

Bc. Jan Matějka, Dis.

# Frekvenční analýza obráběcího stroje – diagram stability

## Frequency analysis of machine – stability diagram

Diplomová práce

Vedoucí práce:  
Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2021

**Bibliografický záznam**

Autor: Jan Matějka, MAT0362

Název práce: Frekvenční analýza obráběcího stroje – diagram stability

Studijní program: N0715A270007 Strojírenská technologie

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

Počet stran: 51

Klíčová slova: Frekvenční analýza, diagram stability, vibrace při obrábění, soustružení

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

MATĚJKA, J. *Frekvenční analýza obráběcího stroje – diagram stability: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2021, 51 s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Řešenou problematikou diplomové práce je frekvenční analýza soustruhu, která obsahuje vyhodnocení a srovnání zrychlení vibrací ve směrech hlavních, posuvových a pasivních složek řezných sil při soustružení. V teoretické části je obsažen obecný popis mechanických vibrací spolu s matematickým vyjádřením, výčtem a popisem druhů vibrací vznikajících při obrábění a metodami měření vibrací. Na konci teoretické části je další možný způsob, se kterým je možné provést frekvenční analýzu a zjistit tak, při jakých řezných podmínkách je obráběcí proces stabilní či nestabilní. V praktické části jsou nejprve vypsány použité prostředky, postup přípravy experimentu a samotný průběh měření. Dále je zde uvedena část vyhodnocení, ve které je obsažen postup vyhodnocení jednotlivých měření s porovnáním výsledků a stabilními diagramy, kde jsou vyznačeny oblasti nestability.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

MATĚJKA, J. *Frequency analysis of machine tool – stability diagram: Master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2021, 51 p. Thesis head: Kratochvíl, J.

Master thesis is dealing with frequency analysis of lathe, which contains the evaluation and comparison of the vibration's acceleration in the directions of the main, feed and passive components of cutting forces during turning with addition of stable diagrams. The theoretical part contains a description of mechanical vibrations together with a mathematical expression, enumeration, description of the types of arising vibrations and methods of measuring vibrations. At the end of the theoretical part, there is another possible way, which allow to perform frequency analysis and find out under which cutting conditions the machining process is stable or unstable. The practical part contains the means used, the procedure of preparation of the experiment and the actual course of measurement. Furthermore, there is a part of the evaluation, which contains the procedure of evaluation of individual measurements with comparison of results and stable diagrams, where the areas of instability are marked.

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK .....</b>	<b>5</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>1 VIBRACE.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 POPIS MECHANICKÝCH VIBRACÍ.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VIBRACÍ.....</b>	<b>10</b>
<b>2 VIBRACE PŘI OBRÁBĚNÍ .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 VYNUCENÉ VIBRACE .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 SAMOBUZENÉ VIBRACE .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 LOBE DIAGRAM .....</b>	<b>16</b>
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 POUŽITÉ PROSTŘEDKY .....</b>	<b>19</b>
3.1.1 OBRÁBĚCÍ SOUSTAVA .....	19
3.1.2 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL .....	23
3.1.3 SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ DAT .....	24
3.1.4 ZAŘÍZENÍ PRO SBĚR DAT .....	25
3.1.5 SOFTWARE PRO ZPRACOVÁNÍ DAT.....	26
<b>3.2 PŘÍPRAVA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 PRŮBĚH EXPERIMENTU .....</b>	<b>30</b>
<b>4 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 NAMĚŘENÁ DATA .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 ZPRACOVÁNÍ DAT.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3 VYHODNOCENÍ RMS HODNOT, STABILNÍ DIAGRAMY.....</b>	<b>35</b>
4.3.1 PRVNÍ FÁZE.....	36
4.3.2 DRUHÁ FÁZE .....	37
4.3.3 TŘETÍ FÁZE.....	38
<b>4.4 POROVNÁNÍ RMS HODNOT JEDNOTLIVÝCH SMĚŘŮ.....</b>	<b>40</b>
4.4.1 HODNOTY RMS VE SMĚRU HLAVNÍ SLOŽKY ŘEZNÉ SÍLY .....	40
4.4.2 HODNOTY RMS VE SMĚRU POSUVOVÉ SLOŽKY ŘEZNÉ SÍLY .....	41
4.4.3 HODNOTY RMS VE SMĚRU PASIVNÍ SLOŽKY ŘEZNÉ SÍLY .....	42
<b>4.5 POROVNÁNÍ CELKOVÉ HODNOTY RMS.....</b>	<b>43</b>
<b>5 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ .....</b>	<b>46</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>49</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK

Značení	Jednotka	Význam
$\psi$	[rad]	Fázový posuv
$\omega$	[rad*s <sup>-1</sup> ]	Úhlová frekvence
$\Delta t_p$	[s]	Časová prodleva mezi pozitivní špičkou a začátkem nové periody
$\phi_x$	[rad]	Fázový posuv vibrace
a	[mm]	Šířka odebírané třísky
$a_p$	[mm]	Axiální hloubka řezu
b	[mm]	Šířka třísky
b	[-]	Součinitel tlumení
$b_{mez}$	[mm]	Mezní šířka třísky
df	[mm]	Změna posuvu na otáčku
dF	[N]	Změna síly
ds	[mm]	Změna tloušťky třísky
dt	[s]	Změna času
d $\omega$	[rad]	Změna úhlové rychlosti
f	[mm]	Posuv na otáčku
$f_r$	[Hz]	Frekvence
h <sub>0</sub>	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
h(t)	[mm]	Tloušťka třísky
k	[-]	Tuhost pružiny
$k_1, k_2, k_3$	[-]	Silové koeficienty
$k_c$	[MPa]	Řezný odpor materiálu
m	[kg]	Hmotnost seismické hmoty snímače
n	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky vřetene
$n_{max}$	[min <sup>-1</sup> ]	Maximální otáčky vřetene
$t_{np}$	[s]	Čas periody
$v_c$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost
$v_f$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Posuvová rychlost
$x_{eq}$	[-]	Rovnovážná poloha vibrace
x(t)	[mm]	Vychýlení mimo rovnovážnou polohu

$y$	[mm]	Výchylka vibrace
$y(t)$	[mm]	Vlna nerovnosti povrchu vzniklá při aktuální otáčce
$y(t-T)$	[mm]	Vlna nerovnosti povrchu vzniklá při předcházející otáčce
$z$	[-]	Počet zubů nástroje
$A_a$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Amplituda zrychlení
$A_v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Amplituda rychlosti
$A_x$	[-]	Amplituda vibrace
CBN	[-]	Kubický nitrid boru
$D_0$	[mm]	Obráběný průměr
$F_0$	[N]	Amplituda síly
$F_b$	[N]	Budicí síla
$F_c$	[N]	Řezná síla
$F_{celk}$	[N]	Celková řezná síla
$F_f$	[N]	Posuvová síla
$F_p$	[N]	Pasivní síla
$Im(\phi)$	[mm.N <sup>-1</sup> ]	Imaginární část záporných hodnot přenosové funkce
$M$	[kg]	Hmotnost objektu
$N$	[-]	Počet celých vln na povrchu mezi řezy
$Re(\phi)$	[mm.N <sup>-1</sup> ]	Reálná část záporných hodnot přenosové funkce
RMS	[-]	Efektivní hodnota (z angl. RootMean Square)
RMS $F_c$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Efektivní hodnota zrychlení vibrace ve směru hlavní složky řezné síly
RMS $F_f$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Efektivní hodnota zrychlení vibrace ve směru posuvové složky řezné síly
RMS $F_p$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Efektivní hodnota zrychlení vibrace ve směru pasivní složky řezné síly
$T$	[s]	Perioda
$\dot{v}(t)$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Derivace rychlosti vibrace v čase
$\dot{x}(t)$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Derivace pohybu vibrace v čase
$\ddot{x}$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení měřeného objektu
$\ddot{x}(t)$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Druhá derivace pohybu vibrace v čase
$\dot{y}$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost vibrace
$\ddot{y}$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení vibrace

## ÚVOD

V dnešní době při procesu zpracování kovů pomocí obrábění jsou kladeny čím dál přesnější požadavky na výrobu. Z toho důvodu je nutné se u technologie obrábění zabývat všemi parametry a jevy, které by mohly, jakkoliv znehodnotit zhotovený výrobek. Jedním z jevů, které ovlivňují výslednou kvalitu výrobku, jsou vibrace. Vibrace mohou mít jak pozitivní, tak negativní účinky na kvalitu zhotoveného výrobku, životnost stroje a nástroje. Nejen v tuzemských firmách obrábí mnoho strojů, kde vibrace výrazně ovlivňují ekonomiku řezného procesu, a to i přes to, že se strojírenský průmysl zabývá mechanickými vibracemi od počátku dvacátého století. Vibrace s negativním účinkem, vznikající při obrábění, jsou nazývány jako chvění. Chvění při obrábění je nežádoucí stav, který působí na každý jednotlivý prvek obráběcí soustavy i na obrobek samotný. U obráběcí soustavy může chvění způsobit zvýšenou drsnost povrchu obráběné plochy, snížit životnost jednotlivých elementů obráběcího stroje a působit negativně na nástroj. Dalším doprovodným jevem chvění je vysoká hlučnost, což může mít vliv na zdraví a psychiku pracovníka u stroje.

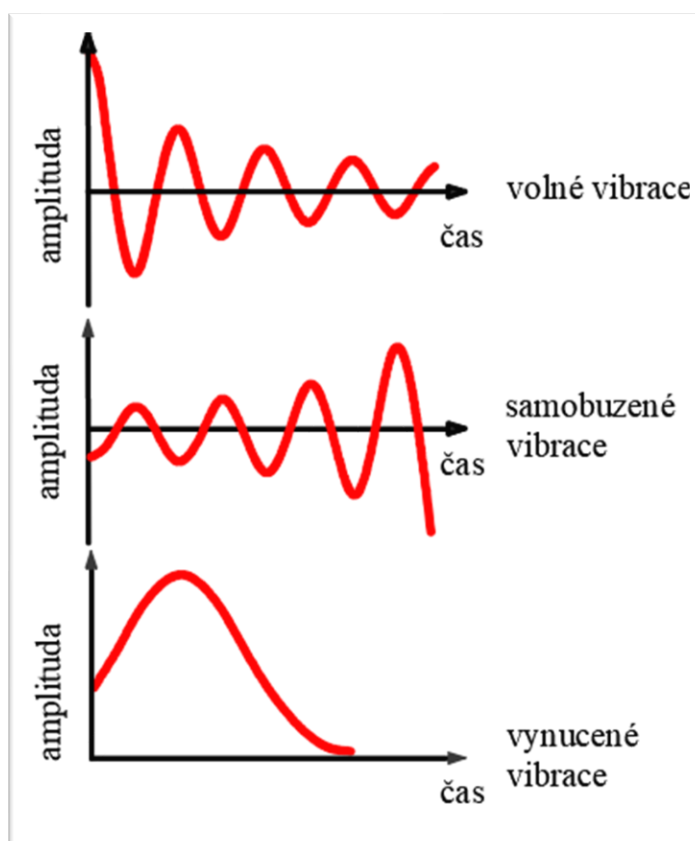
Tato práce obsahuje teoretickou část, rozdělenou do dvou kapitol. V první kapitole je uveden popis a rozbor vibrací z fyzikálního hlediska, dále vývoj měření vibrací a zkráceně popsán význam vibrací při obrábění. V druhé kapitole jsou podrobně popsány vibrace při obrábění, tedy vibrace vznikající při obrábění, jejich použití pro diagnostiku strojů a použití vibrací jako podporu při obrábění. Dále jsou zde uvedeny vlivy vibrací na zhotovený povrch, na řezné parametry a na jednotlivé prvky soustavy SNOF. Ve třetí kapitole této práce je rozbor diagramu pro diagnostiku obráběcích strojů – diagram stability. Tedy popis, k čemu se využívá, postup tvorby a grafické ukázky.

Dále tato práce obsahuje praktickou část, která je rozdělena na tři kapitoly. V první kapitole jsou vypsány všechny použité prostředky a programy, které byly použity při experimentu a zpracování naměřených dat. Součástí této kapitoly je také popis přípravy experimentu spolu s průběhem měření. V druhé kapitole praktické části jsou ukázány podoby naměřených hodnot, jejich zpracování do formy efektivních hodnot a samotné vyhodnocení zpracovaných dat. Dále je zde zpracování diagramu stability s vyznačenou oblastí nestability. Efektivní hodnoty jsou zde vyhodnoceny pro jednotlivé fáze experimentu, které jsou v tomto experimentu tři. Dalším bodem je pak kapitola porovnání efektivních hodnot jednotlivých směrů a porovnání celkových efektivních hodnot. Konečnou kapitolou praktické části je shrnutí všech poznatků z vyhodnocení, porovnání a stabilních diagramů společně s doporučením pro další opakované testování s podobnými či odlišnými řeznými podmínkami.

## 1 VIBRACE

### 1.1 Popis mechanických vibrací

Pojem vibrace je definován jako mechanický jev dynamický, při kterém dochází k oscilačním pohybům tělesa, molekul či atomů kolem rovnovážné polohy. Vibrace jsou tedy důsledkem působení dynamických sil na těleso, případně na jeho část. Síly působící na těleso mění se v čase způsobují rozkmit jednotlivých atomů či molekul mimo rovnovážnou polohu. Při rozkmitu pak element při cestě do bodu nerovnovážné polohy předá energii do okolního systému, tedy vibraci. Ta se systémem šíří dál a se zvětšující vzdáleností od bodu rovnovážné polohy se energie vibrace zmenšuje. Při střetnutí s další vibrací se může amplituda vibrace zvětšovat nebo zmenšovat v závislosti na fázovém posunu střetnutých vibrací. Neodmyslitelně k nim patří i zvuk, který také může být zdrojem vibrací. Podle vzniku rozeznáváme vibrace samobuzené a vynucené. Dle způsobu šíření rozdělujeme vibrace na sinusoidní periodické, komplexní periodické, kvaziperiodické, transientní (přechodové), chaotické nebo náhodné. U dalšího dělení se vibrace rozdělují na vibrace volné, vynucené a samobuzené. Grafické podoby těchto vibrací jsou ukázány na obrázku číslo 1.<sup>1,6</sup>



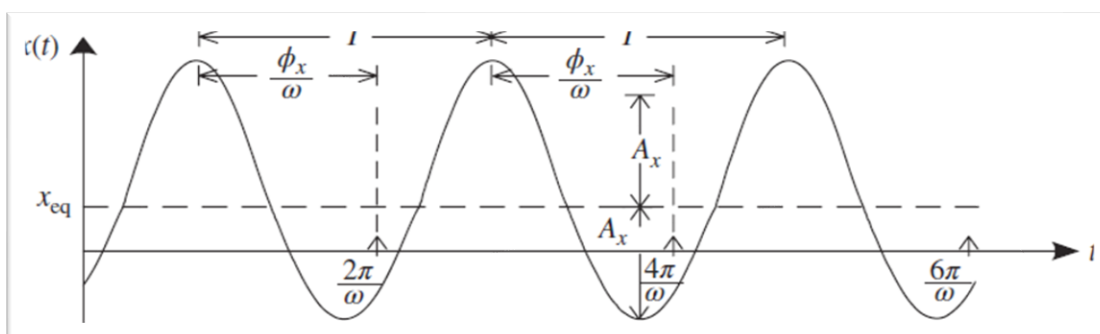
Obrázek 1 – Typy kmitání



Mechanickými vibracemi v obrábění se začali strojní inženýři zabývat již na počátku 20. století, kdy jako jeden z prvních se inženýr Frederick Taylor začal těmito vibracemi zabírat. Svými výzkumy a experimenty přišel na to, že vibrace v procesu obrábění jsou jedním z největších problémů, se kterými se lze v této technologii setkat. Při svém zkoumání navrhnul vztahy závislosti řezných podmínek a trvanlivosti řezného nástroje, jenž se používají i v dnešní době pro zajištění optimální efektivity řezného procesu. V podobném časovém období se vibracemi také zabývali dua Fishwick a Tobias s Poláčkem a Tlustým. Ti se zabývali spíše samobuzenými vibracemi, které budou rozebrány v jedné z následujících kapitol. Navrhli a zpracovali teorii, podle které vznikají samobuzené vibrace, kterou nazvali regenerativní princip vzniku samobuzených vibrací. Zjistili, že tyto vibrace vznikají následkem působení dynamické pružnosti obráběného polotovaru a nástroje. Díky tomuto zjištění definovaly vztah závislosti mezi řeznými parametry, přesněji mezi řeznou rychlostí, posuvem, celkovou řeznou silou  $F$  a okamžitou hodnotou tloušťky třísky.<sup>4,5</sup>

Každý druh vibrací je charakterizován určitými parametry, například monotónní (s jednotnou frekvencí) sinusoidní vibrace jsou charakterizovány rovnovážnou polohou  $x_{eq}$  a dynamickým posuvem, který je určen pomocí amplitudy  $A_x$ , fázového posunu  $\phi_x$ , frekvence  $f$ , periody  $T$  a pomocí úhlové frekvence  $\omega$ . Grafickou podobu zmiňovaného kmitu spolu se všemi charakteristickými parametry lze vidět na obrázku číslo 2.<sup>1,6</sup>

Pohyb vibrace znázorněný na obrázku 2 může být výsledkem přemístění či nárazu komponentu, kde vibrace nejsou nikterak tlumeny. Tak je tomu například u kyvadla, dopravního semaforu, antény auta či struny u kytary. Vibrace těchto přirozených pohybů jsou nazvány samobuzené vibrace. Vynucené vibrace lze vidět například u pračky, kdy je pračka nerovnoměrně zatížena nebo u vozidla, které má kola s disky válcovitého tvaru. Pokud nastane případ, kdy samobuzené a vynucené vibrace dosáhnou podobné či stejné frekvence, tyto vibrace se spojí v jednu větší o vyšší amplitudě a mohou způsobit i porušení součásti, na kterou působí. Tento jev je nazván jako rezonance. Co může způsobit rezonance, je možné vidět v případě zničeného mostu Tacoma Bridge ve Washingtonu, kde byla rezonance hlavním důvodem pádu mostu.<sup>1,6</sup>



Obrázek 2 – Grafická podoba sinusoidní vibrace netlumené<sup>1</sup>

Matematicky lze vibrace popsat pomocí rovnic periody a frekvence: <sup>1</sup>

$$f_r = \frac{1}{T} [Hz] \quad (1)$$

$$\omega = 2 * \pi * f_r [rad.s^{-1}] \quad (2)$$

Začátek periody nastává v nule,  $2\pi/\omega$ ,  $4\pi/\omega$  a  $6\pi/\omega$ , což například představuje jedno otočení klikové hřídele nebo jakýkoliv libovolně opakující se pulz, který značí začátek nové periody. Pohyb vibrace či kmitu lze popsat výrazem: <sup>1</sup>

$$x(t) = A_x * \cos(\omega * t + \phi_x) [mm] \quad (3)$$

Protože fázový posuv vibrace je proměnný v čase: <sup>1</sup>

$$\omega * t_{pn} = 2 * \pi * n \quad (4)$$

, kde  $n = 1, 2, 3, \dots$  a z čehož plyne: <sup>1</sup>

$$t_{pn} \in \left\{ \frac{2\pi}{\omega} - \frac{\phi_x}{\omega}; \frac{4\pi}{\omega} - \frac{\phi_x}{\omega}; \frac{6\pi}{\omega} - \frac{\phi_x}{\omega}; \dots \right\} [s] \quad (5)$$

Pro zjištění časové prodlevy mezi zaznamenáním pozitivní špičky vibrace a začátkem nové periody je určen vztah: <sup>1</sup>

$$\Delta t_p = \frac{\phi_x}{\omega} [s] \quad (6)$$

Hodnoty rychlosti a zrychlení mohou být zjištěny analogicky pomocí derivací rovnice 3: <sup>1</sup>

$$v(t) = \dot{x}(t) = A_v * \cos(\omega * t + \phi_v) [m.s^{-1}] \quad (7)$$

$$a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{x}(t) = A_a * \cos(\omega * t + \phi_a) [m.s^{-2}] \quad (8)$$

, kde

$$A_v = \omega * A_x [m.s^{-1}] \quad (9)$$

$$A_a = \omega * A_v = \omega^2 * A_x [m.s^{-2}] \quad (10)$$

$$\phi_v = \phi_x + \frac{\pi}{2} [^\circ] \quad (11)$$

$$\phi_a = \phi_v + \frac{\pi}{2} = \phi_x + \pi [^\circ] \quad (12)$$

## 1.2 Měření mechanických vibrací

Měření vibrací je komplexní záležitost z důvodu více parametrů, které je možné u měřené vibrace měřit. Tyto parametry jsou vzdálenost posunu, rychlost, zrychlení a frekvence. Ohledně měření parametrů, v praxi je nejčastěji používáno měření zrychlení a vychýlení. Navíc je každou z těchto složek možné měřit několika způsoby a každou složku lze měřit v časové oblasti, frekvenční oblasti nebo jako jednu hodnotu, určující celkovou velikost vibrace. Dále lze měřit vibrace impulsně a průběžně. <sup>7</sup>

Jednotlivé parametry vibrací lze měřit dotykově a bezdotykově. Používané zařízení pro měření jsou převodníky, snímače pro zaznamenávání dat a analyzéry v reálném čase, které jsou schopny měřit úroveň vibrací. Velikost rozkmitu lze dotykově měřit pomocí kontaktního snímače posunu, který se připevní na zkoumaný objekt. Špička kontaktního snímače je přitlačena na povrch měřeného tělesa a koná dopředný a zpětný pohyb podle relativního pohybu dvou povrchů.

Tento snímač převádí mechanický pohyb do elektrického signálu, který je pak zpracováván pomocí analyzáru.<sup>7, 8</sup>

Výsledným signálem je naměřená vzdálenost vychýleného povrchu mimo rovnovážnou polohu. Pro bezkontaktní měření hodnoty výchylky rozkmitu je možné využít magnetického toku, který je generován zdrojem. Na špičce sondy bezkontaktního snímače je připevněna malá cívka, která měří změnu magnetického toku při změně vzdálenosti špičky sondy od měřeného feromagnetického materiálu. Kontaktního měření výchylky kmitu pomocí snímače posunu je doporučováno použít pro vibrace o frekvencích v rozmezí 10 až 200 Hz. Bezkontaktního měření vibrací je doporučováno použít pro rozsah frekvencích od 10 do 600 Hz.<sup>7, 8</sup>

Dalším způsobem dotykového měření je měření seismické. Parametry definující vibrace jsou na sobě závislé. Obecně je tedy možné říct, pro měření mechanických vibrací snímači je zapotřebí pohybu seismické hmoty o hmotnosti  $m$  vzhledem k objektu s hmotností  $M$ , jehož vibrace se měří. V ideálním případě tedy platí vztah:<sup>6</sup>

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = F_b = M\ddot{x} \quad (13)$$

, kde

$y$	výchylka kmitu [mm],
$\dot{y}$	rychlost vibrace [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],
$\ddot{y}$	zrychlení vibrace [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],
$\ddot{x}$	zrychlení objektu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],
$m$	hmotnost seismické hmoty snímače [kg],
$M$	hmotnost objektu [kg],
$k$	tuhost pružiny [-],
$b$	součinitel tlumení [-],
$F_b$	budící síla [N].

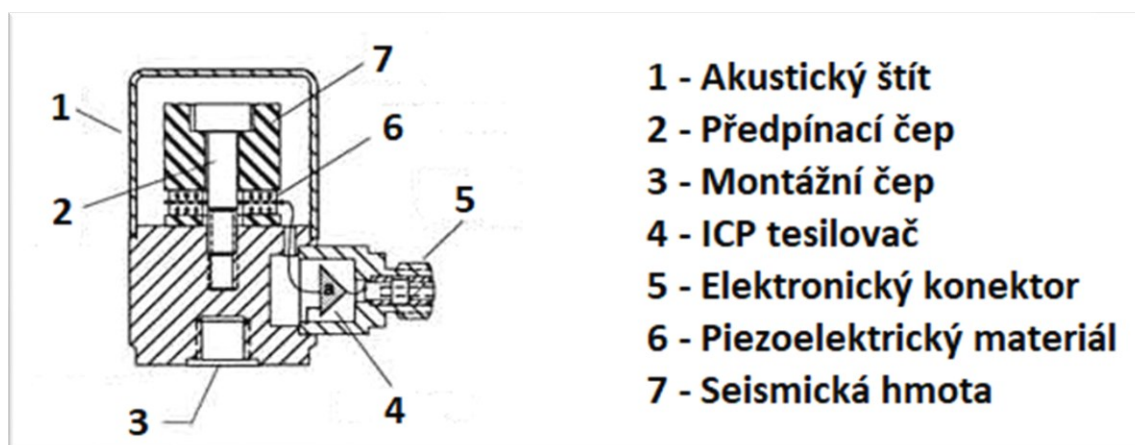
Pro zjištění rychlosti vibrace lze použít snímač rychlosti, ovšem těmito snímači lze měřit vibrace s frekvenčním rozsahem 10 až 2000 Hz. Tento snímač měří rychlost vibrace pomocí zafixovaného permanentního magnetu a cívky připevněné na pružinu. Pokud se na snímač přivede vibrace, cívka se začne hýbat kolem magnetu a tím se začne produkovat napěťový signál, který se pak dále zpracovává. Ve většině aplikací se pro měření nižších frekvencí a záznam využívá právě snímačů rychlosti.<sup>8</sup>



Obrázek 3 – Varianty akcelerometrů<sup>14</sup>

Pro změření velikosti zrychlení vibrace se používá akcelerometr, jenž funguje na principu seismického měření. Varianty provedení akcelerometrů lze vidět na obrázku výše. Akcelerometry jsou malá zařízení, jenž se řadí mezi snímače a které se připojují přímo na povrch měřeného objektu. Akcelerometry využívají pro měření vibrací malé množství hmoty obsahující piezoelektrické krystaly, které produkují napěťový signál při působení síly na hmotu. Tato hmota se chová podobným způsobem jako pružina. Působením síly na piezokrystaly se začne hmota deformovat a nastane vznik elektrického napětí.<sup>7,8</sup>

Pokud se síla působící na hmotu uvolní, piezokrystaly se opět roztáhnou a přestanou produkovat elektrické napětí. Při měření zrychlení vibrací akcelerometry se začne produkovat napětí při pohybu měřeného povrchu, kdy se piezokrystaly uvnitř snímače vychýlí z rovnovážné polohy úměrně s velikostí zrychlení. Pokud se piezokrystaly nachází v rovnovážné poloze, neprodukují žádné napětí. Je možné využít více snímacích technik pro měření míry vychýlení hmoty uvnitř snímače. Jelikož je vždy známé množství seismické hmoty, síla působící na měřený objekt a velikost vychýlení hmoty, lze obvykle snadno převést na hodnotu zrychlení. Akcelerometry mohou poskytovat informace o zrychlení v jedné nebo více osách.<sup>7,8</sup>



Obrázek 4 – Vnitřní stavba akcelerometru<sup>13</sup>

Na obrázku výše je možné vidět schéma vnitřního provedení akcelerometru. Akcelerometry jsou dále často používány pro měření inerciálních vibrací, u kterých jsou působící síly na objekt kritickým faktorem, ovšem jsou citlivé na frekvenci. Jelikož vibrace s vyššími frekvencemi mají větší zrychlení než vibrace s nízkými frekvencemi, akcelerometry produkují velmi nízké úrovně signálu nízkofrekvenční vibrace, a tak mohou mít špatný poměr signálu k šumu. Proto se pro měření nízkofrekvenčních vibrací hodí spíše snímač rychlosti, jak již bylo zmíněno výše v této kapitole. Akcelerometry se používají pro měření vibrací s frekvencí vyšší jak 2 000 Hz. Samozřejmě je možné měřit výchylku kmitu akcelerometrem nebo zrychlení měřit snímačem posunu, ovšem je nutné naměřené signály dále integrovat nebo derivovat, dle rovnic vypsanych výše. Navíc, použití integrace zrychlení pro získání rychlosti vibrace nebo dvojitě integrace k získání hodnoty vychýlení snižuje vysokofrekvenční signál. Při ustavování akcelerometru na měřený objekt je potřeba brát v úvahu to, že připojením tohoto snímače na měřený objekt se změní jeho hmotnost, což se projeví změnou přirozené rezonanční frekvence měřeného objektu.<sup>7,8</sup>

## 2 VIBRACE PŘI OBRÁBĚNÍ

### 2.1 Vynucené vibrace

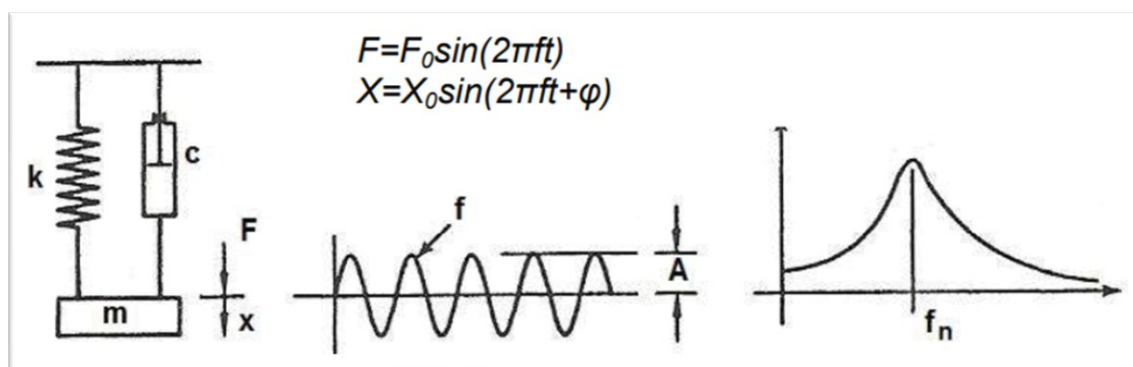
Jak již bylo zmíněno v jedné předešlých kapitol, vynucené vibrace vznikají důsledkem působení periodické dynamické síly v čase. Velikost těchto vibrací lze určit dle empirického vztahu:

$$F = F_0 * \sin 2\pi * f_r * t \text{ [N]} \quad (14)$$

, kde

$F_0$	amplituda síly [N],
$f_r$	frekvence vibrací [Hz],
$T$	čas [s].

Factory ovlivňující vznik a velikost vibrací lze rozdělit do tří skupin. První skupinou jsou silové impulsy vzniklé v obráběcím systému, což mohou být například nevyvážené rotující obrobky nebo přímočaré vratné pohyby hmot. Druhou skupinou je opakovaně přerušovaný řezný proces, do této skupiny patří periodická změna průřezu třísky nebo diskontinuální metody obrábění, jako je hoblování, obrážení či protahování. Schématické znázornění příkladu s průběhem křivky vynucených vibrací je ukázáno na obrázku 5. Po prvotním pohybu počáteční periody, kde je přítomno i přirozené kmitání, se kmitání začne stabilizovat. Ve stabilizovaném stavu je amplituda vibrace konstantní a frekvence kmitání je stejná jako frekvence budící síly. Velikost amplitudy vibrací je určena amplitudou síly  $F_0$ , tuhostí, tlumením vibrací, poměrem budící a přirozené frekvence obráběcí soustavy. Při stejné frekvenci budící a přirozené frekvence vzniká rezonance, kdy je amplituda kmitání v maximu.<sup>9,10</sup>



Obrázek 5 – Schématické znázornění a křivka vynucených vibrací<sup>11</sup>

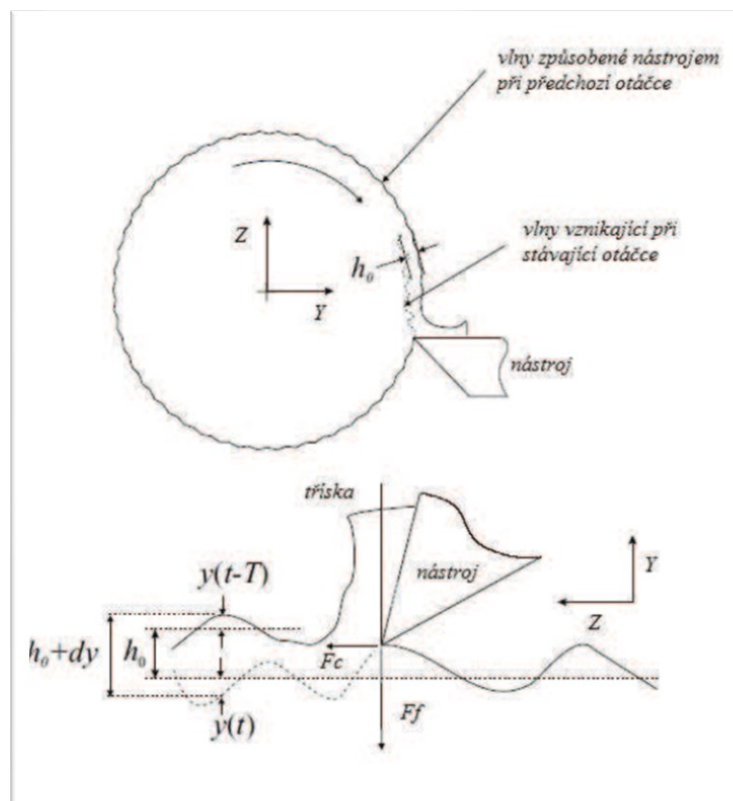
Vynucené vibrace lze nalézt téměř u každého stroje, u kterého se periodicky generuje silové zatížení. Způsobují je zejména takové stroje, u kterých není řádně vyvážená rotující součást nebo u strojů s vratnými jevy. Ovšem tyto vibrace jsou znatelné pouze v případě rezonance. V technologii obrábění se vynucené vibrace o velkých velikostech vyskytují u metod finišování nebo u dokončovacích metod, což může být například vystružování či broušení. V tomto případě se velké vynucené vibrace projevují v podobě zvlnění obrobeneho povrchu ale i přes větší velikosti vibrací jsou vynucené vibrace problémem v případě rezonance.<sup>11</sup>

## 2.2 Samobuzené vibrace

Existence samobuzených vibrací neboli samobuzeného kmitání, je jeden z činitelů, které určují hranice výkonnosti obráběcího stroje. Vznikají jak při procesu hrubování, tak i při dokončovacím obrábění.

Tyto vibrace se vytváří recipročním působením řezného procesu a obráběcího stroje. Přesněji řečeno vznikají v důsledku změny statické složky řezné síly, které se odvíjí od průřezu odebírané třísky. Takže lze říct, že samobuzené vibrace vznikají důsledkem změny tloušťky třísky a jsou charakteristické okamžitým nástupem při překročení mezní hodnoty šířky třísky  $b$  či axiální hloubky řezu  $a_p$ . Samobuzené vibrace vznikají mnoha principy, z nichž jsou nejzákladnější dva. Prvním je princip regenerativní a druhým je princip vzájemné polohy.<sup>2</sup>

Podle regenerativního principu vznikají samobuzené vibrace v důsledku drsnosti povrchu obráběného materiálu. Při obrábění povrchu o určité vlnitosti a drsnosti se neustále mění hloubka vrstvy odebírané třísky, což také mění statickou složku řezné síly působící na nástroj. V důsledku toho je buzený celý obráběcí systém. Tímto způsobem se vlny regenerují při každém jednotlivém řezu, což je například při každém otočení vřetene nebo při každém záběru zubu. Prvním kritériem pro vznik samobuzených kmitů je tedy změna hloubky řezu. Druhým rozhodujícím kritériem je existence fázového posunu mezi vibracemi vznikajícími drsností povrchu a vibracemi v nástroji. Pokud by byl fázový posuv mezi vibracemi nulový, hloubka řezu a statická složka řezné síly konstantní, samobuzené vibrace nevzniknou. To se projeví zefektivněním řezného procesu, což bude předmětem jedné z následujících kapitol.<sup>2,3</sup>



Obrázek 6 – Regenerativní princip<sup>12</sup>

Na obrázku číslo 6 je znázorněn vznik třísky u soustružení s regenerativním principem vzniku samobuzených vibrací za předpokladu, že nástroj je pružný jen ve směru osy  $Y$ , z čehož lze odvodit vztah výsledné tloušťky třísky: <sup>12</sup>

$$h_{(t)} = h_0 + y_{(t-T)} - y_{(t)} \text{ [mm]} \quad (15)$$

a

$$T = \frac{60}{n} \text{ [s]} \quad (16)$$

Jmenovitá tloušťka třísky je označena jako  $h_0$ , vlna nerovnosti povrchu vznikající při aktuální otáčce je  $y_{(t)}$ , vlna nerovnosti povrchu vzniklá při předcházející otáčce je  $y_{(t-T)}$ ,  $T$  je perioda jedné otáčky a  $n$  jsou otáčky vřetene. Pomocí řezného odporu materiálu  $K_f$  a šířky záběru ostří  $a$  je možné určit vztah pro celkovou řeznou sílu: <sup>12</sup>

$$F_c = K_f * a * [h_0 + y_{(t-T)} - y] \text{ [N]} \quad (17)$$

Parametry určující řeznou sílu tedy ovlivňují i vznik samobuzených vibrací, což objevili a potvrdili strojírenští inženýři Tobias a Fishwick. Zhruba v totožné době na tento jev narazili i dvojice českých strojírenských inženýrů Tlustý a Poláček. Mezi tyto parametry se řadí okamžitá tloušťka třísky  $h_{(t)}$ , posuv na otáčku  $f$  a řezná rychlost  $v_c$ , jenž je úměrná úhlové rychlosti  $\omega$ . Vibrace soustavy nástroje s obrobkem způsobují vychýlení nástroje z řezu, a tedy i změnu řezné síly  $dF$  od ustáleného stavu řezné síly  $F$ . Toto vychýlení je vyjádřeno pomocí funkce přírůstku tloušťky třísky  $ds$ , změnou posuvu  $df$  a změnou úhlové rychlosti  $d\omega$ . Dynamickou sílu při soustružení je tedy možné určit empiricky dle vztahu: <sup>12</sup>

$$dF = k_1 * a * ds + \frac{2\pi}{\omega} * k_2 * df + k_3 * d\omega \quad (18)$$

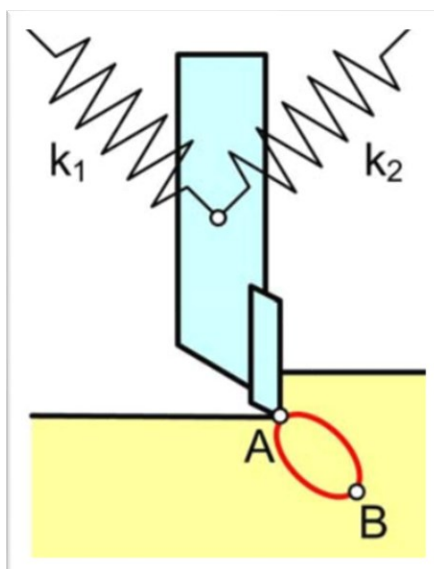
Koeficienty  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_3$  jsou silové koeficienty, které se stanovují na základě provedeného experimentu a určují vztah mezi řeznou silou a dalšími řeznými parametry. Při uvažování změny tloušťky třísky  $h_{(s)}$ , změny rychlosti posuvu  $df$ , při konstantních otáčkách  $n$  a s konstantním koeficientem  $k_1$ , lze upravit rovnici 18 takto: <sup>12</sup>

$$dF = K_f * a * [y_{(t-T)} - y_{(t)}] - \frac{2\pi * k_2}{\omega} * \frac{dy}{dt} \text{ [N]} \quad (19)$$

Mnohočlen na pravé straně rovnice je v záporném směru kvůli pohybu nástroje v kladném směru osy  $Y$ , což se projeví zmenšením tloušťky třísky a také zmenšením velikosti řezné síly. Velikost zmiňovaného mnohočlenu je v přímé úměrnosti s velikostí posuvu, tedy změna posuvu je další složka řezné síly, která v této situaci představuje tlumící sílu. Ta je potřeba zohlednit zejména při práci s malými rychlostmi otáček, jelikož má významný vliv na stabilitu obrábění. Díky tomuto faktu lze vysvětlit vysokou stabilitu obrábění s nízkými otáčkami vřetena. Při zvyšování úhlových rychlostí tento úkaz pomine. Celý vzorec se tedy skládá ze dvou částí, kdy v první části je zohledněna fáze nástroje s tloušťkou třísky a druhá část zohledňuje rychlost posuvu s fázovým posunem, což v důsledku způsobí fázový posun mezi řeznou rychlostí a šířkou třísky. <sup>12</sup>

Druhým předpokladem, podle kterého vznikají samobuzené vibrace, je nazván princip polohové vazby. Pro vznik je nutná existence dvou na sebe kolmých kmitů mezi řezným nástrojem a obráběným povrchem. Tyto kmity také musí oplývat velikostí převládající nad ostatními kmity a mít odlišnou vlastní frekvenci. Projeví se vychýlením nástroje ve dvou směrech, kdy je každé vychýlení v jednom směru ovlivňováno vychýlením v druhém směru. Při periodickém opakování

této situace nastane rozkmit systému v obou směrech takovým způsobem, že se nástroj v řezu začne pohybovat po eliptické křivce, což lze vidět na obrázku číslo 7. <sup>2,3</sup>



Obrázek 7 – Princip polohové vazby <sup>2</sup>

Při uvažování pohybu nástroje po eliptické dráze ve směru hodinových ručiček z bodu A do B, řezná síla působí vůči směru pohybu a tím odebírá energii ze systému. Z bodu B do A je tomu právě naopak a je tedy energie do systému dodávána. Jelikož je při pohybu na dráze BA odebírána větší tloušťka třísky, a tedy je potřebná vyšší řezná rychlost, oproti dráze AB, převažuje energie do systému dodávaná a je vhodné dodávanou energii tlumit. Při nedostačující spotřebě energie tlumením může docházet k postupnému zvyšování amplitud kmitů a řezný proces nebude stabilní. Pro vznik těchto vibrací je tedy rozhodující vzájemná směrová orientace kmitavého systému a řezné síly. <sup>2</sup>

### 2.3 Lobe diagram

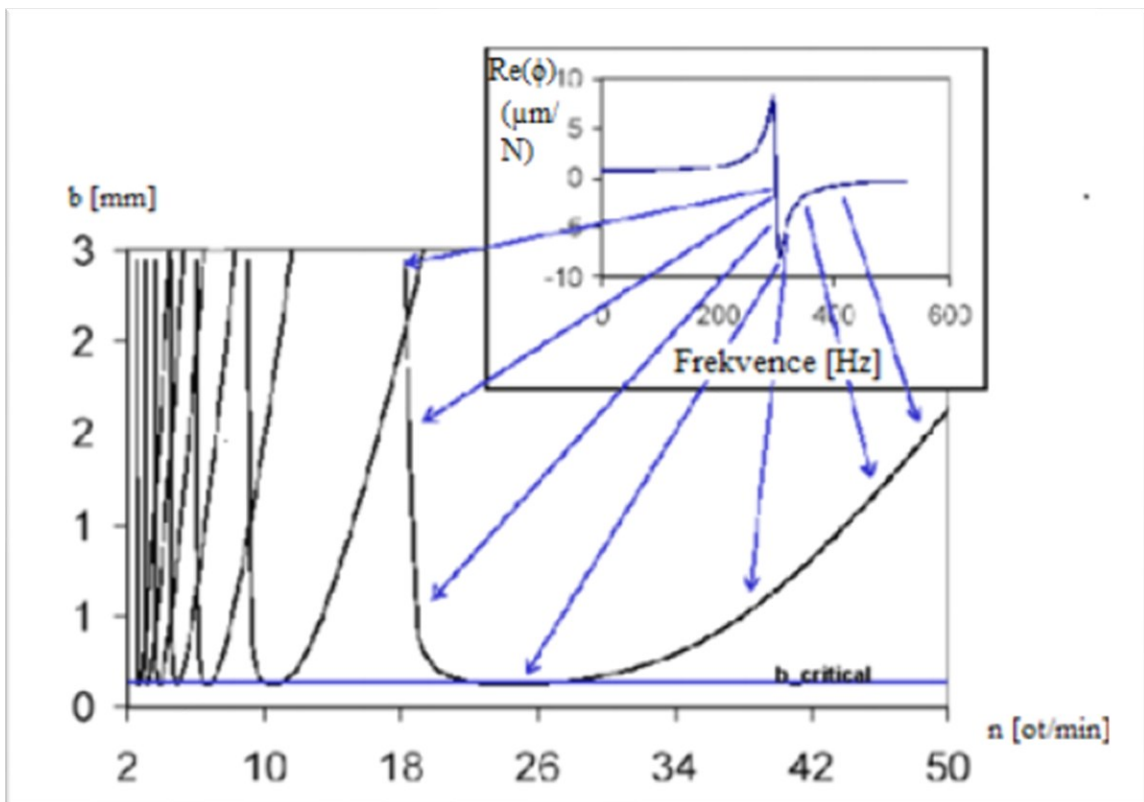
V procesu obrábění je ekonomičnost zásadním parametrem, který ovlivňuje celý průběh výroby. Optimalizovat ekonomičnost obrábění lze pomocí diagramu stability, kde se zjišťuje, pro jaké maximální otáčky s danou tloušťkou třísky nedochází ke vzniku samobuzených kmitů. Mimo frekvenční analýzu je možné použít jako další způsob k optimalizaci řezného procesu Lobe diagram. Lobe diagram je složen z jednotlivých mezních křivek stability, což jsou závislosti mezních šířek třísky při určitých otáčkách vřetene. Ve vzniklém diagramu, poskládaném z jednotlivých křivek stability, se nacházejí oblasti stabilní a nestabilní. Stabilní oblast se nachází pod složenou křivkou stability a nestabilní oblast obrábění se nachází nad křivkou stability, tedy zde vznikají samobuzené vibrace. <sup>15, 16, 17</sup>

Tvorba Lobe diagramu začíná stanovením amplitudo-fázové frekvenční charakteristiky, kterou lze získat z naměřených výsledků u obrábění pro zkoumaný nástroj. Pro naměření požadovaných dat se používá počítače s vhodným softwarem, akcelerometru a modálního kladívka, které jsou připojeny do počítače. Pro naměření požadovaných dat je postup následující. Prvním



krokem je připojení snímacího čidla, tedy akcelerometru, na zkoumaný nástroj. Dále se v softwaru nastaví směry, ve kterých bude probíhat měření odezvy systému pro dané pulsní nárazy kladívkem. Poté se nastaví hodnota řezného odporu  $k_c$ . Dalším krokem je provedení kalibračních úderů, obvykle se provádí dva či více úderů, které je použitá měřící soustava schopna zaznamenat. <sup>15, 16, 17</sup>

Proces kalibrace se používá pro zjištění, zdali nedopadlo kladívko s příliš malou silou nebo zdali dopadlo pod správným úhlem. Obvykle se velikost nárazové síly impulsu měří siloměrem, jenž je umístěn přímo v kladívkem. Po regulaci impulsu nárazové síly na optimální hodnotu se provede více poklepů modálním kladívkem. Výstupem měření poklepů modálním kladívkem je pak graf závislosti přenosové funkce  $Re(\phi)$  na kmitočtu, jež lze vidět na obrázku číslo 8. <sup>15, 16, 17</sup>



Obrázek 8 – Lobe diagram a závislost přenosové funkce na kmitočtu <sup>17</sup>

Z výsledků se poté přebírá pouze negativní část nejdominantnějšího kmitu. Ze záporných hodnot  $Re(\phi)$  se určí mezní šířka třísky  $b_{mez}$  pro stabilní proces obrábění pomocí empirického vztahu: <sup>15</sup>

$$b_{mez} = \frac{-1}{2 * k_c * Re(\phi)} [mm] \quad (20)$$

, kde

$k_c$  řezný odpor materiálu [MPa],

$Re(\phi)$  reálná část záporných hodnot přenosové funkce [mm.N<sup>-1</sup>].

Dalším krokem je stanovení fázového posunu  $\psi$  u dané hodnoty frekvence na základě empirického vztahu: <sup>15</sup>

$$\psi = (2 * \pi) - 2 * \arctg \frac{\text{Im}(\phi)}{\text{Re}(\phi)} \text{ [rad]} \quad (21)$$

, kde

$\text{Re}(\phi)$  reálná část záporných hodnot přenosové funkce [mm.N<sup>-1</sup>],

$\text{Im}(\phi)$  imaginární část záporných hodnot přenosové funkce [mm.N<sup>-1</sup>].

Následně se vypočtou hodnoty odpovídajících otáček: <sup>15</sup>

$$n = \frac{60}{z * (N + \frac{\psi}{2 * \pi})} \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (22)$$

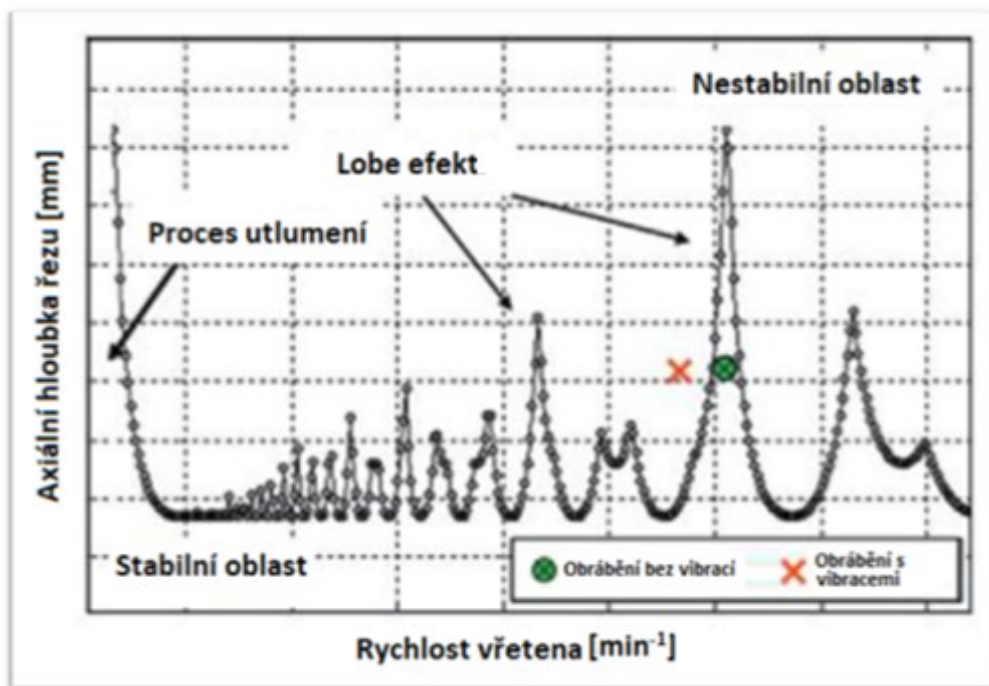
, kde

$\psi$  fázové posunutí [rad],

$z$  počet zubů nástroje [-],

$N$  počet celých vln na povrchu mezi řezy ( $N = \{0, 1, 2, 3, \dots, n\}$ ) [-].

Takto je možné vynést do grafu  $N+1$  mezních křivek pro danou škálu otáček. Hodnoty parametru  $b_{mez}$  se vykreslují v závislosti na otáčkách do grafu. Zde poté vznikne daný počet křivek, jež určují maximální hloubku řezu při daných otáčkách, u které nevznikají samobuzené vibrace. Níže pod odstavcem, na obrázku číslo 9, lze vidět diagram stability s mezními křivkami, s vyznačenými oblastmi stability a nestability pro frézování hliníku. <sup>15, 16</sup>



Obrázek 9 – Lobe diagram pro frézování hliníku <sup>18</sup>

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Měření a samotný experiment probíhal na univerzitním pracovišti, v Centru pokročilých inovačních technologií za spoluúčasti vedoucího práce Ing. Jiřího Kratochvíla, Ph.D. a konzultanta pro měření vibrací Ing. Miroslava Trochty, Ph.D. Předmětem zkoumání byl soustruh XYZ Proturn RLX 1630.

Cílem tohoto experimentu bylo zjistit stabilní a nestabilní oblasti při obrábění a pro dosažení tohoto cíle bylo potřebné získat hodnoty vibrací ve třech směrech, a to ve směru hlavní, posuvové a pasivní složky řezné síly při procesu obrábění. Pro stanovení rozsahu řezných rychlostí k měření vibrací při obrábění, ve kterých by se mohly vyskytovat zkoumané oblasti, bylo nutné provést prvotní měření rázových úderů kladívkem a změřit hodnotu vlastní frekvence obrobku. Dalším cílem bylo provést frekvenční analýzu a určit směry dalšího testování. Dále jsou v této části práce uvedeny srovnání efektivních hodnot zrychlení vibrací jednotlivých směrů a celkových efektivních hodnot.

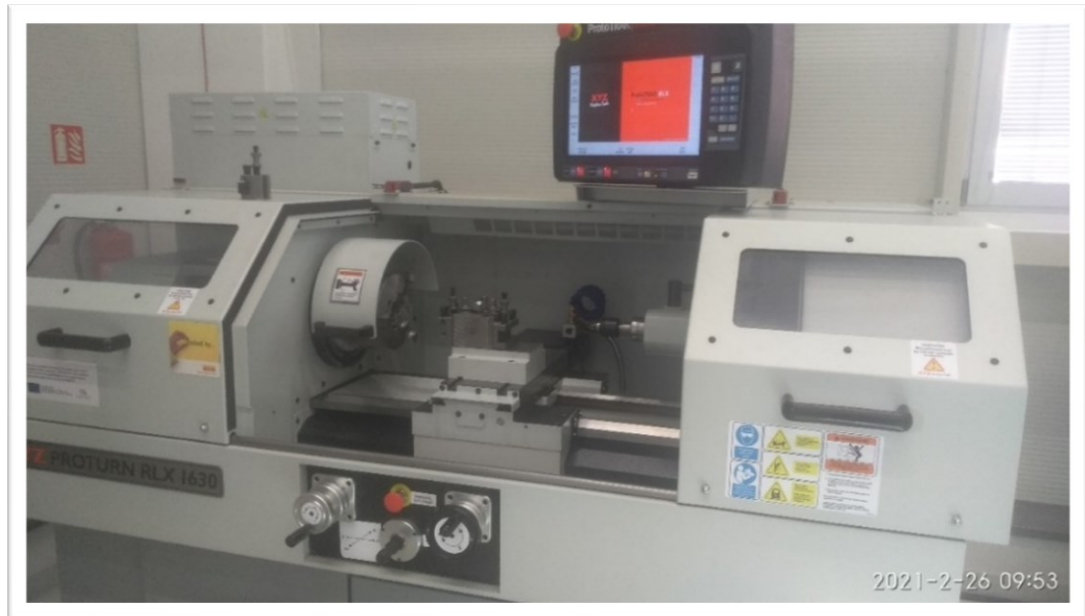
Výsledkem experimentu bylo celkem 43 měření, kdy se při prvním měření zjišťovala vlastní frekvence obrobku. Zbylá měření, která se rozdělila do tří fází, umožnila provést frekvenční analýzu obráběcího stroje a nalézt nestabilní oblasti obrábění. Každá fáze měření probíhala za odlišné hloubky řezu  $a_p$  a s každým měřením v dané fázi se postupně navyšovaly otáčky vřetena  $n$ . Všechny řezné podmínky pro dané fáze a měření jsou vypsány v kapitole 3.2, v tabulce číslo 6.

#### 3.1 Použité prostředky

##### 3.1.1 Obráběcí soustava

Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, pro experiment byl použit obráběcí stroj označením Proturn RLX 1630 od firmy XYZ Machine Tools, který je určen pro obrábění soustružením. Tato firma vyrábí stroje pro velkou škálu obrábění, například stojanové vrtačky, brusky, frézky, soustruhy, soustružnická centra, frézovací centra, 5osá obráběcí centra nebo robotická obráběcí centra. Mimo použitého stroje v experimentu firma Machine Tools vyrábí v řadě RLX dalších pět strojů, které se liší především velikostí pracovního prostoru a obráběcím výkonem. Použitý stroj z řady RLX oplývá nejmenším pracovním prostorem, nejmenším obráběcím výkonem a je dostupný za nejmenší cenu.

Vzhled a rozvržení použitého stroje lze vidět na obrázku číslo 10, všechny technické a mechanické parametry jsou vypsány v tabulce číslo 1 na konci této podkapitoly.<sup>21</sup>



Obrázek 10 – Soustruh RLX 1630

Při prodeji těchto strojů si zmiňovaná firma zakládá na kvalitním servise. Nabízí možnost doručení a instalace obráběcího stroje spolu se zaučením pracovníků skrze kurzy, které firma pořádá. Také jednou z možností je pozvání odborníka pro předvedení kontrolního systému ProtoTRAK, který patří mezi udávané přednosti tohoto stroje. Pro budoucí uživatele je v softwaru zaveden programovací pomocný řádek, který pomůže navrhnout nejefektivnější program pro dané obrábění. K ovládání procesu soustružení slouží dotykový displej o velikosti úhlopříčky 15,6 palců a je vidět na obrázku číslo 11. Pomocí tohoto displeje se nastavovaly souřadnice a rezné rychlosti jednotlivých řezů v experimentu.<sup>21</sup>



Obrázek 11 – Dotykový kontrolní panel

Mezi přednosti, které výrobce uvádí, patří: <sup>21</sup>

- kontrola produktivity,
- bezpečnost operátora při práci,
- vřeteník s dlouhodobou výdrží,
- funkce TRAKing,
- zásobník na třísky,
- litá základna rámu.

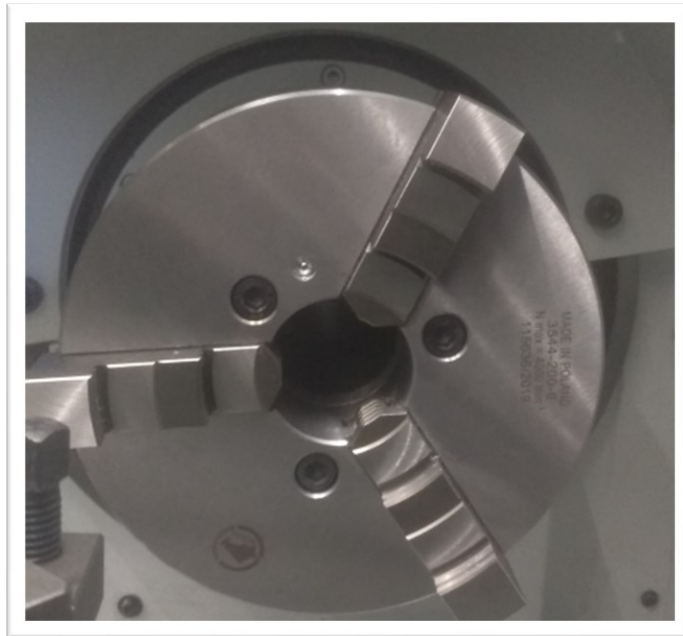
Nejnovější generace řídicí funkce obráběcího procesu s označením ProtoTRAK zvyšuje produktivitu operátora, zejména u jednorázových komponent či malých sérií. Dokonce i operátor bez předchozích zkušeností s prací na CNC strojích díky této funkci bude schopen vyrábět jednoduché i složitější díly během několika hodin. Ochranné funkce a prvky jsou vestavěny a navrženy tak, aby splňovaly nejnovější předpisy CE pro zajištění komplexní bezpečnosti obsluhy. Ochranný kryt je snadno manipulovatelný a zcela uzavřený, tedy i vodotěsný, pro zamezení úniku chladicí či mazací kapaliny. Vřeteník je vyroben pomocí indukčně kalených a přesných broušených ozubených kol. Dvě přesná kuželová ložiska a opěrné čepové ložisko zajišťují tuhost a soustřednost vřetena. Vřeteno dodávané s tímto strojem je s variabilní rychlostí a frekvenčním měničem Yaskawa. Navíc je u všech převodů a ložisek implementováno vysokotlaké mazání pomocí čerpadla a chladiče oleje. Díky tomu je zajištěna tepelná stabilita, tichý chod a dlouhá životnost zmiňovaných komponent. Díky funkci TRAKing je možné ovládat mechanické posuvy pomocí dotykového displeje, to samé platí pro další doplňkové příkazy. Další předností je snadný přístup a umístění zásobníku na třísky. Díky tomu je rychlejší odstraňování třísek, čištění zásobníku a je zmenšen prostor v zadní části stroje.

Na rozdíl od většiny ostatních soustruhů, jejichž hlavní rámy jsou vyráběny ze dvou nebo více kusů spojené šroubením, jsou soustruhy Proturn RLX jednodílné, pevné a žebrované odlitky. Ty poskytují celistvost a tuhost stroje, což zajišťuje bezkonkurenční přesnost procesu řezání. Mimořádně široká dráha s názvem „Vee and flat“ poskytuje velkou nosnou plochu, tedy při srovnání s dalšími soustruhy se ty ostatní zdají být pružné.

Tabulka 1 – Technické a mechanické parametry soustruhu RLX 1630 <sup>21</sup>

Parametr	Hodnota
Druh vřetena [kW]	5,5 – 5,6
Rozsah otáček vřetena [ $\text{min}^{-1}$ ]	150 – 2500
Otvor vřetena [mm]	54
Čelisti vřetena [-]	D1 – 6 Camlock
Kužel vřetena [-]	MT4 zapouzdržený
Maximální průměr obrobku [mm]	400
Maximální průměr obrobku přes příčný support [mm]	218
Pojezd příčného supportu [mm]	216
Vzdálenost mezi centry [mm]	760
Maximální délka řezu [mm]	760
Pojezd koníku [mm]	127
Šířka uložení [mm]	320
Kuličkové šrouby [-]	pro osy X a Z
Rozměry stroje (délka x hloubka x výška) [mm]	2090 x 1200 x 1800

Pro upnutí obrobku bylo použito ocelového sklíčidla od firmy Bison, které má celé označení 3544-200-6 a je ukázáno na obrázku číslo 12. Toto sklíčidlo je samostředící se třemi čelistmi, které má kalené, broušené funkční plochy a vyvážená spirálová kola. Pro průměry obrobku s hodnotou větší jak 500 mm jsou tyto sklíčidla vyráběny s T drážkami. Díky samostředícímu upínání je do určité míry zamezeno vzniku samobuzených vibrací. Pro upnutí s ještě vyšším tlumením vynucených vibrací by bylo vhodné zvolit sklíčidlo se čtyřmi čelistmi. <sup>22</sup>



Obrázek 12 – Sklíčidlo Bison 3544-200-6

Držák nástroje byl upnut do otočné nožové hlavy s označením 4414 o rozměrech 82x76 mm od firmy Bison. Použitou nožovou hlavu lze vidět na obrázku číslo 13.



Obrázek 13 – Nožová hlava Bison 4414

Pro upnutí vyměnitelné břitové destičky byl použit soustružnický nůž s označením PDJNR 2525 M15. Tento nůž se používá pro vnější soustružení. Výška tohoto nože je 25 mm, šířka 25 mm a celková délka nože je 150 mm. Hlava má tvar J a úhel nastavení 93°. Destičky se k noži upínají způsobem P dle normy ISO normy, tedy úhlovou pákou. Tento způsob upínání je nejčastěji používaný a využívá se obecně pro upínání negativních destiček s válcovým otvorem. Tento způsob upínání lze použít jak pro hrubování, tak i pro dokončovací soustružení. Do zmiňovaného držáku se upínají destičky kosočtvercové kontury s úhlem 55°, velikostí 15 mm a délce řezné hrany 12,7 mm. Úhel hřbetu VBD je nulový, směr řezu je pravý. Upnutý nůž v nožové hlavě a detail upnuté VBD v nožovém držáku lze vidět na obrázku číslo 14. Nástroj obráběl s vyložení 49,3 mm. <sup>24</sup>



Obrázek 14 – Nůž s použitou VBD DNMG 1506

Vyměnitelná břitová destička, která byla použita v experimentu, je kosočtvercového profilu s natištěným číslem 6630, které lze vidět výše. Toto číslo značí materiálové složení a určuje její řezné vlastnosti. Obchodní označení této VBD je DNMG 1506.

### 3.1.2 Obráběný materiál

Obráběný materiál, na kterém se prováděl experiment, byl z oceli s označením C45 dle EN 10083-2-91. Označení dle různých norem lze vidět v tabulce číslo 2. Obrobek byl ze středně uhlíkové oceli o chemickém složení, jenž je vyobrazeno v tabulce číslo 3. Mechanické vlastnosti jsou ukázány v tabulce číslo 4. Počáteční průměr  $D_0$ , ze kterého se začalo obrábět, byl 101 mm a průměr po dokončení celého experimentu 92 mm.

Tabulka 2 – Označení použité oceli dle platných norem <sup>19</sup>

Oblast	Označení	Norma
Česká republika	12 050	ČSN 41 2050
EURO	C45	EN 10083-2-91
Německo	C45	DIN 17200-84 (1.1191)
Velká Británie	C45	BS EN 100083-2-91
Japonsko	S45C	JIS G4051
Čína	Ocel 45	GB/T 699
USA	Gr. 1043	ASTM A510

Tabulka 3 – Chemické složení v % dle normy ČSN 12 050 <sup>19</sup>

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,42	0,50	0,17	max.	max.	max.	max.	max.
0,50	0,80	0,37	0,25	0,30	0,30	0,040	0,040

Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti pro ocel C45 dle ČSN 41 20 50 <sup>19</sup>

Parametr	Hodnota
Mez kluzu [MPa]	min. 325
Mez pevnosti [MPa]	min. 540
Tažnost [%]	min. 17
Tvrdość HB [-]	max. 225
Modul pružnosti v tahu [GPa]	211
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	79

Tato ocel je určena k zušlechťování, povrchovému kalení a obvykle se využívá v mechanickém inženýrství a automobilovém průmyslu. Zde je totiž na jednotlivé prvky konstrukce požadavek na vysokou pevnost. Konkrétně je zmiňovaná ocel vhodná například pro hřídele v těžebních zařízeních nebo také pro turbokompresory karuselů. Dále se také používá pro větší ozubená kola, šrouby, kroužky, vřetena, ojnice, pístní tyče, kované šrouby tlakových nádob, vyvrtávací tyče, upínací trny a další. <sup>19, 20</sup>

Ve výchozím stavu, s označením 12 050.1, je ocel normalizačně žíhána. Struktura této oceli při stavu po normalizačním žíhání obsahuje lamelární perlit a feritické síťoví. Kvůli špatné celkové prokalitelnosti se tento materiál přednostně používá v normalizovaném stavu. Teprve při požadavku na vysoké mechanické vlastnosti je přistoupeno ke kalení, popřípadě popouštění. Plastičnost za studena je střední a obrobiteľnost u tohoto materiálu je lepší po žíhání na měkko a normalizačním žíhání. Při kalení a popouštění této oceli obrobiteľnost klesá. <sup>19, 20</sup>

### 3.1.3 Snímače pro měření dat

Jak již bylo zmíněno dříve v této práci, pro snímání hodnot zrychlení vibrací byly použity akcelerometry, které měří hodnoty na základě seismického měření piezokrystalickým materiálem.





Obrázek 15 – Akcelerometry použité pro měření<sup>25</sup>

Jelikož měření zrychlení vibrací proběhlo ve třech směrech, bylo potřeba tři akcelerometrů od firmy Kistler. Použily se dva akcelerometry s vrchním napojením datového kabelu a označením 8704B25T a jeden akcelerometr s bočním napojením datového kabelu a označením 8702B25T. Umístění těchto akcelerometrů na obráběcí soustavě jsou ukázány v následující kapitole. Díky magnetickému upínání mohou použité akcelerometry měřit ve velkém rozsahu provozních teplot. Design použitých akcelerometrů je ukázán na obrázku číslo 15 a některé parametry udávané výrobcem jsou uvedeny v tabulce číslo 5.

Tabulka 5 – Technická specifikace použitých akcelerometrů<sup>26</sup>

Parametr	8702B25T	8704B25T
Rozsah akcelerometru [g]	0,5 až 1000	0,5 až 1000
Rozsah provozní teploty [°C]	-55 až 100	-55 až 100
Citlivost [mV/g]	10	10
Rozsah frekvence [Hz]	1 až 1000	1 až 1000
Stupeň ochrany [-]	IP68	IP68
Váha seismické hmoty [g]	8,7	7,5
Materiál pouzdra [-]	Titan	Titan

### 3.1.4 Zařízení pro sběr dat

Zařízení pro sběr dat je od stejné firmy, jako použité akcelerometry, tedy od firmy Kistler, s označením LabAmp 5165A. Toto zařízení je univerzální laboratorní zesilovač, který lze použít pro měření síly, zrychlení, tlaku, kroutícího momentu a deformace za použití piezoelektrických či piezotronových senzorů. Tento zesilovač měří v režimu duálního módu dynamické PE a IEPE signály, a stejně tak i statické nebo dynamické napěťové signály. U tohoto zesilovače lze také převádět vstupní napětí na proporcionální výstupní napětí. Dále zesilovač LabAmp poskytuje měření nízkého šumu s flexibilní úpravou signálu přenášeného do počítače pro následné

analýzy. Lze propojit a synchronizovat více těchto zesilovačů. Například digitalizované kvazistatické síly z piezoelektrického dynamometru lze měřit zároveň s dynamickými IEPE akcelerometry. Proto je řada těchto zesilovačů modulárním systémem sběru dat. Dalšími všestrannými možnostmi jsou volitelné nastavení vysoké frekvence měření dat, univerzální vstupní porty (pro napájení, IEPE i napěťové signály), možnost analogového i digitálního použití, vysoká kvalita signálu a další.

Tento zesilovač byl použit v první části experimentu pro naměření hodnot vlastní frekvence, kde byly použity funkce zesílení a převodu analogového signálu na digitální díky 24bitovému A/D převodníku. Dále byly použity funkce přepočtu hodnot napětí na hodnoty zrychlení vibrací a zápisu hodnot času, při kterých se jednotlivé hodnoty měření ukládaly. Automatický přepočet hodnot napětí na zrychlení vibrací byl umožněn díky vnitřní paměti akcelerometrů, kde jsou uloženy potřebné technické specifikace, jako například převodový poměr mezi hodnotou vstupního napětí a hodnotou zrychlení vibrace. Podobu zařízení LabAmp lze vidět na obrázku číslo 18.

Druhé použité zařízení bylo pouzdro s AD převodníkem pro malé, univerzální vyhodnocovací moduly měřených dat s označením *cDAQ-9178* od firmy National Instruments. Díky tomuto zařízení je možné jednoduše připojit modul, pomocí funkce Plug and play, pro převod signálu z konektoru snímače na USB či LAN konektor, aby se měřená data mohly nahrát do počítače. Také umožňuje kontrolu vzorkování, synchronizaci přenosu dat mezi vstupními či výstupními moduly a programem v počítači. Pro sběr dat a synchronizaci vzorkování byl použit zásuvný modul Ni 9232 a pro přenos do počítače zásuvný modul Ni 9237. Pouzdro cDAQ a zásuvné moduly jsou vidět na obrázku číslo 16.



Obrázek 16 – Pouzdro cDAQ-9178 s moduly

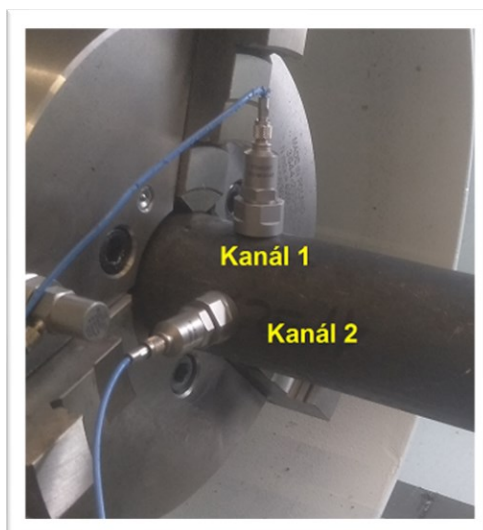
### 3.1.5 Software pro zpracování dat

Pro zpracování dat byl použit program Vibration. Tento program se používá pro vyhodnocení hodnot vibrací s velkými objemy dat a byl vytvořen v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW. Autor tohoto programu je Ing. Miroslav Trochta, Ph.D. Je určen k vykreslení vložených dat do grafů a k vyhodnocení jejich efektivních hodnot.

Dále pro zpracování výsledků do grafů byl použit program Excel vyvinutý společností Microsoft.

### 3.2 Příprava experimentální části

Jeden z cílů této práce bylo zjistit oblasti stability a nestability při soustružení. Stanovení rozsahu, ve kterém se tyto oblasti nachází, se mělo docílit pomocí zjištění vlastní frekvence obrobku. Podle zjištěného průběhu vnitřní frekvence měl být zvolen jak rozsah řezných rychlostí, tak i počet měření. Počátečním krokem tedy byla příprava pro měření vlastní frekvence obrobku pro navrhnutí rozsahu řezných rychlostí druhé části experimentu. Poté proběhlo samotné měření vlastní frekvence obrobku v rámci přípravy experimentu.



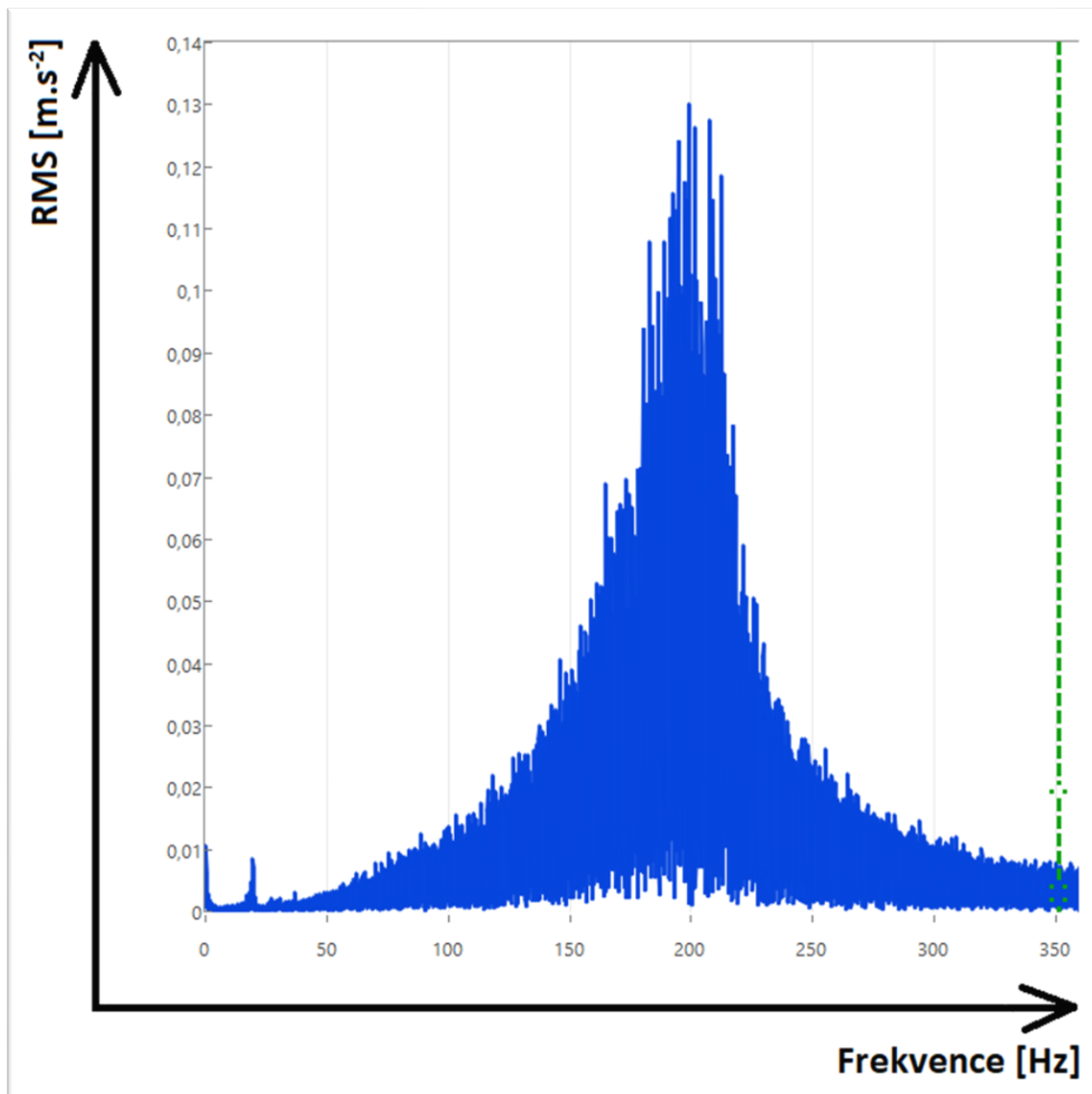
Obrázek 17 – Akcelerometry pro měření vlastní frekvence obrobku

Měření první části probíhalo pomocí dvou akcelerometrů připojených na upnutý obrobek, které měřili vibrace při rázových úderech modálního kladívka do obrobku. Katedra nedisponuje modálním kladívkem, takže se tento proces inicioval rázem gumového kladívka. Nejdříve se provedly nastavovací úder pro zjištění rozsahu frekvence, ve kterém se bude měřit. Připevněné akcelerometry na obrobku s označením jsou vidět na obrázku číslo 17 a datové kabely s jejich označením připojené k měřicí jednotce na obrázku číslo 18.



Obrázek 18 – Měřicí jednotka

Jak lze vidět z výsledku měření frekvenční spektrální analýzy obrobku na obrázku níže, oblasti nestability byly zjištěny okolo frekvence  $f=200$  Hz, což je tedy okolo otáček vřetene  $n=12\ 000$  min<sup>-1</sup>. Vzhledem k maximálním otáčkám použitého soustruhu o hodnotě  $n_{max}=2500$  min<sup>-1</sup>, nemohl být rozsah řezné rychlosti zvolen dle frekvenční analýzy obrobku. Rozsah použitých řezných rychlostí v experimentu byl tedy zvolen dle možností použité VBD a tak, aby se pokryl celý rozsah.



Obrázek 19 – Frekvenční spektrální analýza obrobku

Experiment pro frekvenční analýzu obráběcího stroje byl rozdělen do tří fází. V každé fázi se měřily vibrace pro řeznou rychlost  $v_c$  v rozsahu od 100 do 360 m.s<sup>-1</sup>. Začalo se při  $v_c=100$  m.s<sup>-1</sup>, přičemž v každém následném měření se  $v_c$  zvyšovala o 20 m.s<sup>-1</sup>. Při experimentu se navýšovala řezná rychlost, ale pro vyhodnocení byly řezné rychlosti následně přepočteny na otáčky vřetene. Po vykonání měření jedné fáze se navýšila hodnota hloubky řezu  $a_p$  o 0,5 mm a začalo měření druhé fáze. V tabulce níže jsou vypsány použité řezné rychlosti a další řezné podmínky.

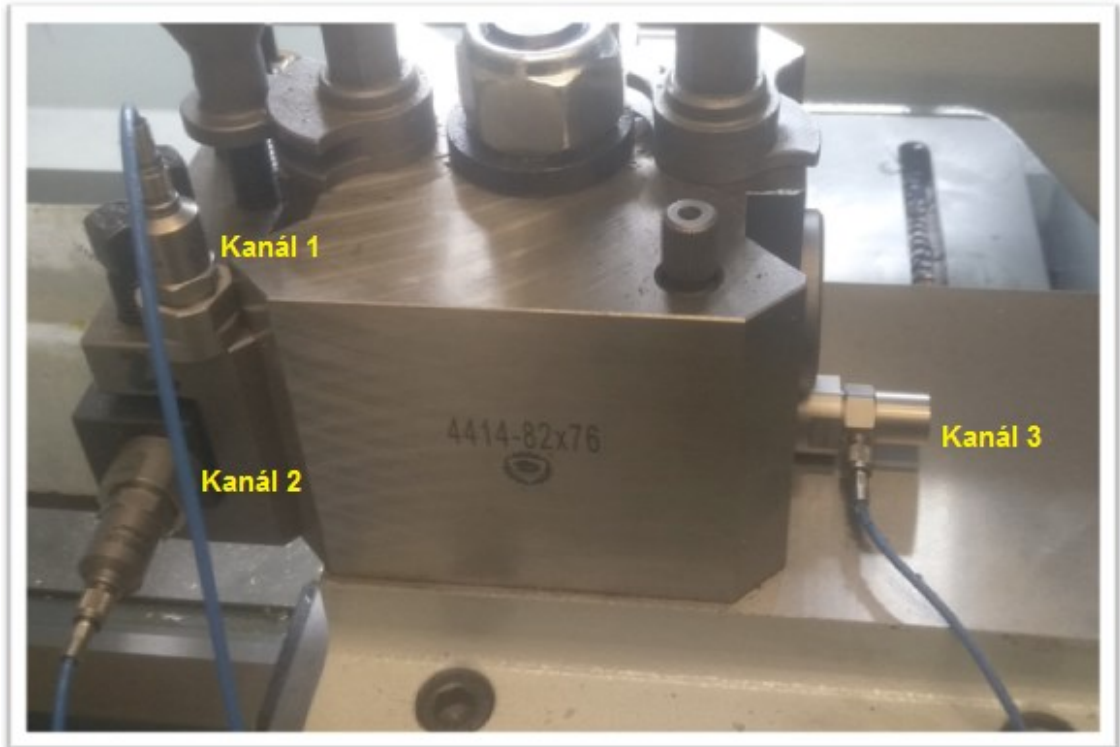
Tabulka 6 – Řezné parametry pro jednotlivé fáze experimentu

	První fáze	Druhá fáze	Třetí fáze
<b>Obráběný průměr <math>D_o</math> [mm]</b>	101	99	96
<b>Rozsah řezné rychlosti <math>v_c</math> [m.s<sup>-1</sup>]</b>	100 až 360	100 až 360	100 až 360
<b>Rozsah použitých otáček <math>n</math> [min<sup>-1</sup>]</b>	322 až 1156	322 až 1156	322 až 1156
<b>Hloubka řezu <math>a_p</math> [mm]</b>	1	1,5	2
<b>Posuvová rychlost <math>v_f</math> [m.s<sup>-1</sup>]</b>	0,2	0,2	0,2

Druhá část přípravy experimentu začala upnutím obrobku do sklíčidla soustruhu. Následně se do koníku soustruhu upnula hlavice s vrtákem a navrtal se středící důlek do obrobku. Po vyvrtání středícího důlku se do koníku místo středícího vrtáku upnul středící hrot, což lze vidět na obrázku číslo 21.

Dalším krokem pak bylo obrobení vrchní vrstvy obrobku pro docílení požadované kruhovitosti obrobku, a tedy pro zamezení vzniku vynucených vibrací. Pokud by se obráběl obrobek s nepravidelnou kruhovitostí, výsledky by byly zkreslené a následné vyhodnocení by bylo chybné. Po obrobení vrchní vrstvy byl obrobek přichystán na samotné měření vibrací při obrábění. Posledním krokem přípravy u obráběcí soustavy byla výměna VBD nože, aby se zamezilo vlivu opotřebeného nástroje na vznik vibrací při obrábění. Po tomto kroku byla tedy celá obráběcí soustava nachystaná pro experiment. Poslední fází přípravy celého experimentu bylo nachystání měřicí soustavy pro naměření a uložení potřebných dat. Propojily se pomocí datových kabelů akcelerometry, měřící jednotka a počítač.

Jak již bylo zmíněno dříve, pro snímání vibrací byly použity tři akcelerometry pro snímání vibrací ve směrech hlavní, posuvové a pasivní složky řezné síly. Umístění jednotlivých akcelerometrů, které byly upnuty na držák nástroje a nožovou hlavu, je na obrázku níže. Akcelerometr upnutý ve vertikální poloze měřil zrychlení vibrací ve směru hlavní složky řezné síly, akcelerometr v horizontální poloze na levé straně měřil hodnoty vibrací ve směru posuvové složky řezné síly a třetí akcelerometr, na pravé straně upnutý v horizontální poloze, měřil zrychlení vibrací ve směru pasivní složky řezné síly.

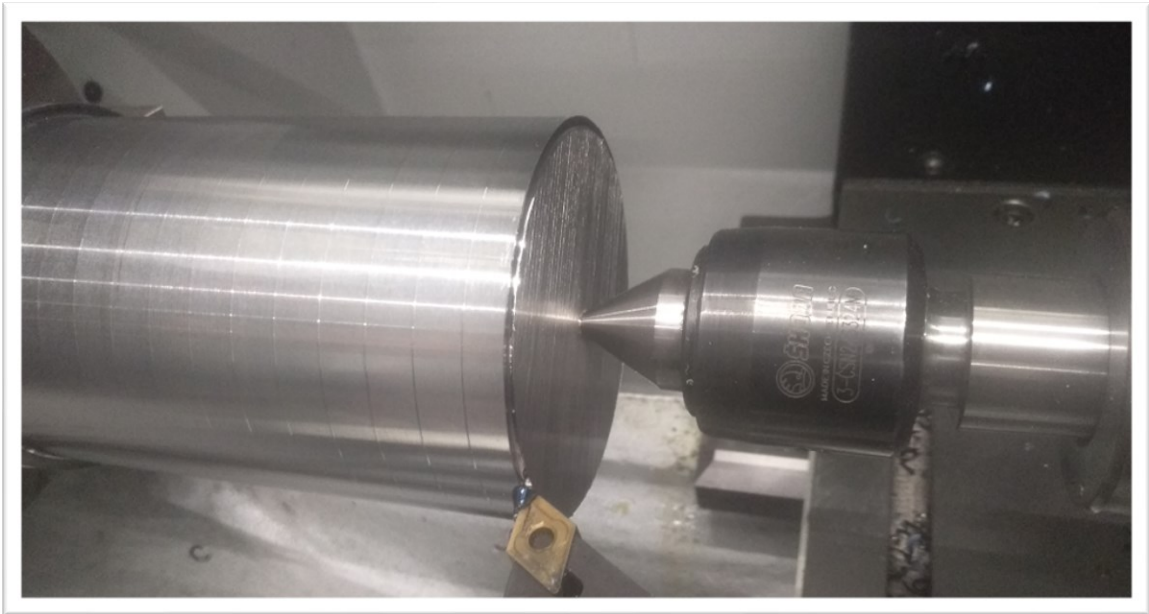


Obrázek 20 – Umístění akcelerometrů druhé části experimentu

### 3.3 Průběh experimentu

V první části experimentu bylo cílem získat hodnoty pro vlastní frekvenci obrobku, v druhé části se soustružil obrobek a měřily se data vibrací pro frekvenční analýzu soustruhu. V první části byly připevněny dva akcelerometry k obrobku na straně upnutí v čelistech sklíčidla, a měřily se vibrace po nárazu gumovým kladívkem. Experiment začal spuštěním měřícího režimu v zaznamenávacím programu a následnými údery kladívka do upnutého obrobku.

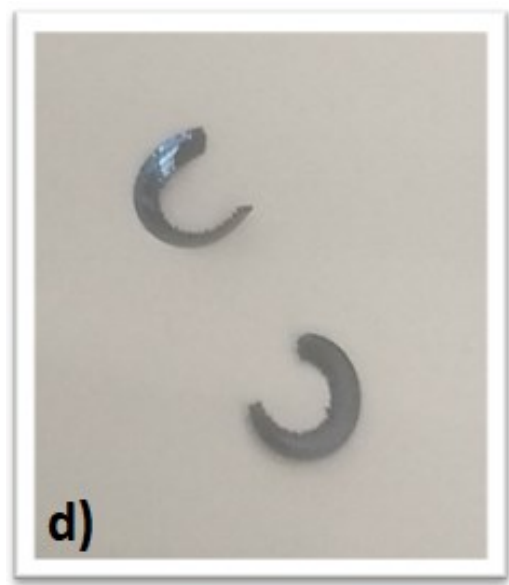
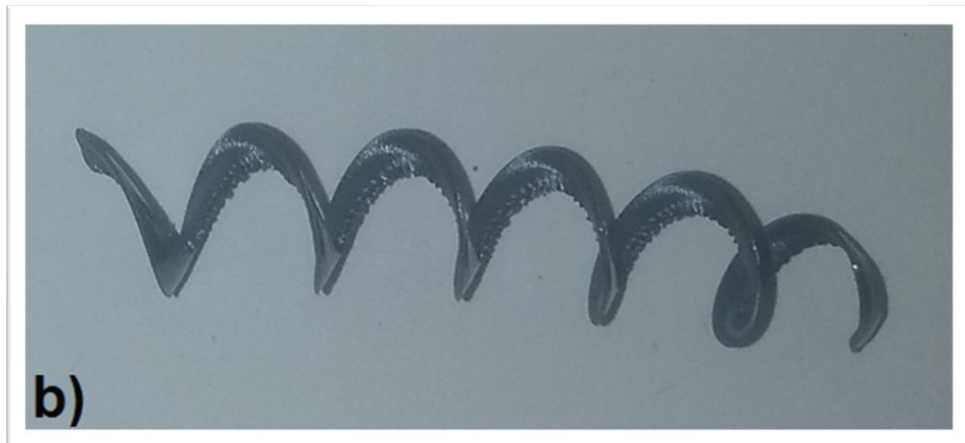
V druhé části se soustružil obrobek a měřily se vibrace při soustružení. Zde proběhly tři fáze a v každé fázi se měnila hloubka řezu  $a_p$ . Každá fáze měla 14 měření, kde se v každém následujícím měření  $v_c$  zvyšovala o hodnotu  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Obrobek po ukončení experimentu je ukázán na obrázku níže, kde lze vidět vykreslené vzory jednotlivých řezů z poslední fáze experimentu. Dále je také vidět neúspěšný pokus k získání dat pro čtvrtou fázi. Hodnota hloubky řezu  $a_p$  byla opět navýšena na celkovou hodnotu  $2,5 \text{ mm}$ . Ovšem nastal problém, kdy se obrobek na začátku prvního měření přestal otáčet a obráběcí proces se tak zastavil. To bylo způsobeno nedostatečným výkonem motoru vřetena.



Obrázek 21 – Obrobek po experimentu

Na obrázku pod textem jsou vidět příklady vzniklé třísky z každé fáze experimentu. Na obrázku 22a) je vidět dlouhá nelámaná tříška, vzniklá za podmínek  $a_p=1$  mm,  $f=0,2$  mm,  $n=514$  min<sup>-1</sup> při soustružení  $D_0=101$  mm. Obrázek 22b) ukazuje tříšku vzniklou při  $a_p=1,5$  mm,  $f=0,2$  mm a  $n=643$  min<sup>-1</sup> při soustružení  $D_0=99$  mm. V poslední řadě jsou ukázány článkové třísky vzniklé při  $a_p=2$  mm,  $f=0,2$  mm při soustružení  $D_0=96$  mm, kde tříška na obrázku 22c) vznikla při  $n=386$  min<sup>-1</sup> a tříška na obrázku 22d) při  $n=707$  min<sup>-1</sup>.

Jak lze vidět na obrázku 22a), při daném měření vznikla dlouhá nelámaná tříška, která by se mohla namotat na nástroj a zkreslit tak naměřené hodnoty zrychlení vibrací. Při experimentu ovšem nebylo vypořádáno namotání třísky na nástroj, čemuž by ovšem mohlo nastat při dalším obdobném experimentu. Na základě toho by bylo vhodné provést další šetření, do jaké míry ovlivňuje namotaná tříška na nástroji velikost naměřených zrychlení vibrací. Tříška na obrázku 22b) vznikala při největší hodnotě naměřených vibrací oproti ostatním tříškám z obrázku 22. Zde je tříška lámavá krátká, tedy pro obrábění výhodnější při srovnání s třískou na obrázku 22a). U obrázku 22c) a 22d) jsou třísky podobné, velmi krátké, i když vznikají při velmi rozdílných hodnotách zrychlení vibrací. Lze tedy konstatovat, že velikost zrychlení vibrací při obrábění nemá vliv na druh vzniklé třísky. Dále lze z těchto poznatků vyvodit, že při zvyšujícím úběru třísky v rozsahu  $a_p$  použitém v experimentu se optimalizuje utváření třísky.



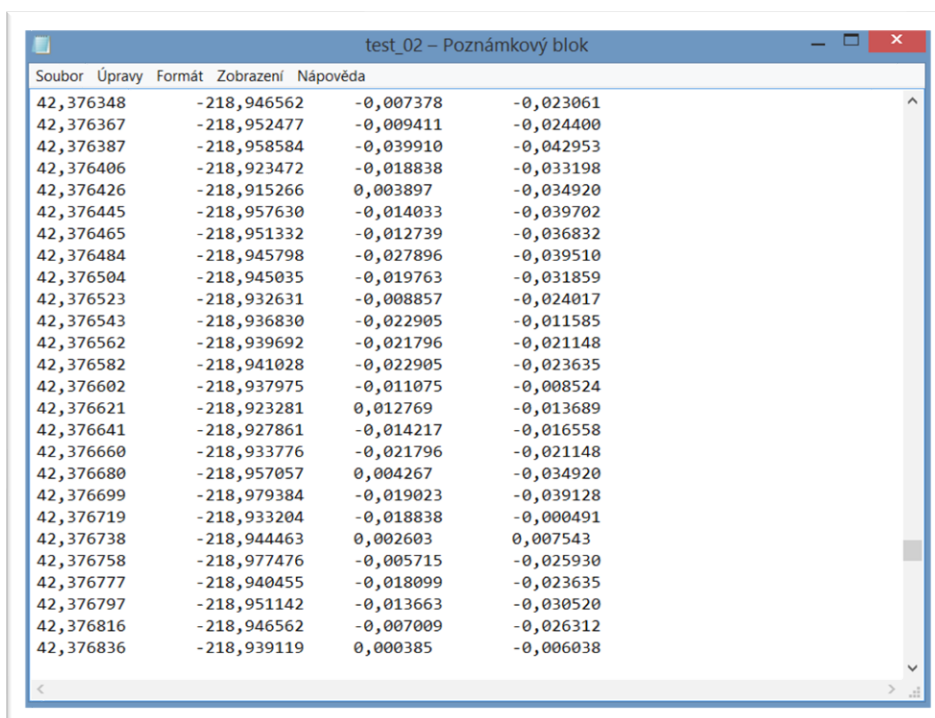
Obrázek 22 – Třísky vzniklé při experimentu



## 4 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

### 4.1 Naměřená data

Z první části experimentu vzešlo jedno měření s hodnotami vibrací rázových úderů kladívkem do obrobku, uložené v podobě textového souboru, který je vidět na obrázku číslo 23. První sloupec je čas, při kterém byla každá informace zaznamenána. Druhý sloupec je záznam hodnot zrychlení vibrací ve směru vertikálním, označený jako kanál 1. Třetí sloupec jsou hodnoty zrychlení vibrací ve směru horizontálním, který je označen jako kanál 2. Označení těchto kanálů lze vidět na obrázcích 17 a 18. Ke třetímu kanálu nebyl připojen akcelerometr, tedy hodnoty zapsané ve čtvrtém sloupci jsou zvukové znečištění, tedy šum.



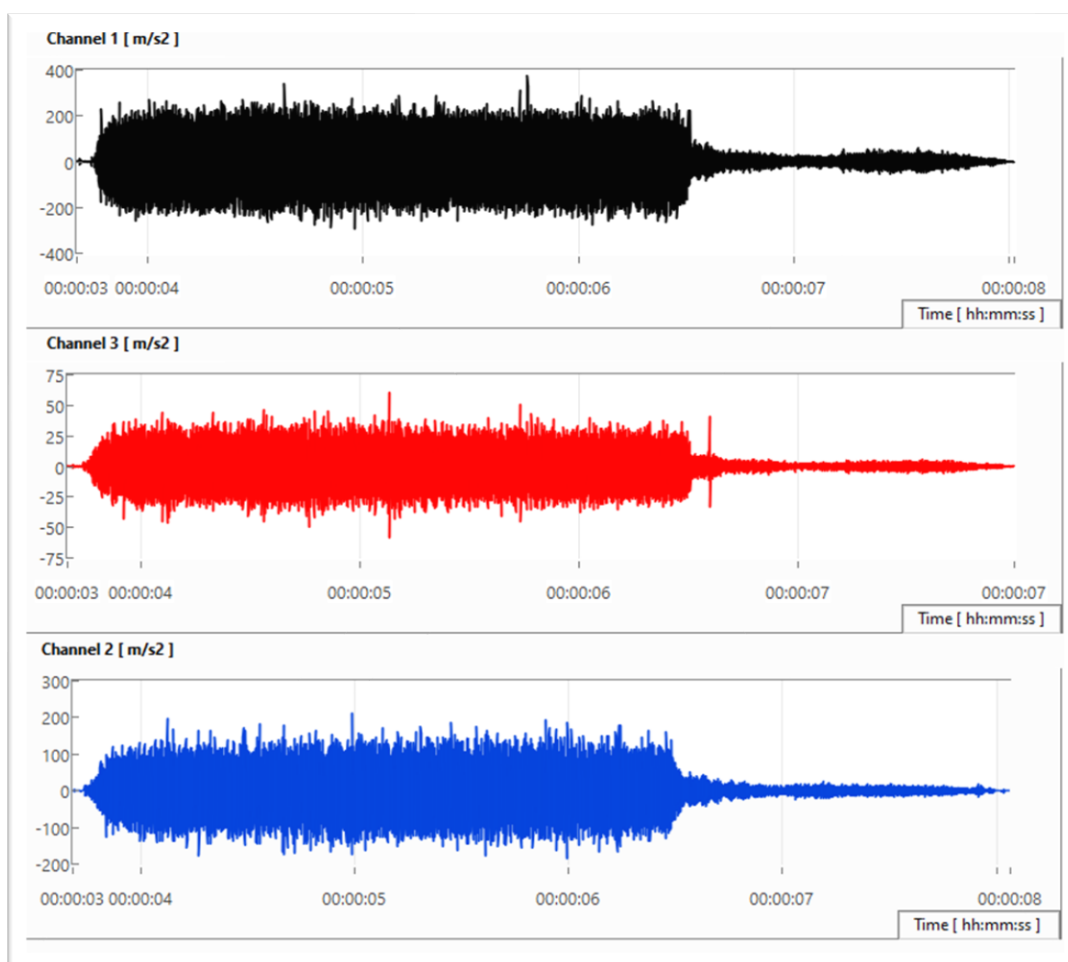
Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda
42,376348		-218,946562	-0,007378	-0,023061
42,376367		-218,952477	-0,009411	-0,024400
42,376387		-218,958584	-0,039910	-0,042953
42,376406		-218,923472	-0,018838	-0,033198
42,376426		-218,915266	0,003897	-0,034920
42,376445		-218,957630	-0,014033	-0,039702
42,376465		-218,951332	-0,012739	-0,036832
42,376484		-218,945798	-0,027896	-0,039510
42,376504		-218,945035	-0,019763	-0,031859
42,376523		-218,932631	-0,008857	-0,024017
42,376543		-218,936830	-0,022905	-0,011585
42,376562		-218,939692	-0,021796	-0,021148
42,376582		-218,941028	-0,022905	-0,023635
42,376602		-218,937975	-0,011075	-0,008524
42,376621		-218,923281	0,012769	-0,013689
42,376641		-218,927861	-0,014217	-0,016558
42,376660		-218,933776	-0,021796	-0,021148
42,376680		-218,957057	0,004267	-0,034920
42,376699		-218,979384	-0,019023	-0,039128
42,376719		-218,933204	-0,018838	-0,000491
42,376738		-218,944463	0,002603	0,007543
42,376758		-218,977476	-0,005715	-0,025930
42,376777		-218,940455	-0,018099	-0,023635
42,376797		-218,951142	-0,013663	-0,030520
42,376816		-218,946562	-0,007009	-0,026312
42,376836		-218,939119	0,000385	-0,006038

Obrázek 23 – Naměřená data

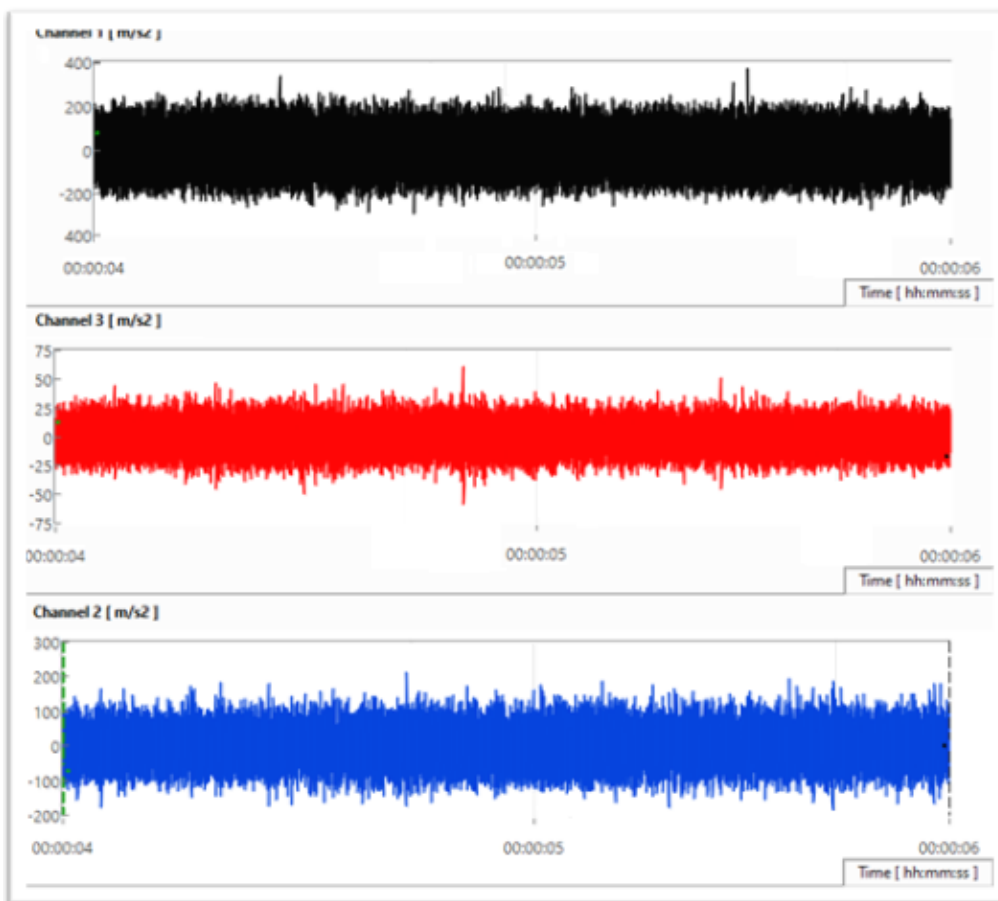
Výsledkem druhé fáze experimentu bylo 42 měření. Uspořádání zaznamenaných dat je stejné jako u dat z první části experimentu. První sloupec jsou hodnoty času vzorkování. Druhý sloupec jsou hodnoty zrychlení vibrací ve směru hlavní složky řezné síly (kanál 1), třetí sloupec hodnoty zrychlení vibrací ve směru pasivní složky řezné síly (kanál 2) a čtvrtý sloupec hodnoty zrychlení vibrací ve směru posuvové složky řezné síly (kanál 3), kanály a jejich umístění jsou vyznačeny na obrázku číslo 20.

## 4.2 Zpracování dat

Pro vyhodnocení se použila hodnota RMS (z angl. Root Mean Square), která průběh naměřeného signálu nejlépe vystihuje. Tato hodnota je také nazývána jako kvadratický průměr a popisuje jak velikost amplitudy signálu, tak i celý jeho průběh. Těchto hodnot bylo dosaženo programem *Vibration*, který navíc vykreslil průběhy měření, tedy hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na čase. Výsledky RMS hodnot poté byly vloženy, upraveny a porovnávány v programu Excel. Příklady vykresleného signálu do grafu programem *Vibration* lze vidět na obrázcích níže. Na obrázku číslo 24 lze vidět naměřená data jednoho řezu pro všechny zkoumané směry. Každý kanál byl vykreslen z hodnot zrychlení vibrací. První kanál jsou vykreslené hodnoty ve směru  $F_c$ , druhý kanál ve směru  $F_p$  a třetí kanál hodnoty ve směru  $F_f$ . Textové soubory s daty se vložily do programu *Vibration* a následně upravily. Úprava spočívala ve zvolení intervalu 2 sekund pro výpočet RMS hodnot tak, aby se hodnotily data z ustáleného řezu. Příklad vybraného intervalu z ustáleného řezu lze vidět na obrázku číslo 25. Všechny obrázky této kapitoly jsou použity z posledního měření třetí fáze experimentu ( $a_p=2$  mm,  $v_c=360$  m.min<sup>-1</sup>,  $f=0,2$  mm a  $D_o=96$  mm).



Obrázek 24 – Průběhy signálů celého měření



Obrázek 25 – Průběhy signálů zvoleného intervalu

Vyhodnocené *RMS* hodnoty byly získány pomocí zmíněného programu Vibration, který spočítal *RMS* hodnoty v jednotlivých směrech a celkové *RMS*. Při tak velkém objemu dat by bylo časově náročné manuálně počítat všechny hodnoty *RMS*. V případě menšího počtu dat by se použilo vzorců pro jednotlivé řezy (viz rovnice 23) a pro celkové hodnoty *RMS* ze všech směrů (viz rovnice 25). Tyto hodnoty by se počítaly pro vybraný interval pomocí vztahu:

$$RMS F_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{|\{x_i\}|}} \quad (23)$$

Použitý vzorec pro přepočítání řezné rychlosti na otáčky vřetena:

$$n = \frac{1000 * v_c}{\pi * D} \quad (24)$$

### 4.3 Vyhodnocení *RMS* hodnot, stabilní diagramy

Po zpracování dat následuje vyhodnocení *RMS* hodnot pro jednotlivé fáze. V každé podkapitole jsou uvedeny řezné podmínky pro danou fázi s vyhodnocením v tabulkách a zpracovanými grafy. Všechny *RMS* hodnoty pro jednotlivé směry byly vypočteny z intervalu dvou sekund. Níže pod odstavcem jsou tabulky hodnot řezných rychlostí spolu s diagramy stability pro jednotlivé fáze. V průběhu celého experimentu byl parametr posuvu  $f=0,2$  mm konstantní.

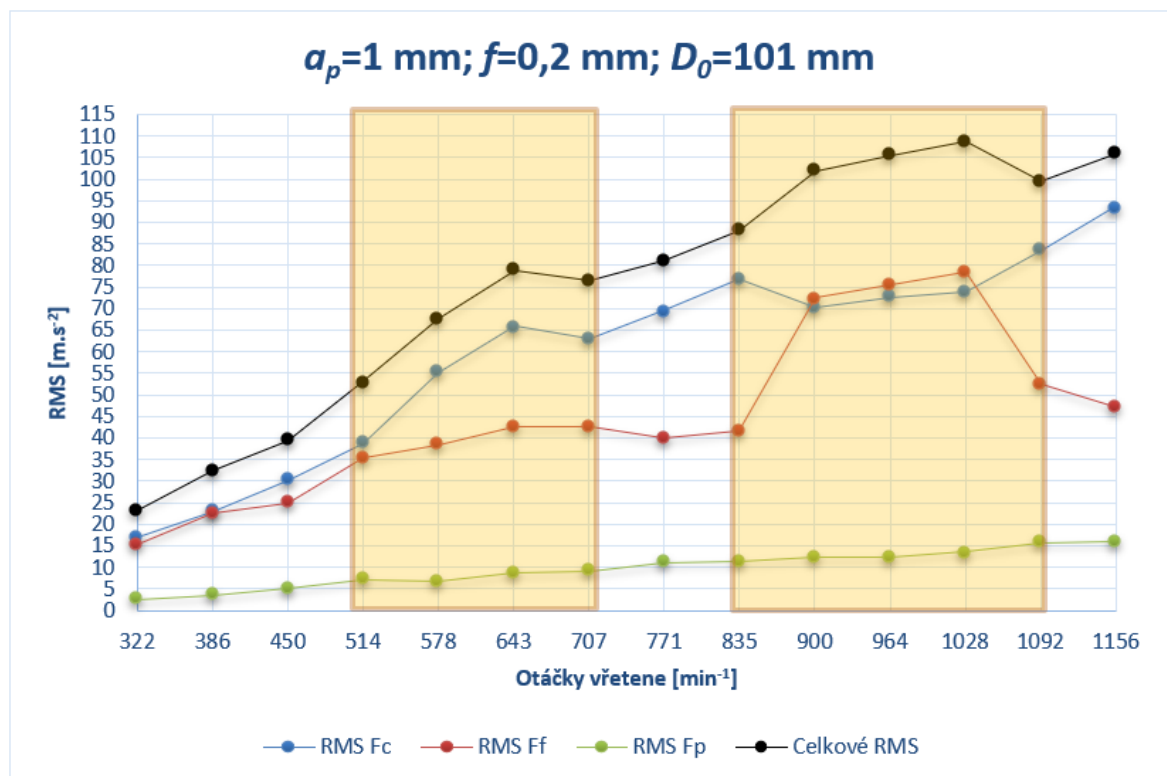
## 4.3.1 První fáze

V tabulce níže pod textem lze vidět výsledky vypočtených hodnot pro první fázi experimentu. Obrábělo se z průměru  $D_0 = 101$  mm, s hodnotou hloubky řezu  $a_p = 1$  mm.

Tabulka 7 – Výsledky první fáze

Číslo měření	Otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]	$RMS F_c$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]	$RMS F_f$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]	$RMS F_p$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]	$RMS F_{celk}$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]
1	322	17,07	15,49	2,36	23,17
2	386	23,00	22,67	3,41	32,47
3	450	30,03	25,02	5,03	39,41
4	514	38,84	35,36	7,10	53,01
5	578	55,24	38,43	6,77	67,63
6	643	65,86	42,59	8,60	78,90
7	707	63,04	42,63	9,18	76,65
8	771	69,47	40,11	11,10	80,98
9	835	76,80	41,53	11,39	88,04
10	900	70,41	72,55	12,28	101,84
11	964	72,64	75,60	12,48	105,58
12	1028	74,04	78,56	13,58	108,80
13	1092	83,35	52,35	15,78	99,68
14	1156	93,54	47,12	15,93	105,95

Ohledně hodnot  $RMS$  pro jednotlivé směry, nejvyšší hodnoty pro  $RMS F_c$  byly vyhodnoceny při nejvyšších použitých otáčkách a nejnižší hodnoty byly zaznamenány při nejnižších otáčkách. Nejvyšší hodnoty  $RMS F_f$  byly vyhodnoceny při 1028 otáčkách vřetene a nejnižší hodnoty v prvním řezu, tedy při 322 otáčkách vřetene.



Graf 1 – Diagram stability první fáze experimentu

Z grafu výše lze vidět, že všechny *RMS* hodnoty se zvyšují s narůstajícími hodnotami otáček vřetena až do hodnoty 643 otáček za minutu. Při převýšení těchto otáček hodnoty *RMS F<sub>c</sub>* a *RMS F<sub>f</sub>* začaly vykazovat proměnné chování. V rozsahu otáček 900 až 1028 bylo zaznamenáno převýšení hodnot *RMS F<sub>c</sub>* hodnotami *RMS F<sub>f</sub>*. Ke srovnání jednotlivých směrů, hodnoty *RMS F<sub>p</sub>* měly nejmenší velikost. Naproti tomu se ty největší zaznamenaly převážně u hodnot *RMS F<sub>c</sub>*. Vzhledem k nepravidelným průběhům u *RMS F<sub>c</sub>* a *RMS F<sub>f</sub>* bych doporučil další testování s větším rozsahem použitých otáček a větším počtem měření. Toto doporučení navrhuji na základě klesající tendence průběhu hodnot *RMS F<sub>f</sub>*. Při překročení  $n=1028 \text{ min}^{-1}$  se průběhy hodnot *RMS F<sub>f</sub>* začaly snižovat až po konečnou hranici rozsahu použitých otáček. Hodnoty *RMS F<sub>p</sub>* vykazují pravidelně narůstající tendenci. Lze tedy shrnout, že nejvyšších hodnot dosahoval parametr *RMS F<sub>c</sub>* a nejnižších parametr *RMS F<sub>p</sub>*. Pokles hodnot parametru *RMS F<sub>f</sub>* může naznačovat úsek stabilní oblasti. V této fázi byly zjištěny výskyty dvou oblastí nestability, kdy první byl zjištěn v rozsahu od 514 až 707 a druhý v rozsahu od 835 do 1092 otáček vřetene.

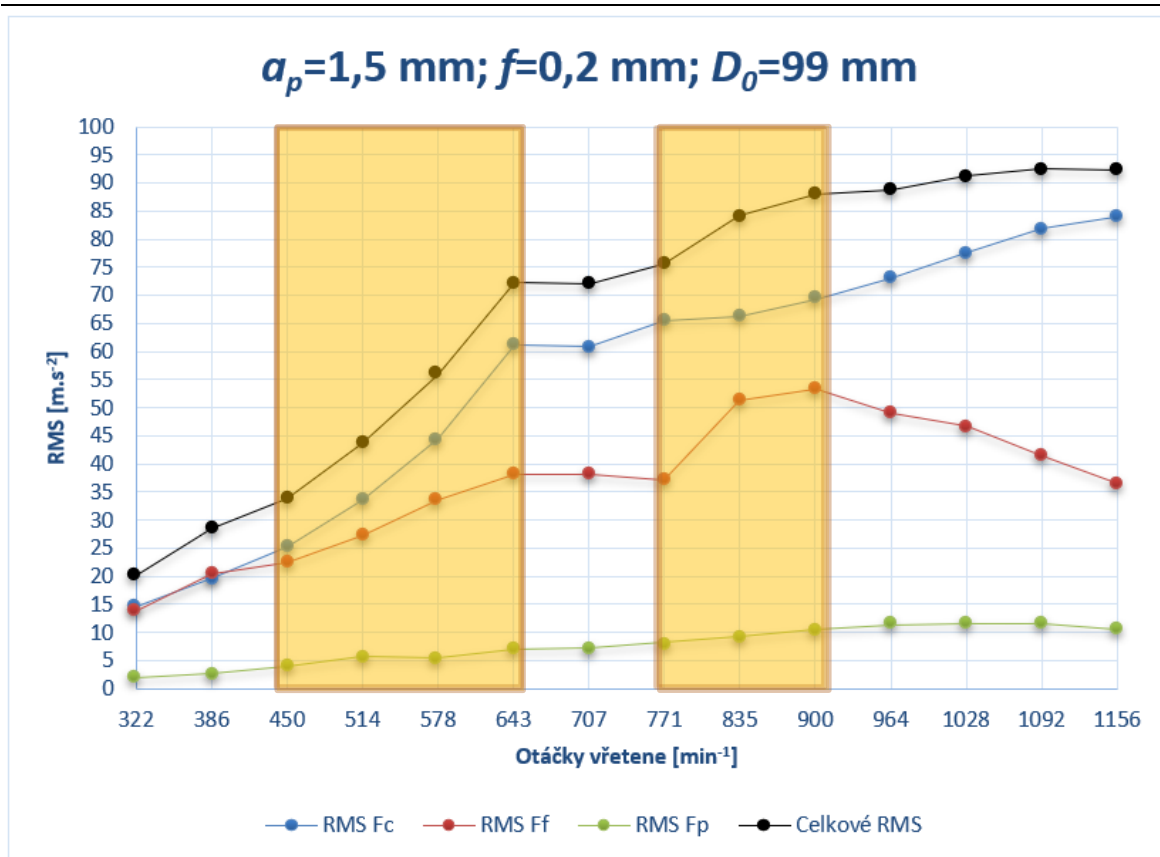
#### 4.3.2 Druhá fáze

V tabulce níže pod textem lze vidět výsledky vyhodnocených hodnot pro druhou fázi experimentu. Obráběl se průměr  $D_0=99 \text{ mm}$ , s hodnotou hloubky řezu  $a_p=1,5 \text{ mm}$ .

Tabulka 8 – Výsledky druhé fáze

Číslo měření	Otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]	<i>RMS F<sub>c</sub></i> [ $\text{m.s}^{-2}$ ]	<i>RMS F<sub>f</sub></i> [ $\text{m.s}^{-2}$ ]	<i>RMS F<sub>p</sub></i> [ $\text{m.s}^{-2}$ ]	<i>RMS F<sub>celk</sub></i> [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
1	322	14,63	13,92	1,93	20,29
2	386	19,59	20,53	2,63	28,50
3	450	25,23	22,37	4,01	33,96
4	514	33,65	27,33	5,63	43,72
5	578	44,35	33,58	5,37	55,89
6	643	61,07	38,23	7,12	72,40
7	707	60,83	38,18	7,20	72,18
8	771	65,49	37,05	8,14	75,68
9	835	66,27	51,19	9,22	84,24
10	900	69,30	53,32	10,48	88,07
11	964	73,07	49,02	11,32	88,71
12	1028	77,52	46,62	11,61	91,20
13	1092	81,89	41,40	11,53	92,48
14	1156	84,08	36,51	10,53	92,27

Z tabulky výše a grafu níže je vidět, že hodnoty *RMS F<sub>c</sub>* byly v maximu při nejvyšších otáčkách a v minimu při otáčkách nejnižších. Maximální hodnota u *RMS F<sub>c</sub>* byla vyhodnocena na  $84,08 \text{ m.s}^{-2}$  a ta nejnižší na  $14,63 \text{ m.s}^{-2}$ . Stejně tomu tak nastalo u *RMS F<sub>p</sub>* hodnot, kromě posledních dvou měření, kdy tato hodnota začala mírně klesat. Nejvyšší hodnoty u *RMS F<sub>p</sub>* byly vyhodnoceny na velikost  $11,61 \text{ m.s}^{-2}$  při  $n=1028 \text{ min}^{-1}$  a nejnižší hodnoty na  $1,93 \text{ m.s}^{-2}$  při  $n=322 \text{ min}^{-1}$ . V případě analýzy poslední ze tří hodnot *RMS*, u hodnot *RMS F<sub>f</sub>*, se maxima dostáhl při 900 otáčkách vřetene. V ten moment byla vyhodnocena *RMS* hodnota na velikost  $53,32 \text{ m.s}^{-2}$  a minima se dosáhlo v prvním měření, tedy  $n=322 \text{ min}^{-1}$  s velikostí  $13,92 \text{ m.s}^{-2}$ .



Hodnoty  $RMS F_c$  vykazují maximum při nejvyšších otáčkách, u hodnot  $RMS F_p$  tomu nastalo při řezu s 1028 otáčkami vřetene. Hodnota  $RMS F_c$  vykazuje změnu velikosti nárůstu při 643 otáčkách, do doby dosažení těchto otáček vykazuje hodnota  $RMS F_c$  téměř exponenciální nárůst. Odlišný případ nastal u hodnot  $RMS F_f$ , prvotní tendence poklesu  $RMS$  hodnot nastala v řezu se 707 otáčkami vřetene, dále tato hodnota narůstala až do 900 otáček vřetene a poté opět začala klesat s větším gradientem až do konce měření fáze. Byl zde vyhodnocen výskyt 2 oblastí nestability, první v rozsahu 450 až 643 otáček a druhý v rozsahu 771 a 900 otáček.

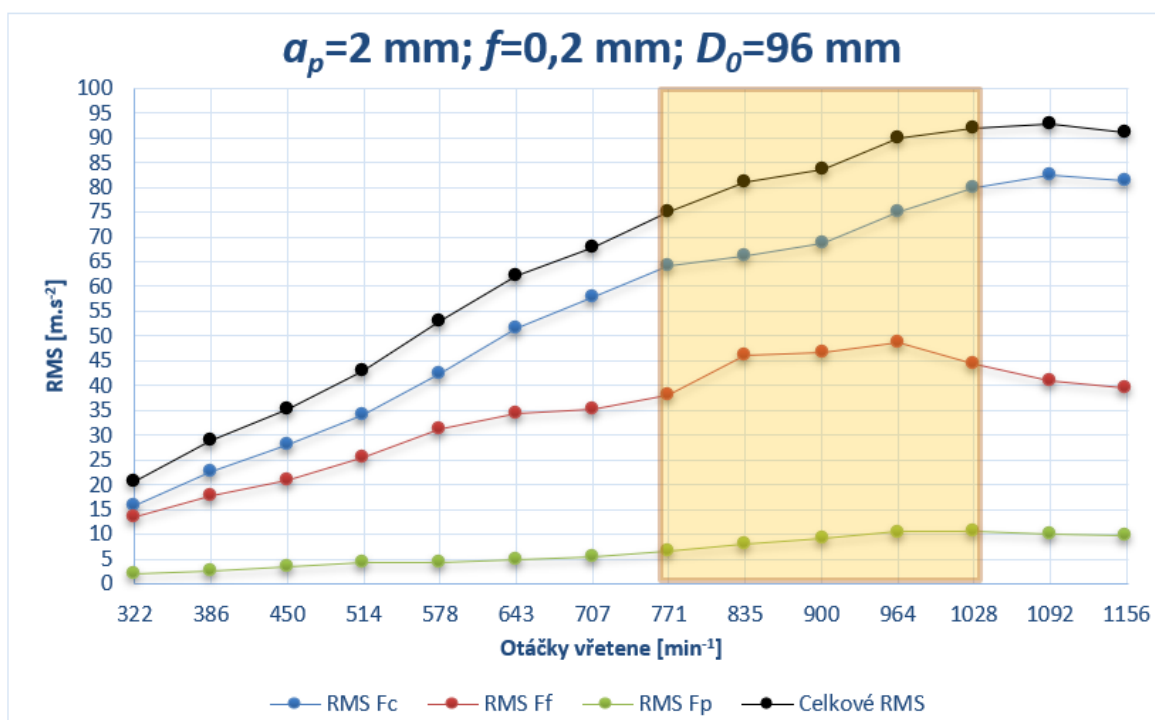
#### 4.3.3 Třetí fáze

V tabulce níže pod textem lze vidět výsledky vypočtených hodnot pro třetí fázi experimentu. Obráběl se průměr  $D_0 = 96 \text{ mm}$ , s hodnotou hloubky řezu  $a_p = 2 \text{ mm}$ .

Tabulka 9 – Výsledky třetí fáze

Číslo měření	Otáčky vřetene [min <sup>-1</sup> ]	RMS $F_c$ [m.s <sup>-2</sup> ]	RMS $F_f$ [m.s <sup>-2</sup> ]	RMS $F_p$ [m.s <sup>-2</sup> ]	RMS $F_{celk}$ [m.s <sup>-2</sup> ]
1	322	15,62	13,37	1,92	20,65
2	386	22,71	17,63	2,58	28,87
3	450	27,94	20,93	3,53	35,09
4	514	34,18	25,58	4,24	42,90
5	578	42,48	31,17	4,36	52,87
6	643	51,43	34,37	4,92	62,05
7	707	57,74	35,33	5,46	67,91
8	771	64,18	38,21	6,49	74,97
9	835	66,17	46,07	7,89	81,01
10	900	68,77	46,63	9,14	83,60
11	964	74,90	48,65	10,46	89,92
12	1028	79,92	44,35	10,60	92,01
13	1092	82,51	40,93	10,10	92,66
14	1156	81,41	39,46	9,63	90,98

V třetí fázi experimentu dosahovaly maximální hodnoty  $RMS F_c$  velikosti 82,51 m.s<sup>-2</sup> a to při řezu s 1092 otáčkami vřetene. Minimální velikost této  $RMS$  hodnoty byla vyhodnocena z dat prvního řezu o velikosti 15,62 m.s<sup>-2</sup>. Nejvyšší hodnota u  $RMS F_f$  byla zjištěna při 964 otáčkách vřetene o velikosti 48,65 m.s<sup>-2</sup>. Naopak nejmenší hodnota byla vyhodnocena z řezu při prvním měření, tedy z řezu při 322 otáčkách s velikostí 13,37 m.s<sup>-2</sup>. U poslední hodnoty, tedy  $RMS F_p$ , nastala situace nejvyšších hodnot při řezu s 1028 otáčkami vřetene. Velikost nejvyšší hodnoty byla 10,6 m.s<sup>-2</sup>. Nejnižší hodnota byla zjištěna hned v prvním řezu s velikostí 1,92 m.s<sup>-2</sup>.



Graf 3 – Diagram stability třetí fáze experimentu

Pro třetí fázi měření lze shrnout, že všechny 3 hodnoty  $RMS$  vyznačovaly obdobné chování. Tedy do velikosti 900 otáček vřetene všechny průběhy vykazovaly podobný gradient navýšení

hodnoty  $RMS$ . Dále lze říct, že křivka  $RMS F_c$  má téměř po celý průběh tendenci stoupat, až při 1092 otáčkách tato hodnota začne klesat. Obdobně tomu tak nastalo u křivky  $RMS F_p$ , kde hodnota začala klesat již při 1028 otáčkách vřetena. Křivka  $RMS F_f$  se začala odebírat záporným směrem od  $n=964 \text{ min}^{-1}$ . Dále v této fázi nebyl zjištěn výskyt nestabilní oblasti, což lze tvrdit na základě plynulého vzestupu hodnot  $RMS$  při zvyšující se hodnotě otáček vřetene.

## 4.4 Porovnání RMS hodnot jednotlivých směrů

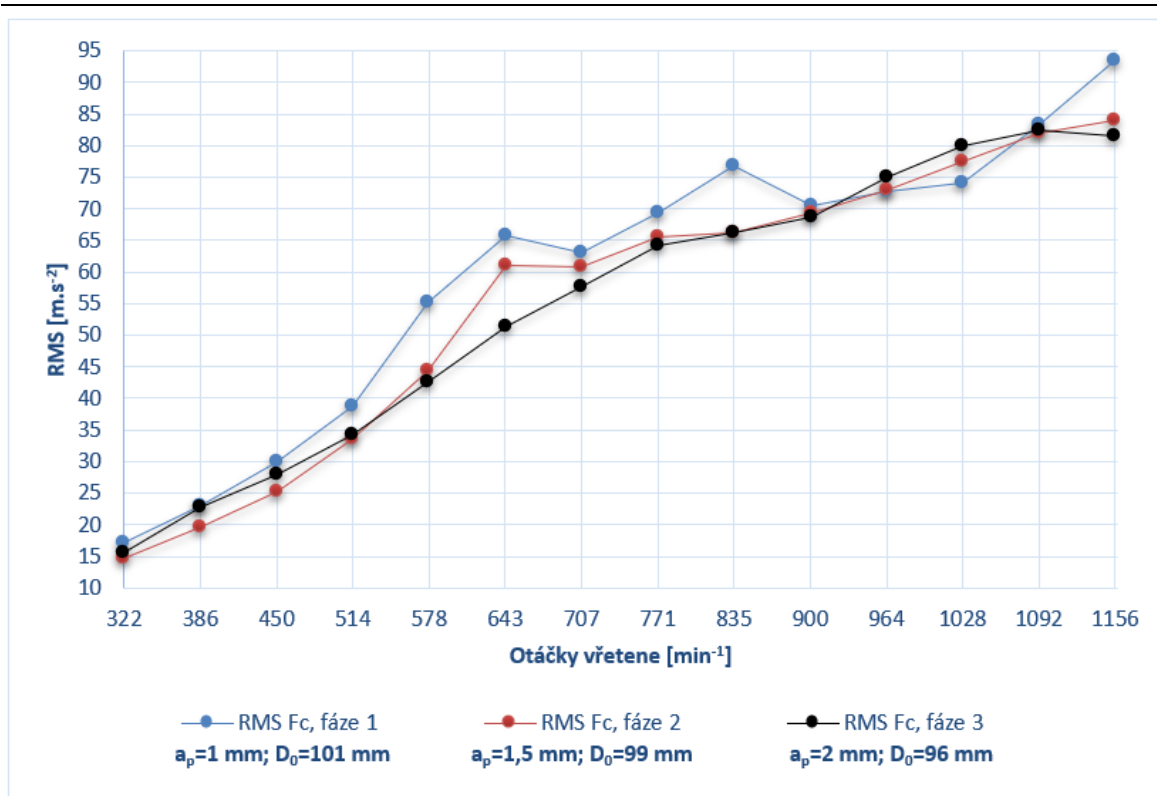
### 4.4.1 Hodnoty RMS ve směru hlavní složky řezné síly

Tabulka 10 – Srovnání hodnot  $RMS F_c$

Číslo měření	Otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]	Fáze 1 [ $\text{m.s}^{-2}$ ]	Fáze 2 [ $\text{m.s}^{-2}$ ]	Fáze 3 [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
1	322	17,07	14,63	15,62
2	386	23,00	19,59	22,71
3	450	30,03	25,23	27,94
4	514	38,84	33,65	34,18
5	578	55,24	44,35	42,48
6	643	65,86	61,07	51,43
7	707	63,04	60,83	57,74
8	771	69,47	65,49	64,18
9	835	76,80	66,27	66,17
10	900	70,41	69,30	68,77
11	964	72,64	73,07	74,90
12	1028	74,04	77,52	79,92
13	1092	83,35	81,89	82,51
14	1156	93,54	84,08	81,41

Při srovnání hodnot  $RMS F_c$  u jednotlivých fází vzešlo zjištění, že největších hodnot v průřezu celého měření se dosahovalo u první fáze. Největší hodnota zrychlení vibrací z celého měření pro  $RMS F_c$  se naměřila také v první fázi experimentu, což lze vidět i z vyhodnocených dat v tabulce výše. Tato hodnota, o velikosti  $93,54 \text{ m.s}^{-2}$ , byla naměřena při posledním měření s 1156 otáčkami vřetene. Při srovnání výsledků druhé a třetí fáze vyplynulo, že nejmenších hodnot se dosáhlo v sedmi měření v každé fázi. Nejnižší hodnota pro  $RMS F_c$  byla vyhodnocena z prvního měření druhé fáze s velikostí  $14,63 \text{ m.s}^{-2}$ . Z porovnání naměřených hodnot  $RMS F_c$  je vidět, že při první fázi vznikaly největší  $RMS$  hodnoty v převážné většině měření. U třetí fáze je dále možné si všimnout nižší hodnoty gradientu, kdy při každém měření hodnota stoupne o podobnou hodnotu. Naopak v první fázi byl zjištěn nárůst hodnot při zvyšování otáček vřetena s nepravidelným gradientem. Přibližně v prvních dvou třetinách vznikaly největší zrychlení vibrací při obrábění v první fázi. V poslední třetině měření vznikaly největší hodnoty  $RMS F_c$  střídavě v první a třetí fázi.



Graf 4 – Vykreslené průběhy RMS  $F_c$ 

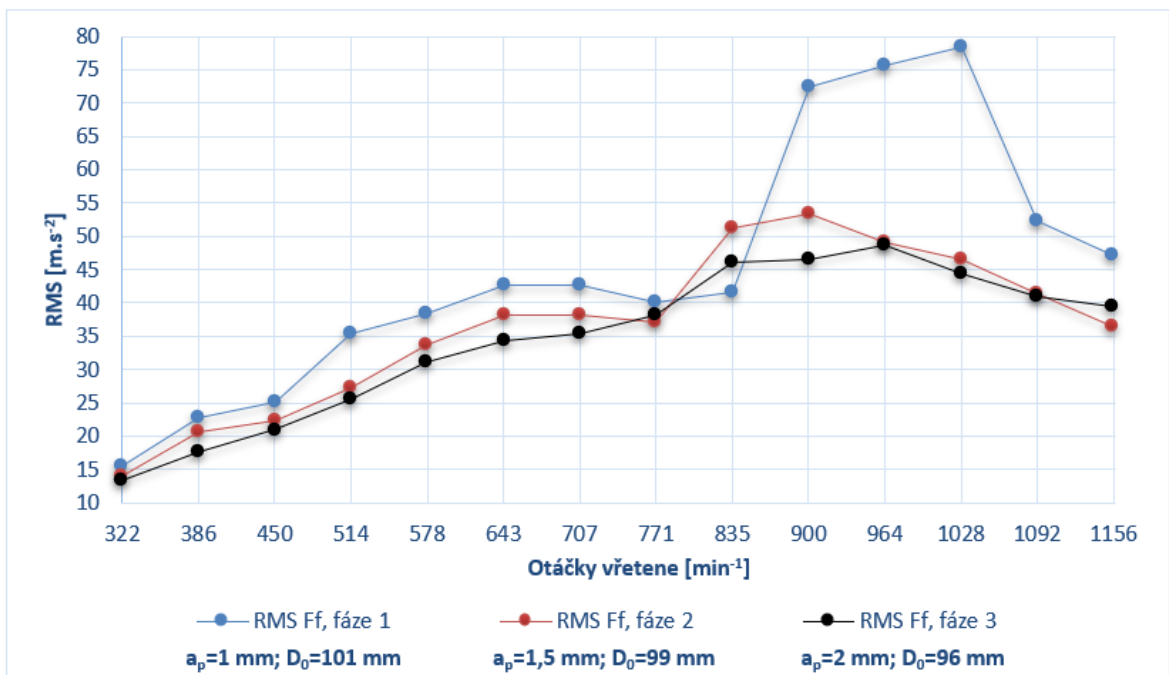
#### 4.4.2 Hodnoty RMS ve směru posuvové složky řezné síly

Tabulka 11 – Srovnání hodnot RMS  $F_f$ 

Číslo měření	Otáčky vřetene [min <sup>-1</sup> ]	Fáze 1 [m.s <sup>-2</sup> ]	Fáze 2 [m.s <sup>-2</sup> ]	Fáze 3 [m.s <sup>-2</sup> ]
1	322	15,49	13,92	13,37
2	386	22,67	20,53	17,63
3	450	25,02	22,37	20,93
4	514	35,36	27,33	25,58
5	578	38,43	33,58	31,17
6	643	42,59	38,23	34,37
7	707	42,63	38,18	35,33
8	771	40,11	37,05	38,21
9	835	41,53	51,19	46,07
10	900	72,55	53,32	46,63
11	964	75,60	49,02	48,65
12	1028	78,56	46,62	44,35
13	1092	52,35	41,40	40,93
14	1156	47,12	36,51	39,46

Jak lze vidět i z tabulky číslo 11, největší hodnoty zrychlení vibrací s působením ve směru  $F_f$  byly vyhodnoceny v první fázi měření. V této fázi vznikaly největší vibrace, oproti hodnotám srovnávaným ze zbylých dvou fází, v téměř všech vyhodnocených měření. Největší hodnota dosáhla velikosti 78,56 m.s<sup>-2</sup> při 1028 otáčkách vřetene. Jediná výjimka vyšší vyhodnocené hodnoty RMS  $F_f$ , nastala u devátého měření druhé fáze, tedy při 835 otáčkách vřetene. Nejmenší hodnoty pro téměř všechny vyhodnocené měření byly zjištěny u třetí fáze, kromě tří měření. Dvě měření, při otáčkách vřetene o hodnotě 771 a 1156 min<sup>-1</sup>, ukázaly vyhodnocené RMS  $F_f$  hodnoty pro druhou fázi menší

než u třetí fáze a měření při  $835 \text{ min}^{-1}$  v první fázi vyšlo s menší hodnotou  $RMS F_f$  než u fáze třetí. Velikost nejmenší hodnoty  $RMS F_f$  byla vyhodnocena z prvního měření třetí fáze o hodnotě  $13,37 \text{ m.s}^{-2}$ . Z grafu níže lze vidět vyhodnocené hodnoty  $RMS F_f$ , přičemž ty největší byly vyhodnoceny z první fáze experimentu. Největší hodnoty  $RMS F_f$  byly vyhodnoceny téměř z celého průběhu měření první fáze. Zejména při otáčkách vřetene v rozsahu od  $835$  do  $1028 \text{ min}^{-1}$  byl vyhodnocen vysoký nárůst zrychlení vibrací, není tedy vhodné obrábět při těchto otáčkách vřetene s řeznými parametry první fáze. Ty nejmenší hodnoty byly vyhodnoceny z převážně celého měření třetí fáze experimentu. V první polovině lze vidět plynulý nárůst a v druhé zase nepravidelný obousměrný gradient.



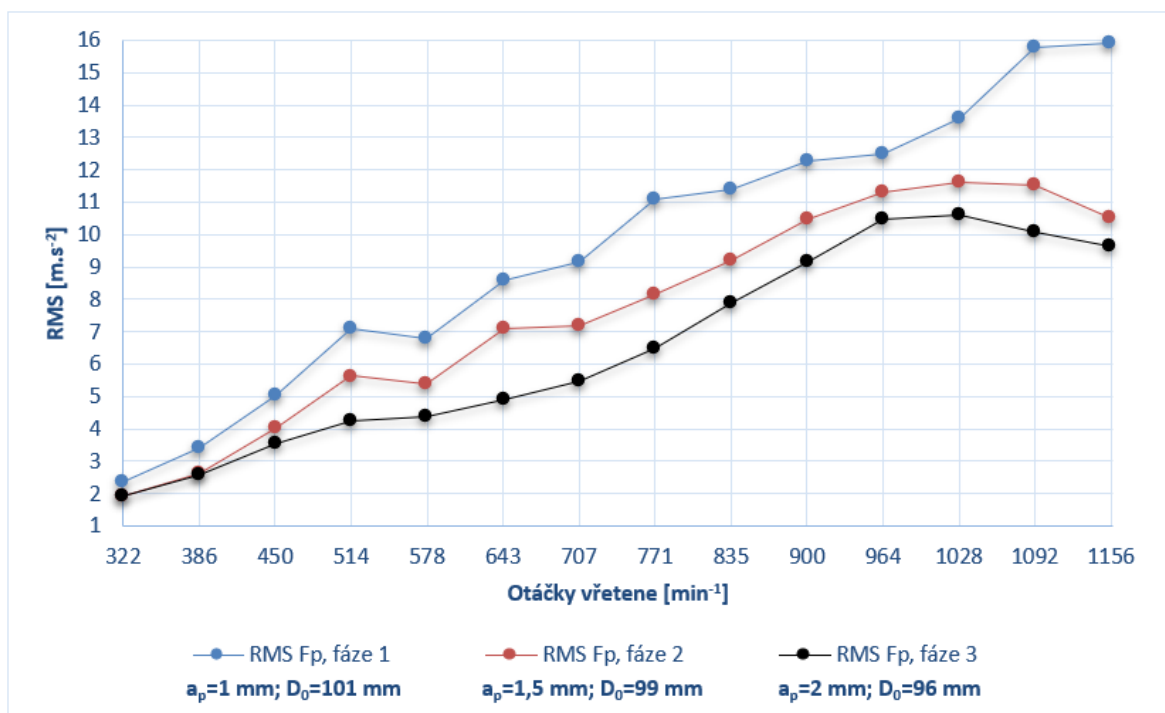
Graf 5 – Vykreslené průběhy  $RMS F_f$

#### 4.4.3 Hodnoty RMS ve směru pasivní složky řezné síly

Tabulka 12 – Srovnání hodnot  $RMS F_p$

Číslo měření	Otáčky vřetene [min <sup>-1</sup> ]	Fáze 1 [m.s <sup>-2</sup> ]	Fáze 2 [m.s <sup>-2</sup> ]	Fáze 3 [m.s <sup>-2</sup> ]
1	322	2,36	1,93	1,92
2	386	3,41	2,63	2,58
3	450	5,03	4,01	3,53
4	515	7,10	5,63	4,24
5	579	6,77	5,37	4,36
6	643	8,60	7,12	4,92
7	707	9,18	7,20	5,46
8	771	11,10	8,14	6,49
9	835	11,39	9,22	7,89
10	900	12,28	10,48	9,14
11	964	12,48	11,32	10,46
12	1028	13,58	11,61	10,60
13	1092	15,78	11,53	10,10
14	1156	15,93	10,53	9,63

V tabulce výše lze vidět vyhodnocené  $RMS F_p$  hodnoty, jejich grafické zpracování pak na grafu pod textem. Největší hodnoty v celém průběhu měření byly vyhodnoceny pro první fázi experimentu, přičemž ta nejvyšší hodnota byla vyhodnocena v posledním měření, tedy při 1156 otáčkách vřetene o velikosti  $15,93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Naopak nejmenší hodnoty, také v celém průběhu měření, byly vyhodnoceny u třetí fáze experimentu. Zde byla vyhodnocena nejmenší hodnota na velikost  $1,92 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . V první fázi je vidět nárůst velikostí hodnot  $RMS F_p$  v celém průběhu měření a při 1028 otáček vřetene je vidět strmý nárůst, zatímco hodnoty druhé a třetí fáze se naopak začaly snižovat. Dále lze vidět v první polovině grafu velmi podobné změny hodnot  $RMS F_p$  u druhé a třetí fáze při navyšování otáček vřetene s velice obdobnými hodnotami při prvním a druhém měření. Tedy v rozsahu 322 až 386 otáček lze ubírat tříska s řeznými parametry první a druhé fáze při velmi podobných hodnotách  $RMS F_f$ . Efektivní oblastí pro obrábění s co nejmenšími hodnotami vibrací ve směru složky  $F_p$  se jeví pro druhou a třetí fázi u posledních dvou měření, kdy při zvýšení otáček tyto hodnoty klesaly. Doporučil bych tedy testování s větším rozsahem otáček pro další vykreslení křivky a provést více měření pro přesnější vykreslení křivky pro podrobnější popis chování těchto změn.



Graf 6 – Vykreslené průběhy  $RMS F_p$

#### 4.5 Porovnání celkové hodnoty RMS

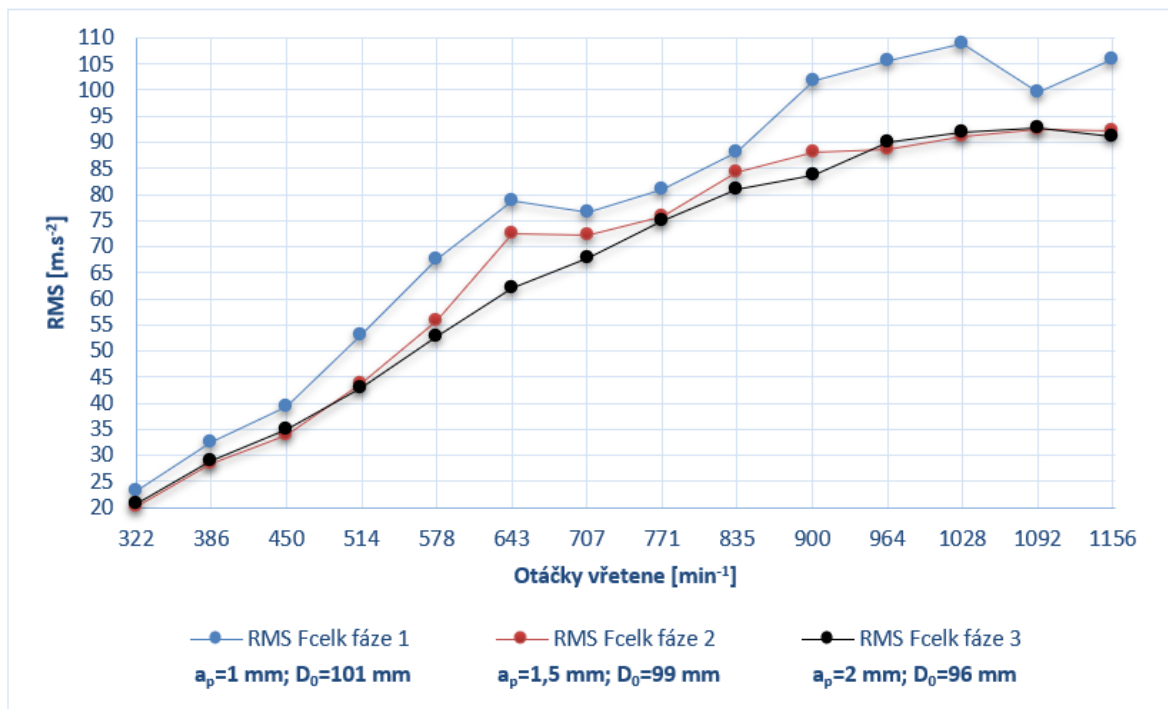
Z celkových  $RMS$  hodnot u jednotlivých směrů lze vyvodit, která fáze experimentu je nevhodnější z hlediska vzniku vibrací při specifických otáčkách vřetene. Pro vyhodnocení celkové hodnoty  $RMS$  byla použita rovnice číslo 25.

$$RMS F_{celk} = \sqrt{RMS F_c^2 + RMS F_f^2 + RMS F_p^2} \quad (25)$$

Tabulka 13 – Srovnání hodnot  $RMS F_{celk}$ 

Číslo měření	Otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]	Fáze 1 [ $\text{m.s}^{-2}$ ]	Fáze 2 [ $\text{m.s}^{-2}$ ]	Fáze 3 [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
1	322	23,17	20,29	20,65
2	386	32,47	28,50	28,87
3	450	39,41	33,96	35,09
4	515	53,01	43,72	42,90
5	579	67,63	55,89	52,87
6	643	78,90	72,40	62,05
7	707	76,65	72,18	67,91
8	771	80,98	75,68	74,97
9	835	88,04	84,24	81,01
10	900	101,84	88,07	83,60
11	964	105,58	88,71	89,92
12	1028	108,80	91,20	92,01
13	1092	99,68	92,48	92,66
14	1156	105,95	92,27	90,98

Jak lze vidět z tabulky výše, kde jsou vyhodnocené hodnoty  $RMS F_{celk}$ , největší hodnota z celého experimentu vznikla z dvanáctého měření první fáze experimentu. Tato hodnota byla vyhodnocena na velikost  $108,8 \text{ m.s}^{-2}$ , která vznikla při 1028 otáčkách vřetene. Nejmenší hodnota  $RMS F_{celk}$  byla zjištěna v prvním měření u druhé fáze experimentu, ovšem podobná hodnota o velikosti  $20,65 \text{ m.s}^{-2}$  vznikla i z prvního měření třetí fáze experimentu, tedy při 322 otáčkách vřetene. Nejmenší hodnota  $RMS F_{celk}$  byla vyhodnocena z prvního měření druhé fáze experimentu o velikosti  $20,29 \text{ m.s}^{-2}$ , ovšem podobná hodnota o velikosti  $20,65 \text{ m.s}^{-2}$  vznikla i z prvního měření třetí fáze experimentu.

Graf 7 – Vykreslené průběhy  $RMS F_{celk}$

Vykreslený průběh z hodnot pro první fázi v grafu výše ukazuje pokles *RMS* hodnot u 643 a 1028 otáček vřetene. To může poukazovat na obrábění ve stabilní oblasti. Stejně tomu tak nastalo při 643 otáčkách v druhé fázi a při 1092 otáčkách vřetena ve třetí fázi, kde také začínají hodnoty klesat. Zde je ovšem pokles velmi mírný a je možné, že při větším rozsahu otáček by se daná velikost vibrací ještě zmenšila. Bylo by tedy vhodné opakovat tento experiment s větším rozsahem použitých otáček vřetene. V druhé fázi nastal ještě jeden mírný pokles s hodnotou gradientu  $0,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  mezi 643 a 707 otáčkami vřetene, což poukazuje na možné přiblížení k hranici stabilní oblasti.

## 5 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Frekvenční analýza řezného procesu soustruhu pomohla zjistit velikosti vibrací ve třech měřených směrech pro jednotlivé fáze experimentu, umožnila stanovit pásma stabilních a nestabilních oblastí a také určila možné směry dalších experimentů navazujících na stabilitu řezného procesu. V průběhu téměř celého experimentu vznikaly největší hodnoty vibrací ve směru hlavní složky řezné síly, střední hodnoty vibrací ve směru posuvové složky řezné síly a ty nejmenší velikosti vibrací ve směru pasivní složky řezné síly. Nestabilní oblasti obrábění pomohly nejvíce určit hodnoty  $RMS F_c$ , které vykazovaly největší gradienty, a tedy i odhalily hranice nestabilních oblastí. Vzhledem k výsledkům měření v jednotlivých fázích lze jednoznačně říct, že velikost tloušťky odebírané vrstvy spolu s obráběným průměrem mají významný vliv na vznik vibrací u zkoumaného stroje.

Lze říct, že vliv navyšovaných otáček vřetene na velikost vibrací v první fázi experimentu, kde řezné parametry byly  $D_0=101$  mm,  $a_p=1$  mm a  $f=0,2$  mm, byl ze všech fází největší. V jako jediné části experimentu zde byl zjištěn nárůst hodnoty  $RMS F_f$  do takové míry, že převýšila hodnoty  $RMS F_c$ . Nastalo tomu tak při v rozmezí otáček vřetene od 900 do 1028  $\text{min}^{-1}$ . Při dalším navyšování otáček vřetene, tedy za hranicí druhé oblasti nestability končící při 1028 otáčkách, hodnota  $RMS F_f$  začala prudce klesat. Byly zde zjištěny dvě oblasti nestability, a to v rozmezích od 514 do 707 a od 835 do 1092 otáček vřetene. Doporučil bych zopakovat měření s řeznými parametry první fáze v rozsahu otáček od 835 do 1028  $\text{min}^{-1}$  a s větším počtem měření pro přesnější vykreslení křivek hodnot  $RMS F_c$  a  $F_f$ . To pomůže určit možný důvod převýšení velikostí  $RMS F_f$  nad hodnotami  $RMS F_c$ .

Menší vliv otáček vřetene na velikost vzniklých vibrací pak byl zjištěn u druhé fáze experimentu s řeznými parametry  $D_0=99$  mm,  $a_p=1,5$  mm a  $f=0,2$  mm. Zde byly také zjištěny dvě oblasti nestability, ovšem v menším rozmezí otáček vřetene, konkrétně od 514 do 643 a 771 do 900. Hodnoty  $RMS F_c$  a  $F_p$  v průběhu téměř celé druhé fáze experimentu stoupaly. Hodnoty  $RMS F_f$ , podobně jako u první fáze, začaly klesat za hranicí druhé oblasti nestability.

Třetí fáze se dle naměřených dat ukázala jako nejstabilnější, tedy s nejmenšími gradienty hodnot  $RMS$ . Zde byly použity řezné parametry  $D_0=96$  mm,  $a_p=2$  mm a  $f=0,2$  mm. V rozmezí od 322 do 771 otáček vřetene se vibrace ve všech směrech zvyšovaly s podobným gradientem. Při dalším navyšování otáček se hodnoty  $RMS F_f$  ve začaly zvyšovat, což může být důkazem výskytu nestabilní oblasti. Doporučil bych opakovat celé testování s větším počtem měření třetí fáze, jednak pro ověření naměřených výsledků a jednak pro přesnější vykreslení křivek z  $RMS$  hodnot. To pomůže přesněji určit nestabilní oblast obrábění třetí fáze.

Dle hodnot  $RMS F_{celk}$ , nejvyšší hodnota zrychlení vibrace z celého experimentu vznikla v první fázi při 1028 otáčkách vřetene. Z toho lze vyvodit, že velikost vibrací významně ovlivňuje kromě obráběného průměru, velikosti úběru třísky a otáček vřetene některý z dalších parametrů, který v této práci nebyl zkoumán. Doporučuji proto provést druhé testování se zaměřením na jiné parametry, které by mohly významně ovlivňovat zkoumaný řezný proces. Nejmenší hodnoty dle  $RMS F_{celk}$  vznikly při prvním měření druhé fáze, tedy při 322 otáčkách vřetene. Z průběhů těchto hodnot je vidět, že při posledních dvou měření druhé a třetí fáze začaly hodnoty  $RMS F_{celk}$  klesat. Doporučuji proto další testování s větším rozsahem otáček vřetene, pro zjištění možného poklesu

a vzrůstu hodnot  $RMS F_{celk}$  pro možné další určení neoptimálnějších podmínek pro řezné parametry dané fáze.

Nejekonomičtější obrábění z celého experimentu proběhlo ve třetí fázi, kde byla zvolena největší hodnota odebírané tloušťky třísky. Zde byly vyhodnoceny hodnoty  $RMS F_{celk}$  s nejmenšími velikostmi v průřezu téměř celého měření v porovnání s dalšími fázemi. Tedy i přes největší záběr nástroje a nejrychlejší čas při odebírání požadovaného množství třísky vznikaly nejmenší hodnoty zrychlení vibrací. Nejméně ekonomické obrábění nastalo u první fáze. To znamená, že zvyšováním hodnoty odebírané tloušťky třísky a zároveň zmenšováním obráběného průměru klesají zároveň hodnoty zrychlení vibrací vznikajících při obrábění. Doporučuji provést další měření vyšší s hodnotou odebírané tloušťky třísky a menším obráběným průměrem pro potvrzení tendence klesání hodnot zrychlení vibrací při zmiňované změně řezných parametrů.

Celkově tedy bylo zjištěno 5 nestabilních oblastí v měřeném rozsahu otáček vřetene celého experimentu. Pro přesnější určení nestabilních oblastí je vhodné pokračovat ve zkoumání daného stroje a navázání tak na tuto práci s použitím více měření, většího rozsahu otáček vřetena a se zaměřením na další možné řezné parametry ovlivňující vznik vibrací při řezném procesu.

#### Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D. a panu Ing. Miroslavu Trochtovi, Ph.D. za konzultace, rady a poznatky ohledně diplomové práce.



## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. PALAZZOLO, Alan. *Vibration Theory and Applications with Finite Elements and Active Vibration Control* [online]. Texas: Wiley, 2016 [cit. 2021-5-2]. ISBN 1118350804. Dostupné z: <https://www.pdfdrive.com/vibration-theory-and-applications-with-finite-elements-and-active-vibration-control-e167823272.html>
2. FOJTŮ, Petr. Problematika samobuzeného kmitání při obrábění. Sborník konference: Konference studentské tvůrčí činnosti [online]. Praha, 2009, 2009, , 15 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>
3. ITO, Yoshimi. Leading-edge perspectives for theory and suppression of chatter in machine tools [online]. March 2019. Tokyo: Machine Tool Engineering Foundation, 2019 [cit. 2021-5-9]. ISBN 978-4-909859-01-3. Dostupné z: [https://www.kousakukikai-zaidan.or.jp/wp-content/uploads/2019/03/MTEF-Book-02\\_20190319.pdf](https://www.kousakukikai-zaidan.or.jp/wp-content/uploads/2019/03/MTEF-Book-02_20190319.pdf)
4. KULJANIC, Elso, Giovanni TOTIS a Marco SORTINO. Vibrations and chatter in machining: State of the art and new approaches [online]. Italy, 2008 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/257444718\\_Vibrations\\_and\\_Chatter\\_in\\_Machining\\_State\\_of\\_the\\_Art\\_and\\_New\\_Approaches](https://www.researchgate.net/publication/257444718_Vibrations_and_Chatter_in_Machining_State_of_the_Art_and_New_Approaches). Publication. University of Udine.
5. GANGULI, Abhijit. Chatter reduction through active vibration damping [online]. Bruxell, 2005 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <http://scmero.ulb.ac.be/Publications/Thesis/Ganguli05.pdf>. Thesis submitted in candidature for the degree Doctor. Université Libre de Bruxelles. Vedoucí práce André Preumont.
6. NOVÝ, Richard. Hluk a chvění [online]. Vyd. třetí. V Praze: České vysoké učení technické, 2009 [cit. 2021-5-9]. ISBN 978-80-01-04347-9.
7. Vibration measurement; vibration sensors and measuring vibration precisely. Lion Precision [online]. Oakdale, California, 2013, 2013 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.lionprecision.com/vibration-measurement-vibration-sensors-measuring-vibration-precisely/>
8. The vibration analysis handbook [online]. Tampa, Florida: Vibration Consultants, 1994 [cit. 2021-5-9]. ISBN 9780964051706. Dostupné z: <https://engineeringresources.org/the-vibration-analysis-handbook-pdf/>
9. KOČMAN, Jaroslav a Karel PROKOP. Technologie obrábění. Druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
10. TLUSTÝ, Jiří a Franz KOENIGSBERGER. Specifications and tests of metal cutting machine tools. Manchester: Revell and George Limited, 1970.
11. TLUSTÝ, Jiří. Manufacturing processes and equipment [online]. Florida: Prentice Hall, 2000 [cit. 2021-5-10]. ISBN 0201498650.
12. LILJEREHN, Anders. Machine tool dynamics: A constrained state-space substructuring approach [online]. Göteborg, Sweden, 2016 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z:

- <https://core.ac.uk/download/pdf/74356383.pdf>. Thesis for the degree of doctor. Chalmers University of Technology. Vedoucí práce Dr. Thomas Abrahamsson.
13. VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - piezoelektrické. HW Server [online]. Praha, 1997, leden 2007 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
  14. Vibrotech: Snímače vibrací - akcelerometr, velocimetr [online]. Praha [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://vibrotech.cz/cz/snimace-vibraci-chveni-posuvu-akcelerometr-velocimetr>
  15. SISMILICH, Vladimír. Vibrace při obrábění kovů [online]. Brno, 2010 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29382](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29382). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
  16. PROCHÁZKA, Luděk. Vibrace při soustružení [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30293468.pdf>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické Brno. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.
  17. STANISLAUS, Charles. Frictional damper to enhancedynamic stability in endmilling [online]. Florida, 2003 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: [http://etd.fcla.edu/UF/UFE0001440/stanislaus\\_m.pdf](http://etd.fcla.edu/UF/UFE0001440/stanislaus_m.pdf). Masterthesis. University of Florida. Vedoucí práce Dr. John Ziegert.
  18. KASHYAPI, Gautam, Suhas MOHITE a Nachiket BELWALKAR. Formation of Stability Lobe Diagram (SLD) for Chatter Free Milling on Aluminium Alloy. Manufacturing Science and Technology [online]. 2015, 3(2), 32-37 [cit. 2021-5-17]. ISSN 2333-2735. Dostupné z: doi:10.13189/mst.2015.030202
  19. PODANÝ, Kamil. Ocel 12 050 [online]. Brno [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/databaze/ocel\\_12050.3.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/databaze/ocel_12050.3.pdf). Výukové materiály. Vysoké učení technické v Brně.
  20. Material C45 steel: Equivalent, properties, composition. The world material [online]. 2017 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/1-0503-material-c45-steel/>
  21. Proturn RLX 1630. XYZ Machine Tools [online]. United Kingdom, Devon [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://xyzmachinetools.com/xyz-rlx-1630/>
  22. Samostředící spirálové sklíčidlo, 3čelistní. ZJP Technik centrum: Železářství, upínací technika [online]. Zábřeh na Moravě [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.zjp.cz/data/documents/productsheets/259.pdf>
  23. Nožový držák PDJNR 2525 M15. Falti [online]. Ostrava, 1997 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: [https://www.falti.cz/pdjnr-2525-m-15-drzak-nuz-vnejsi?gclid=CjwKCAjw07qDBhBxEiwA6pPbHITppT5Go\\_WS1UM5DWhk5Ad5cZ6IJ8lf-FgKjmqya9nrc54t-gChPRoCE8AQAvD\\_BwE#gclid=CjwKCAjw07qDBhBxEiwA6pPbHITppT5Go\\_WS1UM5DWhk5Ad5cZ6IJ8lf-FgKjmqya9nrc54t-gChPRoCE8AQAvD\\_BwE&tb1=1](https://www.falti.cz/pdjnr-2525-m-15-drzak-nuz-vnejsi?gclid=CjwKCAjw07qDBhBxEiwA6pPbHITppT5Go_WS1UM5DWhk5Ad5cZ6IJ8lf-FgKjmqya9nrc54t-gChPRoCE8AQAvD_BwE#gclid=CjwKCAjw07qDBhBxEiwA6pPbHITppT5Go_WS1UM5DWhk5Ad5cZ6IJ8lf-FgKjmqya9nrc54t-gChPRoCE8AQAvD_BwE&tb1=1)

24. IEPE Accelerometer: Type 8702B. Kistler: Measure, analyze, innovate [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-8702b/>
25. IEPE Accelerometer: Type 8704B. Kistler: Measure, analyze, innovate [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <http://www.tnmkorea.co.kr/inphos1/img/pdf/Kistler.pdf>
26. LabAmp charge amplifier: Type 5165A. Kistler: Measure, analyze, innovate [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/products/components/signal-conditioning/labamp-charge-amplifier-daq/>