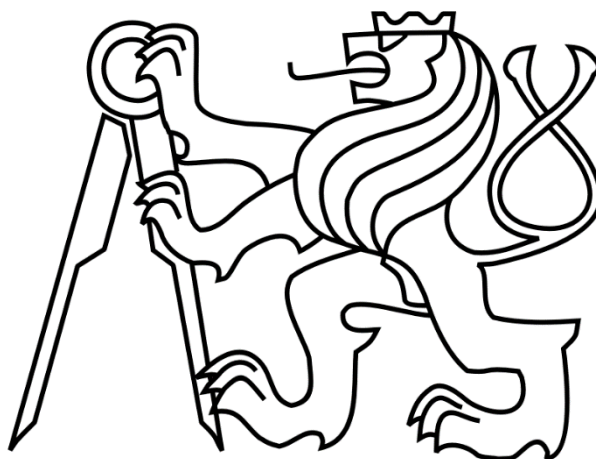


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

**Analýza dynamické poddajnosti frézovacího stroje s vřetenovou hlavou a zkouška  
využití výkonu**

Zadání

# Prohlášení

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

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

V Praze dne 16.7.2022

.....

podpis

# Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petrovi Kolářovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a trpělivost při vedení této práce. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Miroslavovi Janotovi, Ph.D. za věcné připomínky, za vstřícnost a ochotu. Také velké díky patří firmě TOS Varnsdorf a.s. a jejím pracovníkům, díky nimž mohla proběhnout experimentální část práce.

V neposlední řadě děkuji své rodině a nejbližším, kteří pro mě byli během celého studia vždy velkou oporou.

# Anotace

Autor:	Jiří Jiřinský
Název DP:	Analýza dynamické poddajnosti frézovacího stroje s vřetenovou hlavou a zkouška využití výkonu
Rozsah práce:	81 str., 64 obr., 8 tab., 8 příloh
Školní rok vyhotovení:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D., Ing. Tomáš Kozlok
Zadavatel:	TOS Varnsdorf a.s.
Využití:	Výkonové mapy mohou být nápomocné při obrábění s danými nástroji k optimalizaci řezných parametrů, se kterými bude stroj produktivní.
Klíčová slova:	Výkonové zkoušky, dynamická poddajnost, dynamické vlastnosti, samobuzené kmitání
Anotace:	Předložená diplomová práce se zabývá dynamickými vlastnostmi a výkonovými testy obráběcích strojů. Cílem experimentální části je ověřit schopnost stroje přenést do řezu instalovaný výkon na vřetení a identifikovat tím místa, která mohou stroj omezovat. Výsledkem jsou mapy využitelného výkonu. Díky nim lze optimalizovat řezné parametry a lépe čelit vibracím při obrábění.

# Annotation

Author:	Jiří Jiřinský
Title:	Analysis of dynamic compliance of a milling machine with a spindle head and spindle power utilization test
Extent:	81 p., 64 fig., 8 tab., 8 attachments
Academic year:	2021/2022
Univerzity:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 Department of Production Machines and Equipment
Supervision:	doc. Ing. Petr kolář, Ph.D.
Consultant:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D., Ing. Tomáš Kozlok
Submitter of the Theme:	TOS Varnsdorf a.s.
Application:	Performance maps can be helpful to optimize the cutting parameters with which the machine will be productive
Key words:	performance tests, dynamic compliance, dynamic characteristics, chatter
Annotation:	This thesis deals with the dynamic properties and performance tests of machine tools. The aim of the experimental part is to verify the capacity of the machine to fully benefit the installed power throughput of the spindle and therefore identify pain points, which could limit the machine. The results of this part are utilization performance maps. Thanks to those, it is possible to optimize cutting parameters and better counter vibrations in the machining process.

# Obsah

<b>Obsah .....</b>	<b>7</b>
<i>Seznam použitých značek .....</i>	<i>8</i>
<i>Seznam použitých zkratek .....</i>	<i>9</i>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Současné znalosti v problematice .....</b>	<b>11</b>
2.1 <i>Kmitání při obrábění .....</i>	<i>11</i>
2.2 <i>Dynamické vlastnosti obráběcích strojů .....</i>	<i>14</i>
2.3 <i>Interakce stroje s procesem .....</i>	<i>28</i>
<b>3 Měření a vyhodnocení zkoušek stroje .....</b>	<b>32</b>
3.1 <i>Postup měření .....</i>	<i>32</i>
3.2 <i>Výkonové zkoušky .....</i>	<i>38</i>
3.3 <i>Závěr z výkonových testů stroje .....</i>	<i>60</i>
3.4 <i>Měření dynamické poddajnosti .....</i>	<i>61</i>
3.5 <i>Rekapitulace dyn. poddajnosti na nástrojích .....</i>	<i>69</i>
3.6 <i>Výpočet absolutní meze stability .....</i>	<i>70</i>
<b>4 Závěr .....</b>	<b>74</b>
<b>5 Seznamy .....</b>	<b>75</b>
<i>Seznam použité literatury .....</i>	<i>75</i>
<i>Seznam obrázků .....</i>	<i>78</i>
<i>Seznam tabulek .....</i>	<i>80</i>
<i>Seznam příloh .....</i>	<i>81</i>

## Seznam použitých značek

<b><i>A</i></b>	Amplituda kmitů	[mm]
<b><i>a</i></b>	Zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
<b><i>a<sub>e</sub></i></b>	Radiální šířka záběru	[mm]
<b><i>a<sub>p</sub></i></b>	Axiální šířka záběru	[mm]
<b><i>a<sub>plim</sub></i></b>	Mezní hloubka řezu	[mm]
<b><i>D</i></b>	Průměr nástroje	[mm]
<b><i>F</i></b>	Síla	[N]
<b><i>f</i></b>	Frekvence	[Hz]
<b><i>f<sub>o</sub></i></b>	Posuv na otáčku	[mm/ot]
<b><i>f<sub>z</sub></i></b>	Posuv na zub	[mm]
<b><i>H</i></b>	Funkce frekvenčního přenosu	[dle odezvy]
<b><i>h<sub>m</sub></i></b>	Střední tloušťka třísky	[mm]
<b><i>K<sub>c</sub></i></b>	Specifická řezná síla	[MPa]
<b><i>k</i></b>	Tuhost	[N/m]
<b><i>k<sub>c1</sub></i></b>	Nominální řezný odpor	[MPa]
<b><i>MRR</i></b>	Objem odebraného materiálu	[cm <sup>3</sup> /min]
<b><i>m</i></b>	Hmotnost	[kg]
<b><i>m<sub>c</sub></i></b>	Kienzlův exponent	[-]
<b><i>N<sub>t</sub></i></b>	Průměrný počet zubů v záběru	[-]
<b><i>P</i></b>	Výkon	[W]
<b><i>S</i></b>	Otáčky vřetena	[ot/min]
<b><i>t</i></b>	Čas	[s]
<b><i>T</i></b>	Perioda	[s]
<b><i>ω<sub>n</sub></i></b>	Vlastní frekvence	[Hz]
<b><i>v<sub>c</sub></i></b>	Řezná rychlost	[m/min]
<b><i>x</i></b>	Výchylka	[m]
<b><i>X</i></b>	Směr osy x	[-]



$Y$	Směr osy y	[-]
$Z$	Směr osy z	[-]
$z$	Počet zubů	[-]
$\gamma$	Koherence	[-]
$\varphi$	Fázový posuv	[°]

## Seznam použitých zkratek

<b>FFT</b>	Fast Fourier transform (Rychlá Fourierova transformace)
<b>FRF</b>	Frequency Response Function (frekvenční přenosová funkce)
<b>MKP</b>	Metoda konečných prvků
<b>MRR</b>	Objem odebraného materiálu
<b>RCMT</b>	Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (Ústavu výrobních strojů a zařízení, Fakulty strojní ČVUT v Praze)
<b>RMS</b>	Efektivní hodnota
<b>SLD</b>	Stability Lobe Diagram (diagram stability)
<b>VBD</b>	Vyměnitelná břitová destička

# 1 Úvod

V současné době jsou kladeny vysoké nároky na konkurenceschopné obráběcí stroje. Mezi nejdůležitější požadavky pro obráběcí stroj patří užité vlastnosti, mezi které patří přesnost, jakost, produktivita, spolehlivost, hospodárnost a minimální dopad na životní prostředí.

S některými užitnými vlastnostmi jsou spojeny statické a dynamické vlastnosti stroje, které umožňují dosáhnout co nejlepšího využití výkonu stroje, při stále stabilním procesu obrábění. Nestabilní proces obrábění se projevuje vznikem vibrací, které mají negativní vliv na přesnost a kvalitu obrobene plochy, produktivitu a životnost nástroje i stroje. Proto je požadovaná vysoká dynamická tuhost stroje, jelikož při nestabilním procesu nelze dosáhnout využití celého teoretického výkonu stroje. Z tohoto důvodu je měření dynamických vlastností obráběcích strojů velmi žádané.

Na tomto základě se dělají výkonové zkoušky, které zjistí limity obrábění pro danou technologii, konfiguraci stroje, nástroje a obrobku. Spolu se znalostí dynamických vlastností stroje je pak možné identifikovat prvky systému, které nejvíce ovlivňují poddajnost konstrukce stroje.

## 2 Současné znalosti v problematice

### 2.1 Kmitání při obrábění

Kmitavý pohyb je doprovázející jev při provozu téměř každého obráběcího stroje, čili kmitání systému je doprovodný jev činnosti na obráběcích strojích. Kmitání v obráběcích strojích je ve skutečnosti velice složitým jevem. Každý stroj je komplexní soustava hmotných a pružných těles, které se při kmitání vzájemně ovlivňují. Při řezném procesu vznikají složité průběhy kmitání v soustavě S-N-O (stroj-nástroj-obrobek). Ve většině případů je kmitání u obráběcích strojů v provozu považováno za nežádoucí a škodlivý jev. Tyto vibrace nemají za následek jen zhoršenou nebo nevyhovující kvalitu povrchu, ale také navíc zatížení obsluhy i okolního prostřední hlukem. Dále pak zvýšení opotřebení nástroje, snížení životnosti komponent stroje nebo jejich trvalé poškození.

U obráběcích strojů se mohou často vyskytnout různé druhy vibrací. V teorii obráběcích strojů rozeznáváme následující typy kmitání: [3]

- vlastní kmitání (bez vnější budící síly)
- vynucené kmitání (s vnější budící silou)
- samobuzené kmitání (se zpětnou vazbou mezi působící silou a kmitáním systému)

#### **Volné (vlastní) kmitání**

Vlastní kmitání vzniká vychýlením hmoty z klidové polohy účinkem síly nebo rázu. U volného kmitání se ve většině případů vibrace rychle utlumí, a proto je vliv vlastních kmitů většinou zanedbatelný. Volné kmitání se rozděluje na netlumené a tlumené. Pomocí volného kmitání se popisují dynamické vlastnosti systému. [4]

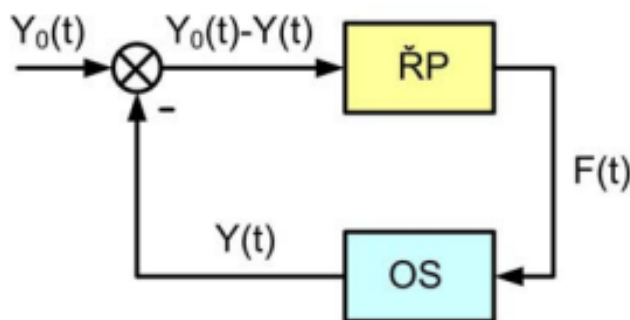
#### **Vynucené kmitání**

Vynucené kmitání je vyvoláno periodicky proměnlivými silami, tyto budící síly působí na jednotlivé prvky obráběcího stroje. Zdrojem budících sil v obráběcích strojích mohou být jejich samotné vlastnosti (nevyvážené části stroje, obrobku nebo nástroje apod.), tak i síly od řezného procesu vyvolané změnou průřezu třísky. Charakteristickou vlastností vynuceného kmitání je, že frekvence kmitání se často shoduje s frekvencí budící síly. [3]

### 2.1.1 Samobuzené kmitání

Samobuzené kmitání, anglicky označované jako „chatter“, je typ kmitání, které čerpá energii generovanou řezným procesem (do kterého je energie dodávána hlavním pohonem stroje) a nutí konstrukci stroje kmitat. Kmity vznikají zpětnovazebným ovlivňováním řezného procesu a soustavy obráběcího stroje viz obr. 2.1. Systém se dostane do kmitavého stavu prvním impulzem, který způsobí výchylku z rovnovážné polohy nástroje a obrobku. Při samobuzeném kmitání kmitá stroj jednou z vlastních frekvencí, při čemž žádné vnější rušivé síly nepůsobí. Frekvence těchto kmitů je velmi blízká některé vlastní frekvenci části stroje.

Jedná se o častý případ kmitání, jehož budící síla je vyvolána vlastním procesem řezání. Důležité však je, že toto kmitání se objevuje jen v určitém rozmezí řezných podmínek a změnou těchto podmínek lze stabilizovat řezný proces. [5]

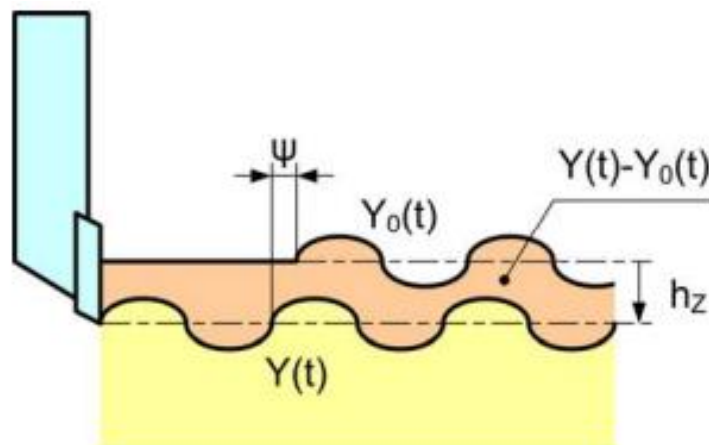


Obrázek 2.1 – Schéma vzniku samobuzeného kmitání formou zpětnovazebního obvodu [5]

Při frézování vznikají samobuzené vibrace ze dvou příčin. Prvním důvodem je, že tříska se při frézování odebírá přerušovaně při střídavém záběru zubů nástroje. Toto jsou vibrace vynucené činností nástroje a jsou vnímané jako běžné a snadno pochopitelné z důsledku tohoto způsobu obrábění. Druhou příčinou vzniku vibrací u frézování je to, že zuby frézy obrábějí zvlněný povrch. Tato teorie, která popisuje princip samobuzeného kmitání obráběcích strojů se nazývá jako tzv. regenerativní princip, který se objevuje téměř u všech principů obrábění a může výrazně ovlivnit výkonnost stroje. [3,5]

## Regenerativní princip

Podle regenerativního principu vznikají samobuzené kmity tak, že kmitající břit nástroje obrábí již zvlněný povrch, který vznikl při předchozím řezu (obr. 2.2). Zvlnění na povrchu obrobku mění periodicky hloubku řezu, resp. se mění průřez třísky a tím vzniká periodicky se měnící řezná síla, která budí celý systém. Takto se vlny regenerují při každém záběru nástroje do materiálu (při každé otáčce vřetene, resp. při každém záběru zubu). Kvůli fázovému posuvu mezi vlnami obráběných povrchů vzniká proměnlivý průřez třísky, a proto vzniká časově proměnlivá řezná síla, která zapříčiňuje kmitání nástroje. Tento fázový posun je pro vznik samobuzených kmitů rozhodující, pokud by byl tento fázový posun nulový, bude průřez odebrání třísky konstantní a tím pádem se samobuzené kmitání neobjeví. [3]



Obrázek 2.2 – Regenerativní princip [3]

## 2.2 Dynamické vlastnosti obráběcích strojů

Dynamické vlastnosti můžeme brát jako ovlivňující faktory zapříčiňující kmitání. Hlavní parametry, které udávají dynamické vlastnosti obráběcích strojů, jsou vlastní frekvence, vlastní tvary kmitů a dynamická poddajnost (převrácená hodnota tuhosti). Dynamická poddajnost je závislá na frekvenci budící síly, proto ji lze vyjádřit jako frekvenční závislost dynamického buzení a odezvy měřené soustavy, resp. závislost posunutí na síle buzení. Čím větší je podíl výchylky kmitání a amplitudy budící síly, tím je struktura poddajnější, to znamená, že pro buzení stejnou silou bude stroj kmitat s vyšší amplitudou. Poddajnost soustavy je určována pro konkrétní frekvenci buzení a na určitém přenosu mezi místem buzení a sledováním odezvy. Důležité je si uvědomit, že dynamická poddajnost není obecně konstantní, ale mění se s kinematickou polohou stroje, s otáčkami vřetene, se změnou hmotnosti obrobku apod. Jedna z nejrozšířenějších metod pro určování vlastních frekvencí a tvarů kmitů je modální analýza. Ta může být prováděna experimentálně nebo simulačně. Pro tuto metodu je nepostradatelná znalost frekvenční odezvové funkce, která je popsána níže v kapitole 2.2. [1,2]

$$H(\omega) = \frac{x(\omega)}{F(\omega)} \quad (2.1)$$

### 2.2.1 Základní veličiny popisující kmitavý pohyb

Nejjednodušší formou kmitání je harmonický pohyb. Tuhé těleso o hmotnosti  $m$  uložené na pružině o tuhosti  $k$  je vychýleno z rovnovážné polohy v čase  $t$ . Pokud bude zanedbáno tlumení, tak tento kmitavý pohyb je popsán rovnicí 2.2.

$$x_t = A \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (2.2)$$

Kde  $A$  je amplituda kmitání,  $\omega$  je vlastní kruhová frekvence a  $\varphi$  je fázové posunutí. V technické praxi se místo kruhové frekvence  $\omega$  vyjádřené v radiánech za sekundu používá frekvence  $f$  v hertzech, která odpovídá počtu celých cyklů za sekundu. Převrácenou hodnotou frekvence je pak perioda  $T$ .

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad (2.3)$$

System zatížen harmonickou silou s budící frekvencí  $f$  odpovídající otáčkám vřetene  $n$  je možné vyjádřit podle vztahu (2.4), nebo pokud nástroj je tvořen více brity vztahem pro zubovou frekvenci  $f_z$  (2.5).

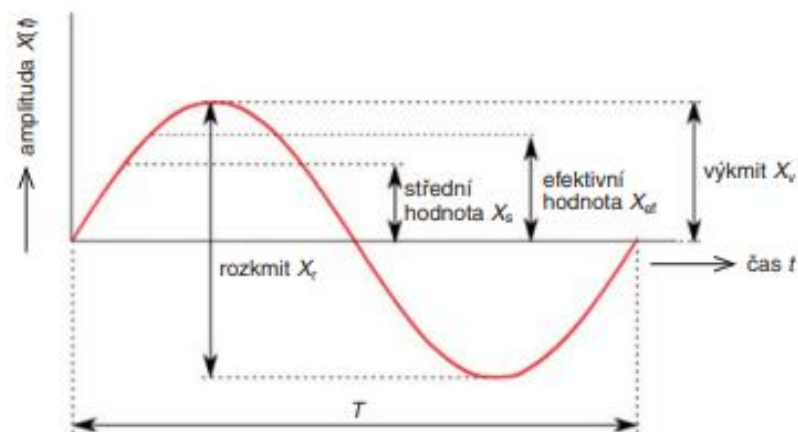
$$f = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (2.4)$$

$$f_z = f \cdot z \quad (2.5)$$

Z teorie kmitání je známo, že každá dynamická soustava má jednu nebo více vlastních frekvencí  $\omega_n$ , které přísluší frekvencím kmitavého pohybu. Pokud budící frekvence  $f$  je rovna některé z vlastních frekvencí  $\omega_n$ , tak nastává stav rezonance, při kterém se systém rozkmitá s větší amplitudou než při jiných frekvencích. Vlastní tvar je tvar deformace, který prvek dosáhne na příslušné vlastní frekvenci. Prakticky nelze vlastní tvar pozorovat nebo experimentálně registrovat. [13]

Harmonický signál z hlediska amplitudy v časové oblasti lze kvantifikovat několika způsoby:

- *Absolutní špičková hodnota (peak-to-peak) = 2 × amplituda*
- *Střední hodnota = 0,637 × amplituda*
- *Efektivní hodnota = 0,707 × amplituda*



Obrázek 2.3 – Parametry časového průběhu kmitavého pohybu(signálu) [15]

Podobné charakteristiky se používají i u signálů, které nejsou harmonické. Jedna z veličin pro popis amplitudy je např. absolutní špičková hodnota (peak-to-peak), znalost této hodnoty je významná z hlediska maximálního namáhání stroje. Špičková hodnota (peak level) je důležitá pro identifikaci krátkodobých pulsů apod. Jak je vidět na obrázku 2.3, špičkové hodnoty udávají pouze hodnotu maximální výchylky, ale neberou zřetel na celý časový záznam výchylek.

U neharmonických signálů nemá velký význam pojem amplituda, z tohoto důvodu jsou výhodnější charakteristiky jako střední hodnota ( $\bar{x}$ ) a efektivní hodnota (RMS), které naopak zohledňují danou časovou oblast výchylek. Efektivní hodnota (RMS) vyjadřuje průměrný výkon měřené veličiny a je nejužitečnějším měřítkem pro vyhodnocení signálu a následnému rychlému porovnání s jiným signálem. Musí se ale brát ohled na to, že se ztrácí informace o charakteru signálu. Efektivní (RMS) hodnotu lze vyjádřit vztahem: [13, 18]

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (2.6)$$

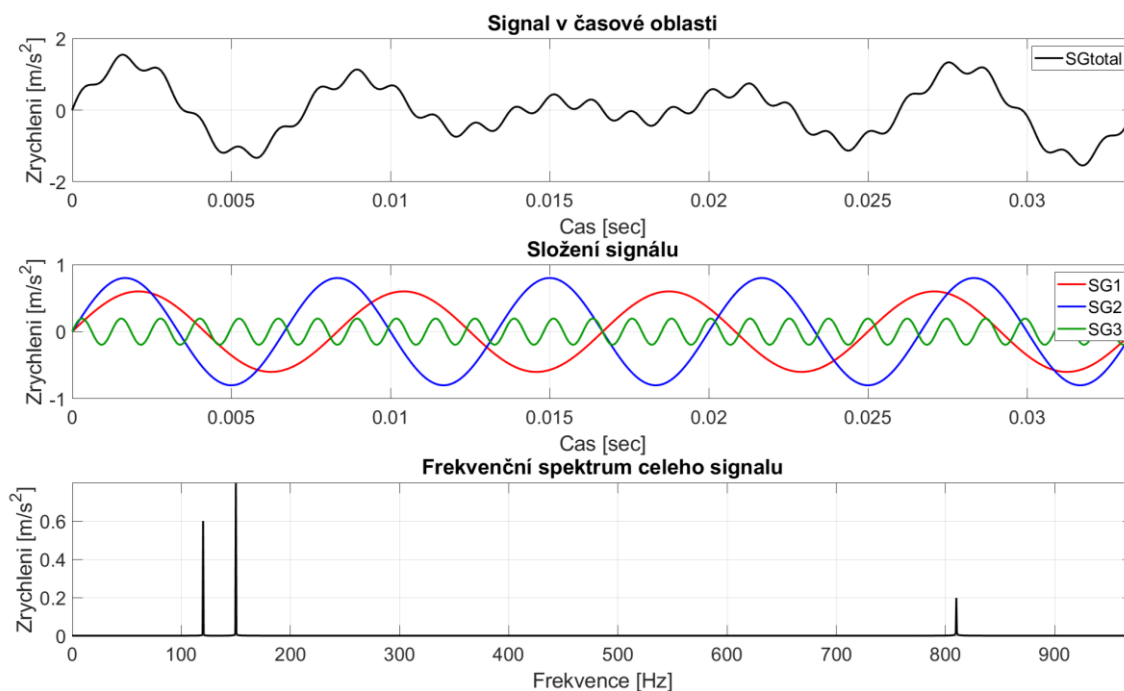
## 2.2.2 Frekvenční analýza a vlastnosti signálů

Základem měření vibračních signálů je získání časového průběhu měřené veličiny. Práce s časovým průběhem je relativně málo použitelná, protože informační přínos takového typu je omezený. Frekvenční analýza poskytuje jiný pohled na měřený časový průběh signálu. Je možné ji označit jako transformaci signálu, a to jako transformaci časové osy na osu frekvenční. Výsledný obraz transformovaného signálu se nazývá frekvenční spektrum.

Převod signálu z časové oblasti na frekvenční spektrum se provádí pomocí Fourierovy transformace (FT) nebo rychlé Fourierovy transformace (FFT), která je využívána ve výpočetních softwarech z důvodu zkrácení výpočetních časů. Po provedení transformace je ve frekvenčním spektru možné vidět, z kolika jednotlivých harmonických signálů byl měřený signál složen a lze pozorovat amplitudy  $A$  jednotlivých časových vln jako spektrální čáry, které přísluší daným frekvencím  $f$  (viz. obr. 2.4). Kromě amplitudového



spektra se získá i spektrum fázové, které ve většině případů není při analýze vibrací podstatné. [13]



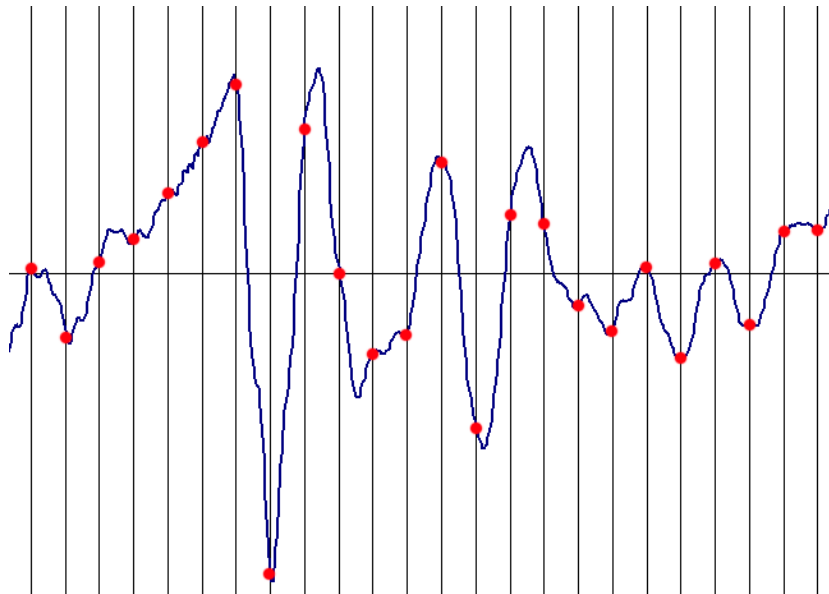
Obrázek 2.4 – Princip frekvenční analýzy [13]

Algoritmus FFT má mnoho vlastností. V případě, že nejsou správně nastaveny, mohou vést k chybným výsledkům. Možné chyby vyplývají z toho, že se v praxi pracuje s nespojitými (vzorkovanými) signály. Potenciálními zdroji chyb mohou být:

- Vzorkování a kvantování
- Chyba typu aliasing (chyba zdánlivosti)
- Chyba typu leakage (chyba únikem)

## Vzorkovací frekvence

Vzorkování signálu popisuje proces diskretizace signálu, kdy je spojitý signál převeden do digitální podoby. Na základě vzorkování signálu se získává počet diskretních vzorků původního analogového signálu. Počet vzorků, které se za jednotku času načtou z analogového signálu při přeměně na diskretní signál udává tzv. vzorkovací frekvence. Na obrázku 2.5 lze vidět vzorkování analogového signálu, kde je analogový signál zobrazen modře a vzorkovaný signál červeně. [18,23]

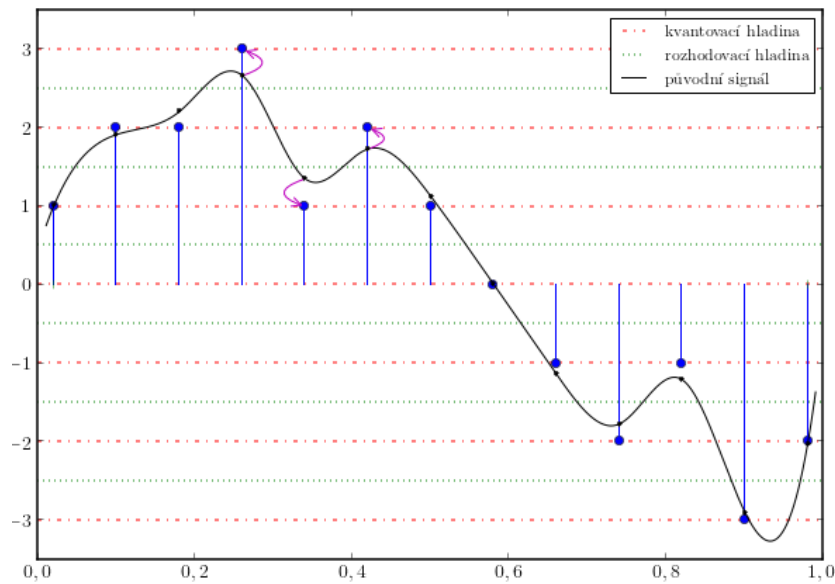


Obrázek 2.5 – Vzorkování analogového signálu [25]

Aby nedocházelo ke ztrátě dat, musí být maximální frekvence vzorkovaného signálu menší než polovina vzorkovací frekvence, jinými slovy vzorkovací frekvence se volí dvakrát větší než maximální frekvence vzorkovaného signálu. Toto pravidlo se nazývá vzorkovací teorém.

Při nedodržení vzorkovacího teorému mluvíme tzv. o chybě typu aliasing. Řešením je použití anti-aliasingového filtru (filtr typu dolní propust). Tento filtr složky, které jsou vyšší než polovina vzorkovací frekvence, z původního signálu odstraní. Tento filtr je integrální součástí nynějších analyzátorů. [13]

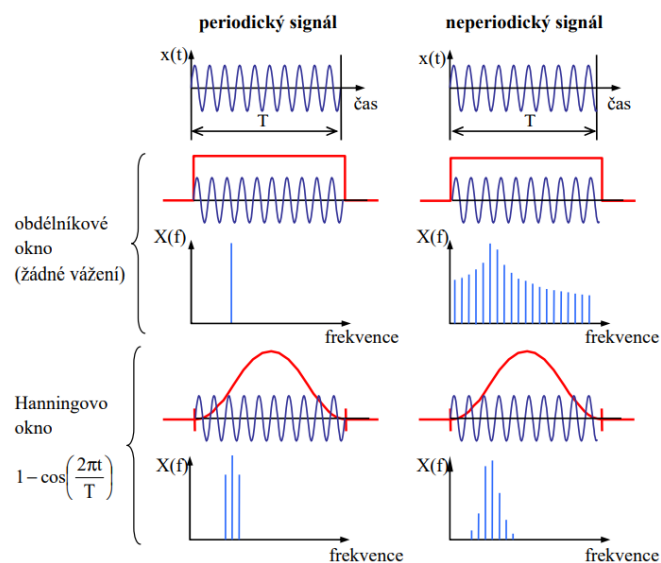
Po vzorkování následuje tzv. kvantování signálu. Podstatou kvantování je zaokrouhlení hodnot signálu získaného při vzorkování na předem dané tzv. kvantovací úrovni. Součástka, která realizuje kvantování se nazývá A/D převodník. Na obrázku 2.6 je možné vidět červeně vyznačené kvantovací úrovni, vzorek je vždy zaokrouhlen na nejbližší kvantovací hladinu (kvantovací úroveň). [24]



Obrázek 2.6 – Kvantování signálu [24]

### Váhová okna – Hannigovo okno

Dalším typem chyb neperiodického signálu je chyba únikem (leakage). K jejímu potlačení se používají tzv. váhová okna, která zabrání nespojitostem mezi dílčími úseky diskretizovaného signálu, které algoritmus Fourierovy transformace považuje za periodické, přestože ve skutečnosti periodické nejsou. K tomuto se používá například Hannigovo okno, které signál na svých koncích potlačuje k nule, čímž se odstraní nespojitosti a signál se více blíží skutečnému periodickému signálu. Výsledek použití Hannigova okna lze vidět na obr. 2.7 dole. [13]



Obrázek 2.7 – Vliv periodicity signálu a vliv váhových oken na chybu únikem [13]

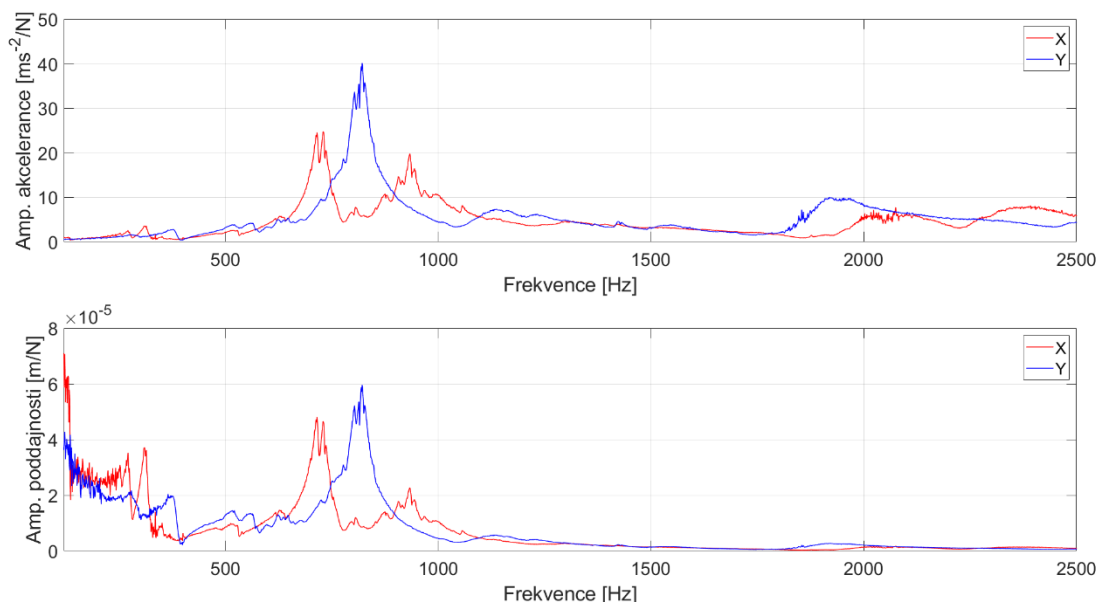
## 2.2.3 Funkce frekvenčního přenosu – FRF

Frekvenční přenosová funkce (frequency response function -FRF), nazývaná také jako funkce frekvenční odezvy systému, vyjadřuje poměr výstupního a vstupního signálu. U mechanických systémů dynamický průběh budící síly  $F(t)$  představuje vstupní signál (sílu). Průběh odezvy zkoumané na toto buzení reprezentuje proměnná  $X(t)$  (viz rovnice 2.7). [18]

$$H(j\omega) = \frac{x(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{\text{výstup}}{\text{vstup}} = \frac{\text{odezva}}{\text{buzení}} \quad (2.7)$$

Mechanické kmitání lze popsat a měřit jako zrychlení, rychlost a výchylku. Frekvenční přenosové funkce vztahující se k těmto veličinám se nazývají:

- Akcelerace [(m/s<sup>2</sup>)/N]
- Pohyblivost [(m/s)/N]
- Poddajnost [m/N]



Obrázek 2.8 – FRF akcelerance a dynamická poddajnost [28]

Tyto veličiny stejně jako zrychlení, rychlost a výchylka jsou vázány algebraickými vztahy a je tedy možné z naměřených dat jedné z těchto veličin, určit zbývající. [28]

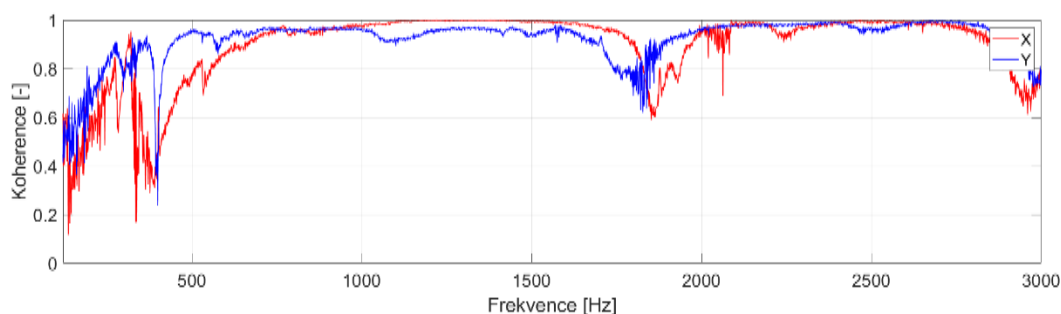
Oba přenosy na obrázku 2.8 mají stejnou vypovídající hodnotu. Z průběhu akcelerance je možné lépe rozpoznávat vlastní frekvence, které nejsou u poddajnosti na vyšších frekvencích dobře identifikovatelné. Z průběhu poddajnosti (dvakrát integrovaná akcelerance), lze vidět, že integrace potlačuje amplitudy na vyšších frekvencích a vynikají amplitudy na nižších frekvencích. Při vynuceném kmitání lze z průběhu poddajnosti dobře počítat velikost amplitudy. [27]

## Koherence

Koherence je frekvenčně závislá funkce, která vyjadřuje míru linearitu mezi vstupním a výstupním signálem, resp. vliv jednoho signálu na jiný signál. Tuto funkci lze definovat jako závislost vzájemného spektra (též křížového spektra) a součinu vlastních spekter (též auto-spektrum), jak je znázorněno v rovnici 2.8. Příkladem může být měření odezvy na silový impulz, kde vstupní signál je z rázové kladívka (síla) a výstupní signál reprezentuje měřenou odezvu (zrychlení).

$$\gamma(\omega)^2 = \frac{|G_{FX}(\omega)|^2}{G_{XX}(\omega) \cdot G_{FF}(\omega)} \quad (2.8)$$

Koherence  $\gamma$  nabývá hodnot od 0 do 1, s rostoucí hodnotou se zvyšuje i závislost signálů. Jestliže hodnota koherence klesá, znamená to, že odezva není závislá jen na jednom typu buzení. Vstupní signál může být ovlivněn šumem, jiným typem signálu, anebo se soustava po vybuzení sama dále budí. U frekvenčních oblastí, které jsou zkoumané, by koherence měla dosahovat co nejvyšších hodnot, a to minimálně 0,95. [17]

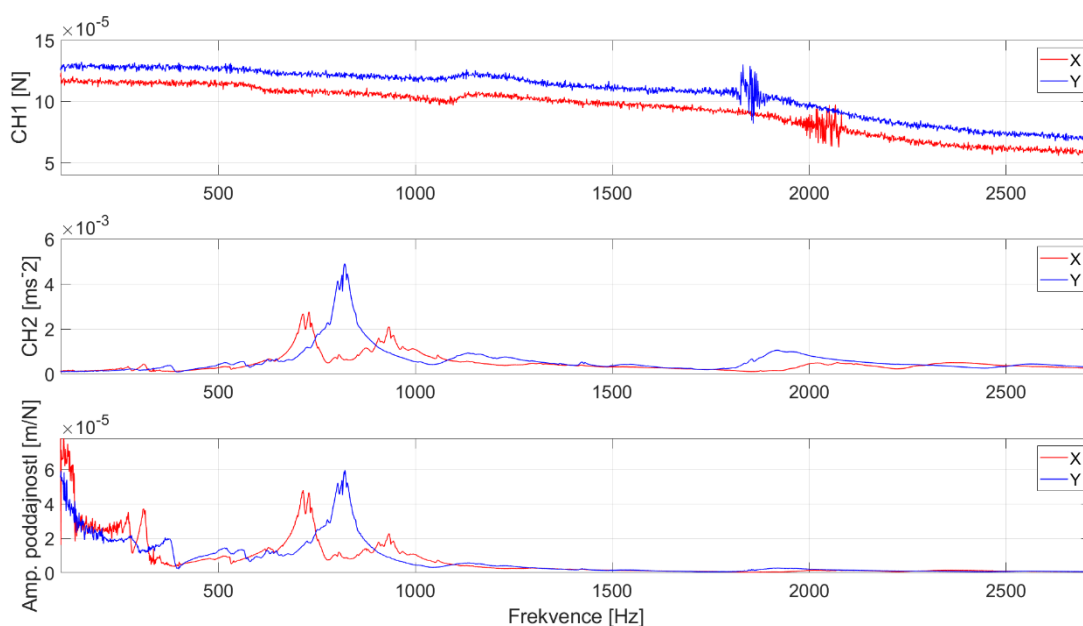


Obrázek 2.9 – Průběh koherence [28]

## 2.2.4 Měření dynamické poddajnosti

Jak již bylo zmíněno, podstatou měření dynamické poddajnosti je měření odezvy systému na buzení. Buzení je nejčastěji prováděno úderem modálního kladiva, jinak tzv. rázovým kladivem, jehož součástí je vestavěný akcelerometr, který měří budící signál. Úder kladivkem by měl ideálně představovat Dirackův impuls, který je nekonečně krátký a má nekonečně velkou amplitudu. Takový puls by ve svém frekvenčním spektru obsahoval všechny budící frekvence a amplitudy. V praxi takového pulsu nelze dosáhnout, a proto má puls konečnou časovou a konečnou amplitudu. V závislosti na kvalitě úderu se odvíjí, jaký rozsah frekvencí se podaří vybudit. Pokud by vlastní frekvence soustavy nebyly ve spektru budících frekvencí od úderu, tak by nebyly vlastní frekvence soustavy identifikované. Odezva kmitání je měřena pomocí akcelerometru. Odezvy jsou získávané v různých směrech v závislosti na směru úderu kladivem a orientaci akcelerometru. [28]

Časové záznamy z kladiva a akcelerometru jsou pomocí rychlé Fourierovy transformace převedeny do frekvenční oblasti. Následně z jejich podílu odezva/buzení získáme požadovaný přenos neboli frekvenční přenosovou funkci FRF. Ilustrační naměřená data jsou vidět na obr. 2.12, kde nahoře CH1 představuje buzení kladivem, uprostřed CH2 je odezva akcelerometru v jednotkách zrychlení a dole se nachází již dvakrát integrovaná akcelerance neboli dynamická poddajnost.



Obrázek 2.12 – Měřená data při FRF [28]

Následně z naměřeného průběhu dynamické poddajnosti je možné rozpoznat hlavní modální parametry jako vlastní frekvenci, relativní útlumy na jednotlivých frekvencích a modální tuhost. [28]

Změřená frekvenční přenosová funkce zobrazuje dyn. poddajnost stroje v konkrétním bodě na konkrétní buzení, což umožňuje z FRF měřené v místě nástroje identifikovat dominantní vlastní frekvence z pohledu interakce stroje s řezným procesem.

### **2.2.5 Modální analýza**

V oblasti dynamiky má velký význam modální analýza. Pomocí této metody je možné získat úplný dynamický popis mechanické soustavy. Podstatou modální analýzy je rozklad dynamického pohybu objektu a zjištění vlastních frekvencí, poměrných útlumů a určení vlastních tvarů kmitů zkoumané soustavy, nazývané též jako modální parametry. Tyto parametry lze získat dvěma způsoby, buď simulovat, kdy je znám matematický model soustavy a modální parametry se mohou dopočítat např. pomocí metody konečných prvků (MKP), anebo experimentálním způsobem, kdy se modální parametry získají měřením. V našem případě se bude jednat o experimentální měření. Pokud jde o experimentální přístup, tj. příprava experimentu, naměření přenosových funkcí, zpracování naměřených dat a stanovení modálních parametrů, označuje se celý proces jako modální zkouška. [22,26]

### **2.2.6 Měřicí aparatura a software**

#### **Modální kladivo**

Modální kladivo nebo jinak rázové kladivo je speciální typ kladívka, který se používá pro buzení měřeného objektu impulzem síly. Součástí kladívka je snímač síly, který měří vstupní impuls síly, tak i jeho časový průběh.

Frekvenční analýzou časového průběhu z modálního kladívka je možné přesně určit šíření vstupní síly na jednotlivých frekvencích. Ráz je schopen v měřeném objektu vybudit poměrně široký rozsah frekvencí. Frekvenční rozsah, který je vybuděn, je závislý na době působení síly. Čím je prováděný ráz kladivem kratší, tím se podaří vybudit větší rozsah vybuděných frekvencí. Při delším času silového působení je rozsah frekvenčního

buzení malý. Rozsah frekvenčního spektra lze ovlivnit koncovkou modálního kladívka. Pryžové koncovky sice nedeformují měřenou část objektu, ale zase nedokážou vybudit vyšší frekvence. Údery prováděny kladivem s kovovou koncovkou lokálně sice více zatíží místo měření, ale zase vybudí velmi vysoký rozsah frekvencí. [17]



Obrázek 2.13 – Modální kladivo [21]

Velikost síly závisí především na síle úderu. Limitujícím rysem je minimální a maximální síla, kterou kladívko je schopno přenést na měřený objekt. Při příliš silném úderu je možné, že dojde k přebuzení vstupního kanálu měřidla a naměřené hodnoty síly budou nepoužitelné. Při silných úderech může docházet i k poškození vlastního modálního kladiva a zároveň k nepřesnostem v poloze a směru vstupu síly. [18, 21]

### **Snímače zrychlení (akcelerometry)**

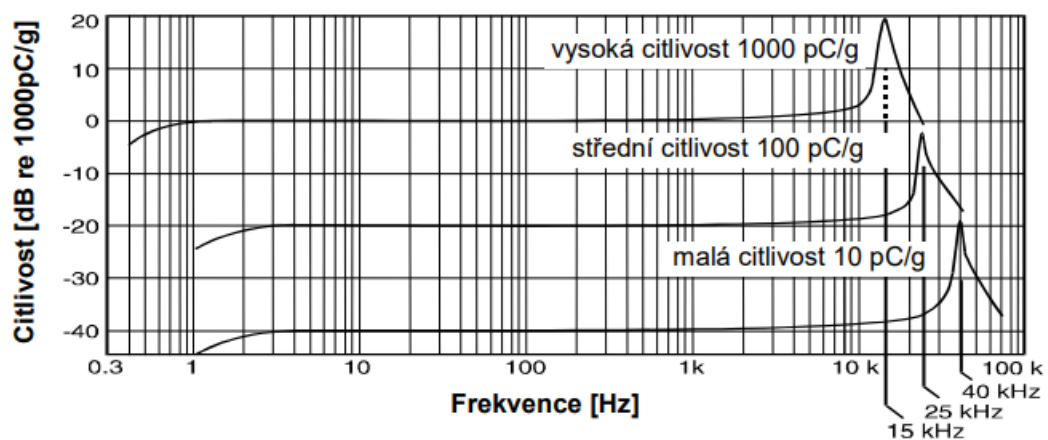
V současné době se pro měření vibrací používají snímače zrychlení. Jsou to dnes nejpoužívanější snímače, lze s nimi měřit nejen zrychlení, ale po integraci hodnoty zrychlení i rychlost a také výchylku. Jedná se o absolutní snímače, což znamená, že snímač je pevně spojen s měřenou strukturou. Nejpoužívanější akcelerometry jsou piezoelektrické (viz obrázek 2.15). Základem piezoelektrického akcelerometru je destička piezoelektrického materiálu, obvykle uměle polarizovaná feroelektrická keramika, která vykazuje piezoelektrický efekt. Když je destička mechanicky namáhána, ať už v tahu, tlaku nebo smyku, generuje elektrický náboj, který je úměrný aplikované síle. Mezi zrychlením a silou platí známý vztah  $F = m * a$ .





Obrázek 2.15 – Třiosý akcelerometr

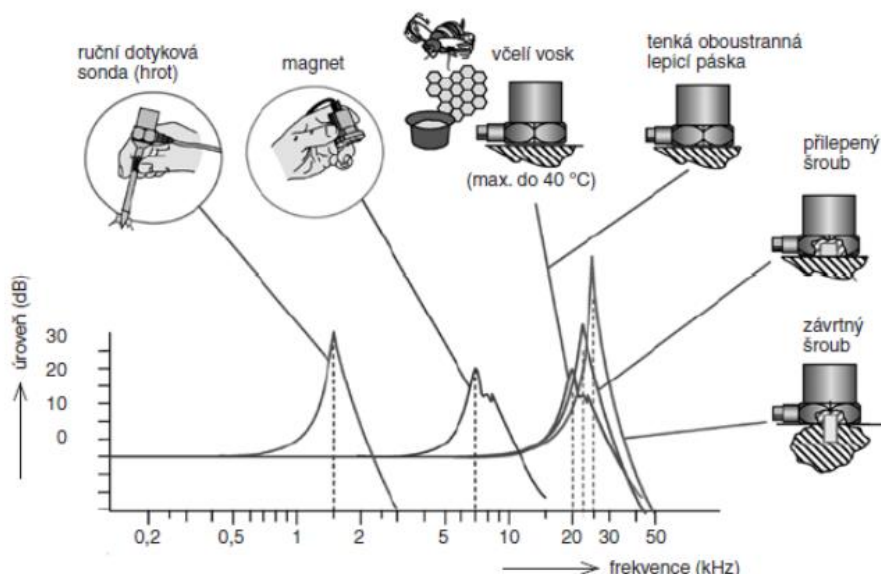
Hlavní charakteristikou akcelerometru je jeho citlivost, frekvenční a dynamický rozsah a jeho použitelnost. Tyto vlastnosti lze vyčíst z kalibrační křivky (obr. 2.14), která by měla být nedílnou součástí dodávky akcelerometru. Frekvenční rozsah akcelerometru by měl odpovídat předpokládanému rozsahu frekvence a dynamický rozsah musí být širší, než je předpokládaný rozsah amplitudy. Akcelerometr má také vlastní frekvenci, která omezuje jeho frekvenční rozsah. [13]



Obrázek 2.14 – Kalibrační křivka akcelerometru [13]

Způsob přichycení akcelerometru k měřenému objektu ovlivňuje hlavně snímání kmitočtový rozsah vibrací. Pro jednotlivé způsoby uchycení je kmitočtový rozsah zobrazen na obr. 2.16. Dále může docházet k utlumení nebo zvýraznění některých frekvencí.

Nevhodným připevněním můžeme zcela znehodnotit naměřená data nebo alespoň výrazně omezit použitelný frekvenční rozsah snímače. Způsob připevnění volíme tak, aby snímač bezpečně pracoval ve frekvenčním rozsahu, který nás zajímá. [18]



Obrázek 2.16 – Vliv způsobu uchycení snímače na jeho frekvenční rozsah [16]

Nedílnou součástí měřící aparatury jsou i kabely, které přenášejí signál z akcelerometru do analyzátoru, a i zde se mohou objevovat vlivy, které mohou znehodnotit naměřená data. V průmyslovém prostředí se mohou vyskytovat poměrně silná elektromagnetická pole, proto se signály z akcelerometrů přenášejí speciálními stíněnými kabely.

## MetalMAX™

Software MetalMAX™ od společnosti BlueSwarf představuje kompletní balíček hardwarových i softwarových nástrojů pro dynamickou charakterizaci obráběcích strojů. Software MetalMAX™ představuje kompletní balíček hardwarových i softwarových nástrojů pro dynamickou charakterizaci obráběcích strojů.

Obsahuje řadu modulů např. TXF™, MilSim™ a Harmonizer™, které jsou speciálně přizpůsobené pro měření obráběcích strojů. Nejdůležitějším modulem je TXF™, jeho výstupem je zobrazení funkce frekvenční odezvy FRF a diagram stability. MilSim™ je program pro simulaci řezného procesu, který využívá výstupní data z TXF k předpovědi stabilních řezných podmínek. Balíček obsahuje rázové kladivo, akcelerometr a měřící kartu. [19]

S modeulem TXF bylo provedené měření nanečisto, které sloužilo pro praktické seznámení s aparaturou pro měření dyn. poddajnosti. Při samotném experimentálním měření byla použita aparatura, jenž je popsána v kapitole 3.4.1.

### **CUTPRO (MAL Inc.)**

Simulační software CUTPRO od společnosti Manufacturing Automation Laboratory (MAL) je podobný typ programu jako MetalMAX, jde o konkureční software, který je zaměřený na měření dynamických vlastností obráběcích strojů. Také obsahuje různé moduly pro simulaci a měření procesů frézování, soustružení, broušení i vrtání a rovněž disponuje funkcemi k odhadu modálních vlastností z FRF a vytvoření diagramu stability.

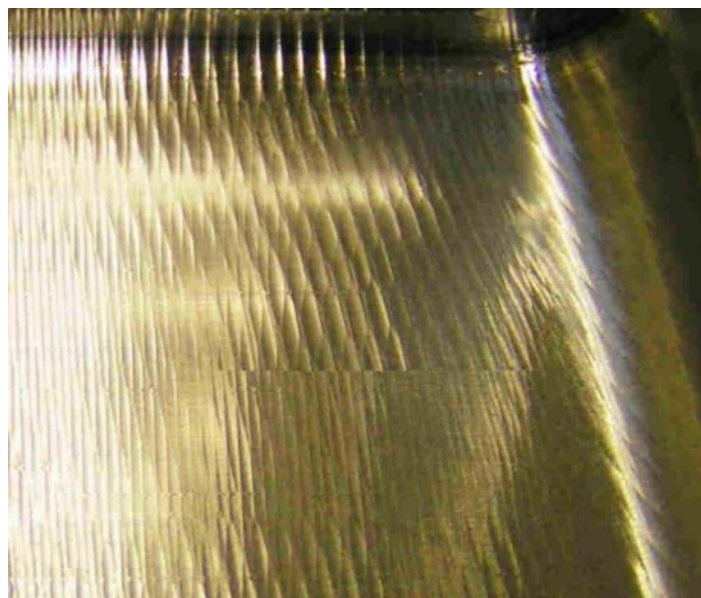
[20]

## 2.3 Interakce stroje s procesem

Řezný proces se vzájemně ovlivňuje s nosnou strukturou stroje, nosná struktura je z pohledu tuhosti a působících sil z procesu soustava stroj-nástroj-obrobek. Při nedostatečné tuhosti soustavy S-N-O, může při obrábění docházet ke vzniku samobuzeného kmitání. Samobuzené kmitání je typ vibrací, které čerpají energii z řezného procesu a nutí strukturu stroje kmitat.

### 2.3.1 Instalovaný výkon stroje

Pro technologie třískového obrábění je důležité porozumět chování samobuzeného kmitání a možnost jeho predikce umožňuje maximální využití výkonu obráběcích strojů. V některých případech se může samobuzené chvění projevit extrémním nárůstem amplitudy kmitání, což pak může způsobit i vyskakování nástroje z řezu a proces se pak stává nestabilní. Obvykle se pro toto kmitání používá výraz z anglické literatury „chatter“. V těchto případech jde pouze snížit rychlosti obrábění nebo ho úplně zastavit. Nadto rozmanitost nástrojů a obráběných materiálů nabízí hodně možností, kde samobuzené kmitání studovat. [6]



Obrázek 2.17 – Zvlněný povrch obrobku po nestabilním obrábění [7]

Dynamická stabilita je schopnost stroje odolávat kmitání. Kmitání stroje omezuje maximální využití instalovaného výkonu stroje, resp. odebírání maximálního objemu materiálu za jednotku času. Jako stabilní obráběcí stroj je považován takový kmitavý systém, jehož amplitudy se nezvětšují. Následkem dynamické nestability jsou větší zatěžující síly než jsou přípustné, a proto se musí omezit použitý výkon stroje. [7]

Na vznik nestability (chatteru) má vliv řada činitelů. Na základě znalosti o jejich působení v dynamickém systému se může často významně ovlivnit stabilita obráběcího procesu. Jedná se zejména o tyto parametry:

- Tuhost technologické soustavy
- Řezná rychlost
- Tloušťka a šířka třísky
- Geometrie nástroje
- Řezný materiál

Závěrem lze tedy shrnout, že hlavním prostředkem, jak zabránit samobuzenému kmitání, je zvyšování tuhosti všech částí technologické soustavy. Závisí na volbě vhodných rozměrů základních částí stroje. Je nutno konstatovat, že ne ve všech případech, vyšší tuhosti a vyšší vlastní frekvence soustavy přinášejí větší odolnost proti kmitání.

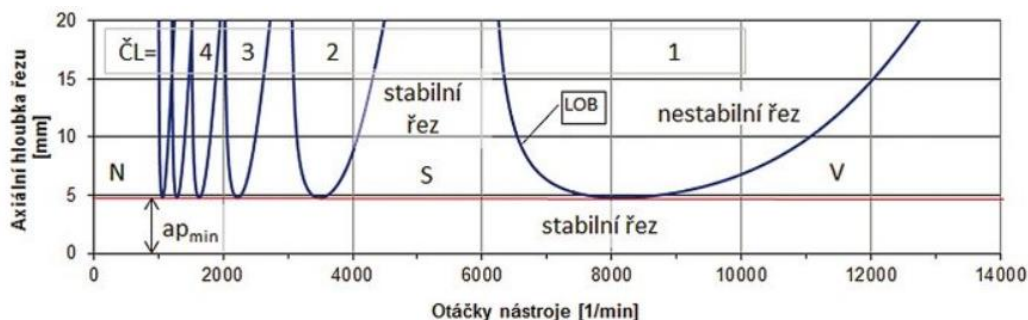
## Diagram stability

Diagram stability tzv. Stability Lobe Diagram (SLD nebo lobe diagram) ukazuje hranici mezi stabilní a nestabilní oblastí řezného procesu pro daný nástroj a řezné podmínky. V praxi tento diagram slouží k nastavení vhodných řezných podmínek pro dosažení maximálního využití výkonu stroje. [1]

V digramu stability (obr. 2.18) je na svislé ose uvedena produktivita, reprezentovaná axiální hloubkou řezu  $a_p$ . Hodnota  $a_{pmin}$ , tzv. mezní hloubka řezu, představuje hloubku odřezávané třísky, při které bude bezpodmínečně proces stabilní, pokud hloubka řezu  $a_p$ , bude pod touto hodnotou. Na vodorovné ose jsou uvedeny otáčky frézy. Mezery mezi jednotlivými „loby“, zobrazují limity stabilního obrábění a zde je možné provádět výkonné obrábění. Loby rozdělují diagram na stabilní a nestabilní část. Oblast pod křivkou je značena jako stabilní a část nad křivkou jako nestabilní, kde může docházet

k nežádoucím vibracím. Se zvyšujícími se otáčkami se vzdálenost mezi loby rozšiřuje, což je žádaný jev pro zvýšení efektivity obrábění.

Technolog a programátor s těmito informacemi může okamžitě zvýšit řezný výkon



Obrázek 2.18 – Diagram stability [9]

a využití instalovaného pohonu vřetena. Výrobce stroje pro zvolené nástroje a technologii, může zákazníkovi předložit stabilní řezné podmínky, řezný výkon a jeho využitelnost. Diagram nelze používat univerzálně, protože je vytvořen pro danou kombinaci stroj-nástroj-materiál obrobku, která stanovuje konkrétní dynamickou poddajnost a měrný řezný odpor. [1,8]

Diagram stability je obvykle sestavován ze znalosti měrného řezného odporu  $K_c$  a frekvenční odezvové funkce (FRF). Z této skutečnosti je možné vypočítat hodnotu  $a_{pmin}$  podle rovnice 2.9, kde  $\min(\text{Re}(\text{FRF}))$  je minimální hodnota reálné složky FRF a  $N_t$  je počet zubů v záběru. [10,11]

$$a_{pmin} = \frac{-1}{2 \cdot K_c \cdot \min(\text{Re}(\text{FRF}_{orient})) \cdot N_t} \quad (2.9)$$

## Měrný řezný odpor

Měrný řezný odpor, jinak nazývaný specifická řezná síla, je klíčovým parametrem, který je důležitý pro odhad řezných sil. Určuje tím tak náročnost obrábění pro daný materiál, pro konkrétní nástroje při konkrétních řezných podmínkách. Hodnotu měrného řezného odporu lze definovat jako sílu potřebnou pro odebrání třísky o průřezu  $1\text{mm}^2$ . Jednou z možností odhadů specifické řezné síly, je použití Kienzleho vztahu (rovnice 2.10), podle něj by měla měrná řezná síla s rostoucí hloubkou třísky klesat. Parametr  $k_{c1}$  je

nominální měrný řezný odpor,  $h_m$  je střední tloušťka třísky a  $m_c$  je Kienzlův exponent. Hodnoty  $k_{c1}$  a  $m_c$  jsou dostupné v katalozích předních výrobců nástrojů. [12]

$$Kc = kc1 \cdot h_m^{-m} \quad (2.10)$$

### 2.3.2 Zkoušky využití výkonu

Výkonové zkoušky testují, zda konstrukce stroje dokáže do řezného procesu přenést instalovaný výkon vřetena, a přitom stabilně obrábět. Špatná konstrukce stroje způsobí to, že i při lehkých řezných podmínkách bude docházet k nestabilnímu obrábění (chatteru). [14]

Je důležité rozeznávat výkonové zkoušky strojů od technologických testů výkonnosti. Cílem výkonových zkoušek strojů je zjistit limity konstrukce stroje narozdíl od technologických testů, kde je cílem maximalizovat produktivitu, která je daná objemem odebíraného materiálu za jednotku času, kde limity konstrukce stroje jsou již známy. [14]

Zkoušky se provádí tak, že pro zvolené polohy stroje se pro daný nástroj a řezné podmínky stanoví jeden parametr, který se bude měnit. Tento řezný parametr se krokově zvětšuje, nejčastěji to je axiální hloubka řezu  $a_p$ . Následně se zvolí řezné parametry, které jsou obvykle neměnné. Volbou zbývajících řezných parametrů je snaha dostat se do oblasti nestability ještě před využitím celého instalovaného výkonu vřetena. Při použití vysoké řezné rychlosti  $v_c$  může dojít k tomu, že bude plně využit výkon stroje, aniž by došlo ke chvění, proto se pro zkoušky volí spíše nižší řezná rychlost  $v_c$ . S rostoucím posuvem se zvyšuje i sklon k chvění, proto se běžně volí spíše vyšší hodnoty posuvu na zub  $f_z$ .

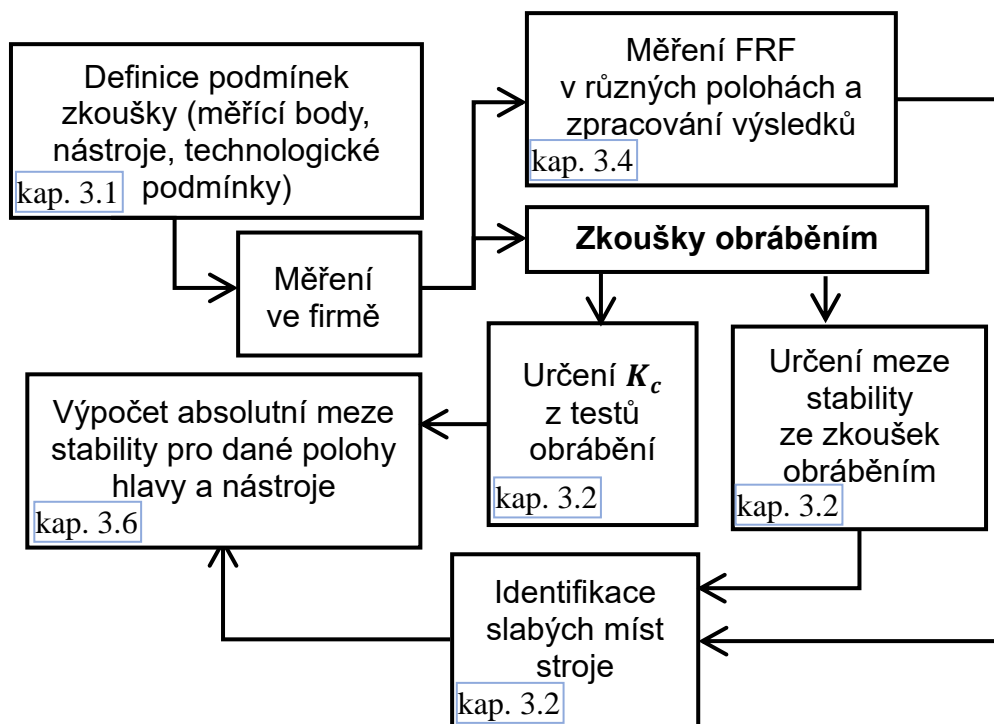
Po zvolení měřících bodů a řezných podmínek se proměnný postupně zvětšuje, dokud se neprojeví vibrace a proces bude nestabilní. Poslední hodnota řezného parametru, kde byl řezný proces ještě stabilní, se zaznamenává s odpovídající hodnotou využitého výkonu. Tento postup se opakuje pro všechny měřené polohy stroje. [15]

## 3 Měření a vyhodnocení zkoušek stroje

Tato část diplomové práce se zabývá popisem a vyhodnocením výkonové zkoušky na stroji. Výkonové zkoušky obráběním a měření dynamické poddajnosti proběhlo ve dnech 31.ledna a 1. února 2022 ve společnosti TOS Varnsdorf. Měření bylo provedeno s pracovníky RCMT ČVUT, s panem docentem Kolářem a panem doktorem Janotou ve spolupráci s pracovníky TOS Varnsdorf.

### 3.1 Postup měření

V této kapitole je popsán postup zkoušek a jakým způsobem byly výsledky vyhodnoceny, dále pak měřený stroj, nástroje, materiál, měřidla a přístroje, které byly použité během měření. V poslední řadě jsou zde shrnuty výsledky z měření.

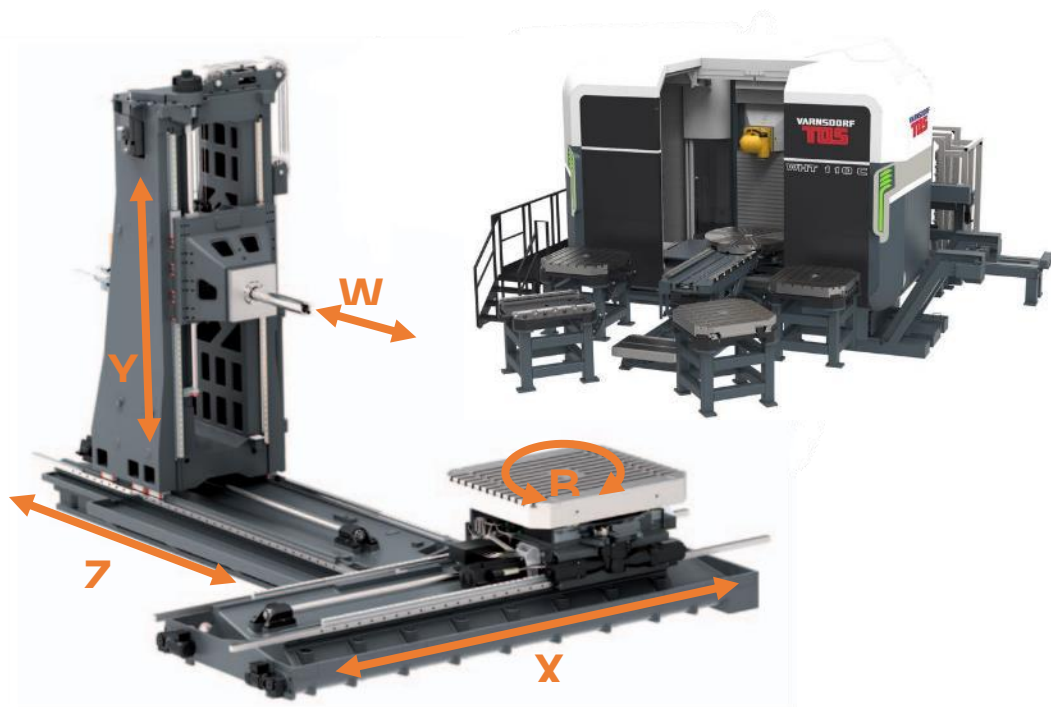


Obrázek 3.1 – Postup měření a vyhodnocení



### 3.1.1 Horizontální obráběcí centrum WHT110C

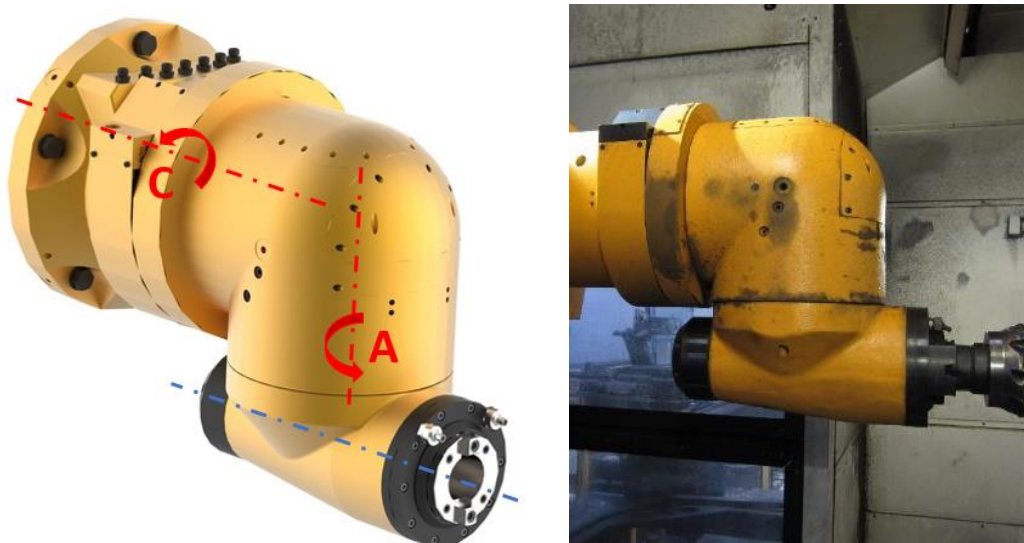
Samostatné měření probíhalo v TOS Varnsdorf a.s. na horizontálním obráběcím centru WHT110C (obrázek 3.2), které je ve výrobním programu samotné společnosti. Jedná se o vyvrtávací stroj s uspořádáním loží do tvaru T s příčně přestavitelným otočným stolem, resp. paletou. Výsuvné vřeteno stroje disponuje výkonem 31 kW a maximálními otáčkami 6000 ot/min. [30]



Obrázek 3.2 – Frézovací centrum WHT110C [30]

### 3.1.2 Vřetenová hlava HOIL50

Na vřeteník stroje byla připevněna frézovací hlava HOIL50. Jde o ortogonální automaticky indexovanou hlavu, která je složena ze tří částí s možností jejich vzájemného natáčení v osách A a C. Hlava je navržena na maximální přenášený výkon 25 kW s maximálními přípustnými otáčkami 3500 ot/min. Frézovací hlavu je možné polohovat v obou osách po  $1^\circ$  pomocí Hirthova ozubení. Hlava je zobrazena na obrázku 3.3. [31]



Obrázek 3.3 – Vřetenová hlava HOIL 50 [31]

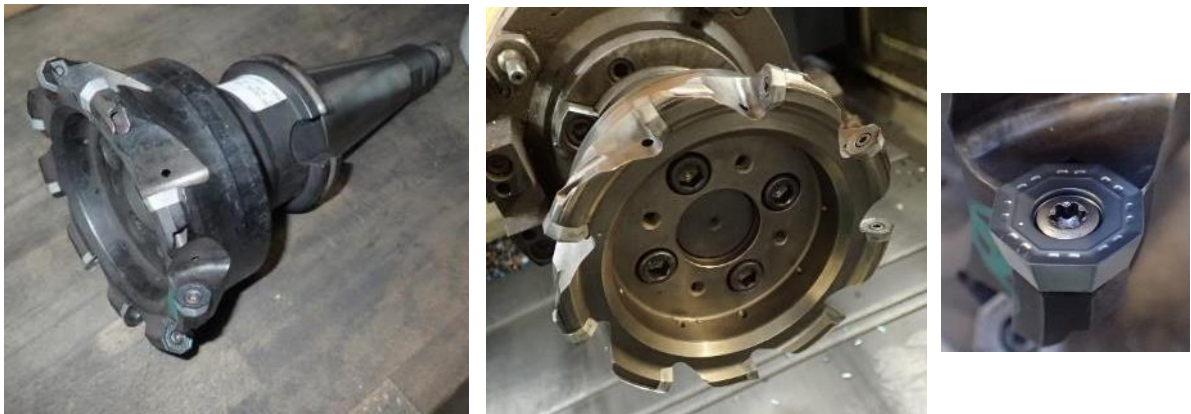
### 3.1.3 Použité nástroje

Pro měření byly použité „obvyklé nástroje“ TOS Varnsdorf, se kterými zkušební technici firmy provádí standardní zkoušky. Jedná se o nástroje určené pro rozdílné pracovní operace, které obsáhnou co nejširší technologické spektrum, se kterým lze na stroji pracovat. Jednotlivé nástroje byly vybírány tak, aby odpovídaly jednak nejčastějším způsobům použití stroje a jednak aby to byly případy, které jsou významné z hlediska kmitání.

## Fréza D160/Z9

První operací bylo čelní frézování s frézou o průměru 160 mm s 9 zuby, kterou lze vidět na obrázku 3.4. Na nástroji byly použity vyměnitelné břitové destičky Walter, oktagonálního tvaru s pozitivní geometrií. Parametry nástroje jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 – Parametry frézy D160/Z9

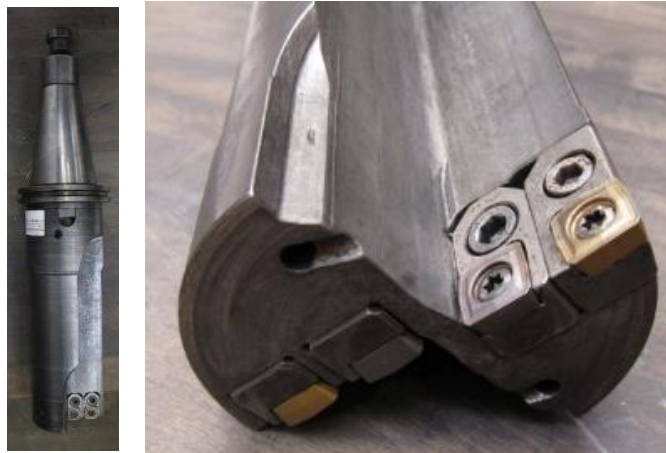


Obrázek 3.4 – Fréza D160/Z3

Čelní fréza D160/Z9		
Průměr	D [mm]	160
Počet zubů	Z [-]	9
Hmotnost	m [kg]	9,8
Vyložení nástroje	l [mm]	133
VBD	Walter ODHT0605ZZN-F57 WSP45S	

## Vrták D78/Z1

Druhým testovaným nástrojem byl vrták o průměru 78 mm s jedním zubem, který je určen pro vrtání děr. Na nástroji byly nasezeny dva páry vyměnitelných břitových destiček, taktéž od firmy Walter, které se liší pouze rozdílným povlakem. Parametry nástroje jsou uvedeny v tabulce 3.2.



Obrázek 3.5 – Fréza D78/Z1

Tabulka 3.2 - Parametry frézy D78/Z1

Fréza D78/Z1		
Průměr	D [mm]	78
Počet zubů	Z [-]	1
Hmotnost	m [kg]	8
Vyložení nástroje	l [mm]	250
VBD	vnitřní pár: P2841S-5N-E57 WXP40 vnější pár: P28475-5 WTP35	

### Fréza D80/Z3

Třetí testovanou operací bylo frézování ze spodní strany dílce s ježkovou frézou Walter, kterou lze vidět na obrázku 3.6. Jedná se o frézu s průměrem 80 mm s 3 zuby. Jedná se taktéž o nástroj s vyměnitelnými břitovými destičkami. Čelní VBD jsou kosočtvercového tvaru a obvodové čtvercového, stejně jako u čelní frézy jde o VBD s pozitivní geometrií.

Tabulka 3.3 - Fréza D80/Z3

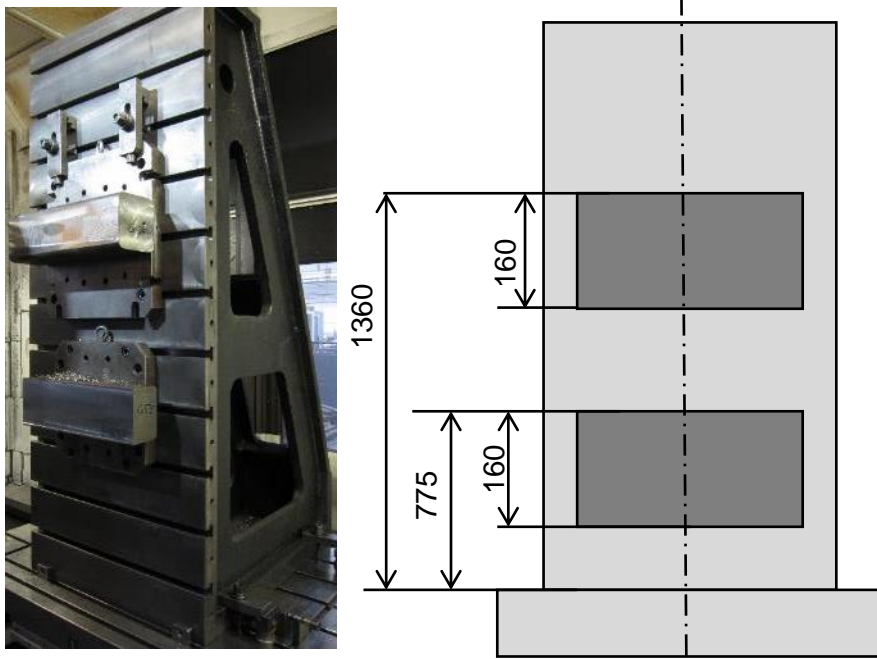
Ježková fréza D80/Z3 (Walter F2238.B.080.Z03.67)		
Průměr	D [mm]	80
Počet zubů	Z [-]	3
Hmotnost	m [kg]	6
VBD	čelní: LPMT150412R-D51 WKP35S obvodové: SPMT120408-D51 WKP35S	



Obrázek 3.6 – Fréza D80/Z3

### 3.1.4 Obrobek

Pro výkonové obráběcí zkoušky byla použita uhlíková ocel 12 050. Bloky oceli byly upevněny na upínacím úhelníku ve dvou různých polohách osy Y. Připevnění bloků lze vidět na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7 – Upnutý obráběný materiál na úhelníku

## 3.2 Výkonové zkoušky

### 3.2.1 Popis postupu měření a vyhodnocení dat

Každý nástroj měl zadané výchozí řezné a záběrové podmínky. Obrábělo se s polohou hlavy A0C0. U každého nástroje byly měněny parametry, které zvyšovaly silové zatížení stroje:

- Pro čelní frézu D160/Z9 se zvyšovalo axiální hloubka záběru  $a_p$
- Pro vrták D78/Z1 se zvyšoval posuv na otáčku  $f_o$
- Pro ježkovou frézu D80/Z3 se zvyšovala radiální šířka záběru  $a_e$

Ve většině případech zkouška obráběním probíhala tak, že se nejprve nastavila jedna řezná rychlost  $v_c$  a postupně se zvyšoval parametr typický pro daný nástroj ( $a_p$ ,  $f_o$ ,  $a_e$ ), dokud se nedosáhlo meze stability. Po dosažení meze stability se zvýšila řezná rychlost  $v_c$  a postup se opakoval zvyšováním typického parametru pro nástroj.

Během zkoušek se pozoroval stav vyměnitelných břitových destiček a jejich otupení, které by mohlo ovlivňovat silové zatížení stroje a tím i stabilitu řezu a zároveň vyhodnocování měrné řezné síly. Na obrázek 3.8 lze vidět rychlý souhrn nástrojů a řezných parametrů pro dané operace.

**Fréza D160/Z9,**  
čelní frézování  
vřeteník Y nahoře a dole;  
 $v_c = 150-256$  m/min,  
 $f_z = 0,349$  mm,  
 $a_e = 105, 55$  mm,  
**proměnlivé  $a_p$ .**



**Vrták D78/Z1,**  
vrtání v ose Z  
polohy hlavy A0C0 a  
A0C90,  
vřeteník Y nahoře a dole;  
 $v_c = 100-120$  m/min,  
**proměnlivý posuv  $f_o$ .**

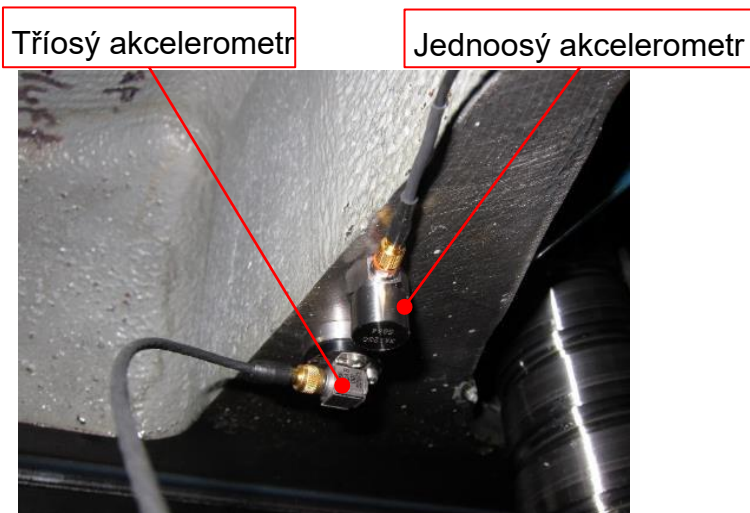


**Fréza ježková D80/Z3,**  
frézování boční plochy,  
vřeteník Y nahoře a dole;  
 $v_c = 118-168$  m/min,  
 $f_z = 0,2$  mm,  
 $a_p = 40$  mm,  
**proměnlivé  $a_e$ .**

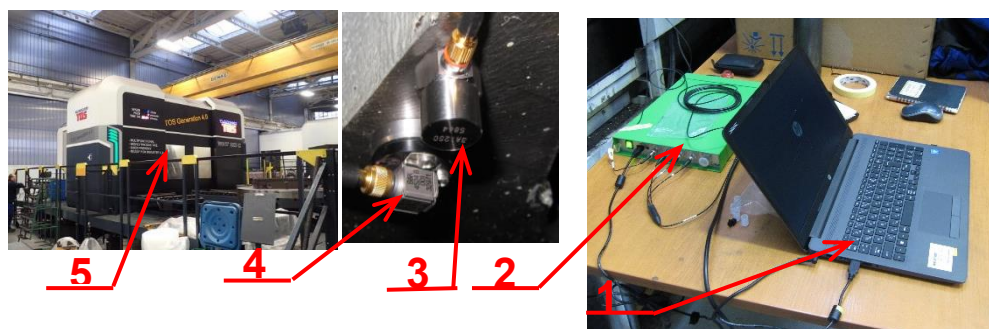


Obrázek 3.8 – Přehled použitých nástrojů a operací

Záměrem testů bylo sledovat při jakých řezných podmínkách stroj dosáhne meze stability a dostane se do zóny samobuzeného kmitání. Běžně je snadné rozpoznat přechod meze stability. Vzniká charakteristický zvuk a na obráběném povrchu se objeví typické stopy. Abychom obdrželi úplné informace o vibracích, byly pod vřeteník umístěny pomocí magnetů jednoosý a tříosý akcelerometr (viz obrázek 3.9). Zároveň při obrábění byl pomocí řídicího systému zaznamenáván výkon na vřetení a polohy pohybových os. Aparaturu pro měření vibrací lze vidět na obrázku 3.10.



Obrázek 3.9 – Umístění akcelerometrů



Číslo	Název	Výrobce	Typ	S/N	Kanál
1	Notebook	DELL	E6530	9XKGLX1	-
2	Analyzátor	NI	NI USB-9162	146D6E0	Dev1
3	Jednoosý akcelerometr	Brüel&Kjaer	4524 B1	4524 B1	Dev1/ai1
4	Tříosý akcelerometr	Brüel&Kjaer	4524 B1	4524 B1	Dev1/ai2
					Dev1/ai3
					Dev1/ai4
5	Obráběcí centrum	TOS VARNSDORF	WHT110C	101	-

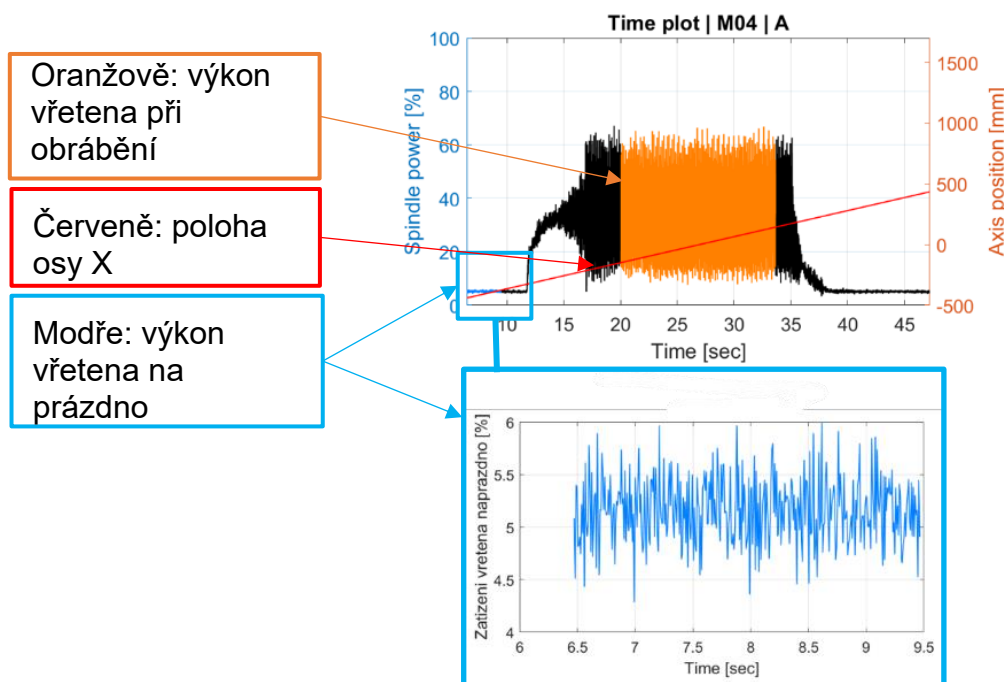
Obrázek 3.10 – Aparatura pro měření vibrací pod vřeteníkem

## Zpracování dat z řídicího systému stroje

Během obrábění řídicí systém stroje s pomocí interního osciloskopu zaznamenával čas [sec], výkon na vřetení [kW], otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ] a polohy pohybových os X, Y, Z [mm]. Data jsou zaznamenána s vzorkovací frekvencí 500 Hz, tzn. s periodou 0,002 s. Tato zaznamenaná data slouží především k vypočítání reálného měrného řezného odporu pro dané operace a nástroje. Tato hodnota měrného řezného odporu bude použita pro výpočet absolutní meze stability obrábění. Měrná řezná síla byla dopočítána podle následujícího vzorečku 3.1.

$$K_C = \frac{P}{MRR} \text{ [MPa]} \quad (3.1)$$

Kde P je průměr zaznamenaného řezného výkonu. Tento řezný výkon lze určit tak, že se měří výkon naprázdno, za stejných podmínek jako při obrábění, který eliminuje ztráty vřetene, následně se tento výkon naprázdno odečte od výkonu změřeného při obrábění (viz obrázek 3.11). Přitom se dosazují průměrné hodnoty. MRR je zkratka z anglického výrazu Metal Removal Rate, neboli množství odebraného materiálu za jednotku času.



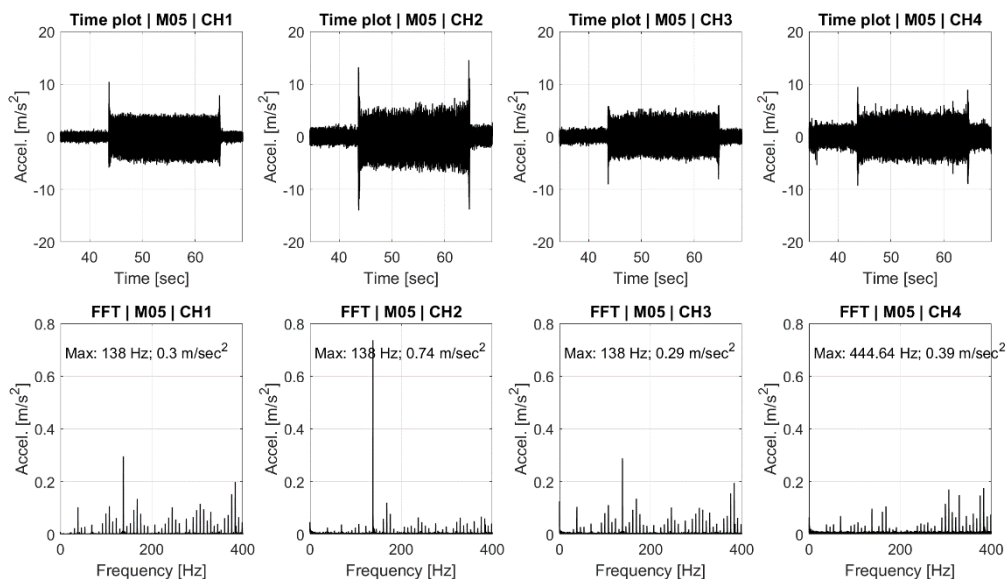
Obrázek 3.11 – Zpracování dat z řídicího systému



Jako vedlejší informace byla vykreslena frekvenční spektra z časového signálu. V tom případě se jednalo pouze o postranní informaci, zásadní údaje o vibraci stroje byly měřeny pomocí akcelerometrů umístěných pod vřeteníkem.

## Zpracování dat z akcelerometrů

Klíčové informace o vibracích vznikajících během obrábění byly zaznamenávány z akcelerometrů pod vřeteníkem. Z tříosého akcelerometru se zaznamenávaly všechny směry X, Y a Z v souřadném systému stroje, jednoosý akcelerometr sbíral data ve směru Y. Z časových záznamů bylo pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) vytvořeno spektrum (viz obrázek 3.12). Ke grafům ve frekvenčním spektru byly vypsány maximální amplitudy vibrací a jejich frekvence. S těmito údaji z akcelerometrů, spolu se zaregistrovaným obrobeným povrchem, byly získány všechny potřebné informace pro posouzení stability.

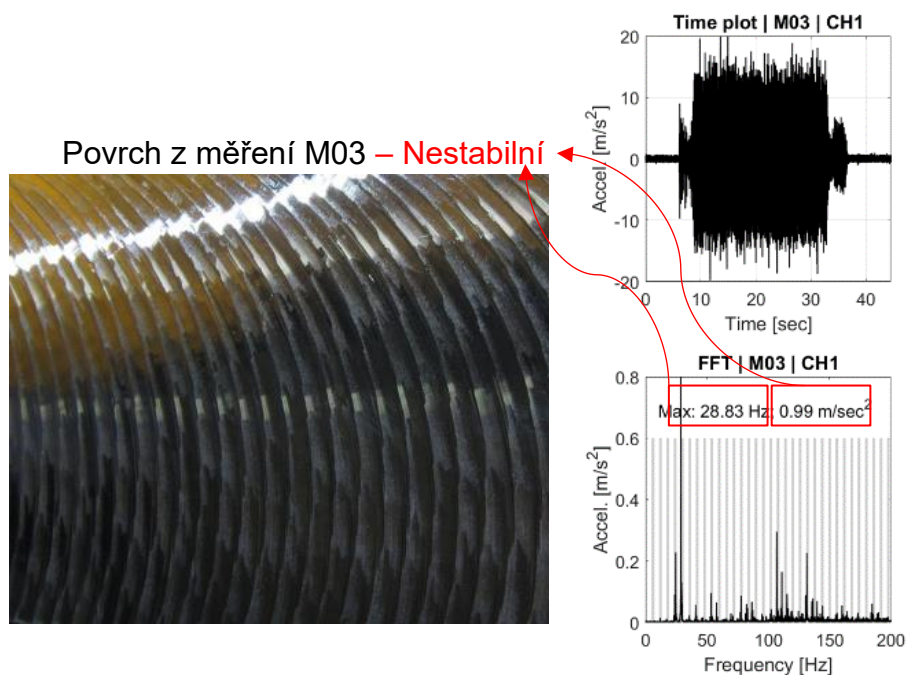


Obrázek 3.12 – Časové záznamy a frekvenční spektra z akcelerometrů

Vyhodnocení nestabilit řezného procesu byly posuzovány podle tří hlavních kritérií:

- 1) Frekvence s nejvyšší amplitudou – pokud není celistvým násobkem otáčkové frekvence
- 2) Celková amplituda vibrací - podezřelé jsou vibrace a amplitudou ve spektru vyšší než  $0,6 \text{ m/s}^2$
- 3) Jakosti povrchu (přítomnost chatter marks)

Princip posuzování samobuzených kmitů je vizuálně zobrazen na obrázku 3.13. Dalším ukazatelem chatteru, spolu s posuzovanými hlavními kritérii, bylo subjektivní posouzení hlukového projevu stroje při obrábění.



Obrázek 3.13 – Princip vyhodnocování stability procesu

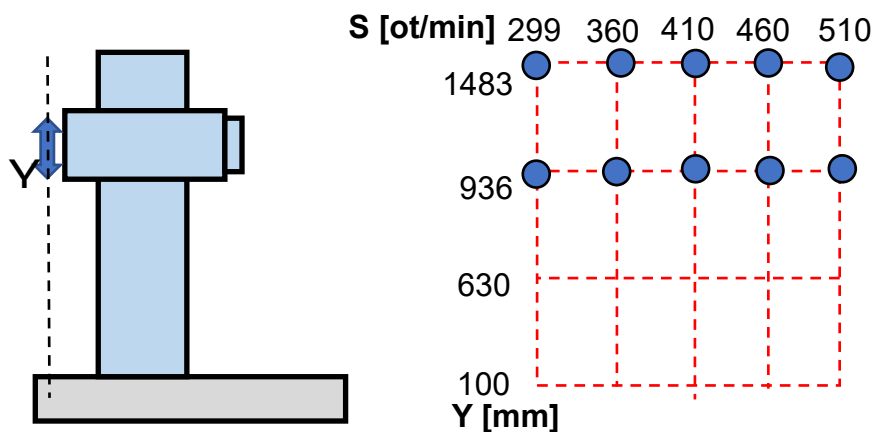
Vyhodnocení zkoušky obráběním je shrnuto v kapitolách níže pro jednotlivé nástroje. Pro všechny použité nástroje a dané řezné podmínky je nejprve vyhodnocen využitý výkon a stabilita procesu, kde se posuzuje schopnost stroje přenést do řezu instalovaný výkon na vřetenu, poté je vyhodnocena měrná řezná síla.

### 3.2.2 Čelní frézování s frézou D160/Z9

Prvním obráběním bylo čelní frézování, které je nejrozšířenějším způsobem frézovací operace. Testována byla čelní fréza o průměru  $D = 160$  mm. Obrábělo se sousledným i nesousledným způsobem a operace byla rozdělena na dvě části, podle radiální šířky záběru  $a_e$ . V první části se obráběla spodní část materiálu, kde radiální šířka záběru byla  $a_e = 105$  mm, což odpovídá 66 % průměru frézy. V druhé části při zpětném pohybu se obráběl zbylý materiál dílce s šířkou záběru  $a_e = 55$  mm.

V tomto případě se zvyšovala axiální hloubka záběru  $a_p$ , při dosažení nestability se snížila axiální hloubka na hodnotu posledního stabilního řezu a dále se zvýšily otáčky vřeten.

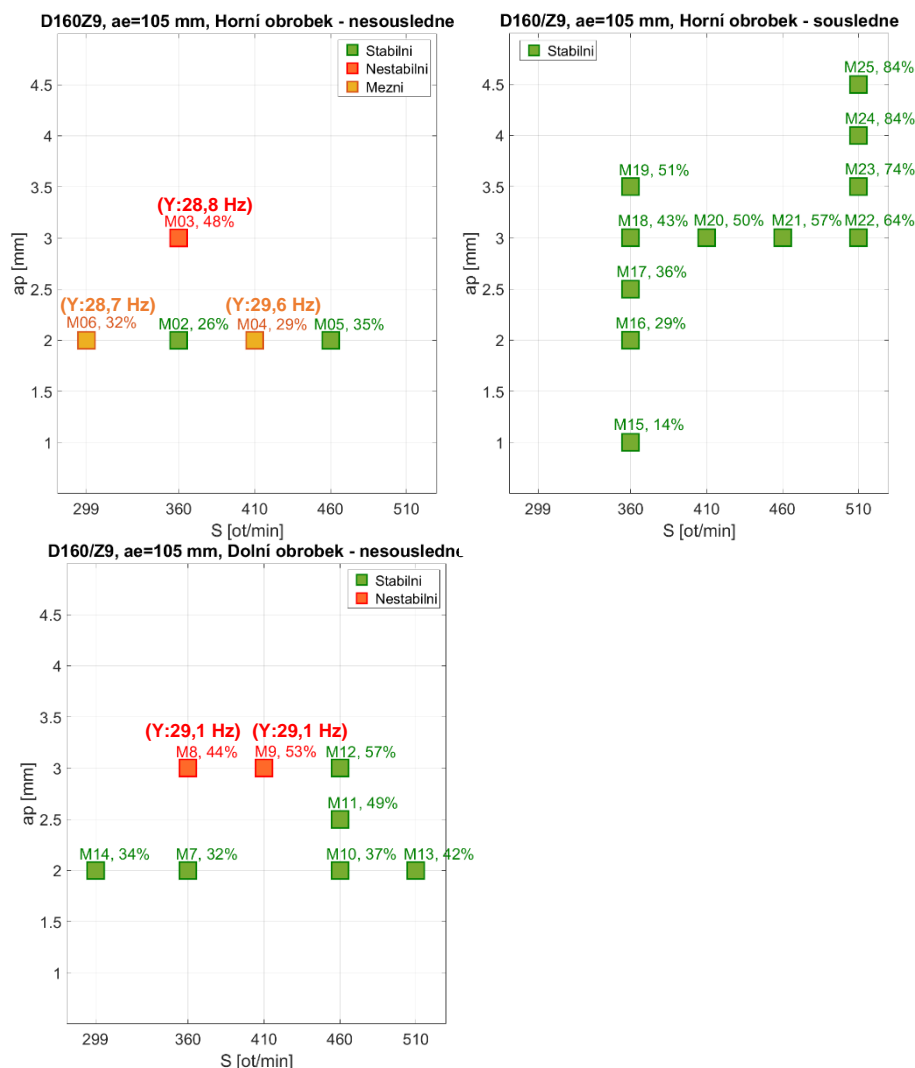
Obrábění probíhalo ve dvou polohách vřeteníku v Y při různých řezných rychlostech. Schéma poloh a řezných rychlostí lze vidět na obrázku 3.14. Síť symbolicky ukazuje, že měření probíhalo ve dvou polohách osy Y a při pěti hodnotách otáček vřeten.



Obrázek 3.14 – Měřící body poloh a řezných rychlostí pro frézu D160/Z3

## Vyhodnocení výkonu – čelní fréza D160/Z9, $a_e = 105$ mm

S čelní frézou se pro dané řezné podmínky využití výkonu pohybovalo mezi 30-80 %. Sousedné frézování s tímto nástrojem se vykazuje mnohem stabilněji než v případě nesousledného frézování, u sousledného záběru se dokonce ani nepodařilo dosáhnout nestability. V následujících grafech (viz obrázku 3.15) lze vidět výsledky stability z měření. Grafy napodobují mapu stability, kde jsou zobrazeny čísla měření včetně procentuálního využití výkonu pro dané operace. Červeně zbarvené buňky značí nestabilní proces, oranžové mezní stav a zelené stabilní obrábění. V závorkách jsou uvedeny frekvence dominantních vibrací spolu se směrem, ve kterém systém nejvíce kmítal.



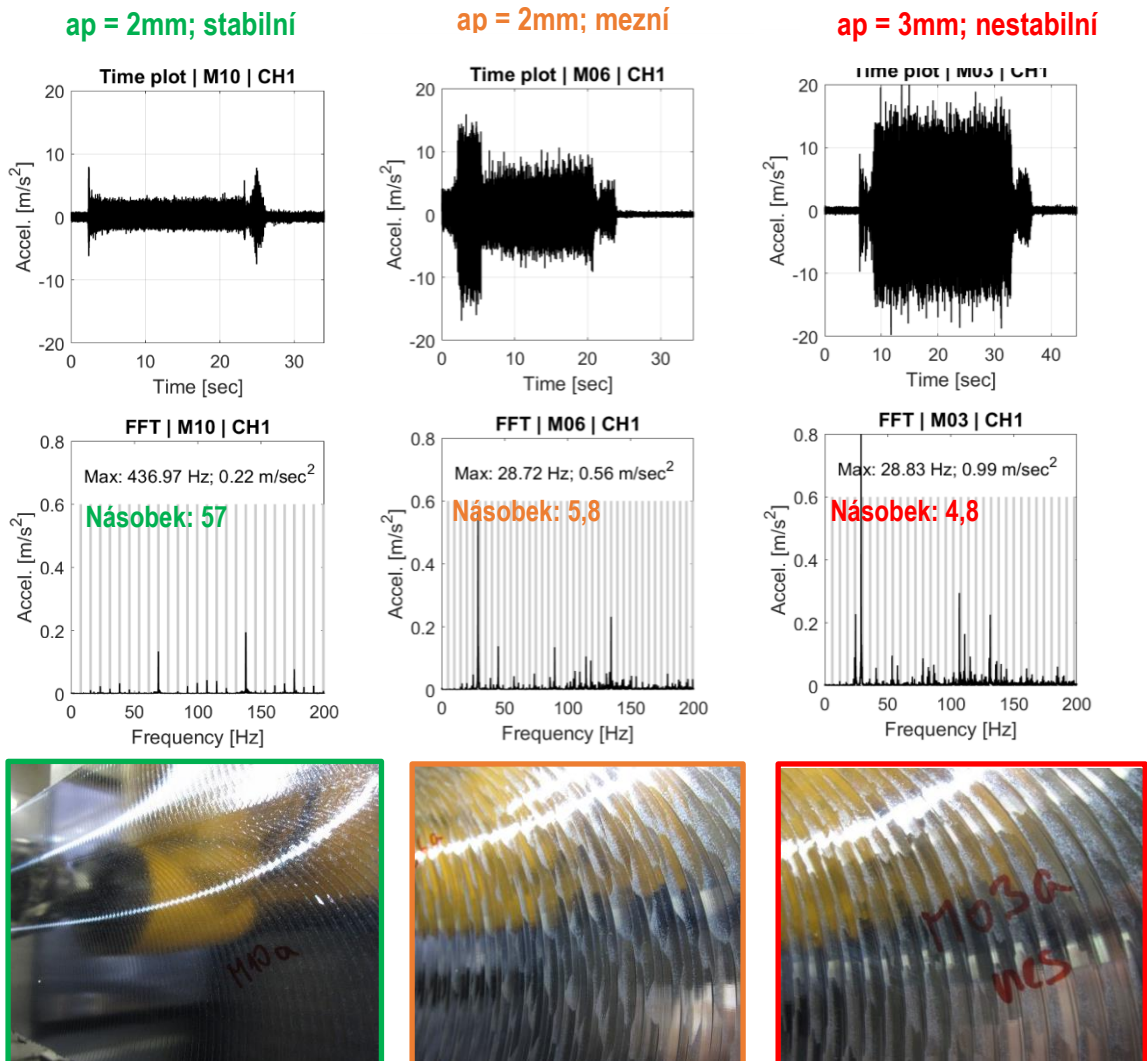
Obrázek 3.15 – Mapa využitého výkonu pro D160/Z9,  $a_e=105$  mm

Na obrázku 3.15 v levém sloupci jsou zobrazeny mapy stability z obrábění s nesousledným záběrem nástroje. U obrábění horního obrobku (vlevo nahoře) ze zvyšování řezné rychlosti lze vypočítat naznačující mezeru mezi „loby“, jako v diagramu stability. Při nesousledném frézování byl proces více náchylný na vibrace při obrábění vrchního obrobku, což by mohlo být způsobeno větší poddajností upínacího úhelníku v horní části.

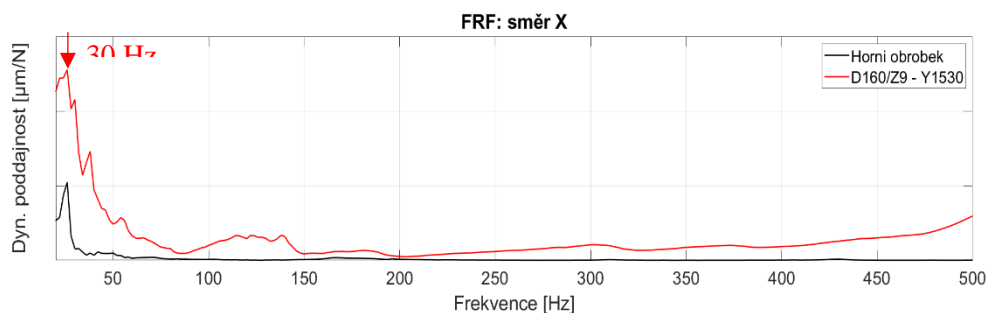
Nesousledné frézování dolního obrobku v poloze vřeteníku lze vidět na obrázek 3.15 vlevo dole, kde se obrábění vykazuje nepatrně stabilnější. Limit stability se zde pohybuje na hloubce třísky 3 mm. Lze také vidět, že zvýšením řezné rychlosti, lze dosáhnout vyšší stability procesu a tím pádem i většího využití instalovaného výkonu.

Na obrázek 3.15 vpravo je znázorněné sousledné frézování, kde při zvyšování axiální hloubky třísky a řezné rychlosti se dosáhlo využít až 84 % výkonu, kde byl při sousledném frézování dosažen limit vyměnitelné břitové destičky, a to při hloubce třísky 4,5 mm. Při dalším zvyšování hloubky třísky by hrozilo vyštípnutí břitu anebo až destrukce nástroje. Dosažení téměř 85 % využití výkonu při stále stabilním procesu se dá považovat jako vynikající výsledek. Mnohem vyšší stabilita při sousledném frézování než při nesousledném frézování, by mohla být způsobena rozdílným působením sil. Řezná síla při nesousledném frézování má složku, která působí směrem ven z obrobku a tím odtažuje obrobek od úhelníku, což mohlo mít za následek rozkmitání systému.

Vizuální porovnání časových záznamů a jejich spekter stabilního, na mezi stability a nestabilního řezného procesu včetně kvality obrobku jsou vidět na obrázku 3.17. Na vrchním řádku jsou časové záznamy kmitání, ze kterých lze vypočítat, že amplituda vibrací při stabilním frézování je nízká oproti nestabilnímu. Ve frekvenčním spektru nestabilního procesu (spodní řádek grafů), není dominantní frekvence celočíselným násobkem otáčkové frekvence. Zároveň lze pozorovat „chatter marks“ na povrchu obrobku, kde již je povrch na mezi stability zvlněný a z hlediska kvality nepřijatelný.



Obrázek 3.17 – Porovnání záznamů kmitání při obrábění s frézou D160/Z9



Obrázek 3.16 – FRF: směr X, porovnání obrobku a nástroje D160/Z9

Nejvyšší amplitudy vibrací při nestabilním procesu se objevovaly na frekvenci okolo 29 Hz, která byla dominantní frekvencí ve všech měřených směrech X, Y a Z. Při porovnání

s naměřenými FRF na nástroji a obrobku (viz obrázek 3.16) je frekvence vibrací 29 Hz velmi blízká poddajné frekvenci jak na nástroji, tak na obrobku ve směru X. Z FRF je patrné, že poddajnost naměřená na nástroji, je přibližně 2x vyšší než poddajnost na obrobku. To ukazuje, že dominantní poddajností v tomto případě by mohla být samotná struktura hlavy a zároveň je možné, že se v menší míře projevila i poddajnost na obrobku.

V tabulce 3.4 jsou shrnuty dílčí výsledky z frézování, tzn. zda obrábění bylo stabilní/mezní/nestabilní při konkrétních rezných podmínkách, a k nim je dále zaznamenána hodnota využitého výkonu. Z tabulky je zřejmé, že při nesousledném frézování byl limit stabilního obrábění na 3 mm hloubky třísky do 410 ot/min, po zvýšení otáček se dosáhlo zvýšení stability.

Tabulka 3.4 – Shrnutí výsledků pro D160/Z9,  $ae=105$  mm

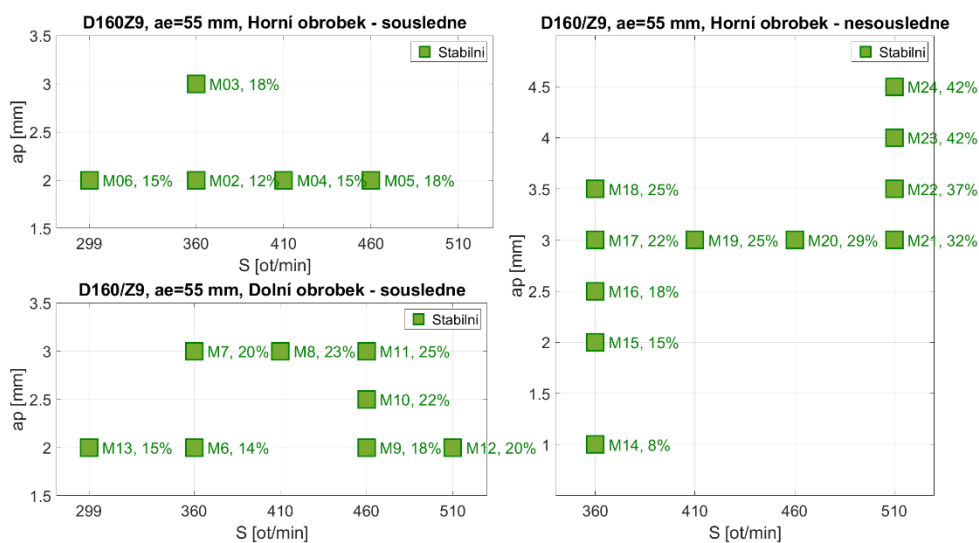
Měření	Y [mm]	S [1/min]	ap [mm]	Záběr	Stabilita	Dominantní frekvence [Hz]	Směr	Násobek ot. frekvence	Výkon [kW]
M06	1483	299	2	NES	Mezní	28,7	Y	5,8	32,12
M14	936	299	2	NES	Stabilní	29,2	X	6	34,28
M02	1500	360	2	NES	Stabilní	108,0	Y	18,0	25,88
M03	1500	360	3	NES	Nestabilní	28,8	Y	4,8	48,14
M07	1100	360	2	NES	Stabilní	108,0	Y	18,0	31,68
M08	1100	360	3	NES	Nestabilní	29,1	Y	4,8	44,43
M15	1500	360	1	SOU	Stabilní	29,0	Y	4,8	13,88
M16	1500	360	2	SOU	Stabilní	108,0	Y	18,0	28,91
M17	1500	360	2,5	SOU	Stabilní	108,0	Y	18,0	36,22
M18	1500	360	3	SOU	Stabilní	108,0	Y	18,0	43,35
M19	1500	360	3,5	SOU	Stabilní	108,0	Y	18,0	50,57
M04	1500	410	2	NES	Mezní	29,6	Y	4,3	29,05
M09	1100	410	3	NES	Nestabilní	29,0	Y	4,2	53,48
M20	1500	410	3	SOU	Stabilní	123,0	Y	18,0	50,26
M05	1500	460	2	NES	Stabilní	138,0	Y	18,0	34,78
M10	1100	460	2	NES	Stabilní	138,0	Y	18,0	37,29
M11	1100	460	2,5	NES	Stabilní	138,0	Y	18,0	49,31
M12	1100	460	3	NES	Stabilní	138,0	Y	18,0	57,39
M21	1500	460	3	SOU	Stabilní	138,0	Y	18,0	56,82
M13	1100	510	2	NES	Stabilní	153,0	Y	18,0	44,43
M22	1500	510	3	SOU	Stabilní	153,0	Y	18,0	63,51
M23	1500	510	3,5	SOU	Stabilní	76,5	Y	9,0	73,99
M24	1500	510	4	SOU	Stabilní	76,5	Y	9,0	84,07
M25	1500	510	4,5	SOU	Stabilní	76,5	Y	9,0	84,36

Rozdíl mezi dosaženými výsledky sousledného a nesousledného frézování je dán rozdílem v záběrových podmínkách, které ovlivňují výslednou orientovanou dyn. poddajnost. Ta je výsledkem skládání poddajnosti, naměřené ve směru X a Y pomocí směrových koeficientů závislých právě na zmíněných záběrových podmínkách.

### Vyhodnocení výkonu – čelní fréza D160/Z9, $a_e = 55$ mm

Při zpětném pohybu nástroje se obráběl zbylý materiál dílce s šířkou záběru  $a_e = 55$  mm. Obrábění s touto šířkou záběru se nevykazovalo pro stroj obzvlášť problematické a všechna měření proběhla bez problému. Proces byl při všech řezných rychlostí a hloubkách třísky stabilní a neprojevil se žádný náznak samobuzených kmitů.

Mapa výkonu z obrábění je zobrazena na obrázku 3.18, kde lze vyzorovat, že maximální využitý výkon je 42 %, kde byl dosažen limit hloubky třísky VBD.



Obrázek 3.18 – Mapa využitého výkonu pro D160/Z9,  $a_e=55$  mm



V tabulce 3.5 jsou shrnuty výsledky z obrábění s  $a_e = 55$  mm, kde je opět zaznamenána stabilita spolu s využitým výkonem pro dané řezné podmínky.

Tabulka 3.5 – Shrnutí výsledků pro D160/Z9,  $a_e=55$  mm

Měření	Y [mm]	S [1/min]	$a_p$ [mm]	Záběr	Stabilita	Dom.frek- vence [Hz]	Směr	Násobek ot. frekvence	Výkon [kW]
M02	1483	360	2	SOU	Stabilní	108	Y	18,0	11,90
M03	1483	360	3	SOU	Stabilní	408	Y	68,0	18,22
M04	1483	410	2	SOU	Stabilní	765,3	X	112,0	15,15
M05	1483	460	2	SOU	Stabilní	138	X	18,0	17,55
M06	1483	299	2	SOU	Stabilní	134,6	X	27,0	15,31
M07	936	360	2	SOU	Stabilní	444	Z	74,0	14,11
M08	936	360	3	SOU	Stabilní	444	Z	74,0	19,79
M09	936	410	3	SOU	Stabilní	123	Y	18,0	22,50
M10	936	460	2	SOU	Stabilní	444,6	Z	58,0	17,71
M11	936	460	2,5	SOU	Stabilní	444,6	Z	58,0	21,60
M12	936	460	3	SOU	Stabilní	138	Y	18,0	25,49
M13	936	510	2	SOU	Stabilní	425	Z	50,0	19,79
M14	1483	299	2	SOU	Stabilní	294	Y	59,0	15,10
M15	1483	360	1	NES	Stabilní	582	Y	97,0	8,33
M16	1483	360	2	NES	Stabilní	636	Z	106,0	15,01
M17	1483	360	2,5	NES	Stabilní	162	X	27,0	18,44
M18	1483	360	3	NES	Stabilní	162	X	27,0	21,94
M19	1483	360	3,5	NES	Stabilní	138	X	23,0	25,24
M20	1483	410	3	NES	Stabilní	123	X	18,0	25,16
M21	1483	460	3	NES	Stabilní	138	X	18,0	29,24
M22	1483	510	3	NES	Stabilní	153	X	18,0	32,05
M23	1483	510	3,5	NES	Stabilní	153	X	18,0	37,00
M24	1483	510	4	NES	Stabilní	153	X	18,0	41,72
M25	1483	510	4,5	NES	Stabilní	153	X	18,0	41,78

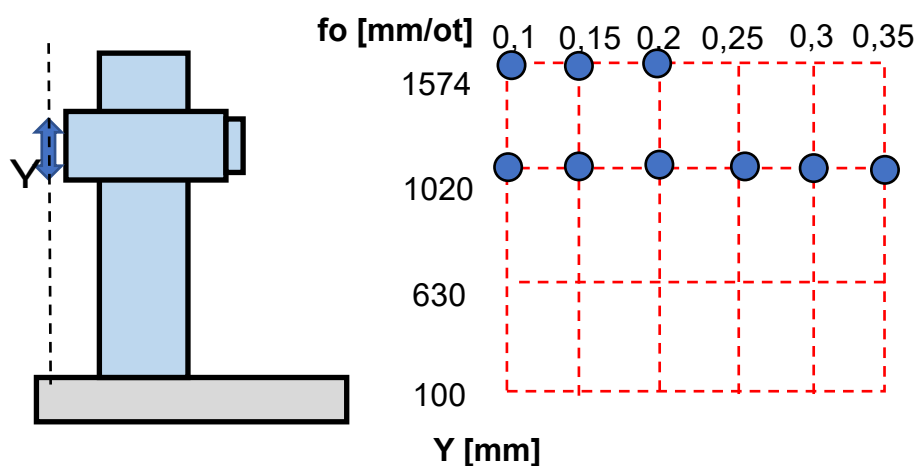
### 3.2.3 Vrtání s D78/Z1

Druhou zkoušenou operací bylo vrtání v ose Z s vrtákem o průměru 78 mm. V tomto případě byla zvolena konstantní řezná rychlost  $v_c$  100 m/min a silové zatěžování stroje se měnilo posuvem na otáčku  $f_o$ . Záběrové podmínky nástroje D78/Z1 pro jednotlivé měření lze vidět v tabulce 3.6.

Obrábění probíhalo opět ve dvou polohách vřeteníku v Y. Schéma poloh a posuvů na otáčku lze vidět na obrázku 3.19. Síť obrazně ukazuje, že měření probíhalo ve dvou polohách osy Y a při šesti hodnotách posuvch na otáčku.

Tabulka 3.6 - Záběrové podmínky pro D78/Z1

Měření	fo[mm/ot]	Y[mm]
M31	0,15	1574
M32	0,15	1020
M33	0,20	1020
M34	0,25	1020
M35	0,30	1020
M36	0,35	1020
M37	0,10	1574
M38 (S490)	0,20	1574
M39(A0C90)	0,10	1574

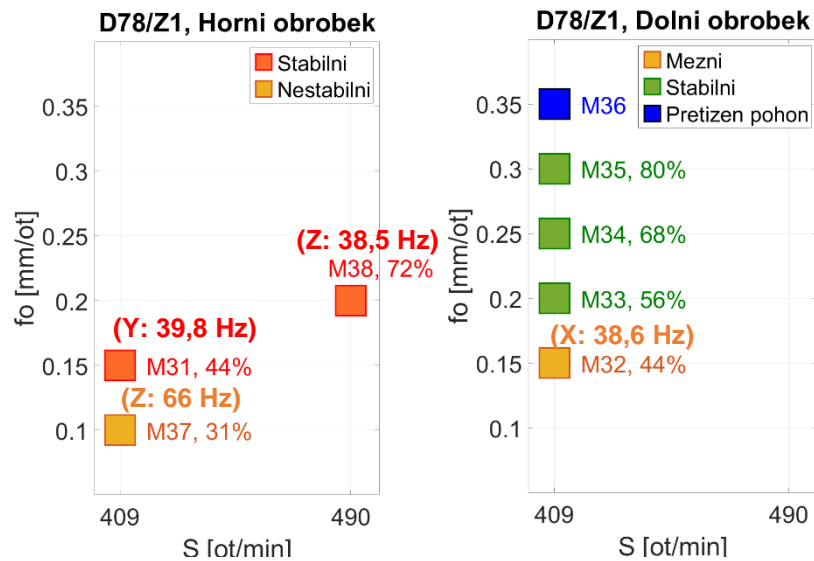


Obrázek 3.19 – Měřící body poloh a posuvy na otáčku pro vrták D78/Z1

### Využití výkonu – vrták D78/Z1

S vrtákem D78/Z1 se pro dané řezné podmínky využití výkonu pohybovalo mezi 30-80%. Při zvyšování posuvu na otáčku se podařilo výkonově přetížít pohon vřeteně. Maximální využitý výkon, kterého bylo dosaženo před přetížením je na 80 %.

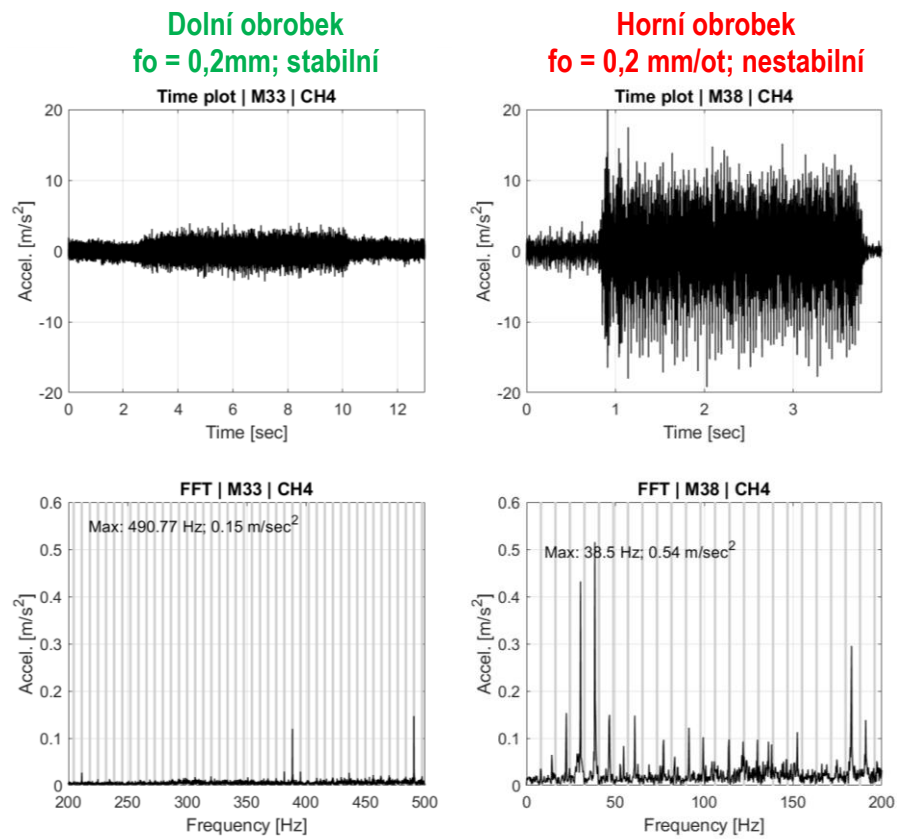
Na obrázku 3.20 vidíme shrnující graf napodobující mapu výkonnosti, kde jsou zobrazeny procentuální využití výkonu pro dané řezné podmínky. V závorkách jsou opět uvedeny frekvence dominantních vibrací v daném směru. Z grafů je patrné, že se na stabilitě výrazněji projevila poloha vřeteníku ve směru Y, kde se v dolní poloze podařilo dosáhnout vyššího posuvu na otáčku, při stále stabilním procesu než v horní poloze.



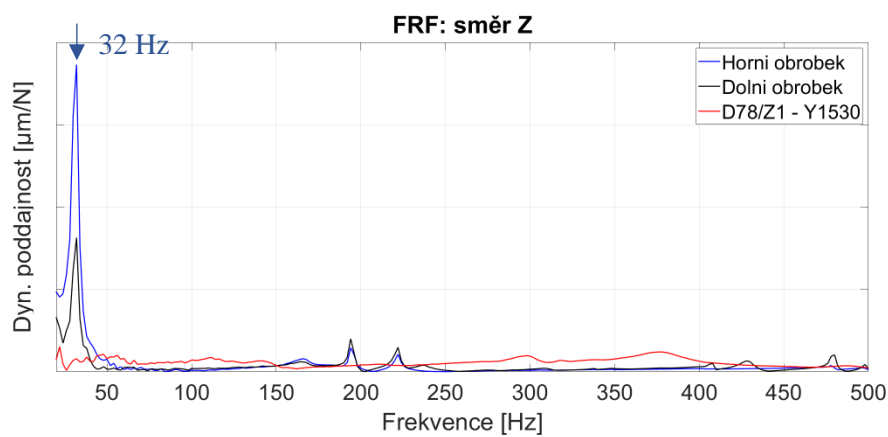
Obrázek 3.20 – Mapa výkonu pro D78/Z1

Obrázek 3.21 znázorňuje rozdílné záznamy kmitání z akcelerometrů pro obrábění dolního a vrchního obrobku ve směru osy Z, který je pro vrtání zásadní. Z časových záznamů je již patrné, že při obrábění vrchního obrobku jsou amplitudy vibrační mnohem vyšší než v případě dolního. Ve frekvenčním spektru (dolní řádek grafů) při obrábění vrchního obrobku byla dominantní frekvence 38,5 Hz, která není celočíselným násobkem otáčkové frekvence.

Porovnáním dynamické poddajnosti obrobku a nástroje ve směru Z (viz obrázek 3.22), je zřejmé, že stroj, i s nasazenou frézovací hlavou, je v tomto směru velmi tuhý v porovnání s obrobkem. Dále lze vidět, že poddajnost horního obrobku je více než 2x větší než dolního a zároveň vlastní frekvence obrobku ve směru Z je 32 Hz, která je velice blízká dominantní frekvenci při obrábění vrchního obrobku. To potvrzuje, že při vrtání je upínací část stroje poddajnou skupinou a závisí na upnutí obrobku v poloze Y, neboť v horní poloze je systém více náchylný k samobuzenému kmitání.



Obrázek 3.21 – Porovnání záznamů kmitání při obrábění s frézou D78/Z1



Obrázek 3.22 – FRF: směr Z, porovnání obrobku a nástroje D78/Z1

V tabulce 3.7 jsou shrnuty výsledky z měření spolu s vyhodnoceným využitým výkonem dílčích operací pro vrták D78/Z1.

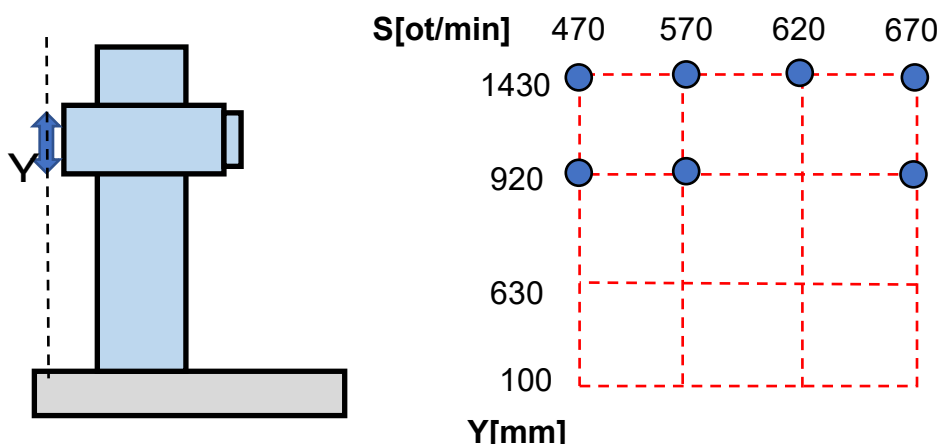
Tabulka 3.7 – Shrnutí výsledků pro D78/Z1

Měření	Y[mm]	fo [mm/ot]	Stabilita	Dominantní frekvence [Hz]	Směr	Násobek ot. frekvence	Výkon [kW]
M37	1574	0,1	Mezní	66,6	Z	9,8	31,0
M31	1574	0,15	Nestabilní	39,8	Y	5,8	44,0
M38(S490)	1574	0,2	Nestabilní	38,5	Z	4,7	72,0
M32	1020	0,15	Mezní	38,6	Z	5,7	44,0
M33	1020	0,2	Stabilní	490	Z	72	56,0
M34	1020	0,25	Stabilní	490	Z	72	68,0
M35	1020	0,3	Stabilní	490	Z	72	80,0
M36	1020	0,35	Přetížení vřetena				
M39(A0C90)	1574	0,1	Mezní	33,2	Y	4,87041565	47,2

### 3.2.4 Frézování s frézou D80/Z3

Frézování ze spodní strany dílce s frézou o průměru 80 mm s 3 zuby probíhalo jako s ostatními nástroji ve 2 polohách vřeteníku v Y. V tomto případě se narozdíl od čelního frézování zvyšovala radiální šířka záběru  $a_e$  a axiální hloubka třísky  $a_p$  byla nastavena jako neměnný parametr na 40 mm. Při dosažení nestability se snížila radiální šířka záběru na hodnotu posledního stabilního řezu a zvýšily se otáčky vřetena.

Obrábělo se sousledným i nesousledným způsobem při různých řezných rychlostech a radiálních hloubkách řezu s cílem najít mez stability. Schéma poloh a otáček lze vidět na obrázku 3.23.

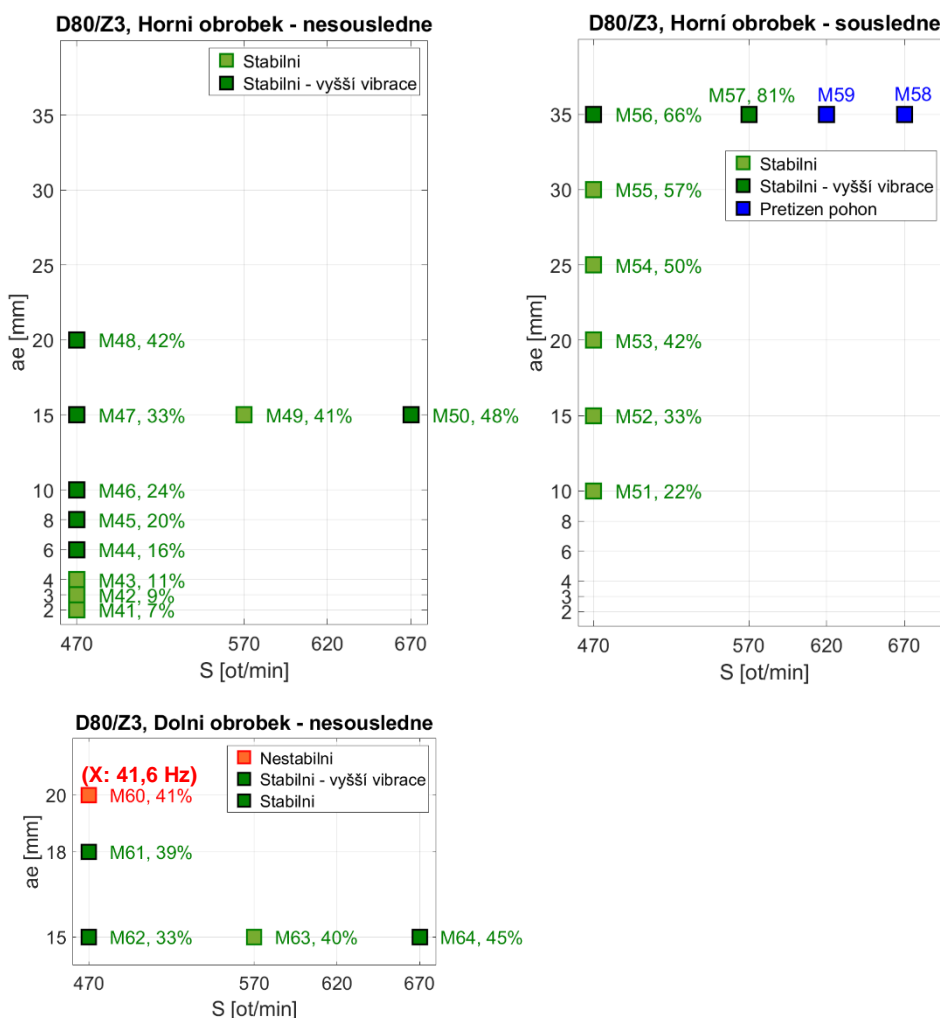


Obrázek 3.23 – Měřící body poloh a řezných rychlostí pro frézu D80//Z3

## Využití výkonu – fréza D80/Z3

Schopnost stroje přenést instalovaný výkon do řezu je s ježkovou frézou opět na velice vysoké úrovni. Při zvyšování řezné rychlosti a radiální šířky záběru se podařilo přetížít pohon vřetene a tím zcela využít instalovaný výkon.

Výsledky z obrábění lze vidět na obrázku 3.24, kde je znázorněna mapa využití výkonu provedených měření pro frézování vrchního i dolního obrobku. Jednotlivé body v grafech jsou označeny číslem měření a využitým výkonem v procentech. V závorkách jsou opět dominantní frekvence vibrací včetně výrazného směru.



Obrázek 3.24 – Mapa výkonu pro D80/Z3

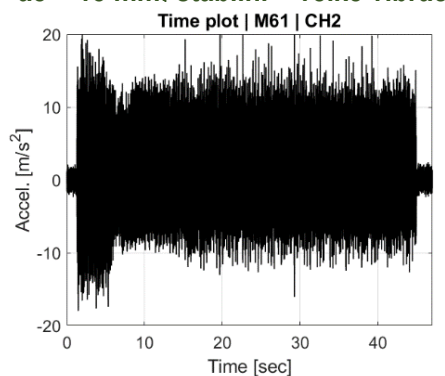
Limitní radiální šířka záběru pro nesousledné frézování byla 20 mm (viz obrázek 3.24 vlevo), kde bylo využito přes 40 % výkonu. V porovnání s čelním frézováním se neobjevovaly náznaky samobuzeného kmitání (kromě jednoho případu).

Při sousledném záběru s ježkovou frézou se obrábělo pouze v horní poloze a nestability se nepodařilo dosáhnout. Využitý výkon pro dané řezné podmínky je zobrazen na obrázku 3.24 vpravo. Zde bylo dosaženo plného využití výkonu, kde se při 620 a 670 ot/min a radiální šířce záběru 35 mm podařilo vřeteno výkonově přetížit. Všechny naměřené dominantní frekvence byly harmonické.

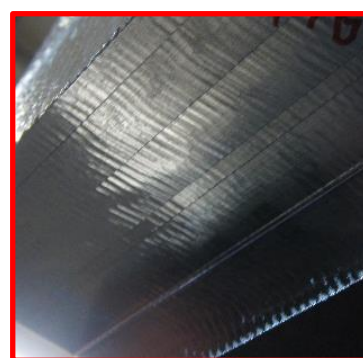
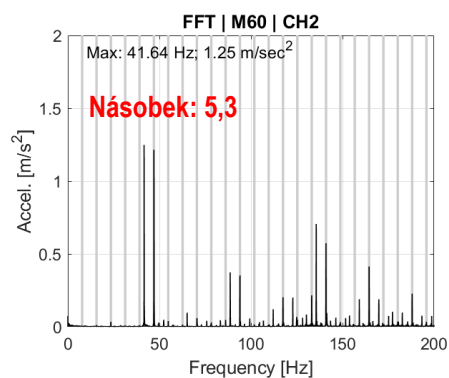
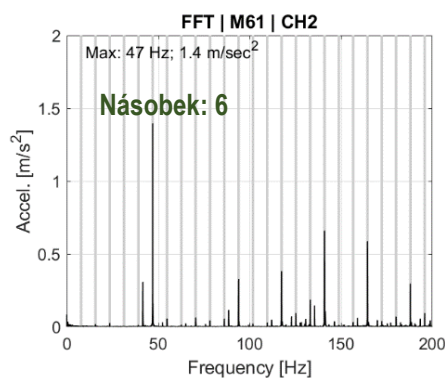
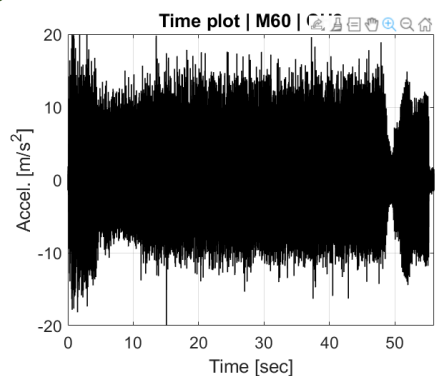
Na obrázku 3.26 je porovnání dvou záznamů z obrábění dolního obrobku nesousledným záběrem nástroje. Časové záznamy v tomto případě mají stejnou vypovídající hodnotu velkých amplitud kmitů. Rozdíl je ve frekvenčním spektru, kde pro nestabilní proces dominantní frekvence není celočíselným násobkem otáčkové frekvence. U zbylých měření se vyskytovaly vyšší amplitudy kmitů s frekvencí přímo úměrnou počtu otáček frézy. V těchto případech nebyl proces považován jako nestabilní, protože se nejednalo o samobuzené kmity, ale o vynucené kmity s velkou amplitudou.

Dominantní frekvence ve směru X 41,6 Hz u nestabilního procesu se neobjevila v naměřených FRF na obrobku, ale je velmi blízká poddajné frekvenci naměřené na konci nástroje, která je 38 Hz (viz obrázek 3.25). Tato frekvence by mohla odpovídat struktuře hlavy, protože na to, aby kmital nástroj, je příliš nízká.

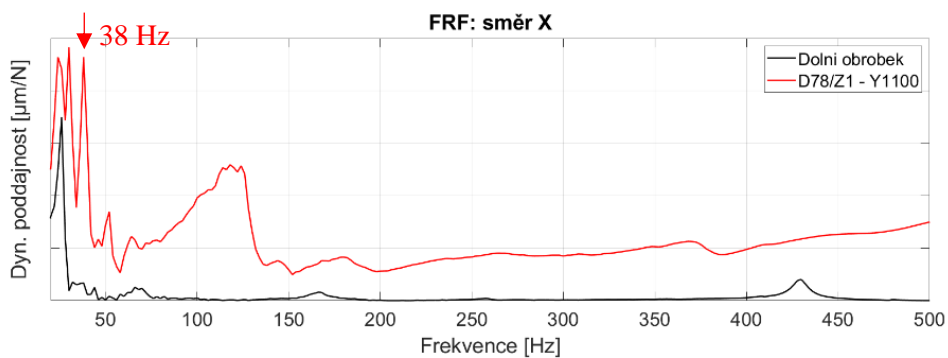
**ae = 18 mm: stabilní – velké vibrace**



**ae = 20 mm: nestabilní**



Obrázek 3.26 – Porovnání záznamů kmitání při obrábění s frézou D80/Z3



Obrázek 3.25 – FRF: směr X, porovnání obrobku a nástroje D80/Z3



Shrnutí výsledků ze zkoušek obrábění včetně posouzení stability procesu a využitého výkonu je v tabulce 3.8.

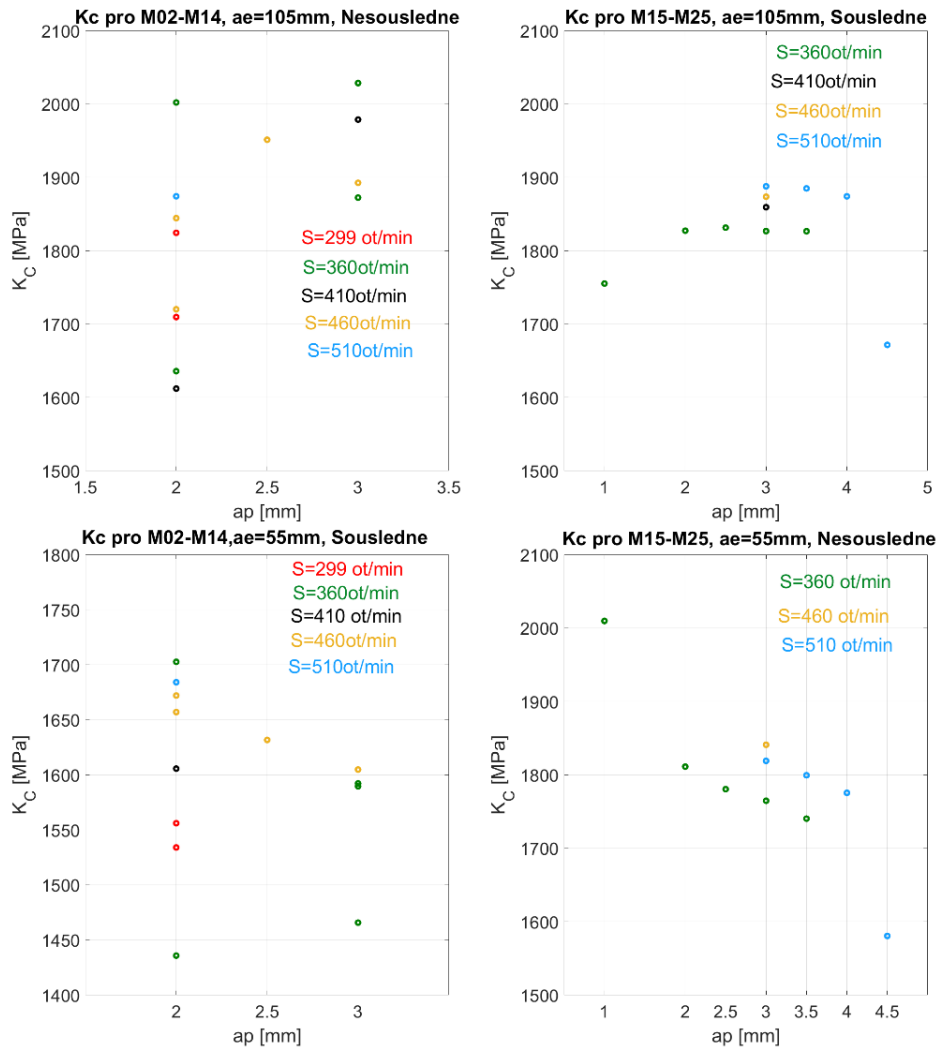
Tabulka 3.8 – Shrnutí výsledků pro D80/Z3

Měření	ae[mm]	Y[mm]	S[1/min]	Záběr	Stabilita	Dominantní frekvence [Hz]	Směr	Násobek ot. frekvence	Výkon [kW]
M41	2	1430	470	NES	stabilní	141,0	X	18,0	6,6
M42	3	1430	470	NES	stabilní	141,0	X	18,0	9,0
M43	4	1430	470	NES	stabilní	141,0	X	18,0	11,2
M44	6	1430	470	NES	stabilní - velké kmity	141,0	X	18,0	15,6
M45	8	1430	470	NES	stabilní - velké kmity	141,0	X	18,0	20,0
M46	10	1430	470	NES	stabilní - velké kmity	141,0	X	18,0	24,1
M47	15	1430	470	NES	stabilní - velké kmity	141,0	X	18,0	33,5
M48	20	1430	470	NES	stabilní - velké kmity	141,0	X	18,0	42,2
M49	15	1430	570	NES	stabilní	57,0	X	6,0	40,7
M50	15	1430	670	NES	stabilní - velké kmity	134,0	X	12,0	47,5
M51	10	1430	470	SOU	stabilní	47,0	Y	6,0	21,5
M52	15	1430	470	SOU	stabilní	47,0	Y	6,0	32,6
M53	20	1430	470	SOU	stabilní	141,0	X	18,0	41,7
M54	25	1430	470	SOU	stabilní	141,0	X	18,0	50,3
M55	30	1430	470	SOU	stabilní	141,0	X	18,0	56,6
M56	35	1430	470	SOU	stabilní - velké kmity	141,0	X	18,0	65,7
M57	35	1430	570	SOU	stabilní - velké kmity	57,0	Y	6,0	80,5
M58	35	1430	670	SOU	přetížení				/
M59	35	1430	620	SOU	přetížení				/
M60	20	920	470	NES	nestabilní	41,6	X	5,3	41,1
M61	18	920	470	NES	mezí	47,0	X	6,0	38,9
M62	15	920	470	NES	stabilní	47,000	Z	6,0	33,4
M63	15	920	570	NES	stabilní	57,0	X	6,0	40,3
M64	15	920	670	NES	stabilní	67,0	X	6,0	45,3

### 3.2.5 Vyhodnocení měrného řezného odporu

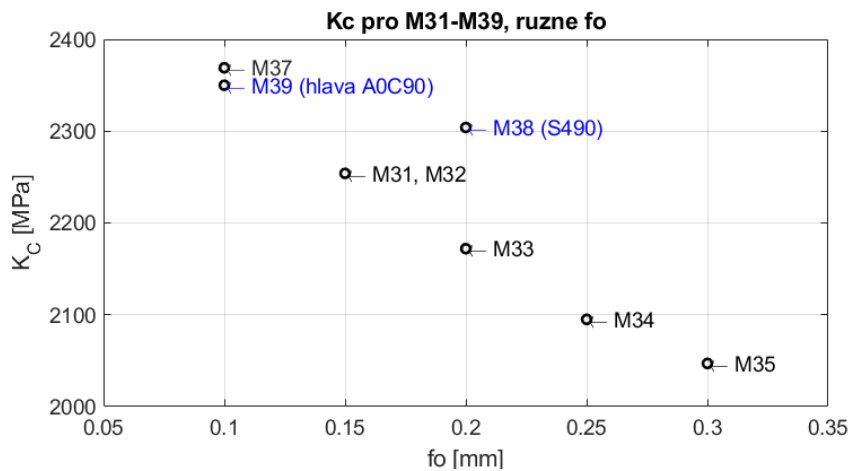
#### Měrný řezný odpor pro frézu D160/Z9

Při frézování s šířkou záběru  $a_e = 105$  mm, vychází hodnota měrného řezného odporu přibližně o 8 % vyšší než s  $a_e = 55$  mm. Hodnoty  $K_c$  se pohybují při stabilním obrábění v rozsahu mezi 1400-2000 MPa. Pro stabilní frézování vychází hodnoty řezného odporu při sousledném záběru nepatrně menší než pro nesousledný záběr. Průběh  $K_c$  pro  $a_e = 105$  mm neodpovídá Kienzleho vztahu (s rostoucí  $a_p$  klesá  $K_c$ ). Z průběhu hodnot (viz obrázek 3.27) při sousledném frézování s  $a_e = 105$  mm lze vidět, že  $K_c$  roste se zvyšováním axiální hloubky třísky, zároveň roste se zvyšováním řezné rychlosti a při stejné řezné rychlosti stagnuje. Rozdílný je však průběh  $K_c$  s  $a_e = 55$  mm, který odpovídá Kienzleho vztahu (s rostoucím  $a_p$  klesá  $K_c$ ).


 Obrázek 3.27 – Průběh  $K_c$  pro D160/Z9

## Měrný řezný odpor – fréza D78/Z1

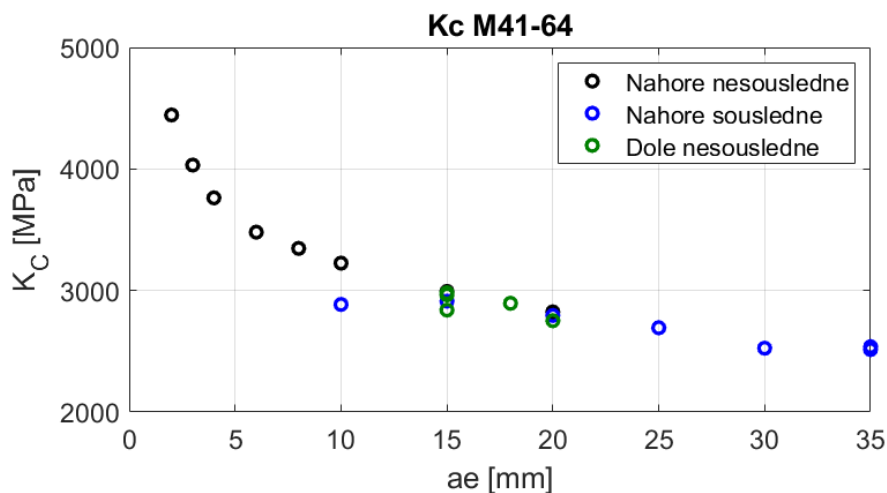
Pro vrtání s frézou D78/Z1 se měrný řezný odpor  $K_c$  pohybuje mezi 2000-2350 MPa. S rostoucím posuvem na otáčku  $f_o$  klesá měrný řezný odpor, což potvrzuje popsanou teorii (Kienzleho vztah), že s rostoucí hloubkou třísky klesá řezný odpor. Hodnoty  $K_c$  prakticky kopírují hodnoty naměřené z předchozího roku. To ukazuje na spolehlivost a dobrou opakovatelnost metody vyhodnocování měrného řezného odporu z výkonu měřeného na vřetení. Průběh  $K_c$  lze vidět na obrázku 3.28.



Obrázek 3.28 – Vyhodnocení  $K_c$  pro D78/Z1

### Měrný řezný odpor pro frézu D80/Z3

Měrný řezný odpor pro ježkovou frézu se v závislosti na radiální šířce záběru pohybuje mezi 2500-4500 MPa. Graf získaných hodnot (viz obrázek 3.29), ukazuje velice podobnou závislost  $K_c$  jako při vrtání s frézou D78/Z1 neboli to, že velikost  $K_c$  je závislá na radiální hloubce záběru a při jejím zvětšování klesá, což odpovídá Kienzleho vztahu. Pro sousledné frézování vychází hodnoty  $K_c$  mírně nižší než v případě nesousledného. Vedle vlivu tloušťky odřezávané vrstvy se zde nepatrně projevil vliv řezné rychlosti, kdy s jejím zvyšováním mírně klesal  $K_c$ . Vyšší hodnoty měrného řezného odporu jsou způsobené geometrií VBD, která má malý úhel čela, a tím pádem se zvětšuje tření třísky odcházející po čele nástroje a současně se zvětšuje řezný odpor materiálu.



Obrázek 3.29 – Vyhodnocení  $K_c$  pro D80/Z3

### 3.3 Závěr z výkonových testů stroje

Výsledky ze zkoušek obráběním jsou velice dobré. Stroj s nasazenou hlavou dokázal při stabilním obrábění přenést do řezu téměř celý instalovaný výkon. S danými nástroji a řeznými operacemi se dokázalo využít přes 80 % výkonu instalovaného na vřetení. Využití výkonu vřetená bylo dosaženo díky zvyšování hloubky řezu a řezné rychlosti.

Při nesousledném frézování bylo dosaženo nižší stability než při sousledném. U sousledného frézování se nepodařilo nestabilitu dosáhnout, větší amplitudy kmitů se objevovaly pouze na násobcích otáčkové frekvence a tyto případy nebyly posuzovány jako chatter. Byl identifikovaný řezný odpor  $K_c$  pro konkrétní nástroje a řezné podmínky.

Jako nejslabší část systému se občasně vykazuje upínací úhelník. Při nestabilním obrábění se mnohdy objevila dominantní frekvence okolo 30 Hz, která je blízko k vlastní frekvenci úhelníku. To ukazuje na to, že upínací úhelník, umístěný na otočném stole, může omezovat výkonnost stroje.

Při zvýšeném chvění stroje se dominantní frekvence nejčastěji objevovaly na nižších hodnotách mezi 30–160 Hz, které by mohly odpovídat struktuře hlavy nebo obrobku.

Na obrázku 3.30 jsou shrnuty testované operace s uvedenými prvky, které byly příčinou nestability.



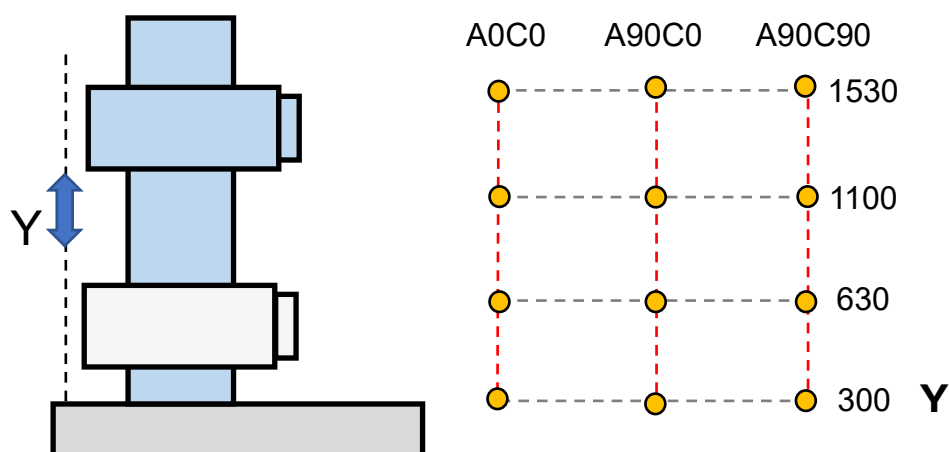
Obrázek 3.30 – Zkoušky obráběním – testované operace

## 3.4 Měření dynamické poddajnosti

Provedené měření dynamické poddajnosti bylo za účelem získání dat pro výkonové testy stroje.

### 3.4.1 Průběh měření

Měření probíhalo na předem určené síti poloh viz obrázek 3.31. Dynamická poddajnost se měřila na konci daného nástroje ve čtyřech různých polohách vřeteníku ve směru osy Y a v každé této pozici se změřily tři polohy frézovací hlavy, kde byly jednotlivé části frézovací hlavy natočeny o  $90^\circ$ , konkrétně to byly polohy A0C0, A90C0 a A90C90 (viz obrázek 3.32).

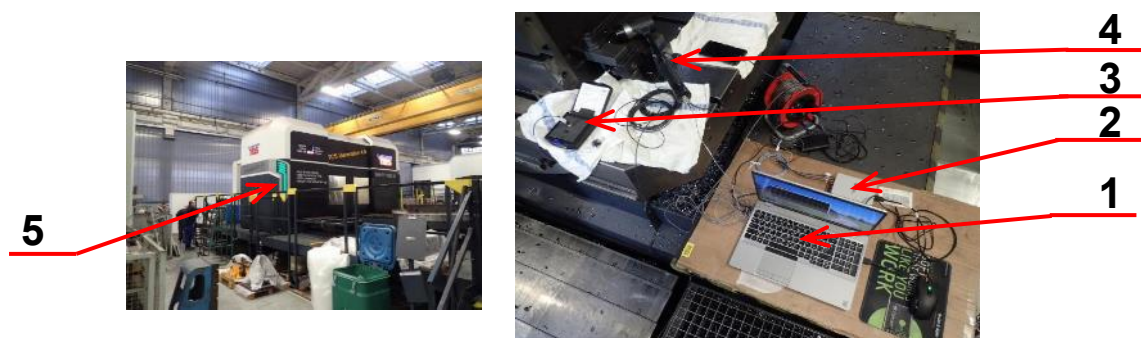


Obrázek 3.31 – Polohy měřených FRF



Obrázek 3.32 – Polohy vřetenové hlavy pro měření FRF

Měřicí aparatura je včetně jejího zapojení zobrazena na obrázku 3.33. Buzení bylo prováděno impulzem síly, a to úderem pomocí modálního kladiva. Měřenou odezvou bylo zrychlení, které se zaznamenávalo tříosým akcelerometrem.

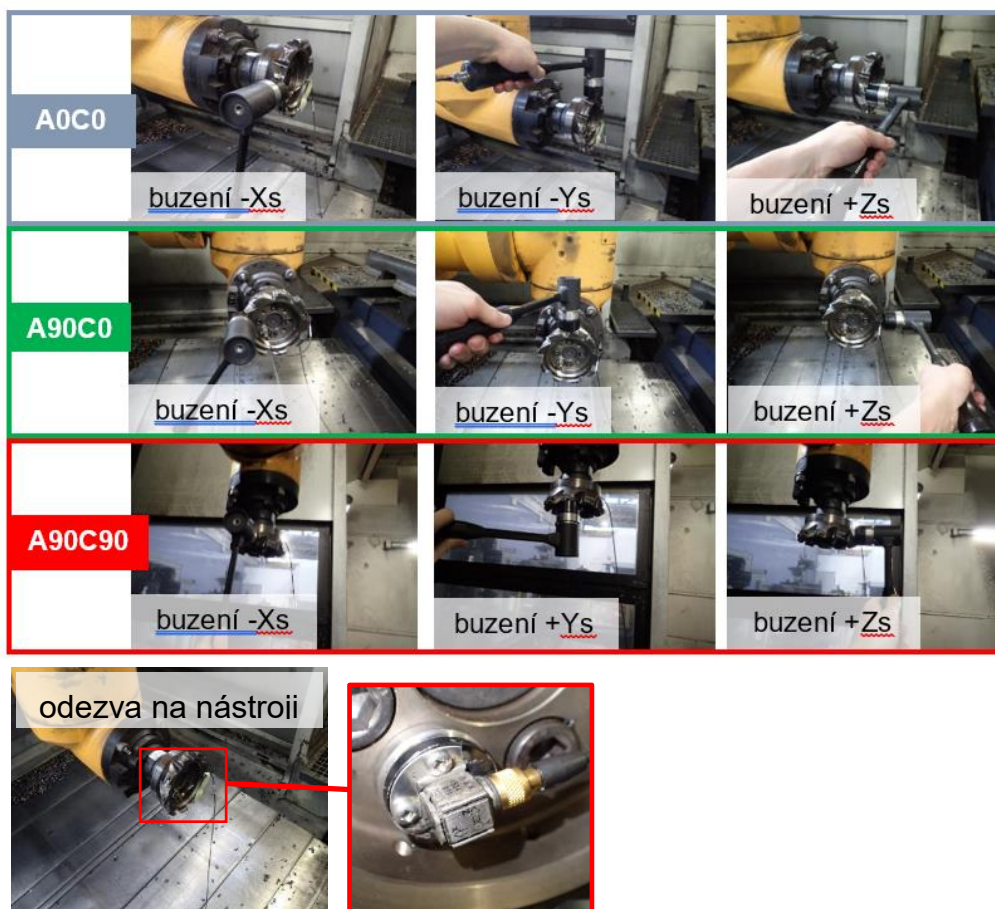


Číslo	Název	Výrobce	Typ	S/N	Kanál
1	Notebook	DELL	Latitude 5510	7X5CL63	-
2	Analyzátor NI cDAQ-9171	NI	cDAQ-9171 9231	32777654 32672009	cDAQ1 Mod1
3	Modální kladivo Kabel: 10-32 UNF → BNC	Endevco Brüel&Kjaer	2303 AO 0531-D- 100	1075 2014W13 3	Mod1/ai0
4	Tříosý akcelerometr Kabel: 1-4 28 UNF → 10- 32 UNF	Brüel&Kjaer Brüel&Kjaer	4524 B AO-0527-D- 100	34298 2019W36 1	Mod1/ai1 Mod1/ai2 Mod1/ai3
5	Obráběcí centrum	TOS VARNSDORF	WHT110C	0101	-

Obrázek 3.33 – Aparatura pro měření FRF

Frekvenční přenosová funkce byla získána podílem odezvy (výstupem) a buzením (vstupem) ve tvaru akceleraace. Po následné dvojité integraci byla získána požadovaná dynamická poddajnost.

Akcelerometry byly připevněny k nástrojům pomocí magnetu, u ježkové frézy D80/Z3 byl akcelerometr připevněn pomocí vosku. Směry buzení a odezvy se při všech třech polohách hlavy shodovaly vždy se souřadným systémem stroje. Buzení se provádělo pokaždé ve všech směrech lineárních os stroje X, Y a Z. Směry buzení a umístění akcelerometrů lze vidět na obrázků 3.34.

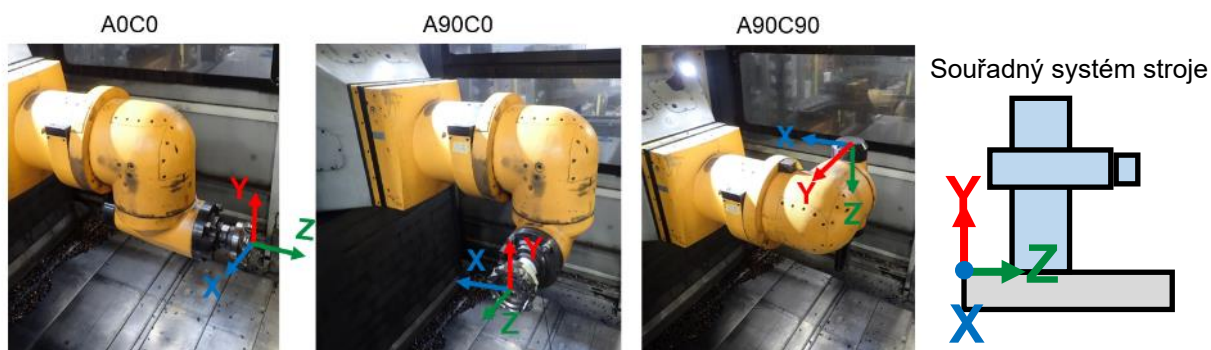


Obrázek 3.34 – Směry buzení

### 3.4.2 Dynamická poddajnost na nástrojích

Aby naměřené FRF v různých polohách hlavy byly lépe srovnatelné, budou v následujících grafech a výsledcích porovnávány směry buzení v lokálním souřadném systému frézovací hlavy, který se otáčí s hlavou. Pro A0C0 je lokální souřadný systém hlavy shodný se souřadným systémem stroje, pro A90C0 je směr X shodný se směrem Z lineární osy stroje apod. (viz obrázek 3.35). X,Y jsou vždy radiální směry, Z vždy axiální.

Pro zachování citlivých dat byly naměřené hodnoty dynamické poddajnosti vynásobeny stálou hodnotou a vyjádřené v procentech. Tato hodnota byla pro všechna měření stejná, aby nebyly výsledky vzhledem k sobě zkreslené a mohly se tak porovnávat mezi sebou.

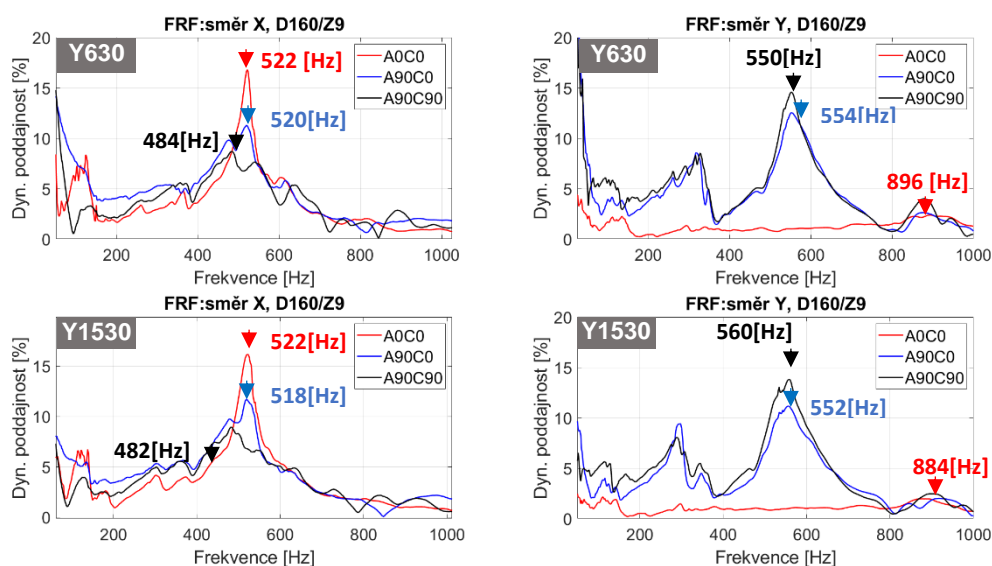


Obrázek 3.35 – Souřadný systém vřetenové hlavy

### FRF s čelní frézou D160/Z3

První měření bylo na čelní fréze D160/Z9, výsledky měření jsou reprezentovány na obr. 3.35. V jednotlivých grafech jsou vykresleny dynamické poddajnosti pro všechny tři polohy hlavy, porovnávané v lokálním souřadném systému hlavy (viz obrázek 3.35). V tomto případě jsou zobrazeny směry X a Y ve dvou polohách lineární osy Y stroje.

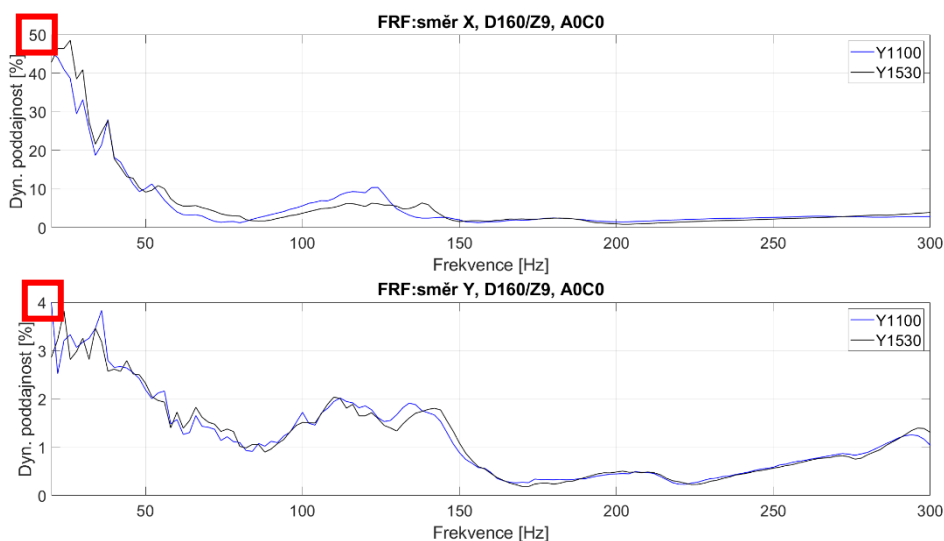
Z obrázku 3.36 je zřejmé, že směr X je nejpoddajnější v poloze A0C0, což je způsobené velkým vyložení hlavy od stojanu. Ostatní polohy hlavy ve směru X mají podobný průběh jako výchozí poloha A0C0, ale jeví se jako méně poddajné. Lze také pozorovat, že natočení hlavy nemá velký vliv na změnu poddajné frekvence. Ve směru Y jsou výrazně poddajnější polohy A0C90 a A90C90, což by mohlo souviset s torzí hlavy nebo stojanu.



Obrázek 3.36 – FRF s nástrojem D160/Z9



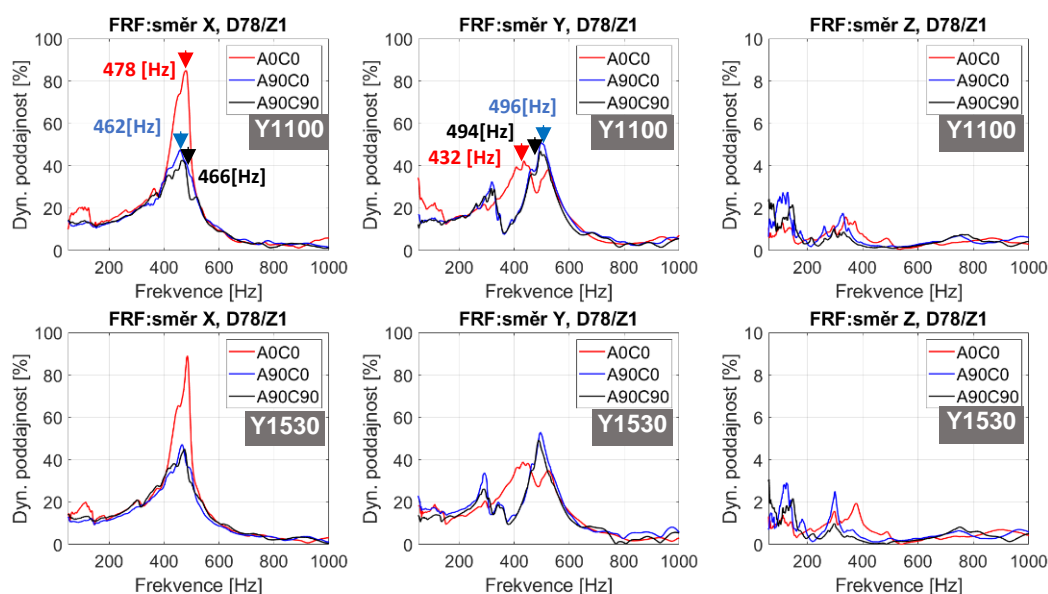
Na obrázku 3.37 jsou zobrazeny přenosy ve směrech X a Y, které byly naměřeny v polohách, jež se nejvíce blížily polohám při obrábění. Důležitá poddajnost je okolo 30 Hz, která se při nestabilním obrábění projevila ve všech směrech. Porovnáním poddajností na této frekvenci je nejvýraznější poddajnost ve směru X. Tato frekvence by mohla odpovídat struktuře hlavy. Frekvence, která se nejčastěji objevovala při stabilním frézování je 108 a 138 Hz. Z průběhu FRF je zřejmé, že při těchto frekvencích nevystupuje žádná dominantní poddajnost a z hlediska stability obrábění se nejedná o kritické místo, což potvrzuje i samotné obrábění.



Obrázek 3.37 – Porovnání FRF pro D160/Z9 různé polohy v Y

### FRF s frézou D78/Z1

Na obrázku 3.38 jsou vykresleny výsledky pro vrták D78/Z1, kde první řádek grafu pro polohu vřeteníku  $Y = 630$  mm a druhý řádek odpovídá  $Y = 1530$  mm. V tomto případě je vykreslen i směr Z, který je pro vrtání zásadní. V poloze A0C0 je směr X výrazně nejpoddajnější, což souvisí s velkým vyložení hlavy od stojanu a zároveň s délkou nástroje. Sklopením hlavy do jiné polohy dojde k poklesu dynamické poddajnosti (cca o 40 %), sledované v lokálním souřadném systému frézovací hlavy. Důležitá poddajnost pro vrtání je ve směru Z, kde je poddajnost přibližně 20x menší než ve směrech X a Y.



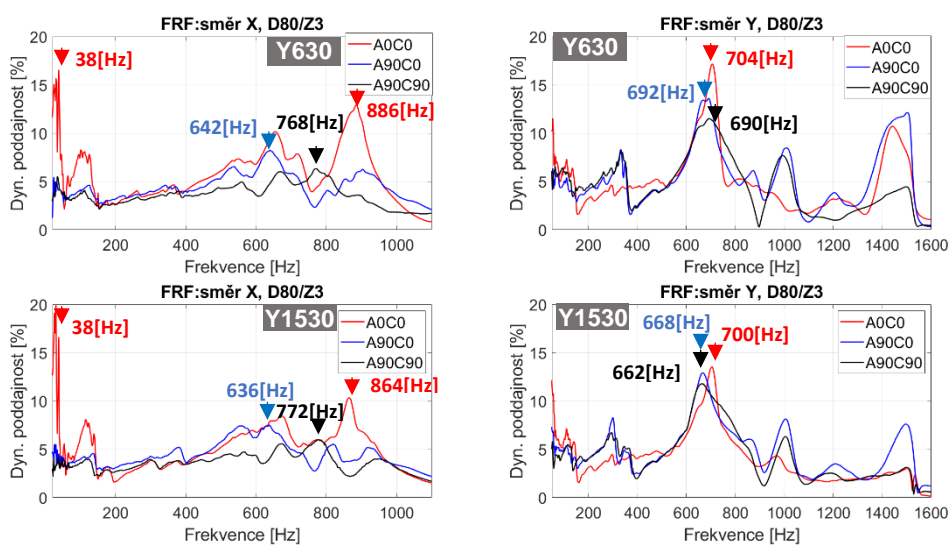
Obrázek 3.38 – FRF s nástrojem D78/Z1

Při nestabilním obrábění se objevovaly frekvence okolo 39 Hz zejména ve směru Z a poté v Y. Tyto frekvence se nevykazují jako poddajná místa pro tento nástroj, v tomto případě bude kritickým místem poddajnost na obrobku ve směru Z. Frekvence blízké k 500 Hz, kde se nacházejí dominantní poddajnosti, se opět nevyskytovaly u vibrací naměřených při obrábění.

### FRF s ježkovou frézou D160/Z3

Pro frézu D80/Z3 je směr X i Y (v souřadném systému hlavy) nejpoddajnější poloha hlavy A0C0 (viz obrázek 3.39). To je způsobeno zvýšeným momentem síly od vyložení. Naklopením hlavy do jiné polohy poddajnost poklesne.

Objevuje se více dominantních frekvencí na celém spektru, výrazné amplitudy na nižších frekvencích, které jsou značně rozkmitané, by mohly být způsobené chybou měření, ale také by tyto frekvence okolo 40 Hz mohly odpovídat struktuře hlavy. Další dominantní frekvence objevující se na vyšších hodnotách frekvencí, by mohly souviset s kmitáním jednotlivých částí stroje.



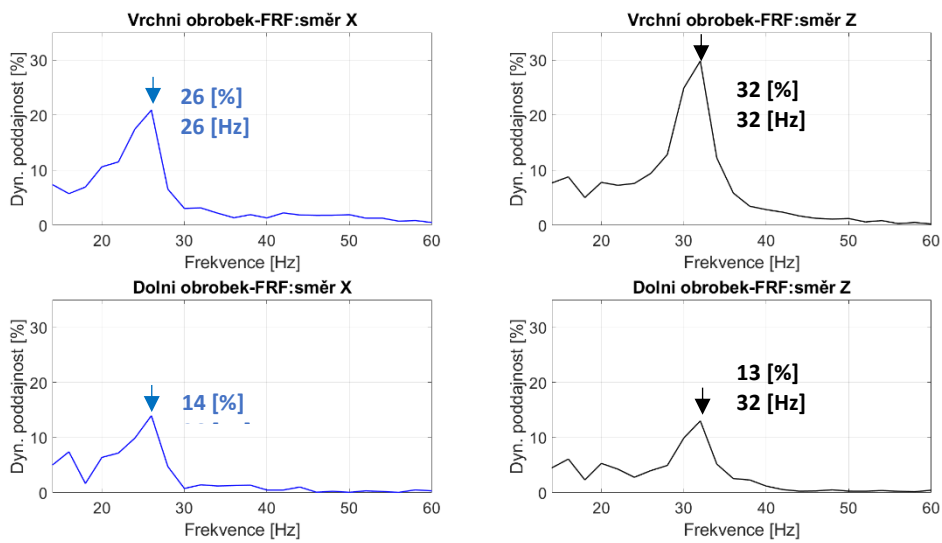
Obrázek 3.39 – FRF s nástrojem D80/Z3

Frekvence vibrací u nestabilního případu při obrábění byla 41,6 Hz ve směru X, ta je velmi blízká dominantní frekvenci, která byla naměřena na nástroji. Vibrace při větších amplitudách kmitů se objevovaly nejčastěji na 141 Hz ve směru X a 47 Hz ve směru Y, které se opět nenachází v místech dominantní poddajnosti.

### 3.4.3 Dynamická poddajnost na obrobku

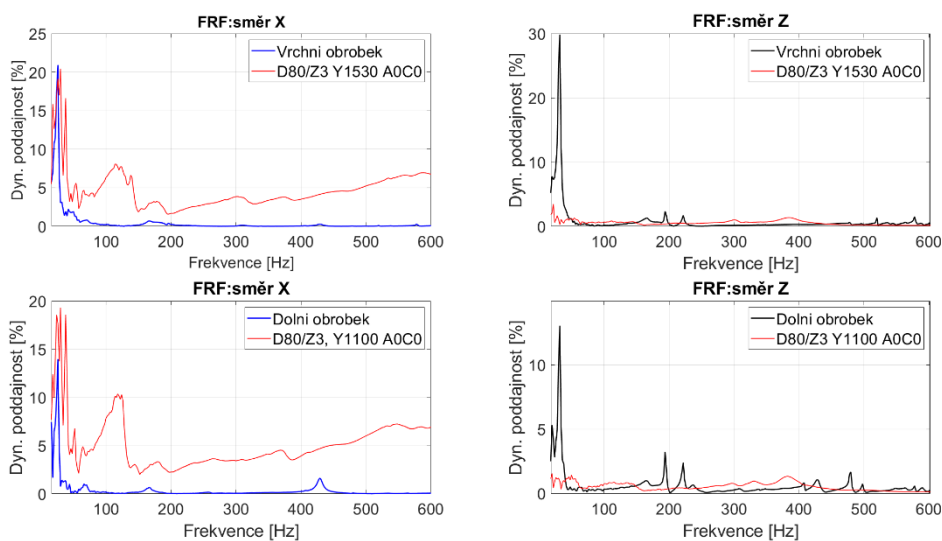
U zkoušek obrábění je důležité, aby upnutí obráběného materiálu a upínací úhelník nesoucí obráběný materiál měl sám vysokou tuhost a byl tuhým způsobem připevněn. Kvůli tomuto ověření byla změřena dynamická poddajnost i na obrobku a bylo tak možné porovnat frekvenci samobuzených kmitů s vlastní frekvencí obrobku. Díky tomu je možné ověřit, zda kmitavý systém vlastního obrobku nerozhoduje převážně o vzniku samobuzených kmitů.

Výsledek tohoto měření je na obrázku 3.41. Zde se měřilo pouze ve směrech X a Z. Je zřejmé, že na obrobku se objevuje pouze jedna frekvence dominantní poddajnosti. Ve směru X je to frekvence 26 Hz a 32 Hz ve směru Z. Horní upnutí obrobku je poddajnější než u spodního obrobku. Ve směru Z je poddajnost dokonce více než 2x větší, což by se mohlo při obrábění projevit jako slabé místo.



Obrázek 3.41 – FRF na obrobku

Poddajnost na nástroji je řádově srovnatelná s poddajností na obrobku, rozdíl je především ve frekvencích, kde frekvence dominantní poddajnosti měřené na nástrojích se objevují téměř na celém spektru. Na obrázku 3.40 je porovnání dynamické poddajnosti měřené na obrobku a na nástroji D80/Z3. Očividný rozdíl je ve směru Z, kde poddajnost na nástroji je takřka zanedbatelná oproti poddajnosti na obrobku. Ve směru X se na nástroji objevují dominantní frekvence, které jsou velice blízké vlastní frekvenci obrobku, v tomto případě by toto mohlo být nebezpečným místem z hlediska stability.



Obrázek 3.40 – Porovnání FRF na nástroji a obrobku

### 3.5 Rekapitulace dyn. poddajnosti na nástrojích

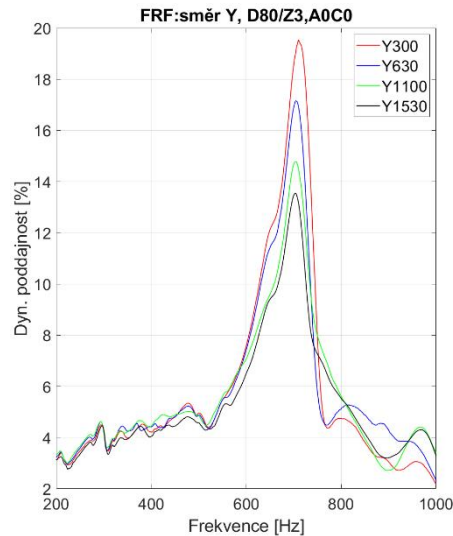
Celkově je dynamická poddajnost rozdílná pro různé polohy hlavy, což také naznačuje, že limity stability pro různé polohy mohou být odlišné. Na nástrojích se objevuje často více dominantních frekvencí poddajnosti a ve většině případů na celém spektru. Avšak natočení hlavy nemá velký vliv na kolísání vlastních frekvencí. Velké poddajnosti se opětovaně objevují od 400 Hz do 800 Hz. To jsou poměrně vysoké frekvence, které mohou odpovídat hřídeli vřetena.

Při porovnání poddajností v lokálním souřadném systému hlavy, je nejpoddajnější ve směru X poloha A0C0, zde se mohla projevit celková poddajnost stroje ve směru X (v tom případě je souřadný systém hlavy shodný se souřadným systémem stroje) a zároveň zde má velký vliv velké vyložení nástroje.

Polohy hlavy A90C0, A90C90 jsou méně poddajné, v těchto polohách je lokální směr X shodný se směrem Z stroje. Stroj je velmi tuhý v ose Z, lze tedy uvažovat, že se měřila pouze poddajnost hlavy. Ve směru Y (v lok. souř. systému hlavy) se závislost poddajnosti na natočení hlavy odvíjí od nástroje.

Při změně poloh vřeteníku v Y, lze pozorovat, že maximální hodnoty dyn. poddajností a jejich frekvence se výrazně nemění. To by mohlo naznačovat, že stojan není poddajným prvkem systému, ale mohla by to být samotná vřetenová hlava.

Poloha vřeteníku v Y se projevuje nepatrně více na dyn. poddajnosti ve směru Y než ve směru X. Zde v několika případech nastává neobvyklý stav a to, že s vyšší polohou vřeteníku v Y, klesá dynamická poddajnost, takový případ je znázorněn na obrázku 3.42.



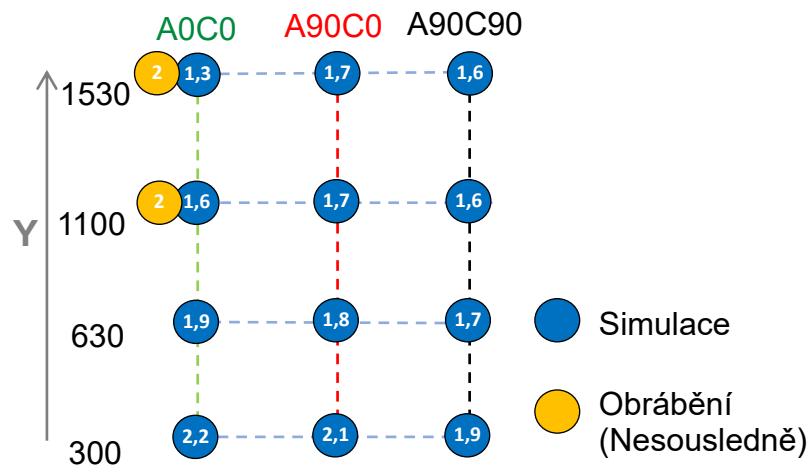
Obrázek 3.42 – FRF na nástroji D80/Z3 pro různé polohy vřeteníku v Y

### 3.6 Výpočet absolutní meze stability

Z naměřených dynamických poddajností byly dopočítány teoretické absolutní meze stability pro dané nástroje a polohy hlavy. Výpočet byl proveden pomocí rovnice 2.9. Pro výpočet je nezbytná znalost měrného řezného odporu, který byl identifikovaný v kapitole 3.2.7. Dalším parametrem rovnice je počet zubů v záběru  $N_t$  a posledním vstupujícím parametrem je dynamická poddajnost, konkrétně jde o minimum reálné složky.

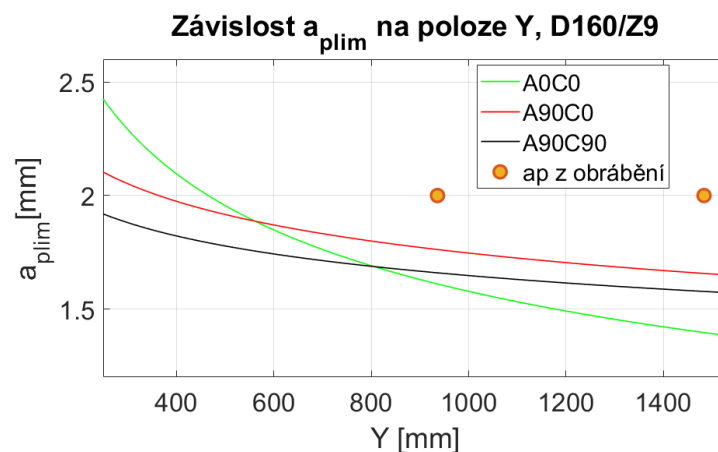
Výpočet absolutní meze stability byl zjednodušen a byly použity minima reálných FRF ve směru X a ostatní směry byly zanedbány. Toto zjednodušení bylo proto, že nebyl brán ohled na strategii obrábění sousledně/nesousledně. Výsledky nejsou zcela přesné, ale použitelně ukazují možné trendy.

Na obrázku 3.43 jsou znázorněny vypočtené minimální třísky pro čelní frézu, kde jsou zobrazeny i hodnoty z obrábění, při kterých byl proces na mezi stability nebo stabilní. Rozdíly mezní třísky pro různé polohy hlavy se nevykazují jako veliké.



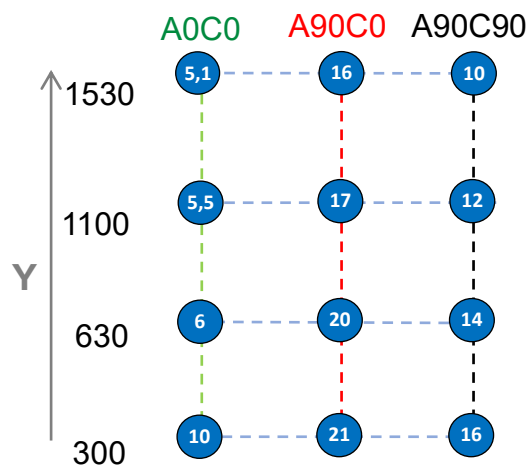
Obrázek 3.44 – Grafické znázornění meze stability pro D160/Z9

Z vypočtených hodnot třísek (viz obrázek 3.43) byl interpolován průběh mezní třísky v závislosti na poloze vřeteníku Y. Závislost mezní třísky na poloze vřeteníku je na obrázku 3.44. Lze vypočítat, že změna polohy v Y má vliv především pro polohu hlavy A0C0, pro ostatní polohy hlavy se nevykazuje poloha Y tolik zásadní. Důvodem toho je, že v poloze A0C0 je nástroj hodně vyložen před stojan. V ostatních polohách není vyložení tak velké a síly působící do boku (z pohledu nástroje) zatěžují vřeteník spíše tlakem než ohybem.



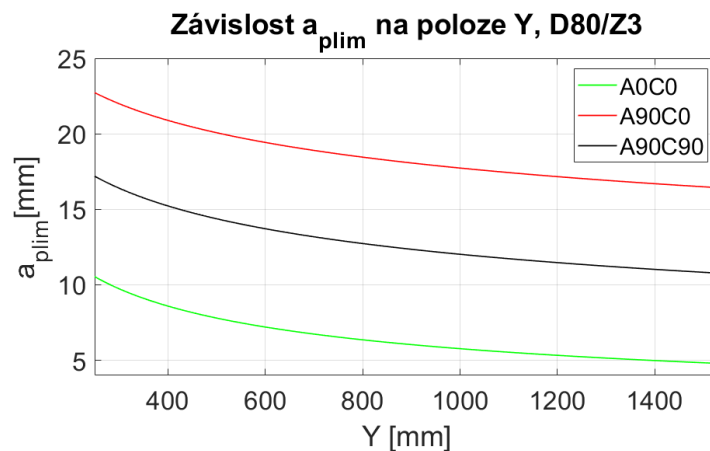
Obrázek 3.43 – Průběh hodnoty maximálního čelního záběru pro stabilní frézování v závislosti na poloze Y pro D160/Z9

Na obrázku 3.46 jsou vypočítané minimální hloubky třísky pro ježkovou frézu D80/Z3 s radiální šířkou záběru 20 mm. V tom to případě vychází limitní hloubky třísek výrazně nižší, než tomu bylo při obrábění (obrábělo se s  $a_p = 40$  mm při stále stabilním řezu). Hodnoty pro polohy hlavy A90C0 a A90C90 se v tomto případě vykazují jako méně poddajné a vypočtené minimální třísky jsou výrazně vyšší než pro polohu A0C0.



Obrázek 3.46 – Grafické znázornění meze stability pro D80/Z3

Stejně jako u čelní frézy byly tyto hodnoty interpolovány v závislosti na poloze Y (viz obrázek 3.45). Ze kterého je zřejmé, že je průběh pro všechny polohy velmi podobný. Lze usuzovat, že změna limitní třísky není silně závislá na poloze Y. To ukazuje na vhodně navržený stojan stroje.



Obrázek 3.45 – Průběh hodnoty maximálního bočního záběru pro stabilní frézování v závislosti na poloze Y pro D80/Z3



Je zřejmé, že tento zjednodušený výpočet není zcela přesný a pro spolehlivou predikci nedostačuje. Primárním cílem bylo vizualizovat určitým způsobem výsledky dynamické poddajnosti naměřené ve všech polohách. Vzhledem k tomu, že cílem bylo vypočítat absolutní mez stability, jsou teoretické výsledky v pořádku, protože limitní tříska z experimentálního měření je vždy nad teoreticky určenou minimální limitní třískou a odhad je tak vždy na straně bezpečnosti.

## 4 Závěr

V rešeršní části diplomové práce jsou charakterizovány jednotlivé typy kmitání při obrábění, dále byla popsána teorie a postup měření dynamických vlastností obráběcích strojů, nevyjímaje s popisem výkonových testů obráběním.

V experimentální části byla provedena výkonová zkouška obráběním v TOS Varnsdorf na stroji WHT110C s nasazenou ortogonální vřetenovou hlavou HOIL50 a s nástroji, které pokrývají široké technologické spektrum, se kterým lze na stroji pracovat. Následovalo měření dynamické poddajnosti na nástrojích a obrobku za účelem získání dat pro výkonové testy stroje.

Díky znalosti dynamické poddajnosti v pracovním prostoru stroje byly identifikovány kritická místa z hlediska stability. Při vrtání ve směru Z se ukázalo, že nejpoddajnějším místem je právě upínací úhelník a obzvlášť při obrábění v jeho horní části. Měřením dynamické poddajnosti na nástrojích bylo zjištěno, že poddajná místa se objevují relativně na vysokých frekvencích, které by mohly odpovídat hřídeli vřetena.

Dynamické poddajnosti v různých polohách hlavy jsou řádově srovnatelné, ale přesto se dyn. poddajnosti v různých polohách liší. Díky tomu je možné najít vhodnou polohu hlavy, která může být pro konkrétní operaci z hlediska stability velmi výhodná.

Schopnost stroje přenést do rezného procesu instalovaný výkon je na velmi vysoké úrovni. Nosná struktura stroje s vřetenovou hlavou dokázala při stabilním obrábění přenést do řezu celý instalovaný výkon, pro ježkovou frézu D80/Z3 a vrták D78/Z1 se podařilo výkonově přetížit pohon vřetene a s čelní frézou byl dosažen limit rezných parametrů vyměnitelné břitové destičky. Vysoké využití výkonu se podařilo zvyšováním hloubky řezu a rezné rychlosti. Lze konstatovat, že se jedná o moderně navržený stroj, který je schopen dosáhnout velké výrobní produktivity zejména zvyšováním rezné rychlosti.

## 5 Seznamy

### Seznam použité literatury

- [1] BACH, Pavel. *Měření vlastností obráběcích strojů* [online]. 18.05.2005 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-obrabecich-stroju>
- [2] BRECHER, Christiam a Jaroslav ŘASA. *Statika a dynamika obráběcích strojů* [online]. 18.04.2017 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/statika-a-dynamika-obrabecich-stroju>
- [3] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-802-6067-801.
- [4] FIALA, Zdeněk. *VIBRACE PŘI OBRÁBĚNÍ KOVŮ* [online]. BRNO, 2010 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27465](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27465). Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce MIROSLAV PÍŠKA.
- [5] FOJTŮ, Petr. *Problematika samobuzeného kmitání při obrábění* [online]. [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>
- [6] DROBÍLEK, Jiří. *Samobuzené kmitání v obráběcích strojích* [online]. [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79220/F2-D-2018-Drobilek-Jiri-Drobilek\\_DP\\_final\\_pdfa.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79220/F2-D-2018-Drobilek-Jiri-Drobilek_DP_final_pdfa.pdf?sequence=-1&isAllowed=y). Disertační práce. ČVUT.
- [7] The Chatter About Chatter. *Precision machined products associaton* [online]. [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <https://pmpaspeakingofprecision.com/2010/05/18/the-chatter-about-chatter/>
- [8] TRMAL, Jiří. *Využití teorie samobuzených kmitů ke zvýšení produktivity a kvality obrábění* [online]. 16.11.2015 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z:

<https://www.oneindustry.cz/obrabeni/vyuziti-teorie-samobuzenych-kmitu-ke-zvyseni-produktivity-a-kvality-obrabeni/>

- [9] BACH, Pavel a Jiří G. TRMAL. *Využití teorie samobuzených kmitů ke zvýšení produktivity a kvality obrábění* [online]. 2015 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/obrabeni/vyuziti-teorie-samobuzenych-kmitu-ke-zvyseni-produktivity-a-kvality-obrabeni/>
- [10] KOLÁŘ, Petr. Interakce struktury stroje s buzením řezným procesem. [PDF]. [cit. 2022-01-19]. Výukové podklady z předmětu Modelování a simulace výrobních strojů. ČVUT v Praze.
- [11] JANOTA, M., P. KOLAR a M. SULITKA. OPERATIONAL METHOD FOR IDENTIFICATION OF SPECIFIC CUTTING FORCE DURING MILLING. *MM Science Journal* [online]. 2019, **2019**(04), 3250-3257 [cit. 2022-01-19]. ISSN 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019\_11\_2019078
- [12] KOLÁŘ, Petr. Zatížení obráběcího stroje řeznými silami. [PDF]. [cit. 2022-01-19]. Výukové podklady z předmětu Modelování a simulace výrobních strojů. ČVUT v Praze.
- [13] APLIKOVANÝ MECHANIK JAKO SOUČÁST TÝMU KONSTRUKTÉRŮ A VÝVOJÁŘŮ: ČÁST VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA [online]. BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>
- [14] KOLÁŘ, Petr. Zdokonalená metodika návrhu nosných struktur obráběcích strojů. Praha, Zář 2018. HABILITAČNÍ PRÁCE. ČVUT v Praze.
- [15] TLUSTÝ, Jiří a Miloš POLÁČEK. Zpráva o výzkumu - Specifikace zkoušek mezních podmínek. Praha. Výzkumný ústav obráběcích strojů a obrábění v Praze, Prosinec 1967.
- [16] Automa časopis pro automatizační techniku: Měření ve vibrodiagnostice [online]. 2010 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: [http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/40375.pdf](http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/40375.pdf)

- [17] DØSSING, Ole. Structural Testing I: Mechanical Mobility Measurements [PDF]. Brüel & Kjær, 1998 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/vibration/structural-testing-part-one>
- [18] Measuring Vibration [PDF]. Brül & Kjaer, 1982 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/vibration/measuring-vibration>
- [19] *MetalMAX, The Complete Package for Machine-Tool Dynamic Characterization* [online]. In: . 2010 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: [http://www.blueswarf.com/uploads/3/8/5/6/38566/030-datasheet\\_metalmax.pdf](http://www.blueswarf.com/uploads/3/8/5/6/38566/030-datasheet_metalmax.pdf)
- [20] *CUTPRO: MODAL ANALYSIS SOFTWARE MODULE (MODAL)* [online]. [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.malinc.com/products/cutpro/modal-analysis/>
- [21] *Impulse Hammer* [online]. [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://sea.omega.com/tw/pptst/IH101.html>
- [22] Co to je modální analýza [online]. Ekosoftware, 2018 [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/co-to-je-modalni-analyza>
- [23] JANOTA, Miroslav a Petr CHVOJKA. P02: Zpracování signálu I (FFT) [PDF]. 2020 [cit. 2021-01-19]. Výukové podklady z předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů II. ČVUT v Praze.
- [24] NOŽKA, Marek. *Převod dat do digitální podoby - kvantování* [online]. [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://mamut.spseol.cz/nozka/psk/031-kvantovani/>
- [25] Vzorkování. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vzorkov%C3%A1n%C3%AD>
- [26] DØSSING, Ole. Structural Testing II: Modal Analysis and Simulation [PDF]. Brüel & Kjær, 1998 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/vibration/structural-testing-part-two>

- [27] KOLÁŘ, Petr. Tlumení mechanických soustav. Převod do stavového prostoru. Frekvenční přenosová funkce.. [PDF]. [cit. 2022-01- 19]. Výukové podklady z předmětu Modelování a simulace výrobních strojů. ČVUT v Praze.
- [28] KOLÁŘ, Petr. Měření dynamické poddajnosti. Samobuzené kmitání. [PDF]. [cit. 2022-01- 19]. Výukové podklady z předmětu Modelování a simulace výrobních strojů. ČVUT v Praze.
- [29] Confirmation of Chatter Prediction Reliability [online]. [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2010/sbornik/papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>. Disertační práce. ČVUT. Vedoucí práce Pavel Bach.
- [30] *TOS Varnsdorf: Horizontální obráběcí centra - WHT110C* [online]. [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/cz/produkty/horizontalni-obrabeci-centra/wht-110-c/>
- [31] *TOS Varnsdorf: Frézovací hlavy* [online]. [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/cz/produkty/prislusenstvi/frezovaci-hlavy/>

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1 – Schéma vzniku samobuzeného kmitání formou zpětnovazebního obvodu [5].....	12
Obrázek 2.2 – Regenerativní princip [3] .....	13
Obrázek 2.3 – Parametry časového průběhu kmitavého pohybu(signálu) [15].....	15
Obrázek 2.4 – Princip frekvenční analýzy [13] .....	17
Obrázek 2.5 – Vzorkování analogového signálu [25] .....	18
Obrázek 2.6 – Kvantování signálu [24] .....	19
Obrázek 2.7 – Vliv periodicity signálu a vliv váhových oken na chybu únikem [13] ...	19
Obrázek 2.8 – FRF akceleraace a dynamická poddajnost [28] .....	20
Obrázek 2.9 – Průběh koherence [28] .....	21
Obrázek 2.10 – Měřená data při FRF[28]Obrázek 2.11 – Průběh koherence[28].....	21
Obrázek 2.12 – Měřená data při FRF [28].....	22
Obrázek 2.13 – Modální kladivo [21].....	24
Obrázek 2.14 – Kalibrační křivka akcelerometru [13] .....	25

Obrázek 2.15 – Tříosý akcelerometr.....	25
Obrázek 2.16 – Vliv způsobu uchycení snímače na jeho frekvenční rozsah [16].....	26
Obrázek 2.17 – Zvlněný povrch obrobku po nestabilním obrábění [7].....	28
Obrázek 2.18 – – Diagram stability [9].....	30
Obrázek 3.1 – Postup měření a vyhodnocení .....	32
Obrázek 3.2 – Frézovací centrum WHT110C [30].....	33
Obrázek 3.3 – Vřetenová hlava HOIL 50 [31] .....	34
Obrázek 3.4 – Fréza D160/Z3.....	35
Obrázek 3.5 – Fréza D78/Z1.....	36
Obrázek 3.6 – Fréza D80/Z3.....	37
Obrázek 3.7 – Upnutý obráběný materiál na úhelníku .....	37
Obrázek 3.8 – Přehled použitých nástrojů a operací .....	38
Obrázek 3.9 – Umístění akcelerometrů .....	39
Obrázek 3.10 – Aparatura pro měření vibrací pod vřeteníkem .....	39
Obrázek 3.11 – Zpracování dat z řídicího systému .....	40
Obrázek 3.12 – Časové záznamy a frekvenční spektra z akcelerometrů.....	41
Obrázek 3.13 – Princip vyhodnocování stability procesu .....	42
Obrázek 3.14 – Měřicí body poloh a řezných rychlostí pro frézu D160/Z3.....	43
Obrázek 3.15 – Mapa využitého výkonu pro D160/Z9, ae=105 mm .....	44
Obrázek 3.16 – FRF: směr X, porovnání obrobku a nástroje D160/Z9.....	46
Obrázek 3.17 – Porovnání záznamů kmitání při obrábění s frézou D160/Z9 .....	46
Obrázek 3.18 – Mapa využitého výkonu pro D160/Z9, ae=55 mm .....	48
Obrázek 3.19 – Měřicí body poloh a posuvy na otáčku pro vrták D78/Z1 .....	50
Obrázek 3.20 – Mapa výkonu pro D78/Z1 .....	51
Obrázek 3.21 – Porovnání záznamů kmitání při obrábění s frézou D78/Z1 .....	52
Obrázek 3.22 – FRF: směr Z, porovnání obrobku a nástroje D78/Z1 .....	52
Obrázek 3.23 – Měřicí body poloh a řezných rychlostí pro frézu D80//Z3.....	53
Obrázek 3.24 – Mapa výkonu pro D80/Z3 .....	54
Obrázek 3.25 – FRF: směr X, porovnání obrobku a nástroje D80/Z3.....	56
Obrázek 3.26 – Porovnání záznamů kmitání při obrábění s frézou D80/Z3 .....	56
Obrázek 3.27 – Průběh Kc pro D160/Z9 .....	58
Obrázek 3.28 – Vyhodnocení Kc pro D78/Z1 .....	59

Obrázek 3.29 – Vyhodnocení Kc pro D80/Z3 .....	59
Obrázek 3.30 – Zkoušky obráběním – testované operace .....	60
Obrázek 3.31 – Polohy měřených FRF .....	61
Obrázek 3.32 – Polohy vřetenové hlavy pro měření FRF .....	61
Obrázek 3.33 – Aparatura pro měření FRF .....	62
Obrázek 3.34 – Směry buzení .....	63
Obrázek 3.35 – Souřadný systém vřetenové hlavy .....	64
Obrázek 3.36 – FRF s nástrojem D160/Z9 .....	64
Obrázek 3.37 – Porovnání FRF pro D160/Z9 různé polohy v Y .....	65
Obrázek 3.38 – FRF s nástrojem D78/Z1 .....	66
Obrázek 3.39 – FRF s nástrojem D80/Z3 .....	67
Obrázek 3.40 – Porovnání FRF na nástroji a obrobku .....	68
Obrázek 3.41 – FRF na obrobku .....	68
Obrázek 3.42 – FRF na nástroji D80/Z3 pro různé polohy vřeteníku v Y .....	70
Obrázek 3.44 – Průběh hodnoty maximálního čelního záběru pro stabilní frézování v závislosti na poloze Y pro D160/Z9 .....	71
Obrázek 3.43 – Grafické znázornění meze stability pro D160/Z9 .....	71
Obrázek 3.46 – Průběh hodnoty maximálního bočního záběru pro stabilní frézování v závislosti na poloze Y pro D80/Z3 .....	72
Obrázek 3.45 – Grafické znázornění meze stability pro D80/Z3 .....	72

## Seznam tabulek

Tabulka 3.1 – Parametry frézy D160/Z9 .....	35
Tabulka 3.2 - Parametry frézy D78/Z1 .....	36
Tabulka 3.3 - Fréza D80/Z3 .....	36
Tabulka 3.4 – Shrnutí výsledků pro D160/Z9, ae=105 mm .....	47
Tabulka 3.5 – Shrnutí výsledků pro D160/Z9, ae=55 mm .....	49
Tabulka 3.6 - Záběrové podmínky pro D78/Z1 .....	50
Tabulka 3.7 – Shrnutí výsledků pro D78/Z1 .....	53
Tabulka 3.8 – Shrnutí výsledků pro D80/Z3 .....	57

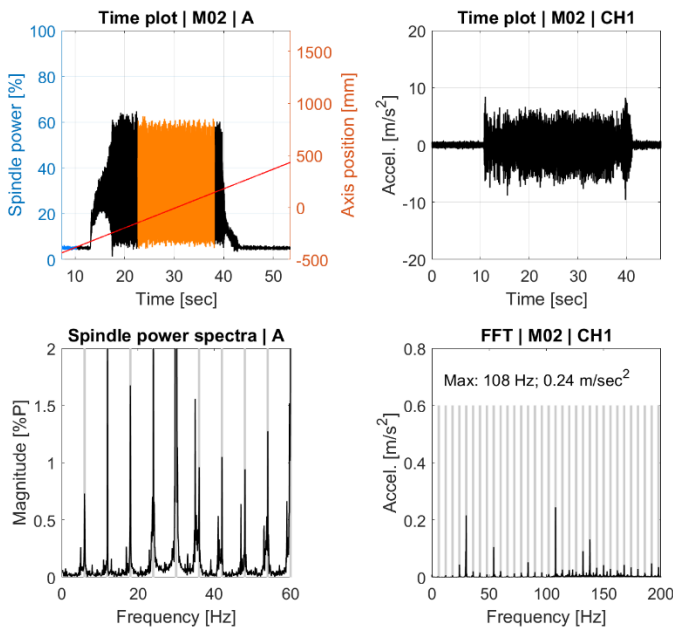


## Seznam příloh

- Příloha č.1 – Měření M02-M06 s nástrojem D160/Z9,  $a_e= 105$  mm,  $Y=1483$  mm, nesousledný záběr
- Příloha č.2 – Měření M07-M14 s nástrojem D160/Z9,  $a_e= 105$  mm,  $Y= 936$  mm, nesousledný záběr
- Příloha č.3 – Měření M15-M25 s nástrojem D160/Z9,  $a_e= 105$  mm,  $Y=1483$  mm, sousledný záběr
- Příloha č.4 – Měření M31-M39 s nástrojem D78/Z1, S409, proměnlivé fo
- Příloha č.5 – Měření M41-M50 s nástrojem D80/Z3,  $a_p= 40$  mm,  $Y= 1430$  mm, nesousledný záběr
- Příloha č.6 – Měření M51-M59 s nástrojem D80/Z3,  $a_p= 40$  mm,  $Y= 1430$  mm, sousledný záběr
- Příloha č.7 – Měření M60-M64 s nástrojem D80/Z3,  $a_p= 40$  mm,  $Y= 920$  mm, nesousledný záběr
- Příloha č.8 – Shrnující tabulky měrného řezného odporu

**Příloha č.1 – Měření M02-M06 s nástrojem D160/Z9:  $a_e=105\text{mm}$ ,  
 $Y=1483\text{ mm}$ , nesousledný záběr**

Měření M02: Y1483, horní obrobek, nesousledné frézování, S360, F1130,  $a_e=105\text{mm}$

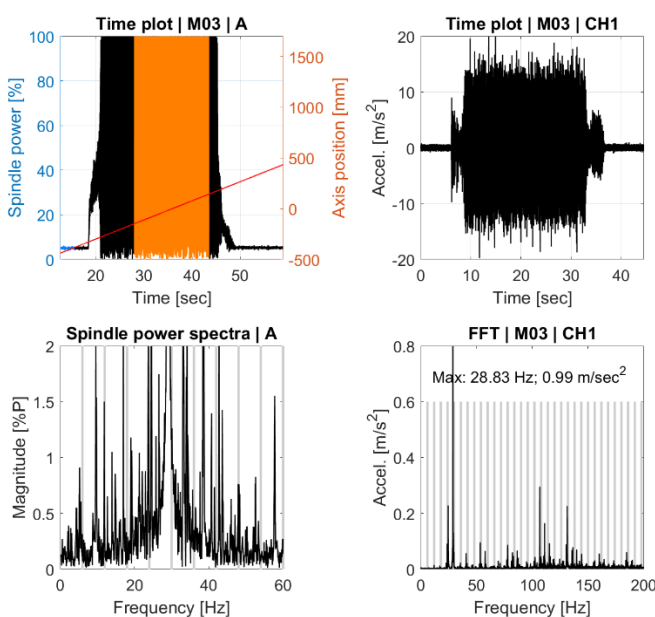


**$a_p = 2\text{ mm}$ ; stabilní**

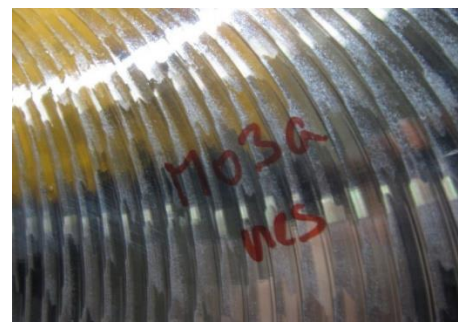


- $K_c=1636\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=25,9\%$

Měření M03: Y1483, horní obrobek, nesousledné frézování, S360, F1130,  $a_e=105\text{mm}$

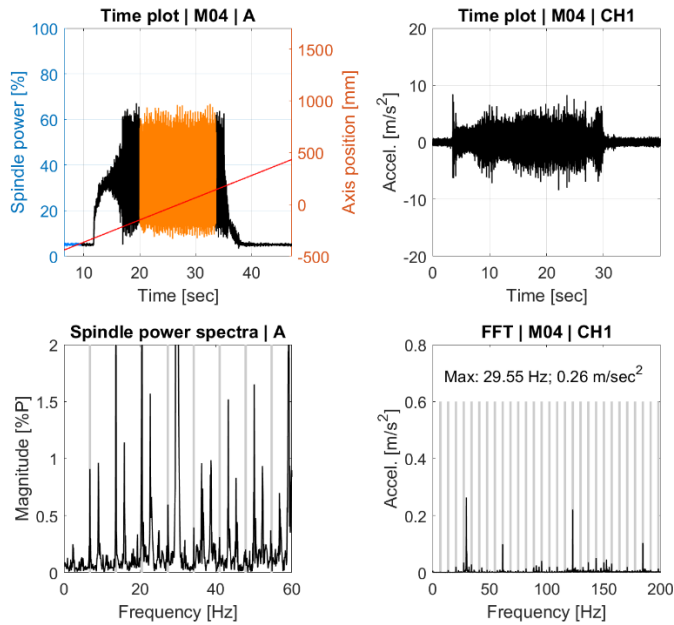


**$a_p = 3\text{ mm}$ ; nestabilní**



- $K_c=2029\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=48,14\%$

Měření M04: Y1483, horní obrobek, nesousledné frézování, S410, F1287,  $a_e=105\text{mm}$

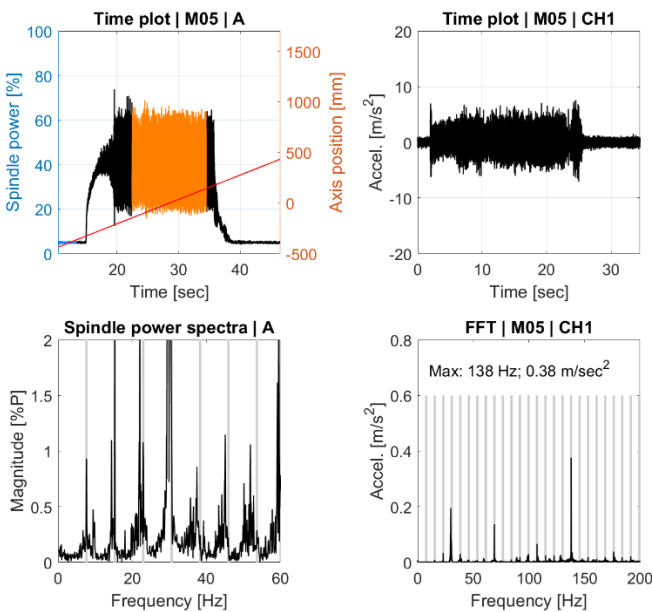


$a_p = 2\text{mm}$ ; mezní

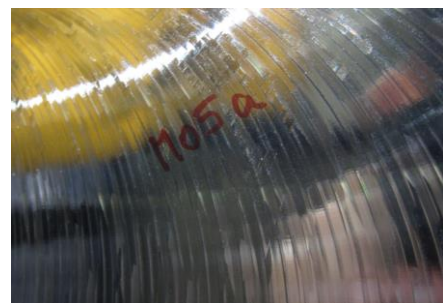


- $K_c=1612\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=29,1\%$

Měření M05: Y1483, horní obrobek, nesousledné frézování, S460, F1444,  $a_e=105\text{mm}$

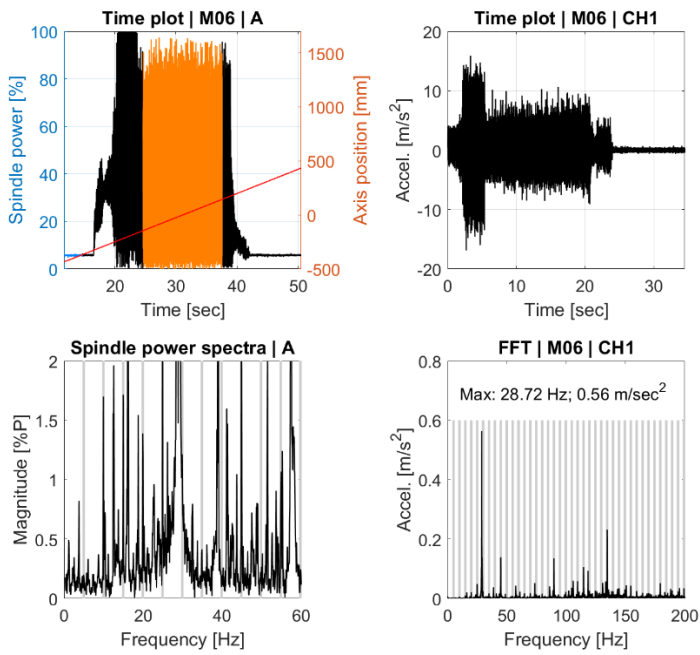


$a_p = 2\text{mm}$ ; stabilní

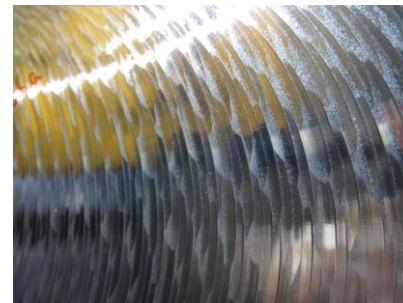


- $K_c=1720\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=34,8\%$

Měření M06: Y1483, horní obrobek, nesousledné frézování, S299, F1342,  $a_e=105\text{mm}$



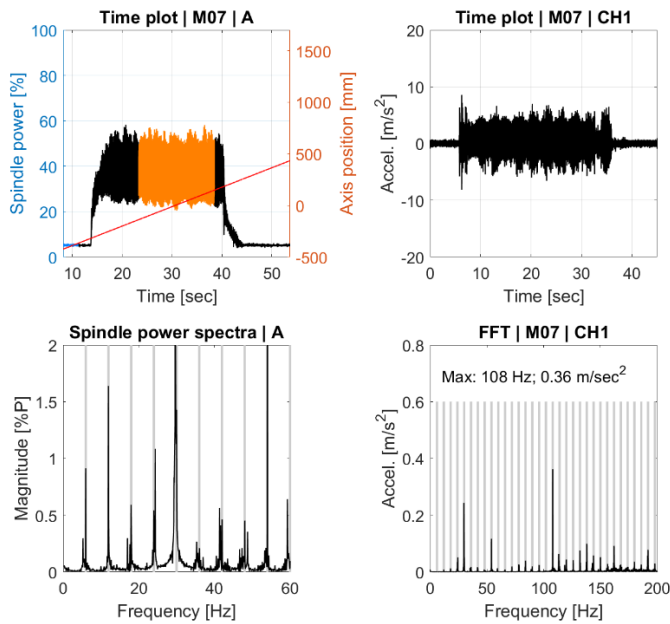
$a_p = 2\text{mm}$ ; mezní



- $K_c=1710\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=32,1\%$

**Příloha č.2 – Měření M07-M14 s nástrojem D160/Z9:  $a_e=105\text{mm}$ ,  $Y=936\text{ mm}$ , nesousledný záběr**

Měření M07: Y936, dolní obrobek, nesousledné frézování, S360, F1130,  $a_e=105\text{mm}$

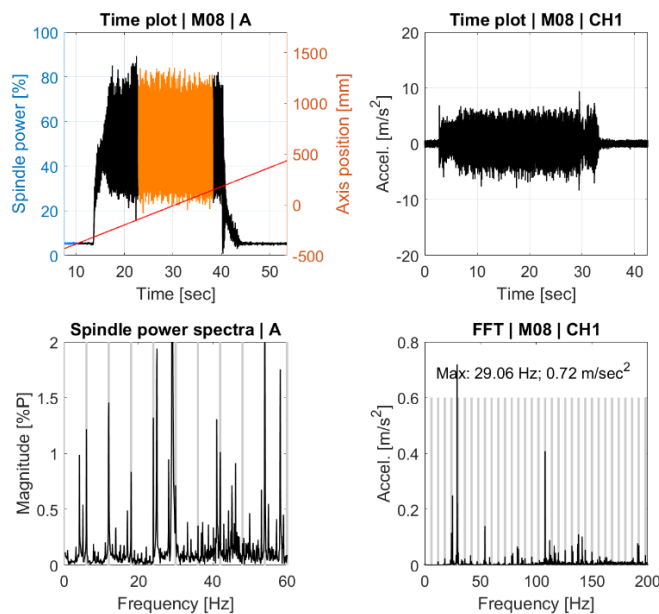


**$a_p = 2\text{mm}$ ; stabilní**



- $K_c=2002\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=31,7\%$

Měření M08: Y936, dolní obrobek, nesousledné frézování, S360, F1130,  $a_e=105\text{mm}$

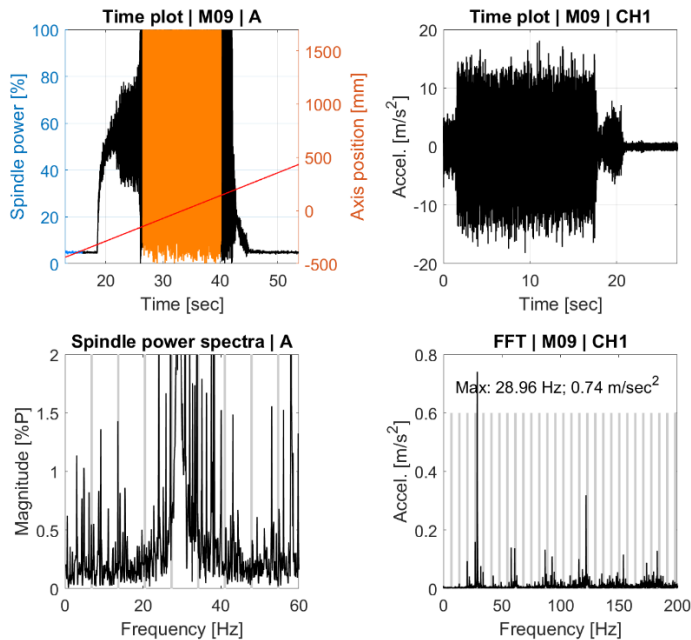


**$a_p = 2\text{mm}$ ; nestabilní**

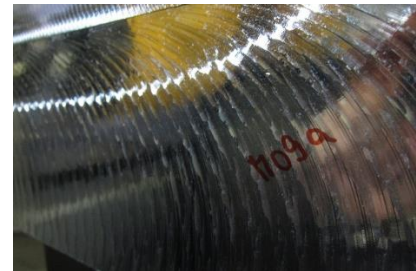


- $K_c=1872\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=44,4\%$

Měření M09: Y936, dolní obrobek, nesousledné frézování, S410, F1287,  $a_e=105\text{mm}$

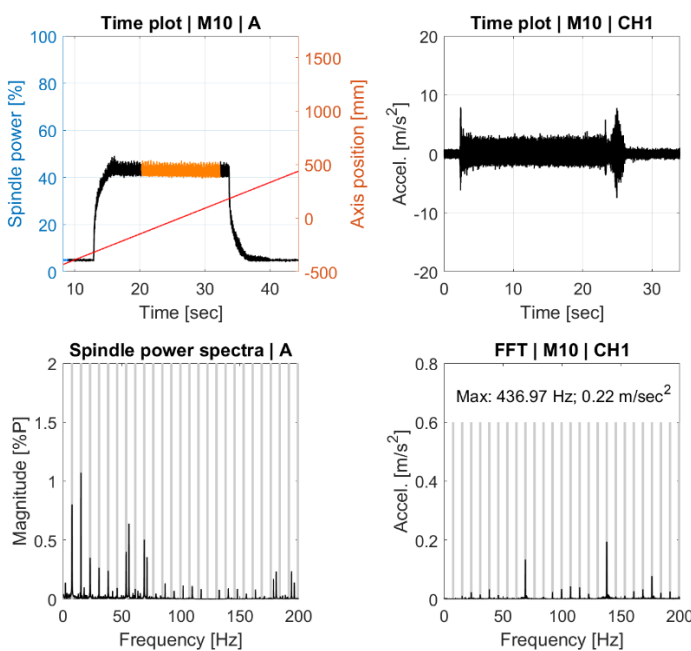


**$a_p = 3\text{mm}$ ; nestabilní**



- $K_c=1979\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=53,5\%$

Měření M10: Y936, dolní obrobek, nesousledné frézování, S460, F1444,  $a_e=105\text{mm}$

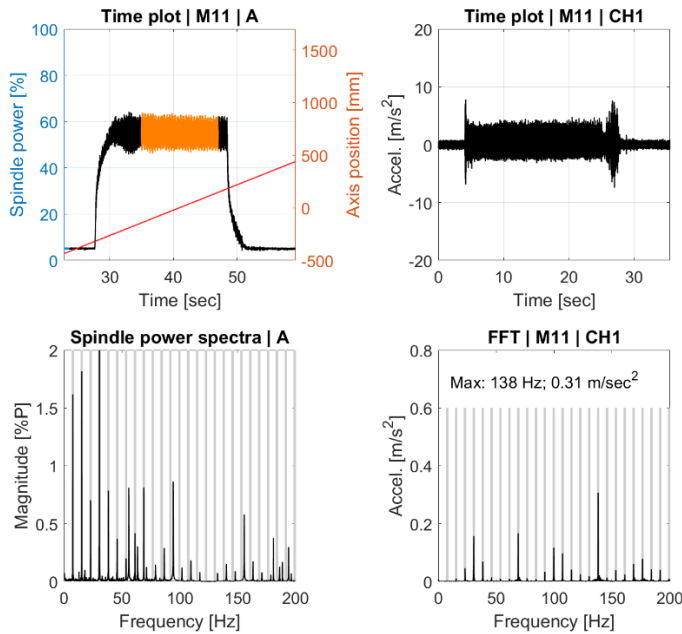


**$a_p = 2\text{mm}$ ; stabilní**

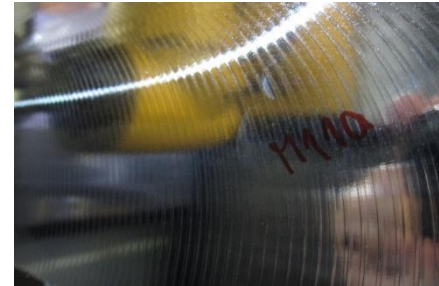


- $K_c=1844\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=37,3\%$

Měření M11: Y936, dolní obrobek, nesousledné frézování, S460, F1444,  $a_e=105\text{mm}$

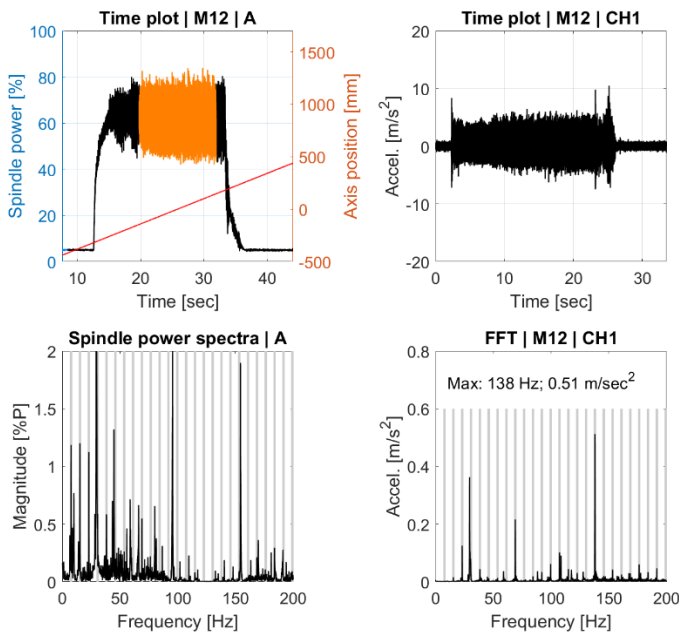


$a_p = 2,5\text{mm}$ ; stabilní



- $K_c=1951\text{MPa}$
- $P_{vyu\check{z}}.=49,3\%$

Měření M12: Y936, dolní obrobek, nesousledné frézování, S460, F1444,  $a_e=105\text{mm}$

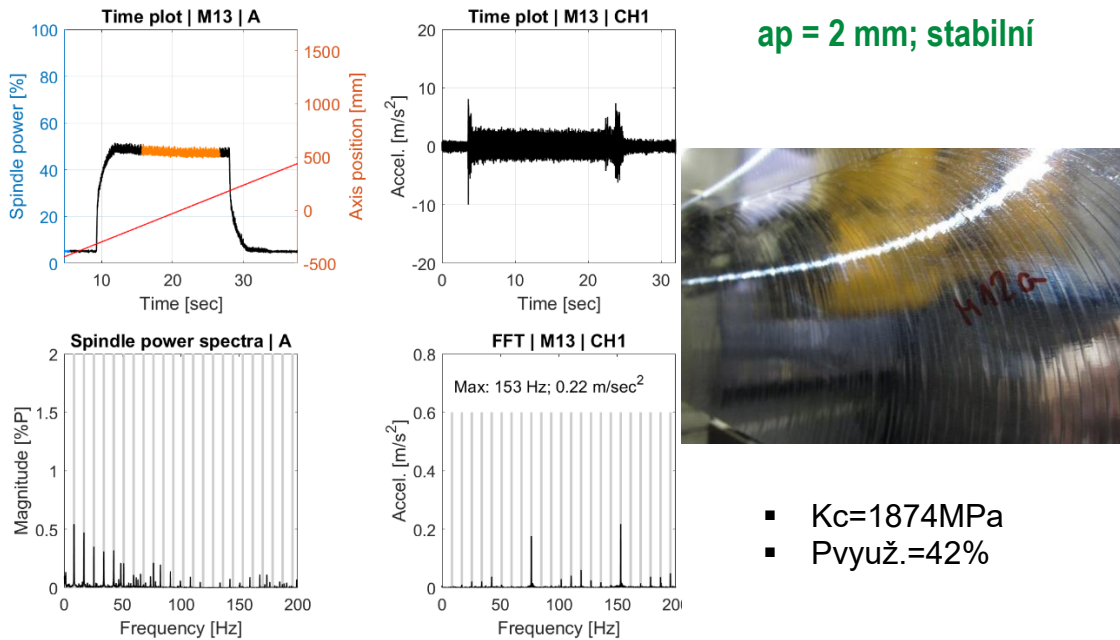


$a_p = 3\text{ mm}$ ; stabilní



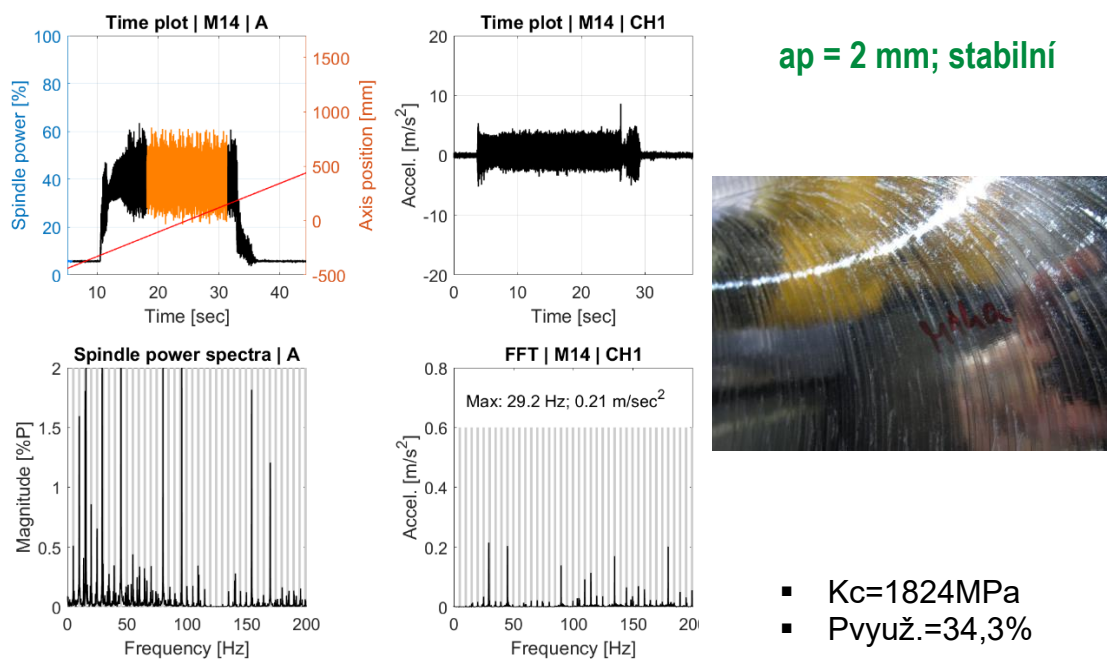
- $K_c=1951\text{MPa}$
- $P_{vyu\check{z}}.=57,4\%$

Měření M13: Y936, dolní obrobek, nesousledné frézování, S510, F1602,  $a_e=105\text{mm}$



$a_p = 2 \text{ mm}$ ; stabilní

Měření M14: Y936, dolní obrobek, nesousledné frézování, S299, F1342,  $a_e=105\text{mm}$

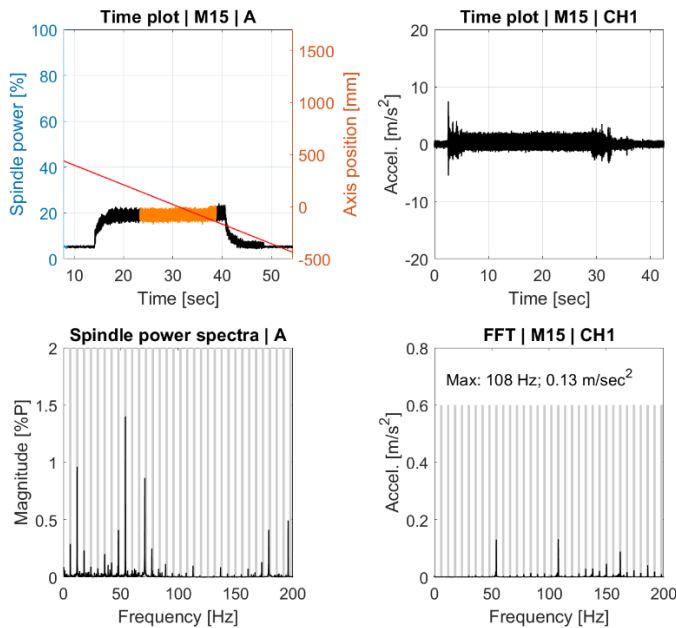


$a_p = 2 \text{ mm}$ ; stabilní



**Příloha č.3 – Měření M15-M25 s nástrojem D160/Z9:  $a_e=105\text{mm}$ ,  
 $Y=1483\text{ mm}$ , sousledný záběr**

Měření M15: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S360, F1130,  $a_e=105\text{mm}$

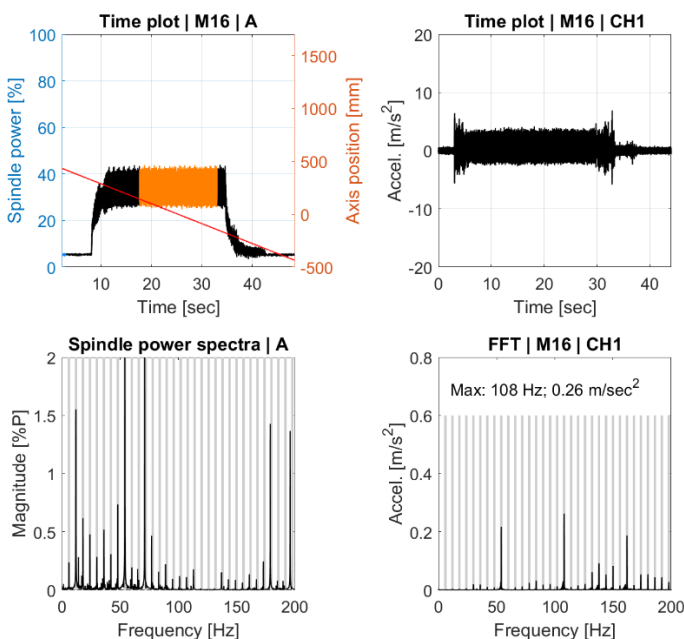


$a_p = 1\text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=1755\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=13,9\%$

Měření M16: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S360, F1130,  $a_e=105\text{mm}$

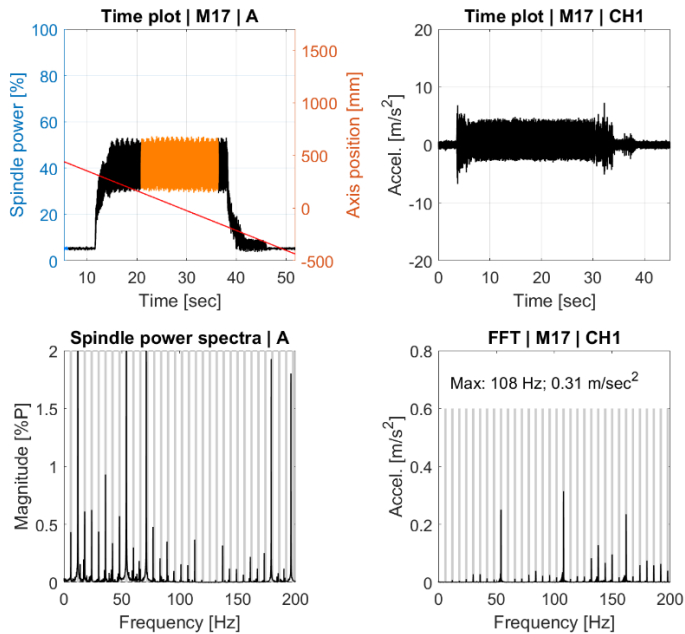


$a_p = 2\text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=1827\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=28,9\%$

Měření M17: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S360, F1130,  $a_e=105\text{mm}$

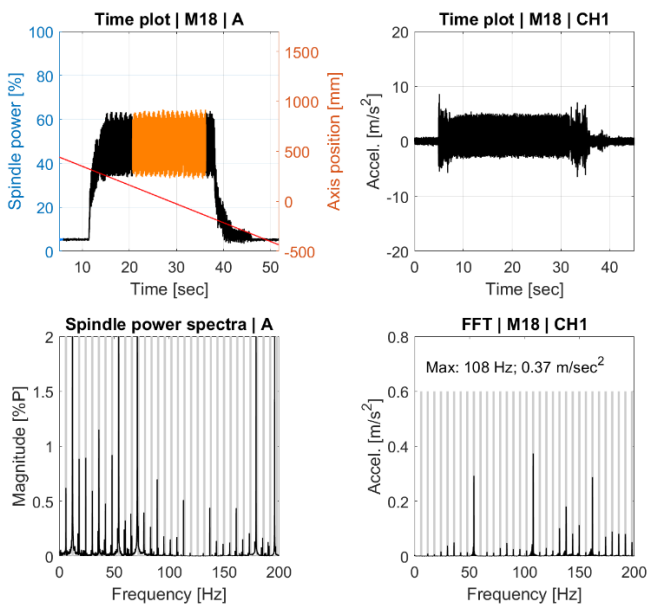


$a_p = 2,5 \text{ mm}$ ; stabilní

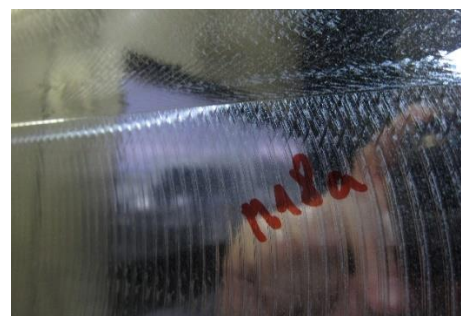


- $K_c=1832\text{MPa}$
- $P_{vyu\dot{z}.}=36,2\%$

Měření M18: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S360, F1130,  $a_e=105\text{mm}$

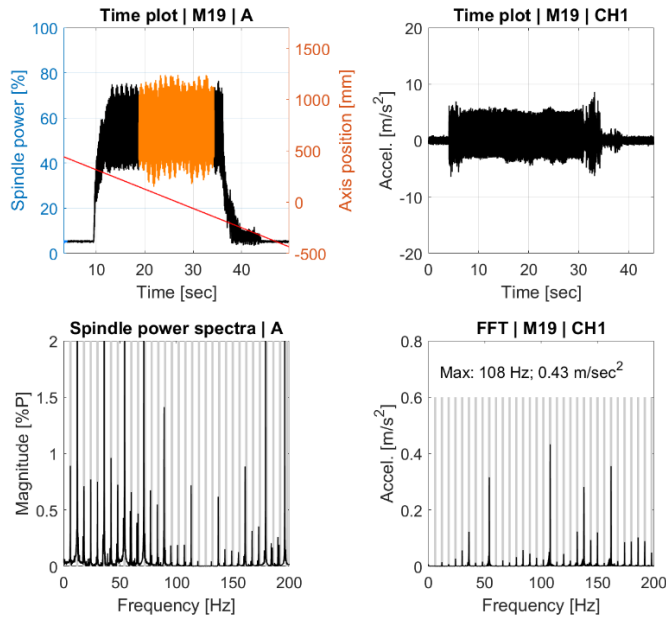


$a_p = 3 \text{ mm}$ ; stabilní

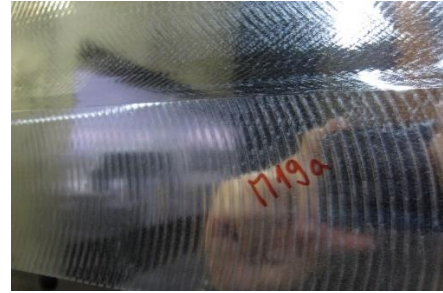


- $K_c=1827\text{MPa}$
- $P_{vyu\dot{z}.}=43,4\%$

Měření M19: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S360, F1130,  $a_e=105\text{mm}$

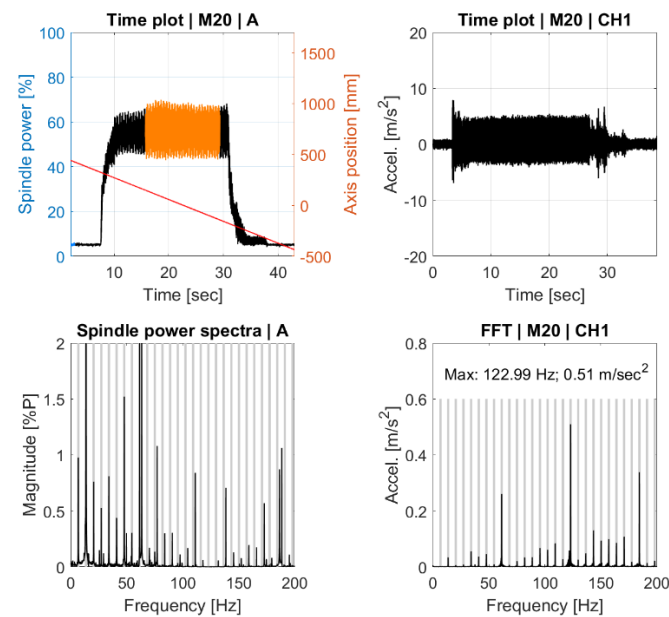


$a_p = 3,5 \text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=1827\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=50,6\%$

Měření M20: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S410, F1287,  $a_e=105\text{mm}$

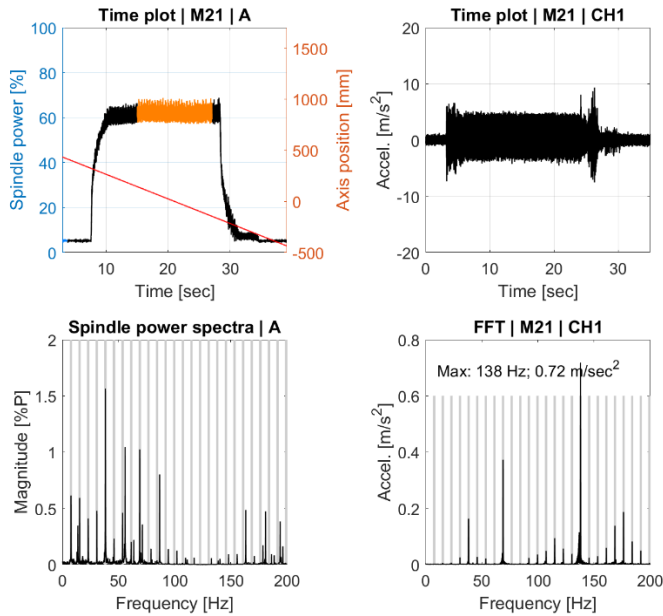


$a_p = 3 \text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=1859\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=50,6\%$

Měření M21: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S460, F1444,  $a_e=105\text{mm}$

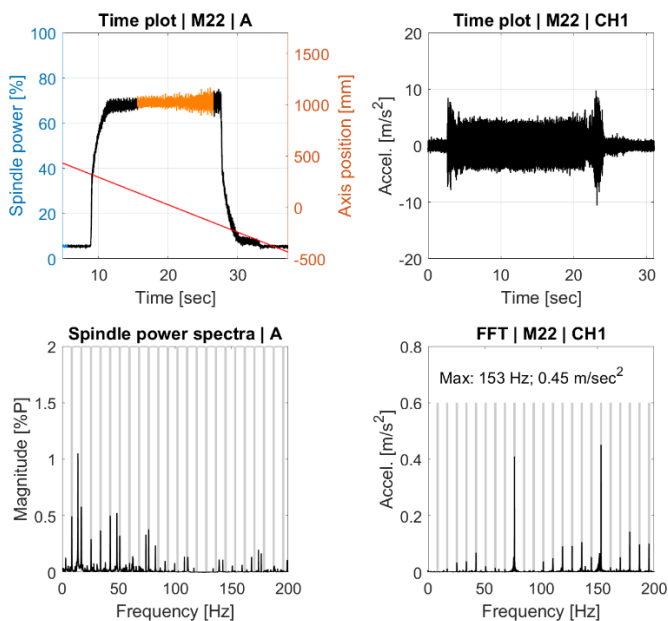


$a_p = 3 \text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=1874\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=56,8\%$

Měření M22: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S510, F1602,  $a_e=105\text{mm}$

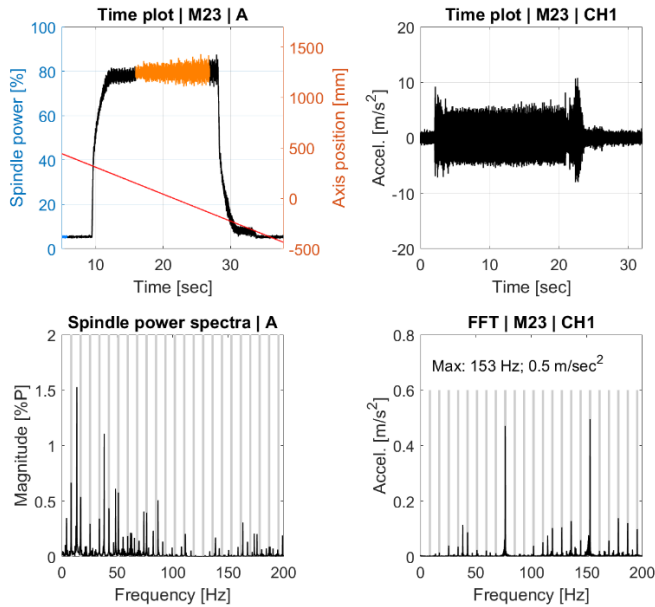


$a_p = 3 \text{ mm}$ ; stabilní

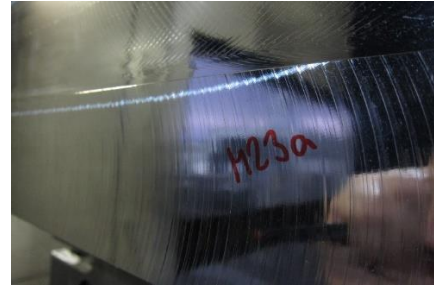


- $K_c=1888\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=63,5\%$

Měření M23: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S510, F1602,  $a_e=105\text{mm}$

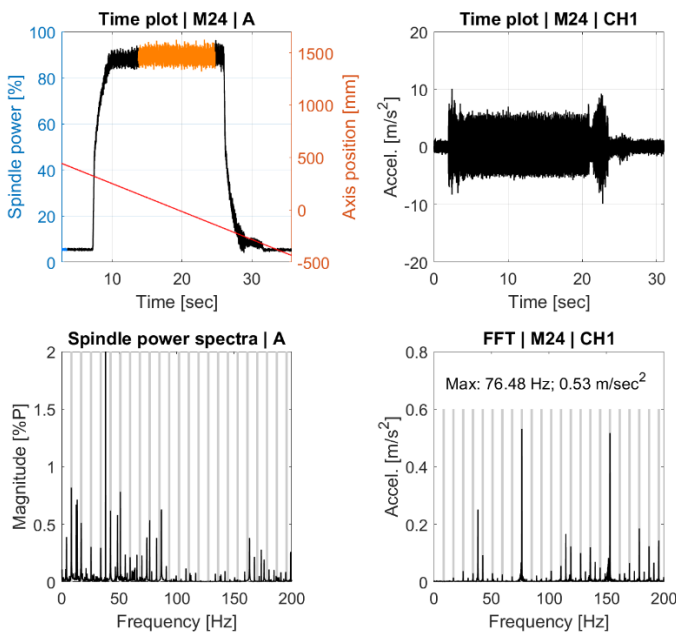


$a_p = 3,5 \text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=1885\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=74\%$

Měření M24: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S510, F1602,  $a_e=105\text{mm}$

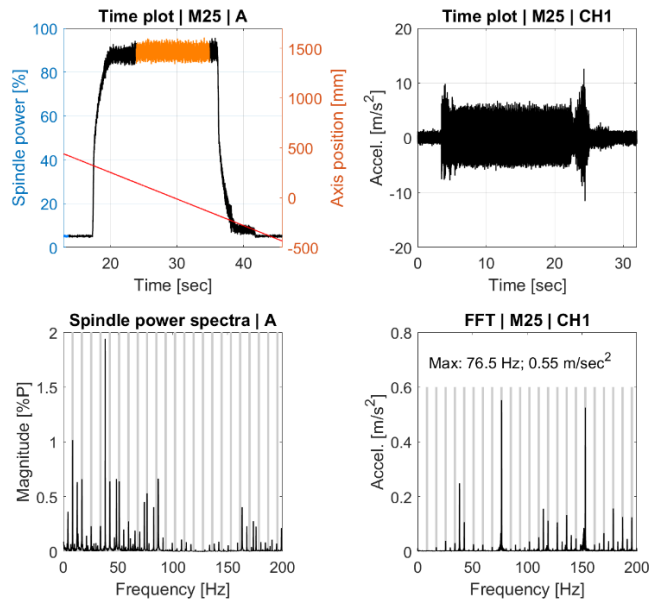


$a_p = 4 \text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=1874\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=84,1\%$

Měření M25: Y1483, horní obrobek, sousledné frézování, S510, F1602,  $a_e=105\text{mm}$



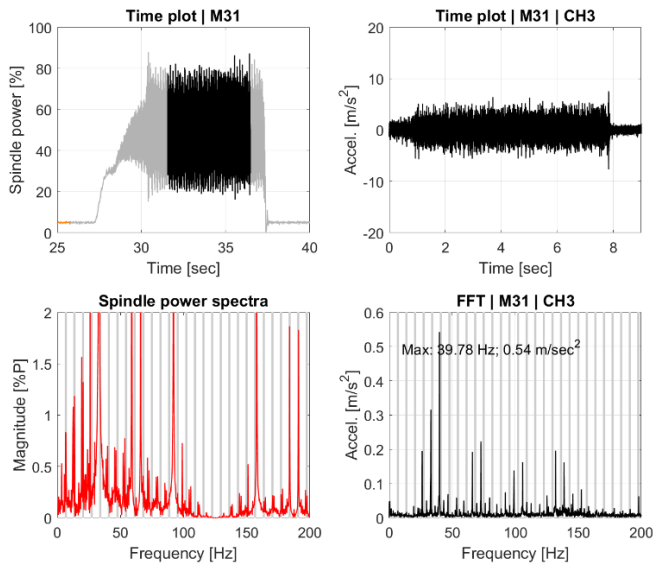
$a_p = 4 \text{ mm};$  stabilní

obrázek není  
k dispozici

- $K_c=1672\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=84,4\%$

## Příloha č.4 – Měření M31-M39 s nástrojem D78/Z1: S409, proměnlivé $f_0$

Měření M31, Y1574, vrtání, S409,  $f_0 = 0,15$  mm



$f_0 = 0,15$  mm; nestabilní

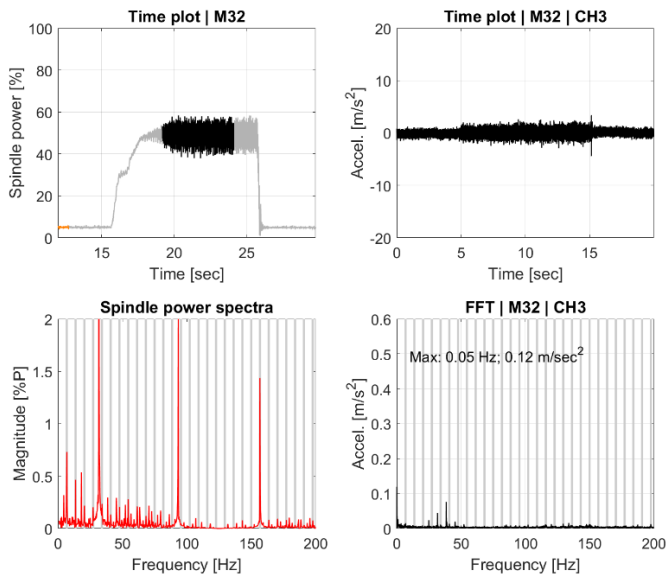


- $K_c = 2254$  MPa
- $P_{vyu\dot{z}.} = 43,8\%$

Měření M32, Y1020, vrtání, S409,  $f_0 = 0,15$  mm

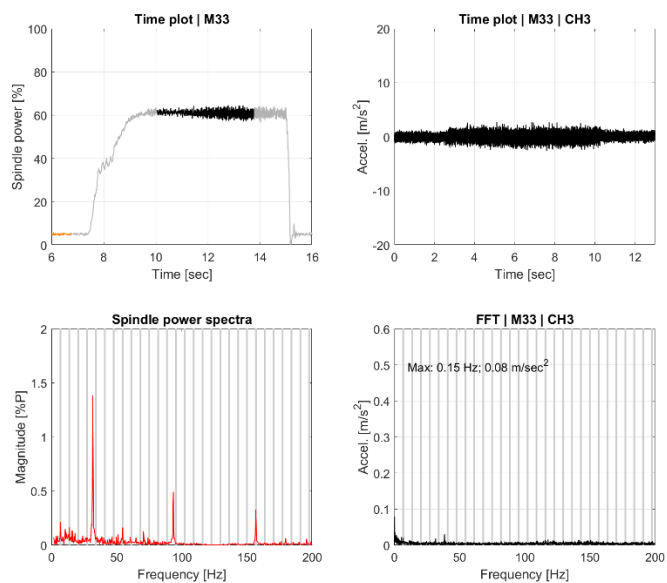
$f_0 = 0,15$  mm; mezní



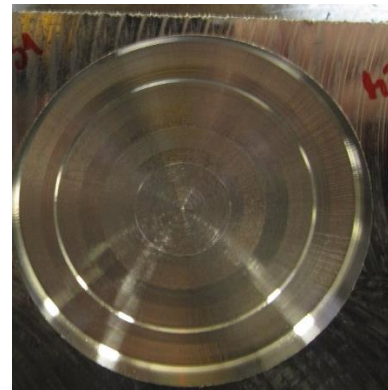


- $K_c=2254$  MPa
- $P_{vyu\check{z}.}=43,8\%$

Měření M33, Y1020, vrtání, S409,  $f_o=0,2$  mm



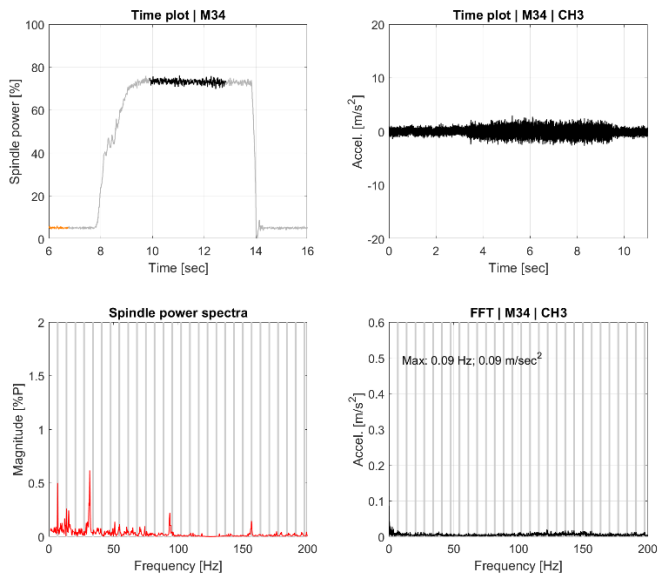
$f_o = 0,2$  mm; stabilní



- $K_c=2172$  MPa
- $P_{vyu\check{z}.}=56\%$

Měření M34, Y1020, vrtání, S409,  $f_o=0,25$  mm



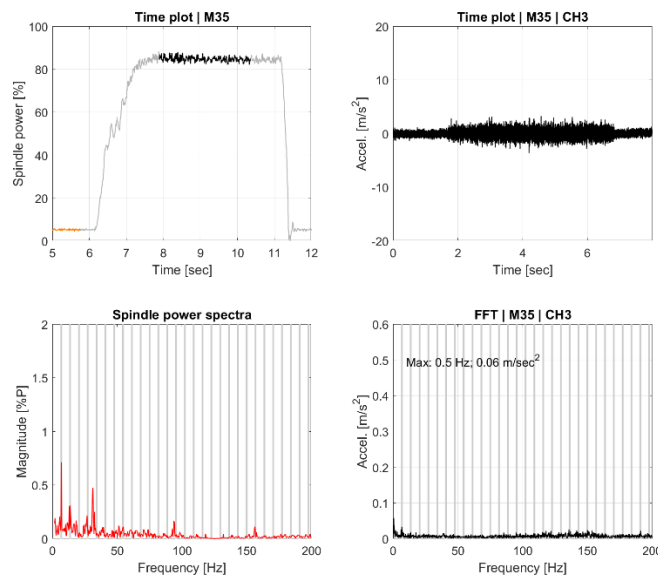


**fo = 0,25 mm; stabilní**



- Kc=2095 MPa
- Pvyuž.=68%

Měření M35, Y1020, vrtání, S409, fo =0,3 mm

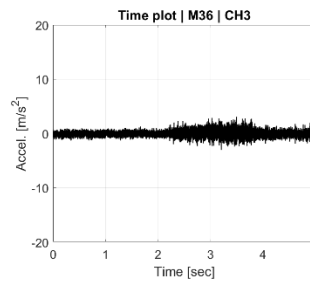
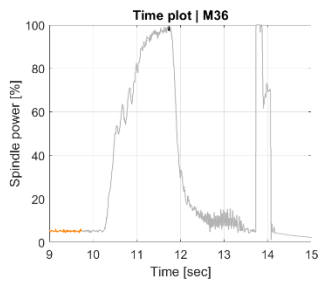


**fo = 0,3 mm; stabilní**

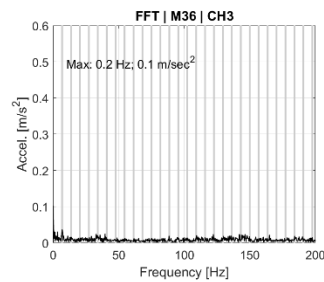
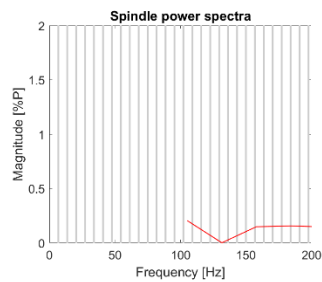


- Kc=2047 MPa
- Pvyuž.=79,6%

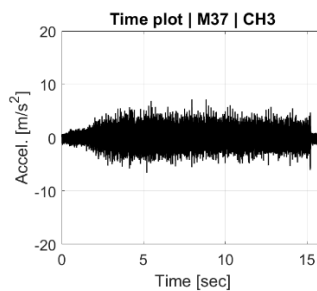
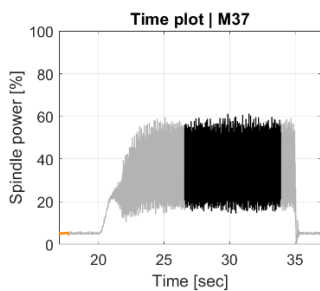
Měření M36, Y1020, vrtání, S409, fo =0,35 mm



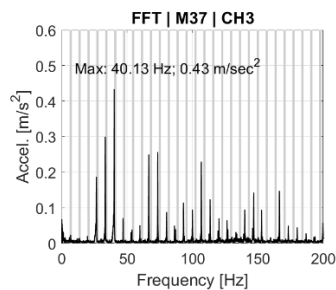
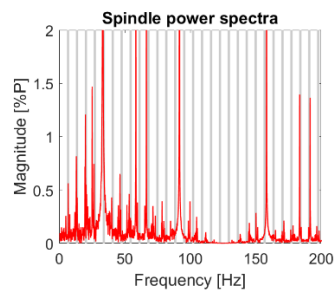
$f_0 = 0,35$  mm; přetížení vřetene



Měření M37, Y1574, vrtání, S409,  $f_0 = 0,1$  mm

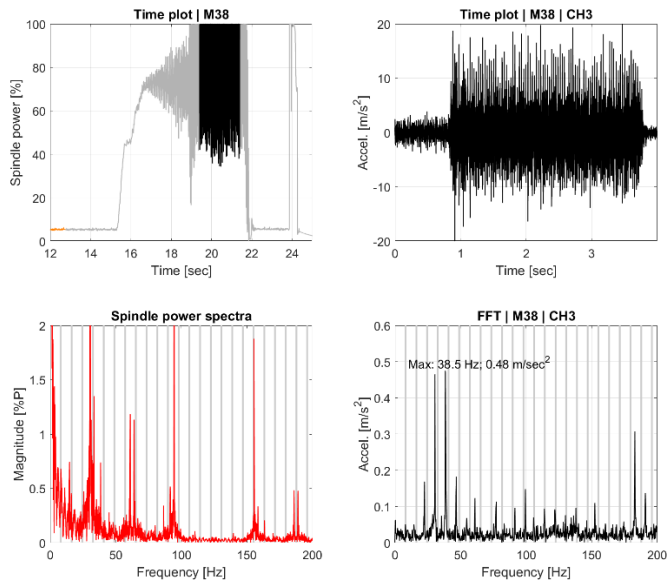


$f_0 = 0,1$  mm; mezní



- $K_c = 2369$  MPa
- $P_{vyu\dot{z}.} = 30,9\%$

Měření M38, Y1574, vrtání, S490,  $f_0 = 0,24$  mm

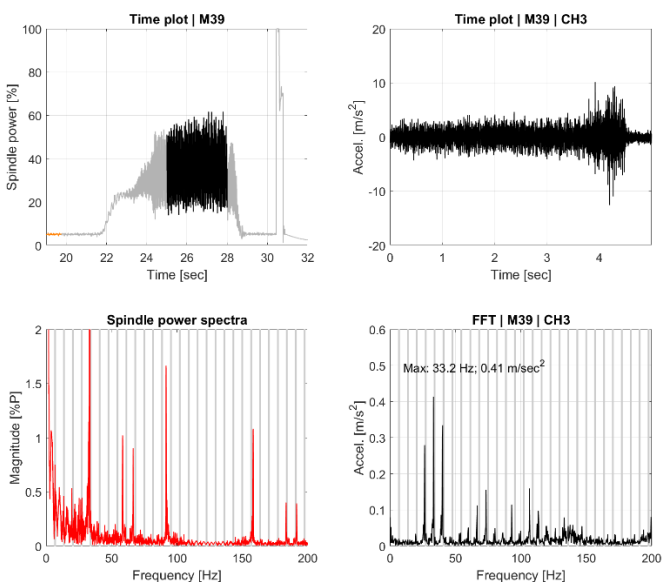


**fo = 0,24 mm; nestabilní**

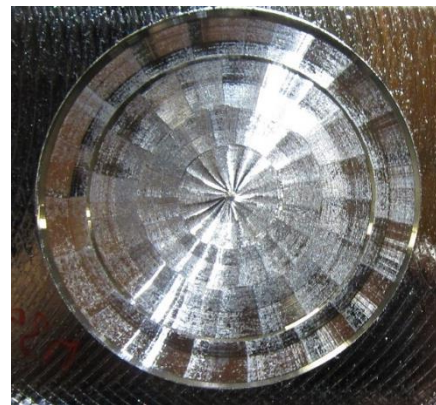


- Kc=2304 MPa
- Pvyuž.=72%

Měření M39, Y1574, vrtání, S409, A0C90,  $f_0 = 0,1$  mm



**fo = 0,1 mm; mezní**

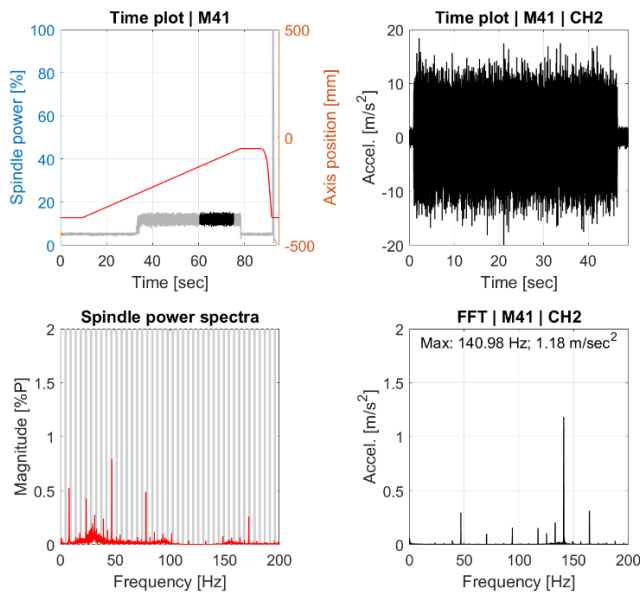


- Kc=2350 MPa
- Pvyuž.=31%



## Příloha č.5 – Měření M41-M50 s nástrojem D80/Z3: $a_p=40\text{ mm}$ , $Y=1430\text{ mm}$ , nesousledný záběr

Měření M41, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=2\text{ mm}$ , S470

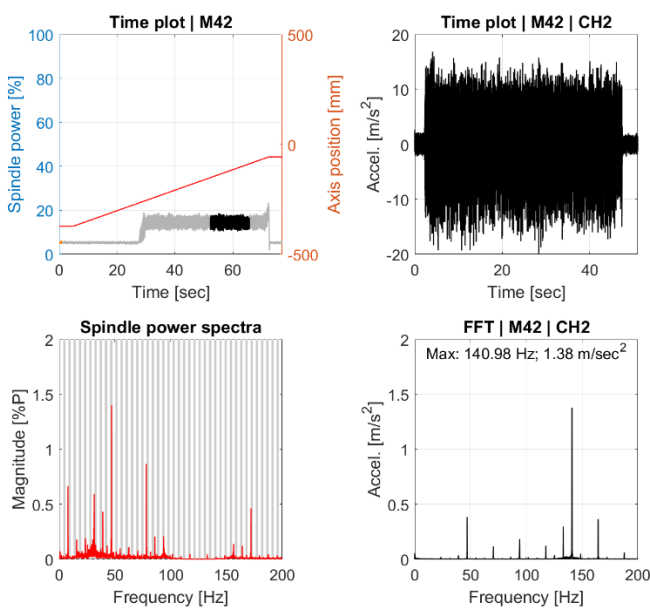


$a_e = 2\text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=4444\text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=6,6\%$

Měření M42, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=3\text{ mm}$ , S470

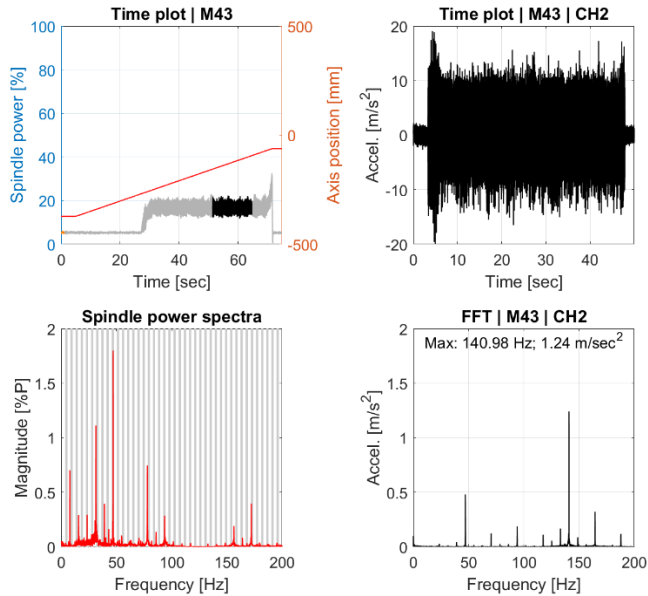


$a_e = 3\text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=4032\text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=9\%$

**Měření M43, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=4\text{mm}$ , S470**

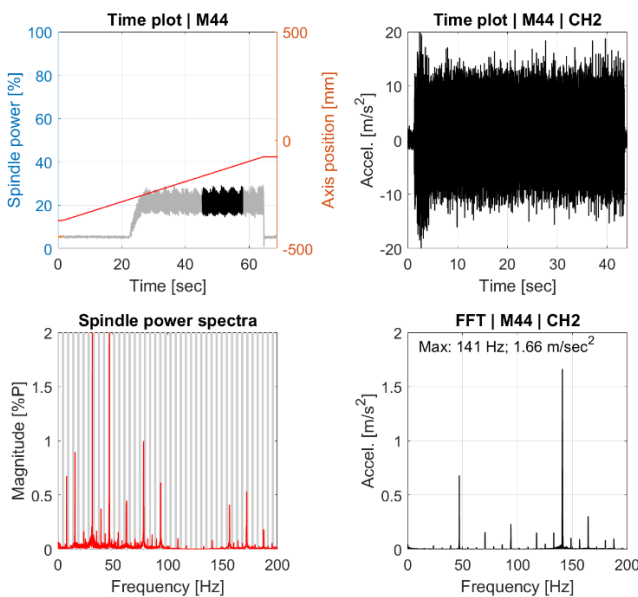


**ae = 4 mm; stabilní**

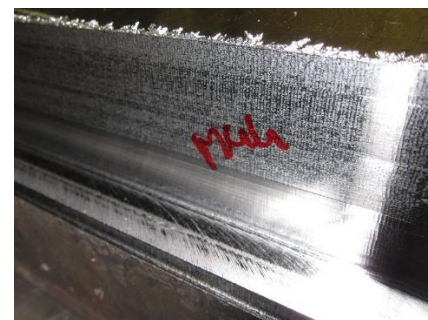


- Kc=3762 MPa
- Pvyuž.=11,2%

**Měření M44, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=6\text{mm}$ , S470**

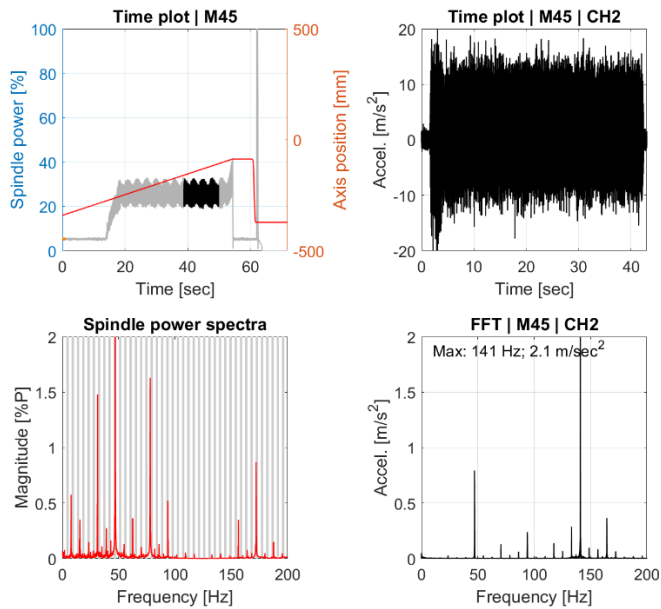


**ae = 4 mm; stabilní – velké kmity**

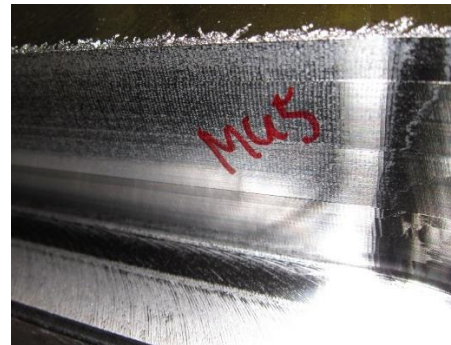


- Kc=3480 MPa
- Pvyuž.=15,6%

Měření M45, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=8\text{mm}$ , S470

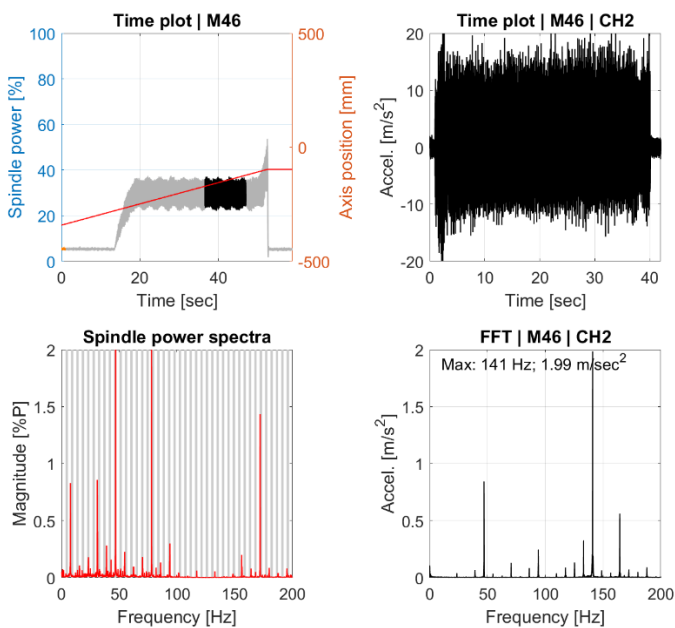


$a_e = 4 \text{ mm}$ ; stabilní – velké kmity



- $K_c=3346 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=20\%$

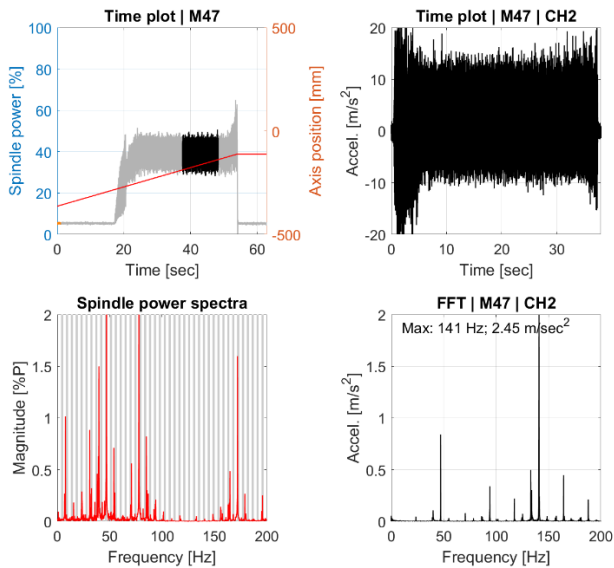
Měření M46, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=10\text{mm}$ , S470



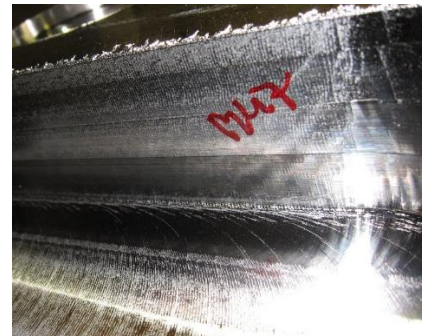
$a_e = 10 \text{ mm}$ ; stabilní – velké kmity



Měření M47, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=15\text{mm}$ , S470

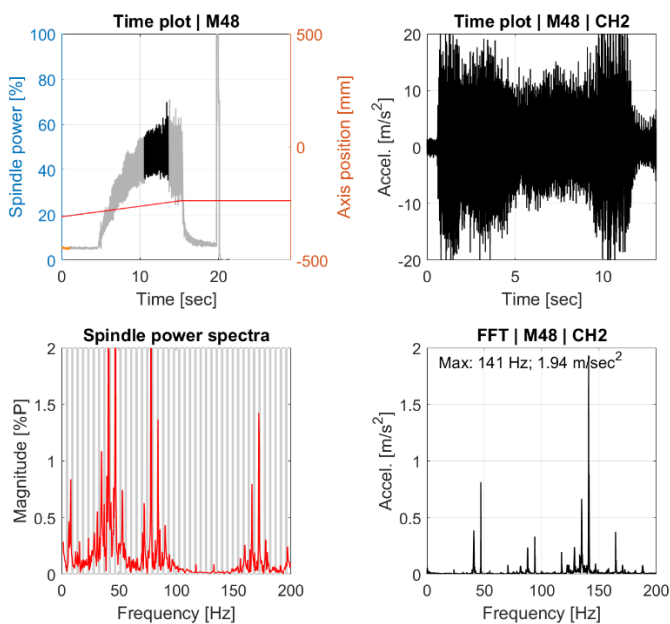


$a_e = 15 \text{ mm}$ ; stabilní – velké kmity

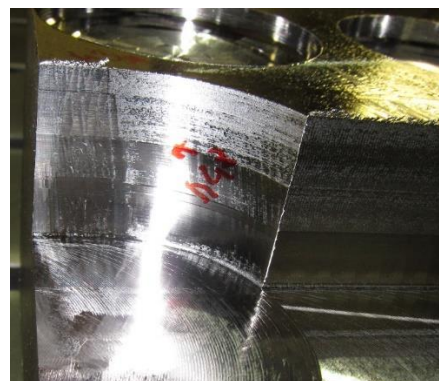


- $K_c=2992 \text{ MPa}$
- $P_{vyu\check{z}}=33,5\%$

Měření M48, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=20\text{mm}$ , S470



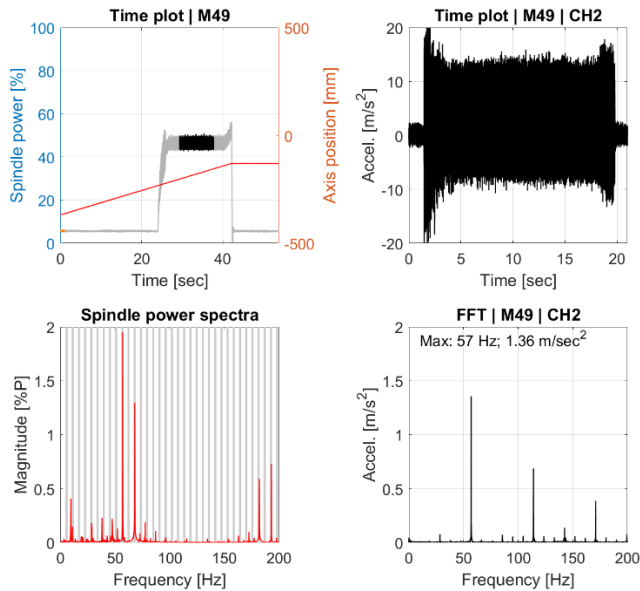
$a_e = 20 \text{ mm}$ ; stabilní – velké kmity



- $K_c=2824 \text{ MPa}$
- $P_{vyu\check{z}}=42,2\%$



Měření M49, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=15\text{mm}$ , S570

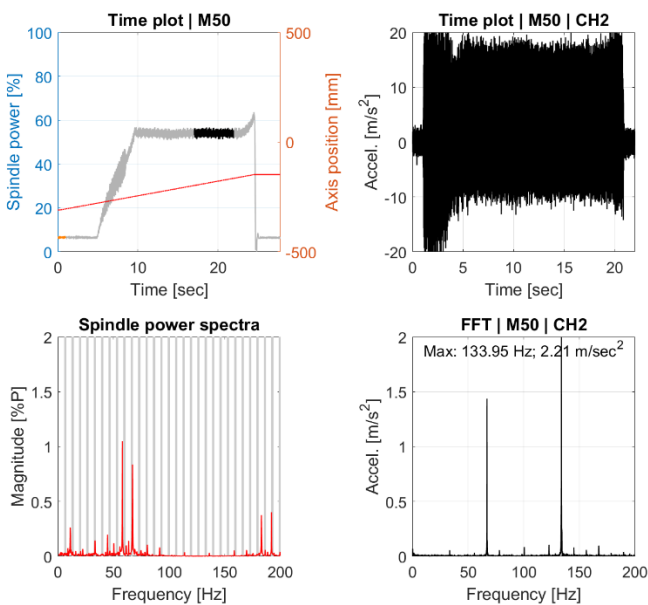


$a_e = 15 \text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=2992 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=40,7\%$

Měření M50, Y1430, nesousledné frézování,  $a_e=15\text{mm}$ , S670



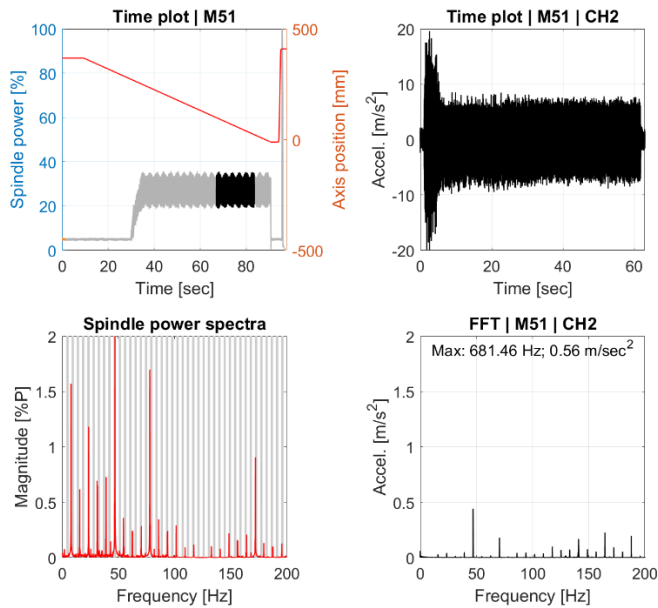
$a_e = 15 \text{ mm}$ ; stabilní – velké kmity



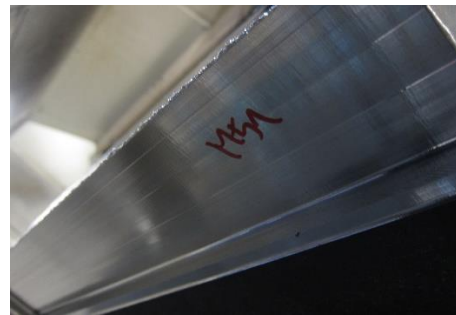
- $K_c=2978 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=47,5\%$

## Příloha č.6 – Měření M51-M59 s nástrojem D80/Z3, $a_p=40\text{ mm}$ , $Y=1430\text{ mm}$ , sousledný záběr

Měření M51, Y1430, sousledné frézování,  $a_e=10\text{ mm}$ , S470

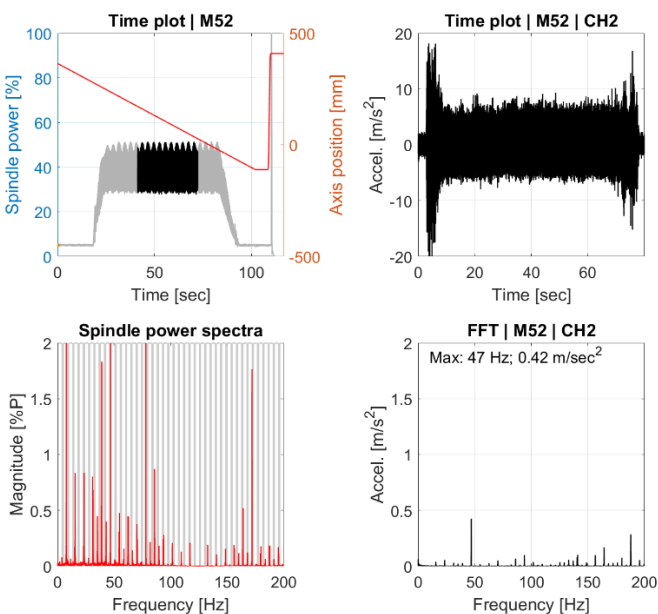


$a_e = 10\text{ mm}$ ; stabilní

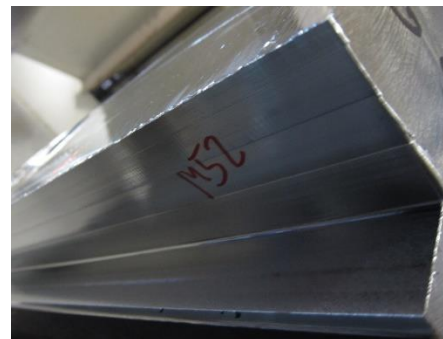


- $K_c=2885\text{ MPa}$
- $P_{vyu\check{z}.}=21,5\%$

Měření M52, Y1430, sousledné frézování,  $a_e=15\text{ mm}$ , S470

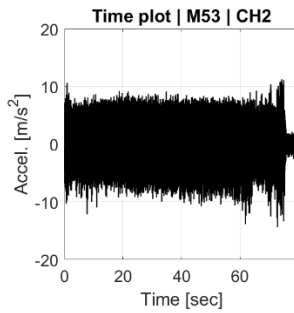
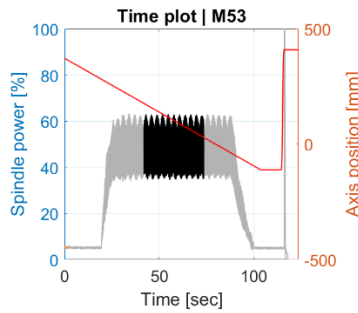


$a_e = 15\text{ mm}$ ; stabilní

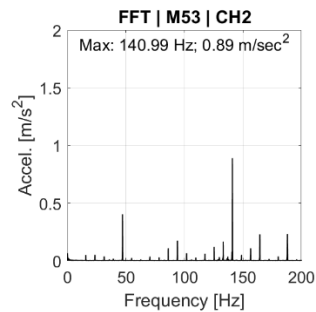
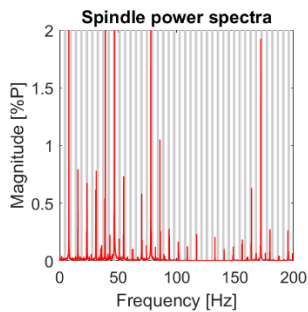


- $K_c=2912\text{ MPa}$
- $P_{vyu\check{z}.}=32,6\%$

Měření M53, Y1430, sousledné frézování,  $a_e=20\text{mm}$ , S470

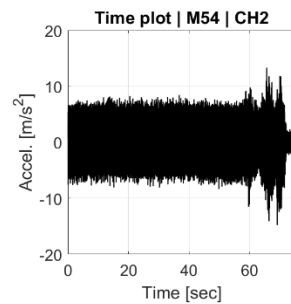
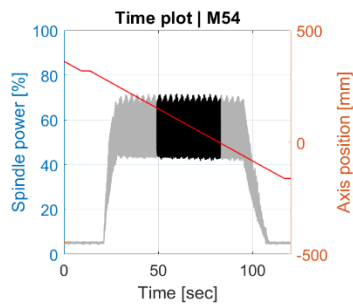


$a_e = 20 \text{ mm}$ ; stabilní

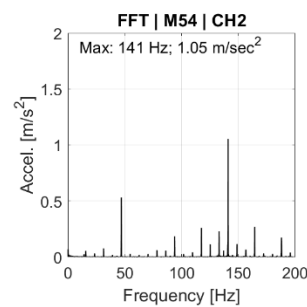
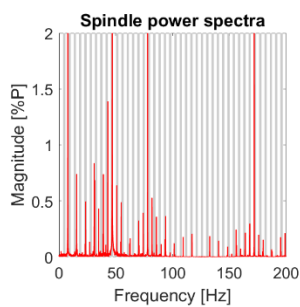


- $K_c=2795 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=41,7\%$

Měření M54, Y1430, sousledné frézování,  $a_e=25\text{mm}$ , S470

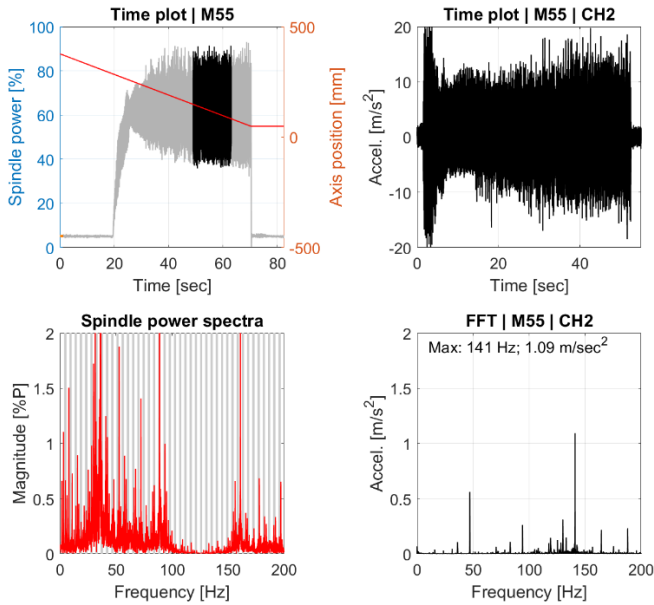


$a_e = 25 \text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=2693 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=50,3\%$

Měření M55, Y1430, sousledné frézování,  $a_e=30\text{mm}$ , S470

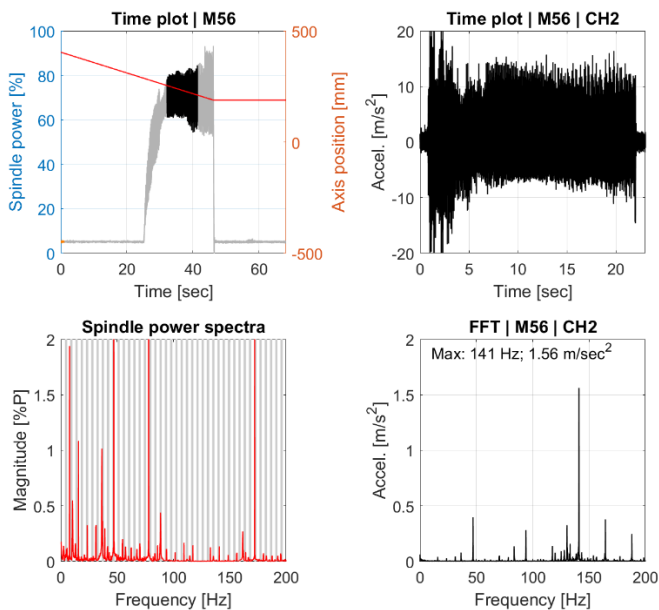


$a_e = 30 \text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=2525 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=56,6\%$

Měření M56, Y1430, sousledné frézování,  $a_e=35\text{mm}$ , S470

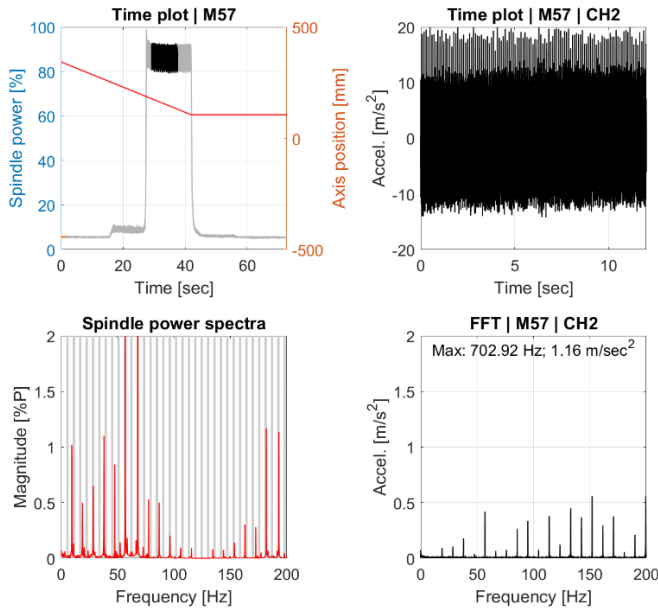


$a_e = 35 \text{ mm}$ ; stabilní – velké kmity



- $K_c=2515 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=65,7\%$

Měření M57, Y1430, sousledné frézování,  $a_e=35\text{mm}$ , S570

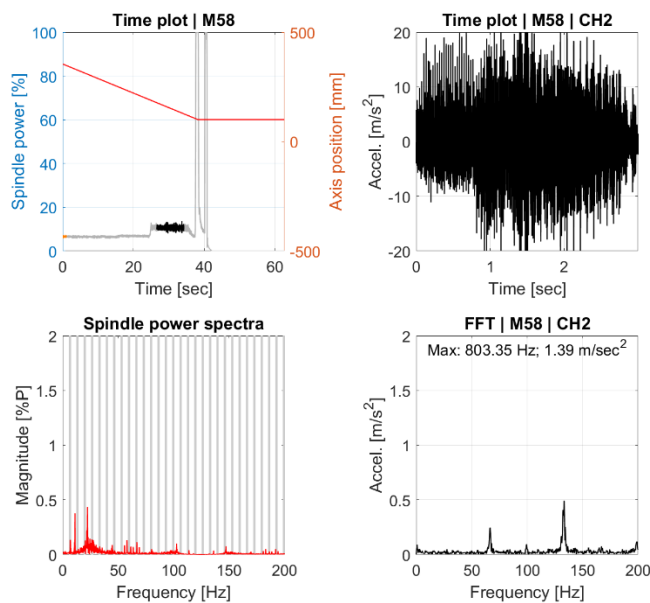


$a_e = 35 \text{ mm}$ ; stabilní – velké kmity

obrázek není  
k dispozici

- $K_c=2537 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=80,5\%$

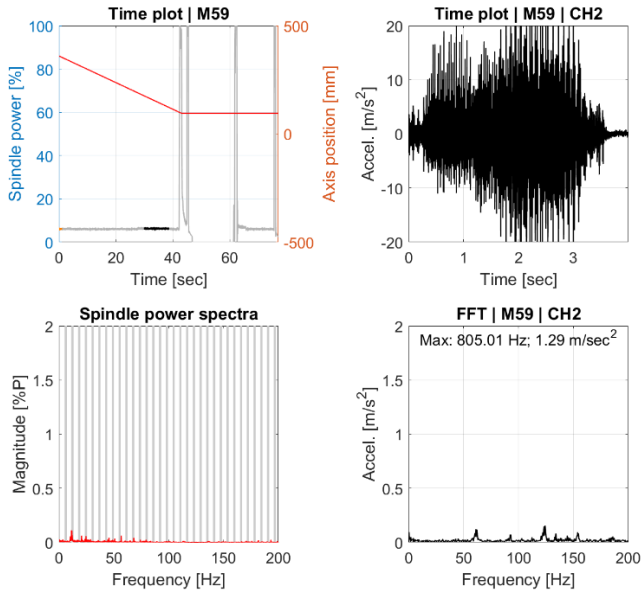
Měření M58, Y1430, sousledné frézování,  $a_e=35\text{mm}$ , S670



$a_e = 35 \text{ mm}$ ; přetížen pohon vřetene

obrázek není  
k dispozici

Měření M59, Y1430, sousledné frézování,  $a_e=35\text{mm}$ , S620

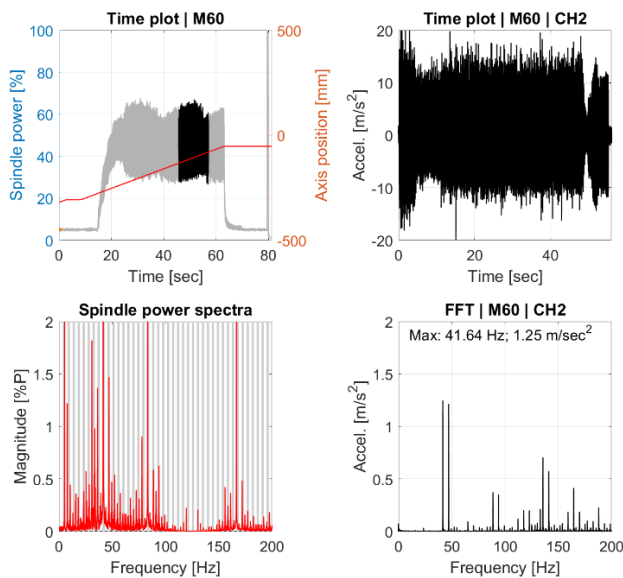


$a_e = 35 \text{ mm}$ ; přetížen pohon vřetene

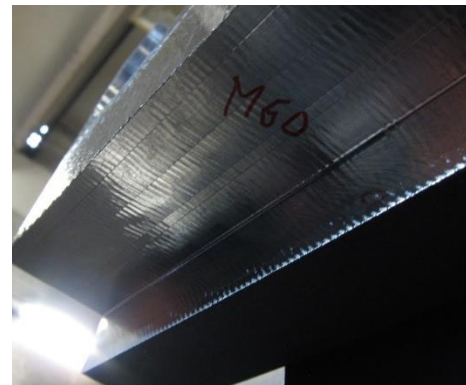
obrázek není  
k dispozici

## Příloha č.7 – Měření M60-M64 s nástrojem D80/Z3, $a_p=40\text{ mm}$ , $Y=920\text{ mm}$ , nesousledný záběr

Měření M60, Y920, nesousledné frézování,  $a_e=20\text{mm}$ , S470

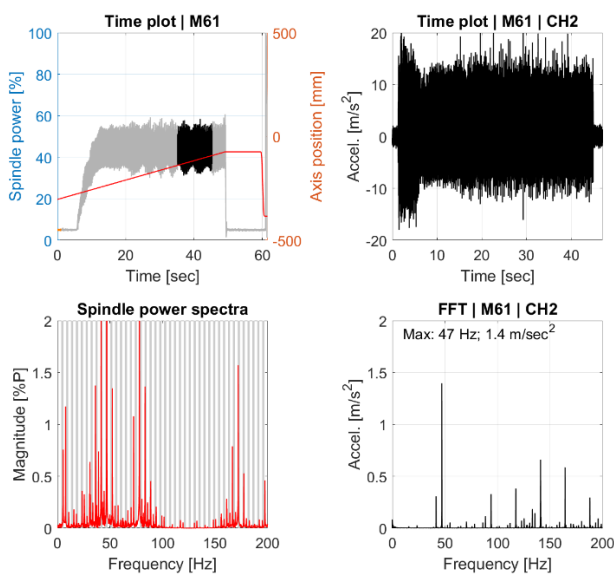


$a_e = 20\text{ mm}$ ; nestabilní

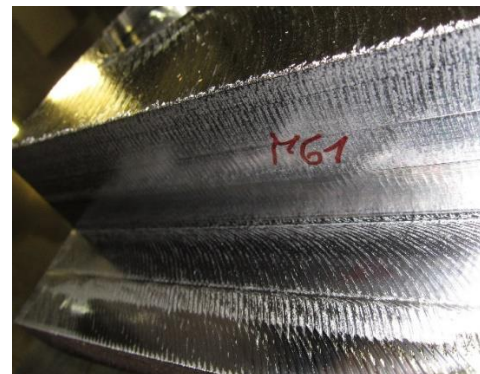


- $K_c=2751\text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=41,1\%$

Měření M61, Y920, nesousledné frézování,  $a_e=18\text{mm}$ , S470

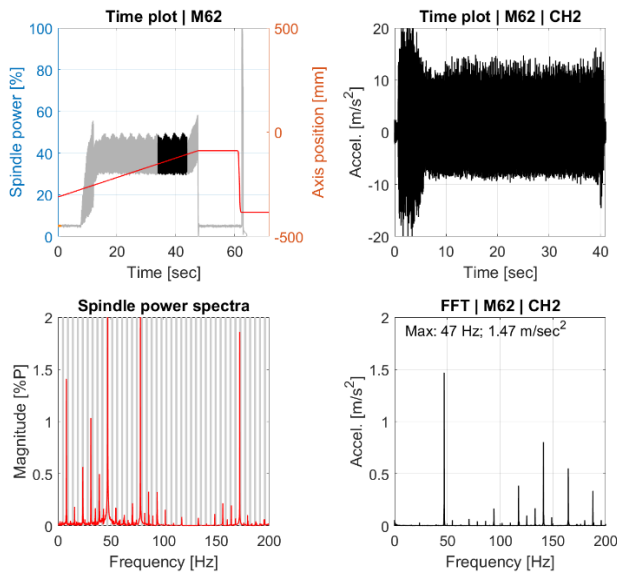


$a_e = 18\text{ mm}$ ; mezní

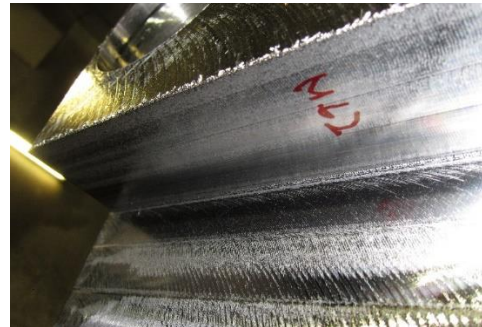


- $K_c=2895\text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=38,9\%$

Měření M62, Y920, nesousledné frézování,  $a_e=15\text{mm}$ , S470

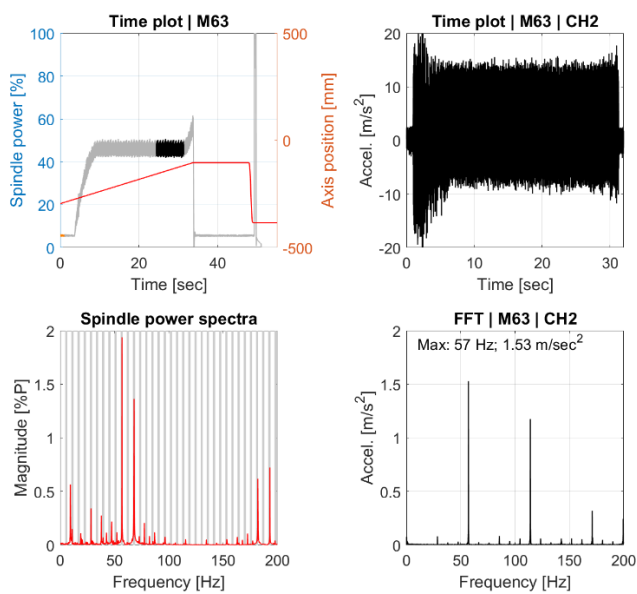


$a_e = 15 \text{ mm}$ ; stabilní

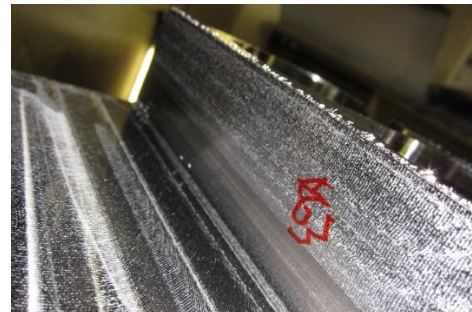


- $K_c=2981\text{MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=33,4\%$

Měření M63, Y920, nesousledné frézování,  $a_e=15\text{mm}$ , S570



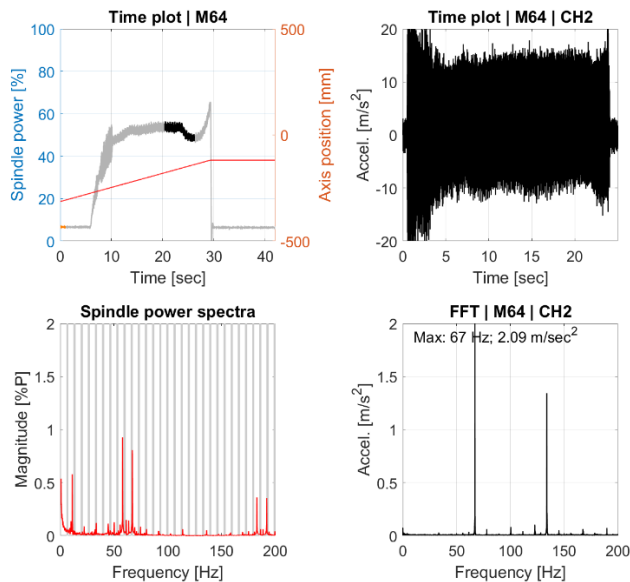
$a_e = 15 \text{ mm}$ ; stabilní



- $K_c=2964 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=40,3\%$



Měření M64, Y920, nesousledné frézování,  $a_e=15\text{mm}$ , S670



$a_e = 15 \text{ mm}$ ; stabilní – velké kmity



- $K_c=2839 \text{ MPa}$
- $P_{\text{využ.}}=45,3\%$

## Příloha č.8 – Měrný řezný odpor

Kc pro D160/Z9, ae=105mm

Měření	Y	S	ap	Záběr	Stabilita	Kc [MPa]
	[mm]	[1/min]	[mm]			
M06	1500	299	2	NES	Mezní	1710
M02	1500	360	2	NES	Stabilní	1636
M03	1500	360	3	NES	Nestabilní	2029
M07	1100	360	2	NES	Stabilní	2002
M08	1100	360	3	NES	Nestabilní	1872
M15	1500	360	1	SOU	Stabilní	1755
M16	1500	360	2	SOU	Stabilní	1827
M17	1500	360	2,5	SOU	Stabilní	1832
M18	1500	360	3	SOU	Stabilní	1827
M19	1500	360	3,5	SOU	Stabilní	1827
M04	1500	410	2	NES	Mezní	1612
M09	1100	410	3	NES	Nestabilní	1979
M20	1500	410	3	SOU	Stabilní	1859
M05	1500	460	2	NES	Stabilní	1720
M10	1100	460	2	NES	Stabilní	1844
M11	1100	460	2,5	NES	Stabilní	1951
M12	1100	460	3	NES	Stabilní	1893
M21	1500	460	3	SOU	Stabilní	1874
M13	1100	510	2	NES	Stabilní	1874
M22	1500	510	3	SOU	Stabilní	1888
M23	1500	510	3,5	SOU	Stabilní	1885
M24	1500	510	4	SOU	Stabilní	1874
M25	1500	510	4,5	SOU	Stabilní	1672

**Kc pro D160/Z9, ae=55mm**

Měření	Y	S	ap	Záběr	Stabilita	Kc [MPa]
	[mm]	[1/min]	[mm]			
M06	1500	299	2	SOU	Stabilní	1556
M02	1500	360	2	SOU	Stabilní	1436
M03	1500	360	3	SOU	Stabilní	1466
M07	1100	360	2	SOU	Stabilní	1703
M08	1100	360	3	SOU	Stabilní	1592
M15	1500	360	1	NES	Stabilní	2010
M16	1500	360	2	NES	Stabilní	1811
M17	1500	360	2,5	NES	Stabilní	1780
M18	1500	360	3	NES	Stabilní	1765
M19	1500	360	3,5	NES	Stabilní	1740
M04	1500	410	2	SOU	Stabilní	1466
M09	1100	410	3	SOU	Stabilní	1590
M20	1500	410	3	NESOU	Stabilní	1777
M05	1500	460	2	SOU	Stabilní	1657
M10	1100	460	2	SOU	Stabilní	1672
M11	1100	460	2,5	SOU	Stabilní	1632
M12	1100	460	3	SOU	Stabilní	1605
M21	1500	460	3	NES	Stabilní	1841
M13	1100	510	2	SOU	Stabilní	1684
M22	1500	510	3	NES	Stabilní	1819
M23	1500	510	3,5	NES	Stabilní	1799
M24	1500	510	4	NES	Stabilní	1776
M25	1500	510	4,5	NES	Stabilní	1581

**Kc pro D80/Z3**

Měření	ae[mm]	Y[mm]	S[1/min]	Záběr	Stabilita	Kc[Mpa]
M41	2	1430	470	NESOU	stabilní	4444
M42	3	1430	470	NESOU	stabilní	4032
M43	4	1430	470	NESOU	stabilní	3762
M44	6	1430	470	NESOU	stabilní - velké kmity	3480
M45	8	1430	470	NESOU	stabilní - velké kmity	3346
M46	10	1430	470	NESOU	stabilní - velké kmity	3225
M47	15	1430	470	NESOU	stabilní - velké kmity	2992
M48	20	1430	470	NESOU	stabilní - velké kmity	2824
M49	15	1430	570	NESOU	stabilní	2992
M50	15	1430	670	NESOU	stabilní - velké kmity	2978
M51	10	1430	470	SOU	stabilní	2885
M52	15	1430	470	SOU	stabilní	2912
M53	20	1430	470	SOU	stabilní	2795
M54	25	1430	470	SOU	stabilní	2693
M55	30	1430	470	SOU	stabilní	2525
M56	35	1430	470	SOU	stabilní - velké kmity	2515
M57	35	1430	570	SOU	stabilní - velké kmity	2537
M58	35	1430	670	SOU	přetížení	
M59	35	1430	620	SOU	přetížení	
M60	20	920	470	NESOU	nestabilní	2751
M61	18	920	470	NESOU	mezní	2895
M62	15	920	470	NESOU	stabilní	2981
M63	15	920	570	NESOU	stabilní	2964
M64	15	920	670	NESOU	stabilní	2839

**Kc pro D78/Z1**

Měření	Y[mm]	fo [mm]	Stabilita	Kc[MPa]
M37	1574	0,1	Mezní	2369
M31	1574	0,15	Nestabilní	2254
M38(S490)	1574	0,2	Nestabilní	2304
M32	1020	0,15	Mezní	2254
M33	1020	0,2	Stabilní	2172
M34	1020	0,25	Stabilní	2095
M35	1020	0,3	Stabilní	2047
M36	1020	0,35	Přetížení vřetena	-
M39(A0C90)	1574	0,1	Mezní	2346