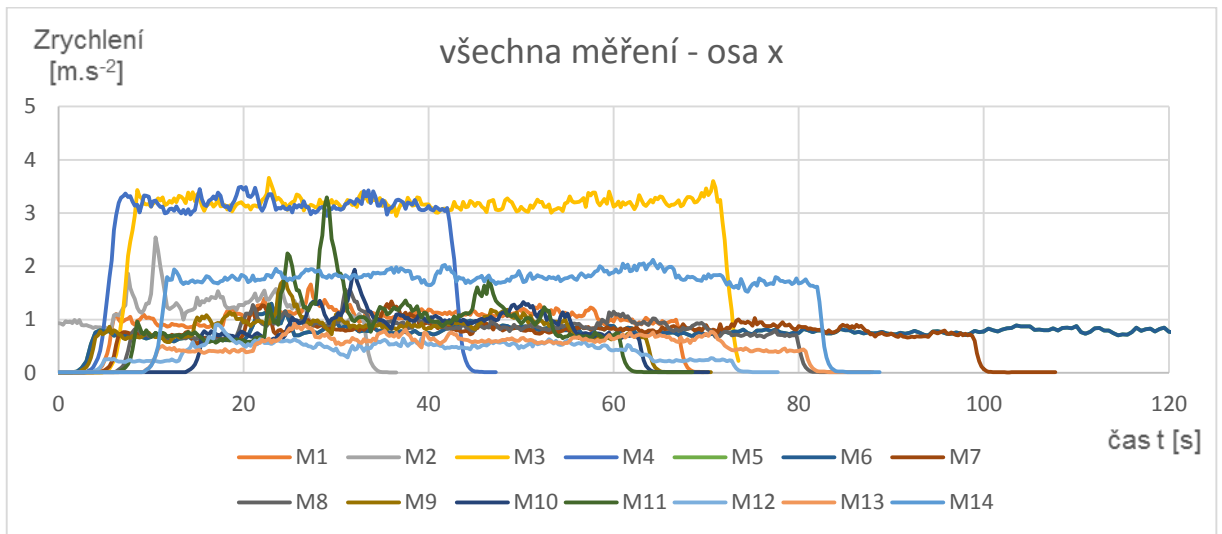
## 8.1. Porovnání vibrací hliníkového a ocelového obrobku

Pro porovnání byly zvoleny měření obdobných parametrů s označením M1 (hliník) a M11 (ocel).



Při porovnání průběhů vibrací obrábění hliníkového a ocelového obrobku, lze vidět tvrdší charakteristika ve prospěch ocelového materiálu s výrazně vyššími maximálními hodnotami. Špičkové zatížení je však krátká a odstraníme-li extrémní hodnoty, průměrné hodnoty budou velice podobné. Přesto z měření jasně vyplývá, že obrábění oceli je náročnější a je tak třeba dávat šetrnější nastavení frézky než u hliníku.

## 8.2. Porovnání vibrací ve stejných osách za různých podmínek

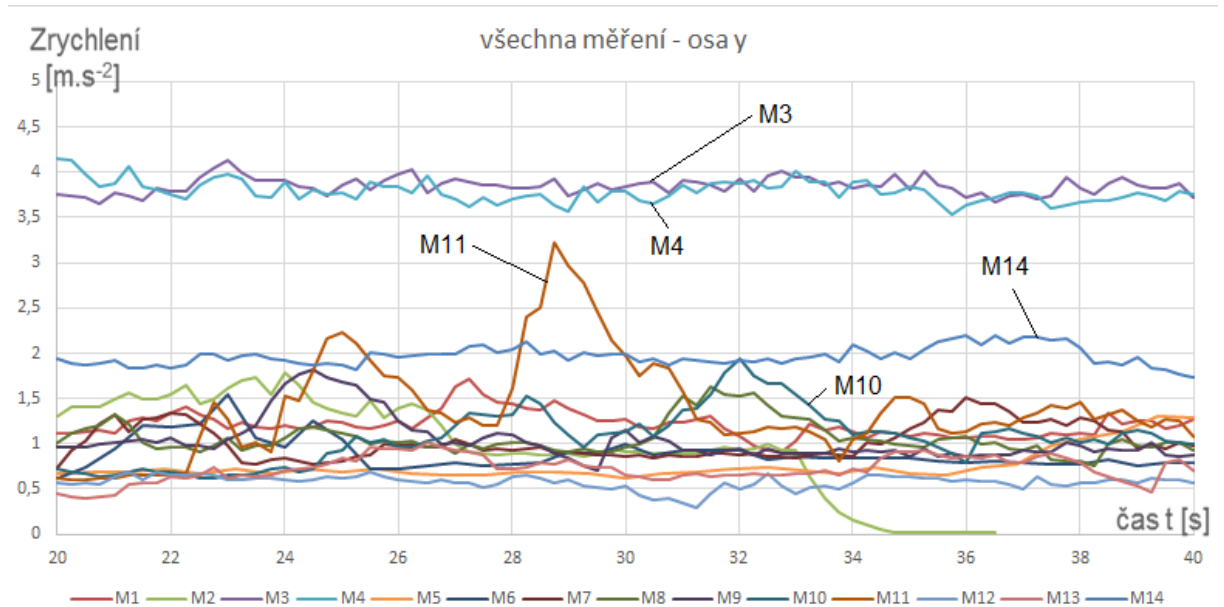


Porovnání stejných os za různých podmínek odhaluje největší zátěž stroje při měření M4 a M3 v osách XY, jimž odpovídají maximální otáčky. Ačkoliv je rychlost posuvu u těchto dvou měření různá, naměřené hodnoty vibrací jsou velmi podobné. Pravděpodobně rychlost posuvu už v tomto případě nemá enormní vliv na měřené vibrace.

Velký peak je naměřen při měření M11, zejména pak v ose Z. V tomto měření došlo k průrazu materiálu skrz řezným nožem, lze tak přikládat tuto špičku právě tomuto proražení. Výsledky by odhalila podrobnější analýza se zaměřením právě na tuto oblast.

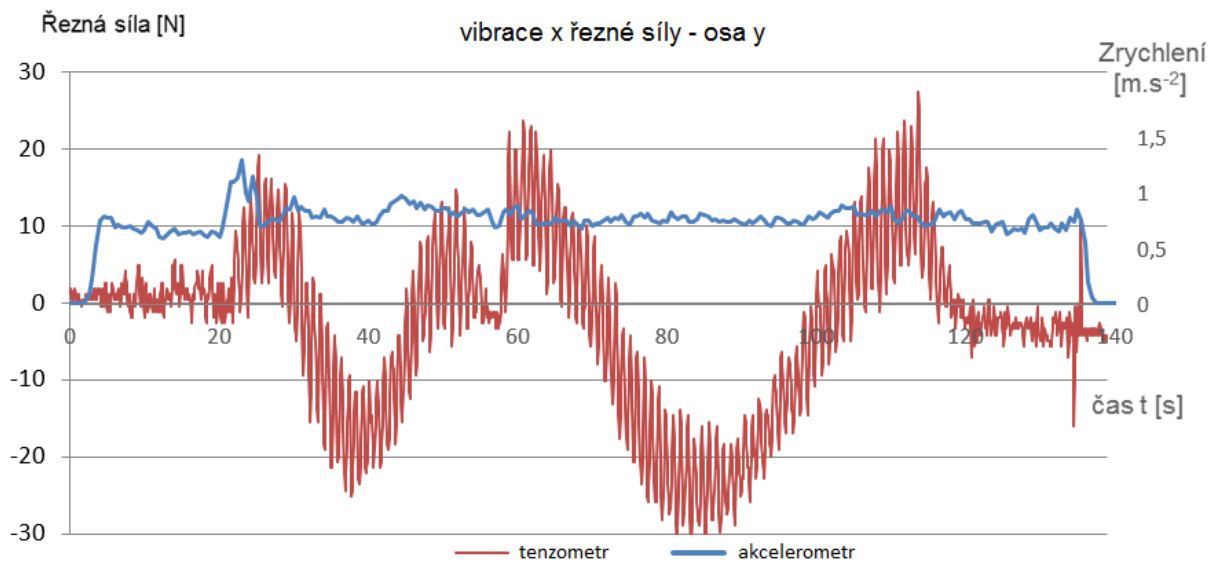
Měření M12, M13, M14 mají jedinou proměnnou veličinu otáčky, je možno se tak přesvědčit jaký má na vibrace vliv právě tento parametr nastavení frézky. Měření M12, M13 se nepatrně liší, ale svým průměrem nepřevyšují ostatní měření. Měření M14 potvrdilo, že hodnota otáček nad 1900 už má zvýšenou průměrnou hodnotu vibrací a dá se předpokládat zvýšené opotřebení.

Detail grafu na jednotlivé měření.

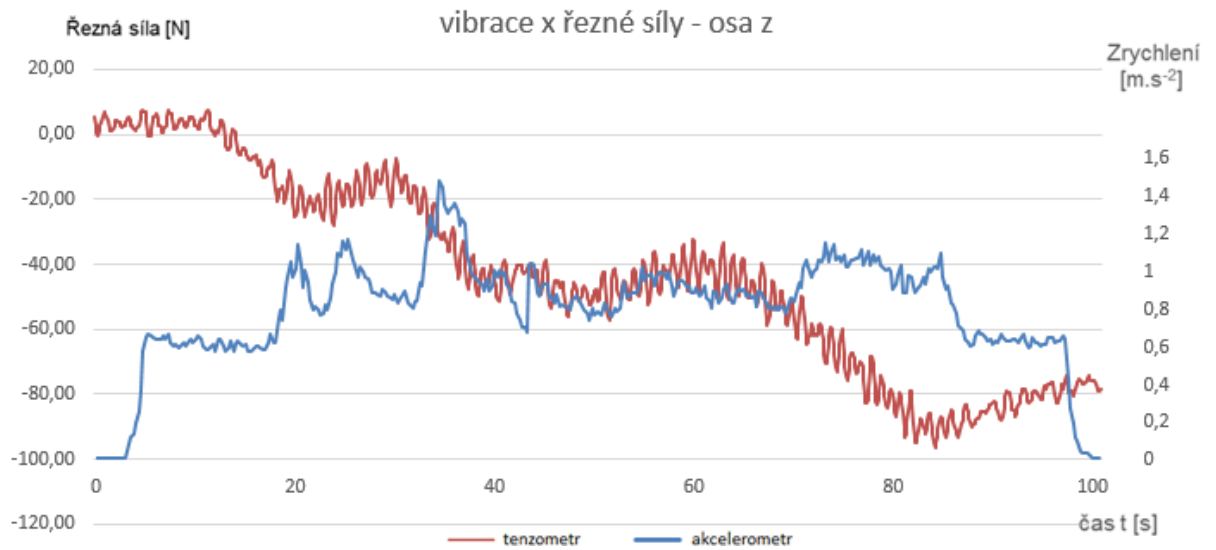


### 8.3. Porovnání vibrací a řezných sil

#### Měření 6



#### Měření 7



Tenzometrická měření projevila pouze velmi malou závislost na měření vibrací na vřetenu stroje. Lze tak dedukovat, že směr záběru obráběcího nože nemá vliv na celkové vibrace stroje. U měření řezných sil tenzometry nebyla provedena teplotní kompenzace, a proto u většiny měření není rozvážený můstek na konci měření v původní rovnováze.



## 9 Závěr

Práce nastiňuje dnes hojně využívané vibrodiagnostické metody v praxi. Obráběním rozdílných materiálů, při různém nastavení programovatelné frézky, jsme nasimulovali možné podmínky běžného provozu, přičemž jsme sledovali a následně vyhodnocovali hodnotu vibrací přenášených na vřeteník frézky.

Cílem bakalářské práce bylo najít nejvhodnější podmínky obrábění při zachování maximální spolehlivosti stroje, a co největší rychlosti obrábění. Tím lze například zefektivnit výrobu a hospodárnost firmy, jak bylo uvedeno v úvodu. Vyhodnocení vibrací je v časové oblasti porovnáním jednotlivých signálů ze snímačů.

Určení optimálních podmínek nelze přesně z grafů specifikovat, ale bude úzce souviset s naměřenými hodnotami vibrací. Tam, kde byly naměřeny vysoké vibrace, je nastavení parametrů obrábění nevhodné kvůli většímu opotřebení. Přesnější měření by bylo dosaženo uchycením snímače blíže k obrobku na místech uchycení tenzometrů.

Z výše uvedeného plyne, že bakalářská práce splnila své cíle a přinesla očekávané poznatky v oblasti vibrací a diagnostiky strojů.

## 10 Seznam použitých zdrojů

- 1 KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- 2 ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *Automa* [online]. , 32-36 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/40375.pdf>
- 3 SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901-9362-5.
- 4 TESAŘ, Miroslav. Provoz a údržba silničních vozidel. První. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava/Univerzita Pardubice, 2012. ISBN 978-80-248-3278-4.
- 5 ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Možnosti a problémy moderní (vibro)diagnostiky [online]. , 10-13 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39703.pdf>
- 6 Analysis of data and curves [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://scidavis.sourceforge.net/manual/c4166.html>
- 7 Vibrodiagnostika elektrických strojů. Ústav elektroenergetiky Vysoké učení technické v Brně [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images\\_laboratory/Diagnostika/Files/04\\_Vibrodiagnostika\\_elektrickyh\\_stroju.pdf](http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images_laboratory/Diagnostika/Files/04_Vibrodiagnostika_elektrickyh_stroju.pdf)
- 8 Frézka. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9zka>
- 9 Návody a rady obráběcí stroje a technika. *Strojnet* [online]. [cit. 2016-05-30]. Dostupné z: <http://www.strojnet.cz/clanky/obrabeci-stroje-cnc.php>
- 10 Základní vlastnosti měřicích přístrojů. *Ústav počítačové a řídicí techniky VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2016-05-30]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k41-zvmp.htm>
- 11 Zákon elektromagnetické indukce. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1kon\\_elektromagnetick%C3%A9\\_indukce](https://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1kon_elektromagnetick%C3%A9_indukce)

- 12 Model: 356A24. *PCB Piezotronics* [online]. [cit. 2016-05-29]. Dostupné z:  
<http://www.pcb.com/products.aspx?m=356A24>
- 13 Specifications Documents NI PXIe-4499. *National Instruments* [online]. [cit. 2016-05-30].  
Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/209384>
- 14 Mikronex [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/>
- 15 Technická dokumentace frézky
- 16 SERRIDGE, Mark a Torben LICHT. *PIEZOELECTRIC ACCELEROMETER AND VIBRATION PREAMPLIFIER HANDBOOK* [online]. 1987. Brüel & Kjær [cit. 2016-06-02].
- 17 VACEK, Vladimír. *Přehled senzorů pro měření vibrací* [online]. [cit. 2016-06-02].  
Dostupné z:  
[https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/4741/Vacek\\_BP\\_E09B0203P.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/4741/Vacek_BP_E09B0203P.pdf?sequence=1)

# 11 Přílohy

Legenda:

— X — Y — Z

