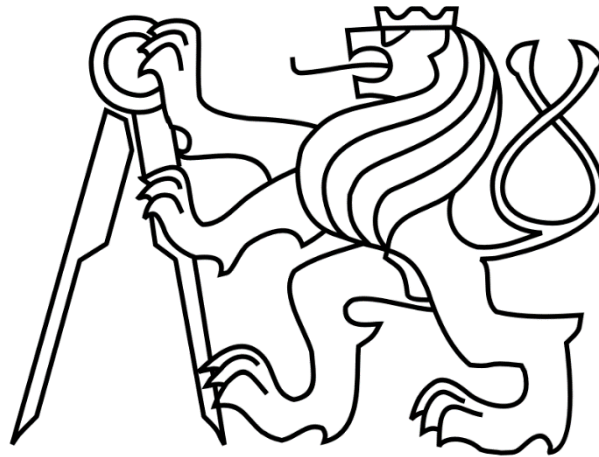


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

Vliv použitého držáku na dynamickou poddajnost soustavy stroj – nástroj

*Bc. Quang Huy Bui*

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bui** Jméno: **Quang Huy** Osobní číslo: **475435**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**  
Studijní program: **Robotika a výrobní technika**  
Specializace: **Výrobní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vliv použitého držáku na dynamickou poddajnost soustavy stroj - nástroj**

Název diplomové práce anglicky:

**Effect of the tool holder used on the dynamic compliance of the machine tool - tool system**

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Výkonnost stroje determinuje nejpoddajnější část soustavy stroj - nástroj - obrobek. Práce je zaměřena na uzel nástroje. Konkrétně se jedná o výzkum vlivu nástrojových držáků na dynamickou poddajnost nástroje. Tento vliv bude ověřen měřeními dynamické poddajnosti vytipovaných kombinací nástroje a držáků, měřeními kmitání stroje při obrábění. Při obrábění bude vyhodnocena mez stability a výkonnost stroje. Osnova práce: 1. Rešerše nástrojových držáků; 2. Volba dvou nástrojů a sady nástrojových držáků; 3. Návrh řezných podmínek; 4. Seznámení se s problematikou měření dynamické poddajnosti a kmitání při obrábění; 5. Seznámení se s teorií stability obrábění; 6. Provedení a zpracování experimentu: změření dynamické poddajnosti, měření kmitání při obrábění; 7. Vyhodnocení experimentu: porovnání jednotlivých konfigurací: nástroj - držák z hlediska dynamické poddajnosti a meze stability; 8. Tvorba diplomové práce. Rozsah textové části: 60 - 80 stran. Rozsah grafické části: Potřebné obrázky a tabulky.

Seznam doporučené literatury:

TLUSTÝ, Jiří. Manufacturing processes and equipment. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000. ISBN 0-201-49865-0; DØSSING Ole. Structural Testing, Part I: Mechanical Mobility Measurements, Brüel & Kjær, April 1988, DK BR 0458-12, pp 47.; DØSSING Ole. Structural Testing, Part II: Modal Analysis nad Simulation, Brüel & Kjær, April 1988, DK BR 0458-12, pp 47.; JANOTA, M., P. KOLÁŘ a M. SULITKA. Operational method for identification of specific cutting force during milling. MM Science Journal [online]. 2019, 2019(November), 3250–3257. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019\_11\_2019078

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

**Ing. Michal Stejskal ústav výrobních strojů a zařízení FS**

Datum zadání diplomové práce: **14.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **24.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **24.09.2023**

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

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem 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 22.07.2023

.....  
podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Miroslavovi Janotovi, Ph.D., za odborné vedení a cenné rady během konzultací, panu Ing. Michalovi Stejskalovi za domluvení a přípravu experimentu a taktéž společnosti TOS VARNSDORF s.r.o. za umožnění provedení tohoto experimentu, bez kterého by tato práce nevznikla. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mi byli oporou a podporovali mě nejen při psaní této diplomové práce, ale také po celou dobu studia.

## Anotační list

Autor:	Bc. Quang Huy BUI
Název DP:	Vliv použitého držáku na dynamickou poddajnost soustavy stroj – nástroj
Rozsah práce:	80 str., 93 obr., 5 tab., 11 příloh
Akademický rok:	2022/2023
Škola:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D.
Konzultant	Ing. Michal Stejskal
Zadavatel:	TOS Varnsdorf a.s.
Využití:	Schopnost optimalizace řezného procesu ze znalosti dynamických vlastností zvolené konfigurace držák – nástroj
Klíčová slova:	vibrace, frézovací stroj, modální analýza, diagram stability, dynamická poddajnost, nástrojový držák, Big Plus
Anotace:	Tato diplomová práce se zabývá zkoumáním vlivu použitého nástrojového držáku na dynamickou poddajnost nástroje a stability řezného procesu. Úvodní část se skládá z rešerše pojednávající o používaných typech nástrojových držáků a teoretického úvodu do měření dynamické poddajnosti a kmitání. V druhé části je dále provedeno experimentální porovnání zvolených konfigurací držák – nástroj z pohledu dynamické poddajnosti a stability řezného procesu.

## **Anotation**

Author:	Bc. Quang Huy BUI
Title of diploma thesis:	Effect of the tool holder used on the dynamic compliance of the machine tool - tool system
Extent:	80 p., 93 fig., 5 tab., 11 attachments
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D.
Consultant	Ing. Michal Stejskal
Submitter:	TOS Varnsdorf a.s.
Application:	The ability to optimize the cutting process based on the knowledge of the dynamic properties of the selected holder-tool configuration
Key words:	vibrations, milling machine, modal analysis, stability lobe chart, dynamic compliance, tool holder, Big Plus
Annotation:	<p>This diploma thesis deals with the investigation of the influence of the used tool holder on the dynamic compliance of the tool and the stability of the cutting process. The introductory part consists of a reasearch about the types of tool holders and a theoretical introduction to the measurement of dynamic compliance and vibration. The second part contaions of an experimental comparison of the selected configurations of the holder - tool from the point of view of dynamic compliance and stability of the cutting process.</p>

## Obsah

Obsah .....	- 7 -
Seznam použitých značek a zkratk .....	- 9 -
1. Úvod .....	- 10 -
2. Rešerše .....	- 11 -
2.1. Rozhraní upínač – nástroj.....	- 12 -
2.1.1. Mechanické .....	- 12 -
2.1.2. Hydraulické.....	- 15 -
2.1.3. Tepelné.....	- 16 -
2.2. Rozhraní vřeteno – upínač .....	- 17 -
2.2.1. Kuželová stopka se strmostí 7:24 .....	- 17 -
2.2.2. Kuželová stopka se strmostí 1:10.....	- 21 -
2.2.3. Kuželová stopka se strmostí 1:20 .....	- 24 -
2.3. Shrnutí rešerše .....	- 25 -
3. Úvod do problematiky měření vibrací.....	- 26 -
3.1. Mechanické kmitání .....	- 26 -
3.1.1. Druhy mechanického kmitání .....	- 26 -
3.1.2. Parametry kmitání.....	- 28 -
3.2. FFT analýza .....	- 29 -
3.3. FRF – funkce frekvenčního přenosu .....	- 32 -
3.4. Modální analýza .....	- 33 -
3.5. Měřicí aparatura.....	- 34 -
4. Vlastní řešení .....	- 37 -
4.1. Použitý stroj, nástroj a obrobek .....	- 38 -
4.1.1. Stroj .....	- 38 -
4.1.2. Nástroje .....	- 39 -
4.1.3. Obrobek.....	- 41 -
4.2. Měření FRF (dynamická poddajnost) .....	- 41 -
4.2.1. Měřicí aparatura a parametry měření .....	- 41 -
4.2.2. Výsledky měření .....	- 44 -
4.2.3. Shrnutí výsledků .....	- 47 -
4.3. Stanovení teoretického diagramu stability .....	- 48 -
4.3.1. Postup zpracování dat .....	- 48 -
4.3.2. Vyhodnocení dat .....	- 53 -
4.3.3. Shrnutí výsledků .....	- 55 -
4.4. Zkouška obráběním .....	- 56 -
4.4.1. Parametry zkoušky a způsob zpracování výsledků.....	- 57 -
4.4.2. Vyhodnocení stability řezného procesu pro čelní frézu.....	- 62 -
4.4.3. Vyhodnocení stability řezného procesu pro válcovou frézu .....	- 69 -
5. Závěr .....	- 74 -
6. Seznamy.....	- 76 -
Seznam použité literatury .....	- 76 -
Seznam obrázků .....	- 78 -



---

Seznam tabulek .....	- 79 -
Seznam příloh.....	- 80 -



## Seznam použitých značek a zkratek

### Seznam použitých značek

<b><math>a_e</math></b>	Radiální šířka záběru	[mm]
<b><math>a_p</math></b>	Axiální hloubka řezu	[mm]
<b><math>a_{plim}</math></b>	Mezní hloubka řezu	[mm]
<b><math>b_{krit}</math></b>	Mezní šířka	[mm]
<b>F</b>	Budící síla	[N]
<b>f</b>	Frekvence	[Hz]
<b><math>f_{max}</math></b>	Maximální frekvence	[Hz]
<b><math>f_s</math></b>	Vzorkovací frekvence	[Hz]
<b><math>f_z</math></b>	Posuv na zub	[mm]
<b>G</b>	Stupeň vyvážení	[-]
<b>H</b>	funkce frekvenčního přenosu	[dle odezvy]
<b><math>k_c</math></b>	Měrný řezný odpor	[MPa]
<b>n</b>	Otáčky vřetena	[1/min]
<b><math>v_c</math></b>	Řezná rychlost	[m/min]
<b><math>v_{eff}</math></b>	Efektivní hodnota rychlosti signálu	[mm/s]
<b><math>v_f</math></b>	Posuvová rychlost	[mm/min]
<b>W</b>	Osa W	[mm]
<b>X</b>	Osa X	[mm]
<b>x</b>	Odezva	[dle odezvy]
<b><math>x_{eff}</math></b>	Efektivní hodnota obecného signálu	[dle odezvy]
<b>Y</b>	Osa Z	[mm]
<b>Z</b>	Osa Z	[mm]
<b><math>z_e</math></b>	Počet zubů v záběru	[-]

### Seznam použitých zkratek

<b>FFT</b>	Fast Fourier transform (Rychlá Fourierova transformace)
<b>FRF</b>	Frequency Response Function (frekvenční přenosová funkce)
<b>RMS</b>	Efektivní hodnota
<b>VBD</b>	Vyměnitelná břitová destička

## 1. Úvod

Při každém výrobním procesu se vždy usiluje o maximální využití instalovaného výkonu obráběcího stroje především proto, aby se dosáhlo co největší produktivity a hospodárnosti výroby s minimálním dopadem na životní prostředí. Tento obráběcí proces je přímo ovlivňován statickými a dynamickými vlastnostmi soustavy stroj – nástroj – obrobek.

Jedna z charakteristických vlastností této soustavy, která zásadně ovlivňuje vibrace vzniklé při obrábění, a tím stabilitu řezného procesu, se nazývá dynamická poddajnost. Jedná se o frekvenčně závislý poměr spektra, který popisuje odezvu stroje na dynamické buzení stroje.

Nestabilita řezného procesu je charakterizována vznikem nežádoucího kmitání během obrábění, jenž se nazývá samobuzené kmitání, které je vybuzeno samotným řezným procesem. Toto kmitání má negativní vliv na výslednou kvalitu a přesnost obrobeného povrchu, způsobuje nadměrné opotřebení nástroje a stroje a také dochází ke zvýšeným hlukovým emisím. Z toho plyne požadavek na co největší dynamickou tuhost stroje, aby bylo možné plného využití výkonu obráběcího stroje.

Předmětem této práce, jak již z názvu vypovídá, je porovnání zvolených nástrojových držáků z pohledu dynamické poddajnosti nástroje a stability obráběcího procesu na základě experimentu, který se skládal z měření odezvy systému a kmitání při obrábění, jenž se konal ve společnosti TOS Varnsdorf.

## 2. Rešerše [2]

Nástrojový držák je nezbytným mezičlánkem mezi řezným nástrojem a obráběcím strojem. V dnešní době existuje mnoho nástrojových upínačů lišících se od sebe jak už fyzikálním principem fungování, upínací silou, tuhostí tak i pořizovací cenou. Zejména upínací síla hraje velkou roli při volbě upínače, neboť má největší vliv na řezný proces, což ovlivňuje i výslednou kvalitu obrobeneho povrchu.

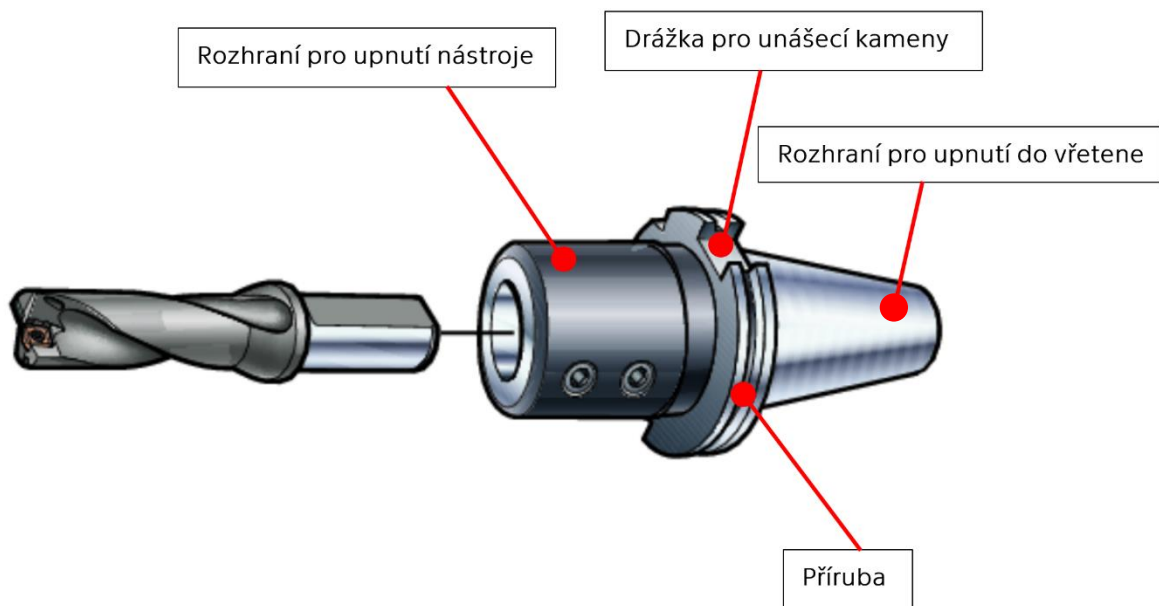
Aby bylo obrábění co nejproduktivnější, je zapotřebí využít všech dostupných prostředků, které nám obráběcí stroj poskytuje, to znamená frézování při co nejvyšší řezné a posuvové rychlosti.

Vysoká řezná rychlost vyžaduje vysoké otáčky vřetena. Z toho vyplývá podmínka přesného upnutí s minimálním obvodovým házením a s tím související dynamické vyvážení, které může vyvolat nežádoucí vibrace. Tyto vibrace způsobují nadměrné namáhání ložisek vřetene, zvýšené hlukové emise během procesu obrábění a nerovnoměrné opotřebení břitu nástroje vedoucí ke zhoršení přesnosti a kvality obráběného povrchu.

Vysoká posuvová rychlost zase vede k ohybovému namáhání sestavy (nástroj – upínač) především při velkém vyložení nástroje, z čehož plyne potřeba vysoké pevnosti v ohybu.

Dalšími požadavky, které musí upínač splňovat, jsou krátké upínací a uvolňovací časy, snadná a bezpečná obsluha, vysoká životnost při nízkých pořizovacích nákladech, tlumení vibrací, pevnost proti axiálním silám i proti pootočení atd. Vhodnou volbou upínače lze také výrazně prodloužit životnost nástroje.

Hlavní funkční prvky nástrojového držáku jsou vidět na obr. 1.



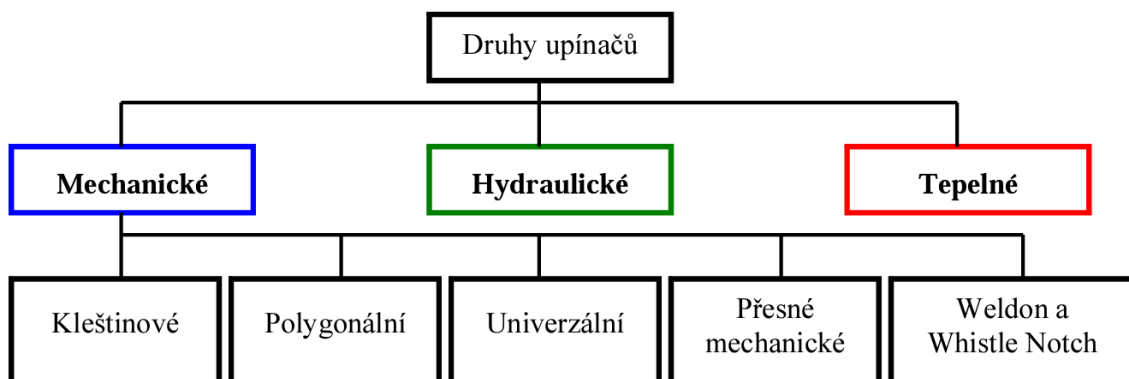
Obr. 1: Nástrojový držák [1]

Shrnutí požadavků na nástrojový držák:

- Minimální obvodové házení
- Vysoká tuhost a pevnost v ohybu
- Přesné středění nástroje
- Opakovatelná přesnost upnutí
- Snadná a bezpečná obsluha
- Statické a dynamické vyvážení
- Vysoká životnost
- Cenová dostupnost
- Dokonalý přenos kroutícího momentu a sil mezi upínačem a nástrojem
- Tlumení vibrací

## 2.1. Rozhraní upínač – nástroj

Nástrojové držáky používané v praxi nejčastěji rozdělujeme dle fyzikálního principu fungování do tří kategorií, a to na mechanické, tepelné a hydraulické viz obr. 2. Volba také závisí na tvaru stopky nástroje a způsobu obrábění.



Obr. 2: Druhy upínacích pouzder [2]

### 2.1.1. Mechanické [2]

Pro moderní nástroje určené pro vysokorychlostní a výkonové obrábění nejsou zcela vhodné, neboť neumožňují využití plného potenciálu nástrojů. V průmyslu jsou často využívány hlavně z důvodu dobrého poměru cena – výkon. Nevýhodami jsou malá upínací síla, nedostatečná pevnost v ohybu, velká obvodová házivost a nízké tlumení vibrací.

#### a) Morse kužel [3]

Nástroje s kuželovou upínací stopkou, viz obr. 3, se upínají přímo do kuželové dutiny vřetena frézky v případě, je-li kužel upínací stopky frézy a dutiny vřetena shodný. Je-li kužel upínací stopky menší než kužel dutiny vřetena, je nutno k upínání použít redukční pouzdra.



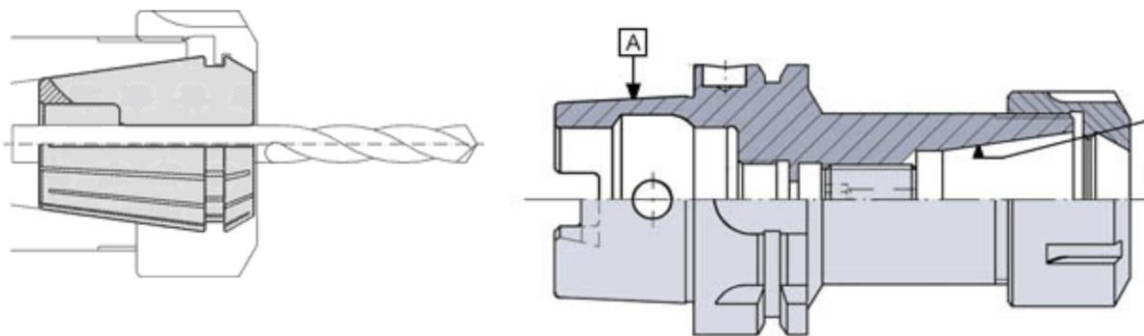
Obr. 3: Frézovací nástroje s kuželovou stopkou (Morse) [3]

#### b) Kleštinové [3], [4], [5]

Nástroje s válcovou stopkou se nejčastěji upínají pomocí upínacích pouzder a kleštin, které umožňují rychlé a spolehlivé upnutí. Kleštiny se vyrábějí pro velký rozsah průměrů stopky nástroje a jsou odstupňovány po různých velikostech (ER11, ER16, ER20, ER25, ER32, ER40, ER50) od průměru 6 mm do 34 mm.

Fungují na principu zatlačování výměnné vložky (kleštiny) do kuželové dutiny pouzdra, čímž se elasticky zdeformuje a dojde k upnutí válcové stopky nástroje. Schéma tohoto upínače je na obr. 4.

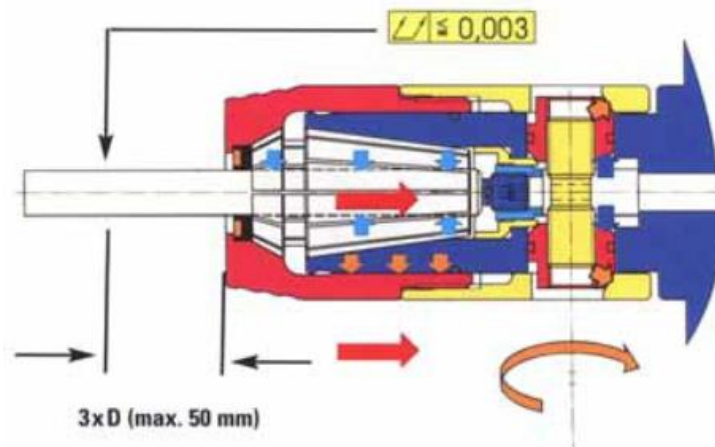
Nevýhodami jsou vyšší házivost (10–20  $\mu\text{m}$ ), která je způsobena vychýlením její osy během zatlačování nebo vtahování do kuželové dutiny, a proto se nehodí pro vysokorychlostní obrábění.



Obr. 4: Princip kleštinového upínače [5]

Moderní kleštinové upínače řeší tento problém buď přesným vedením upínací převlečné matice kolmým stykem mezi maticí a kleštinou pomocí broušené tvrdokovové vložky, která navíc díky dvojitému kontaktu výrazně snižuje sklon k vibracím, nebo je kleština vtahována do kužele upínače osovým vtahovacím mechanismem – např. upínač HP

plus firmy Fahrion (obr. 5), u něhož je dle údajů výrobce hodnota radiální házivosti nástroje ve vzdálenosti  $3 \times D$  cca 3–5  $\mu\text{m}$ .



Obr. 5: Přesný kleštinový upínač Fahrion HP plus [4]

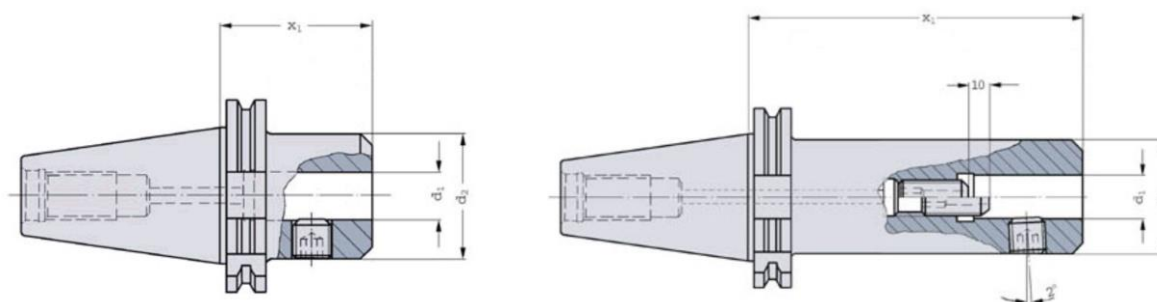
### c) Weldon a Whistle Notch [3], [4], [5]

Upínače typu Weldon (DIN 6535 HB) a Whistle Notch (DIN 6535 HE) se používají pro upínání nástrojů s válcovou stopkou s vyfrézovanou ploškou. Pro přenos kroutícího momentu je využit princip upnutí pomocí šroubů, dosedajících kolmo na plochu vyfrézovanou do stopky nástroje rovnoběžně s osou (Weldon) nebo se sklonem  $2^\circ$  (Whistle Notch).

Výhodou těchto upínačů je jednoduchost a rychlost upínání nástroje, nízká pořizovací cena, bezpečnost upnutí v radiálním směru a tím i velký přenos kroutících momentů.

Nevýhodou je nutnost užít pro každý průměr stopky nástroje jiný upínač a vysoká házivost upnutého nástroje (15–20  $\mu\text{m}$ ), vycházející z principu upnutí – nástroj je odtlačován upínacím šroubem mimo osu rotace. Také odolnost proti vibracím není vysoká, neboť pevné upnutí je až v místě kontaktu upínacího šroubu se stopkou nástroje, tedy daleko od čela upínače.

Dle typu mohou být standardně vyvažovány až na hodnoty G 6,3 při otáčkách 12 000 až 30 000 1/min. Schéma držáků Weldon a Wistle Notch je vidět na obr. 6.

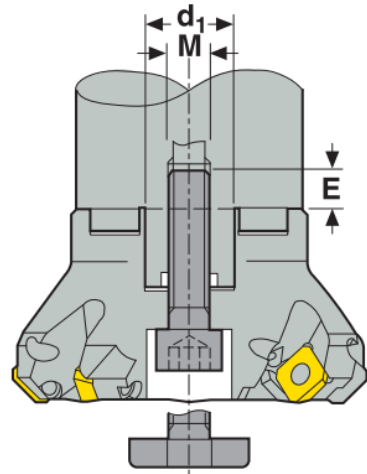


Obr. 6: Upínač Weldon (napravo) a Wistle notch (vlevo) [5]

#### d) Frézovací trny [3], [4]

Nástroje s otvorem (válcové, kotoučové, tvarové apod.) se upínají na upínače s trnem a jsou zajištěny šrouby (obr. 7). Nástroje o většího průměru se upínají na přírubu. Kroutící moment se přenáší přírubou nebo dvojicí kamenů na upínači, které zapadají do vybrání v těle frézy. Přenos kroutícího momentu kotoučové frézy se přenáší pomocí pera.

Nevýhodou pevného trnu je ta, že není zaručena přesná centricita frézy vůči ose rotace, což způsobuje nestejný posuv na zub a nerovnoměrné opotřebení břitových destiček. Proto se ve zvláště přesných aplikacích používá upínání na trn, který je rozpínatelný mechanicky nebo hydraulicky.



Obr. 7: Nástrčný upínač [1]

#### 2.1.2. Hydraulické [3], [4], [5]

Hydraulické upínače jsou založeny na deformaci vnitřního pouzdra vyvolanou hydraulickým tlakem pomocí upínacího šroubu. Vyznačují se velmi dobrým tlumením vibrací a dosahují házivosti  $\leq 3 \mu\text{m}$ . Dle typu mohou být standardně vyvažovány až na hodnoty G2,5 při otáčkách 25 000 1/min. Jsou snadno a rychle přestavitelné na jiný průměr upínané stopky pomocí přesných vložek. Nedochozí u nich k poklesu upínací síly při vysokých otáčkách a jsou vhodné pro práce v HSC režimu. Pro hydraulické upínače obecně platí omezení provozní teploty na 50 °C.

Předností těchto upínačů je vysoká radiální tuhost, přesnost upínání a jeho opakovatelnost. Další výhodou je možnost upnutí jak hladkých stopek, tak i stopky určené pro Weldon a Whistle Notch.

Nevýhodou je složitá výroba, nenáročnost údržby a vysoké nároky na těsnost celého upínacího systému. Také jsou vyšší nároky na vyvážení z důvodu nesymetrické konstrukce.

Na obr. 8 je možné vidět hydraulický nástrojový držák od společnosti Schunk Tendo.



Obr. 8: Hydraulický upínač Schunk Tendo [4]

### 2.1.3. Tepelné [3], [4], [5]

Tepelné upínače (obr. 9) pracují na principu tepelné roztažnosti kovů při vysokých teplotách. Pomocí vysokofrekvenční indukční cívky se upínač velmi rychle ohřeje přesně na místě, kde se nástroj upíná (na 250–300 °C) a dojde k rozšíření otvoru. Po vsunutí nástroje se upínač musí nechat ochladit, a to buď přirozenou cestou (časově náročné), nebo nuceně (chladičí systém). Pro správnou funkci je nutné zvolit nástroj se s topkou s menším koeficientem tepelné roztažnosti.

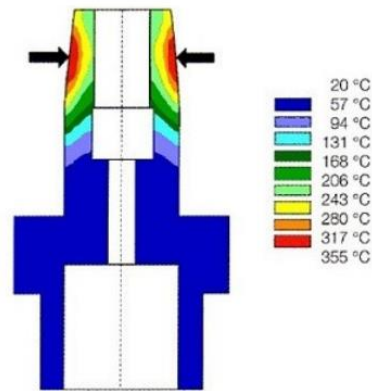
Velkou výhodou tepelných upínačů je jejich jednoduchá konstrukce a s ní související nízké výrobní náklady. Do tepelných upínačů lze upnout i nástroje, jejichž stopka má vyfrézovanou upínací plošku – např. Weldon, Whistle Notch. Dalšími klady jsou nízké obvodové házení nástroje  $\leq 3 \mu\text{m}$ , vysoká upínací síla, vysoká životnost upínacích držáků, symetrická a jednoduchá konstrukce vhodná pro obrábění těžko přístupných míst, přenos vysokého krouticího momentu (2 – 4x vyšší než u hydraulického upínače, možnost použití až do 55 000 1/min.

Nevýhodou je vysoká pořizovací cena zařízení pro ohřev a ochlazování upínač a omezený počet cyklů upínání – odepínání nástrojů, neboť časté zahřívání a ochlazování upínače zkracuje jeho životnost.

Mezi výrobce patří Haimer, Gühring, Diebold, Komet, Seco, Pramet atd.



Obr. 9: Typy tepelných upínačů [5]



Obr. 10: Princip tepelného upínače [3]



## 2.2. Rozhraní vřeteno – upínač

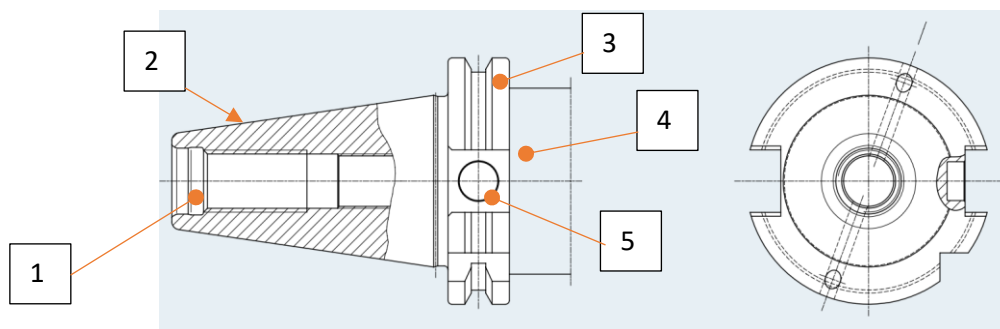
Jedná se o připojovací stopku většinou kuželovitého tvaru, který se upíná do dutiny vřetena. Volba upínací stopky držáku nástroje ovlivňuje jak stabilitu upnutí, tak i možný přenositelný krouticí a ohybový moment. Musí také zajistit dostatečnou upínací sílu při vysokých otáčkách, rychlou výměnu nástroje, opakovanou přesnost, možnost přívodu chladicí kapaliny středem nástroje a v neposlední řadě i snadná obsluha.

Rozdělení upínacích systémů:

- Podle tvaru stopky:
  - Kuželové (ISO, HSK, CAT, MAS BT, MORSE atd.)
  - Polygonální (CAPTO)
  - Jiné
  
- Podle délky stopky
  - Dlouhé
  - Krátké
  
- Podle strmosti kuželové stopky
  - 7:24 (ISO, CAT, MAS BT atd.)
  - 1:10 (HSK)
  - 1:20 (MORSE, CAPTO)
  - Kužel R8
  - Jiné
  
- Podle způsobu vyvinutí upínací síly
  - Samosvorné (MORSE)
  - Nesamosvorné (ISO, HSK atd.) – třecí síla musí být vyvozená přidavným mechanismem

### 2.2.1. Kuželová stopka se strmostí 7:24 [6]

Je oblíbená a velmi často používaná v průmyslu pro svoji nenáročnost na údržbu, jednoduchý provoz a nízké pořizovací náklady. Nejdůležitějšími zástupci jsou ISO, MAS BT, CAT a BIG-PLUS. Tvar a funkční prvky jsou na obr. 11 níže.

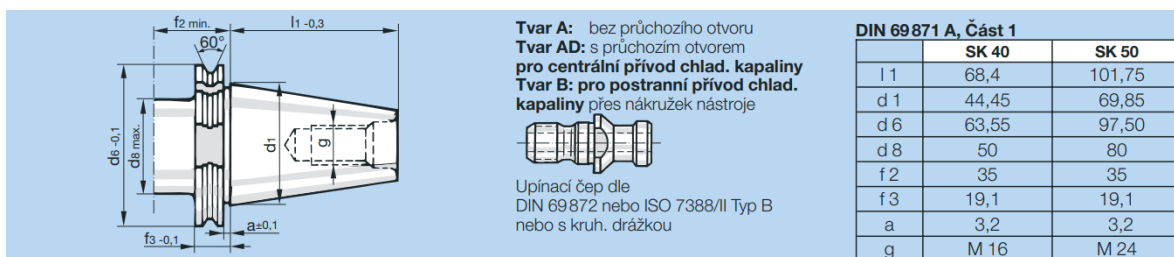


Obr. 11: Konstrukce upínače s kuželem 7:24 [6]

- 1 – otvor pro upínací čep – pomocí kleštiny je za tuto část vtažen upínač do dutiny vřetene
- 2 – styková plocha – různé délky dle použité normy
- 3 – příruba – tvar je dán dle stupně automatizace
- 4 – upínací část pro nástroj
- 5 – drážka pro unášecí kameny

### Upínač ISO/SK [6], [7], [8]

Název SK vychází z německého slova Steikegel (v překladu strmý kužel). Patří mezi nejstarší typy upínačů a jsou rozšířeny především na evropském kontinentu. V současnosti se nejčastěji používají upínače dle německých norem DIN 69871 typu A a B s lichoběžníkovou drážkou pro snadné uchopení manipulátorem, viz obr. 12. Upínače pro manuální výměnu nástroje odpovídají normě DIN 2080.



Obr. 12: Rozměry Kuželové stopky dle DIN 67891 [7]

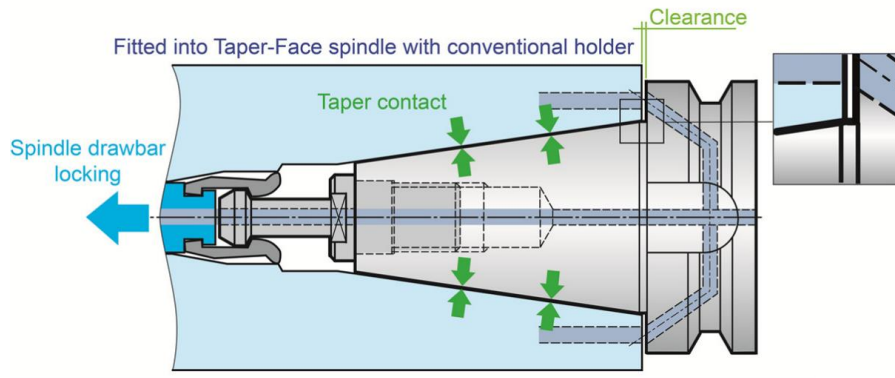
Vyrábí se v šesti velikostech a použití je závislé na rozměrech stroje. Dělí se na:

- 30 – Velmi malé stroje
- 35 – Malé stroje
- 40 – Střední stroje
- 50 – středně velké
- 60 – velmi velké stroje

Kroutící moment se přenáší třecí silou na kuželové ploše, z toho vyplývá potřeba mechanismu pro upnutí. Princip upínání je zobrazen na obr. 13. Při vyšších momentech a otáčkách se pro přenos řezných sil používají unášecí kameny, které zapadají do drážek na přírubě. Velká strmost kuželu znamená jednoduchost nasazování a vyndávání z vřetena.

Hlavní nevýhodou je malá tuhost uložení a nepřesnost v axiálním uložení upínače. To je dáno tím, že při vysokých otáčkách dochází vlivem odstředivých sil k rozšíření kuželové dutiny vřetena. Tím se taky zmenší styková plocha a možnost přenosu kroutícího momentu třením.

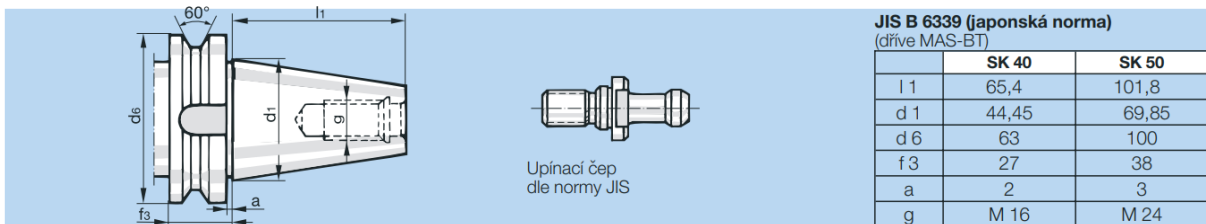
Upínač proto není vhodný pro vysokorychlostní obrábění a používá se hlavně pro konvenční obrábění při otáčkách až 12 000 1/min a při stupni vyvážení G 6,3.



Obr. 13: Princip upínání ISO upínače [9]

### Upínač MAS BT [10], [11]

Tyto upínače byly vyvinuty v Japonsku a řídí se japonskou normou JIS B 6339 (obr. 14). Od upínačů ISO a CAT se liší hlavně délkou kuželové stopky, která je delší u upínačů BT, a tloušťkou příruby. V důsledku toho není drážka pro unášecí kameny vyfrézovaná skrz celou přírubu.

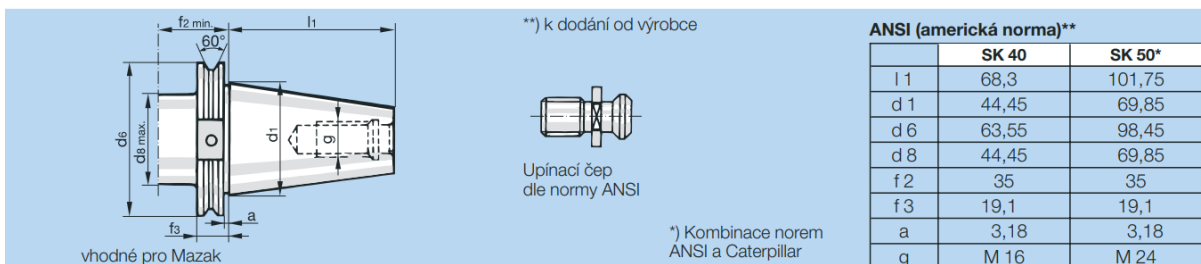


Obr. 14: Rozměry kuželové stopky dle JIS 6339 [7]

Upínače BT jsou osově symetrické, z čehož plyne vyváženější a stabilnější chod při vyšších otáčkách. Díky tomu je možné je používat pro obrábění při otáčkách až 15 000 1/min při stupni vyvážení G 6,3.

### Upínač CAT [10], [11]

Tyto upínače byly vyvinuty v severní Americe společností Caterpillar pro své CNC a řídí se podle normou ANSI (obr. 15). Tento upínač je nejvíce rozšířený na americkém kontinentu a v menší míře i ve východní Asii. Od typů ISO se kromě několika nepatrných rozdílů prakticky neliší.

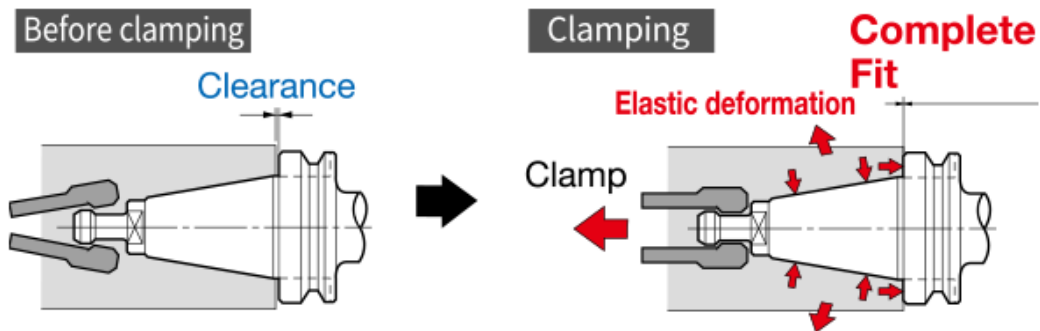


Obr. 15: Rozměry kuželové stopky dle ANSI [7]

Oblast použití těchto upínačů je díky jejich podobnosti s ISO upínači téměř stejná. Dají se použít jak pro ruční, tak i pro strojní výměnu. Jsou vhodné pro klasické obrábění a maximální otáčky nepřevyšují 12 000 ot. /min při stupni vyvážení G 6,3.

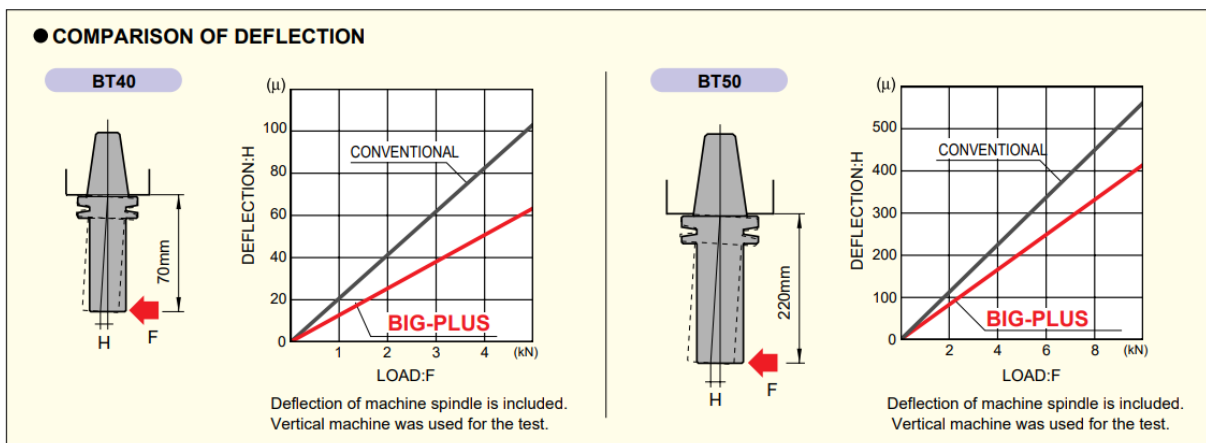
### Upínač BIG-PLUS [13], [14], [15]

Jedná se o vylepšenou verzi klasických upínačů s kuželem se strmostí 7:24 (ISO, CAT, MAS BT) vytvořenou japonskou společností BIG DAISHOWA SEIKI, která se vyznačuje dvojitým kontaktem mezi nástrojovým držákem a vřetenem, a to jak na kuželové ploše stopky upínače, jak je to běžné u zavedených systémů, tak i kontaktem na čelní ploše vřetena, kdežto u předtím zmíněných systémů zůstává vůle mezi čelem a držákem až 3 mm. Podmínkou čelního kontaktu je vyvození dostatečné upínací síly, kdy dojde k elastické deformaci dutiny vřetena, čím se eliminuje vůle mezi přírubou a čelem vřetena. Princip upínání tohoto systému je zobrazen na obr. 16 a je totožný jako u systémů ISO, CAT a MAS BT, tudíž je možné tyto systémy mezi sebou zaměňovat



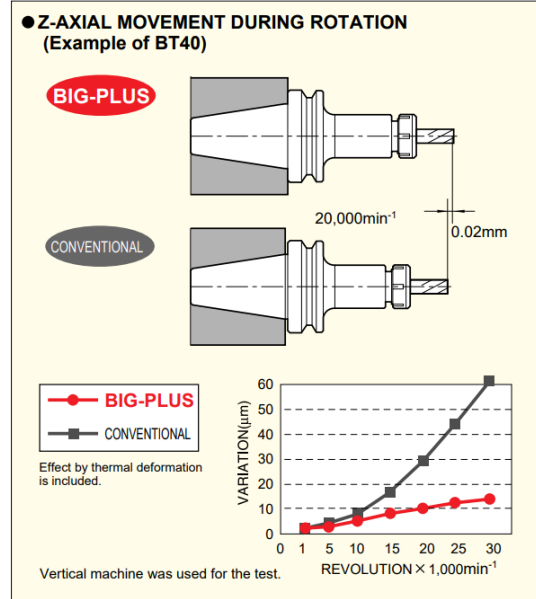
Obr. 16: Princip upnutí upínače BIG-PLUS [13]

Díky přídavnému styku na přírubě držáku dochází k navýšení kontaktní plochy a tím je dosaženo vyšší ohybové tuhosti a stability během obrábění, která přispívá k minimalizaci vibrací mezi kuželovou stopkou a dutinou vřetena. Na obr. 17 je vyobrazena závislost deformace nástroje na zatížení, kde se porovnávají systémy Big Plus a MAS BT.

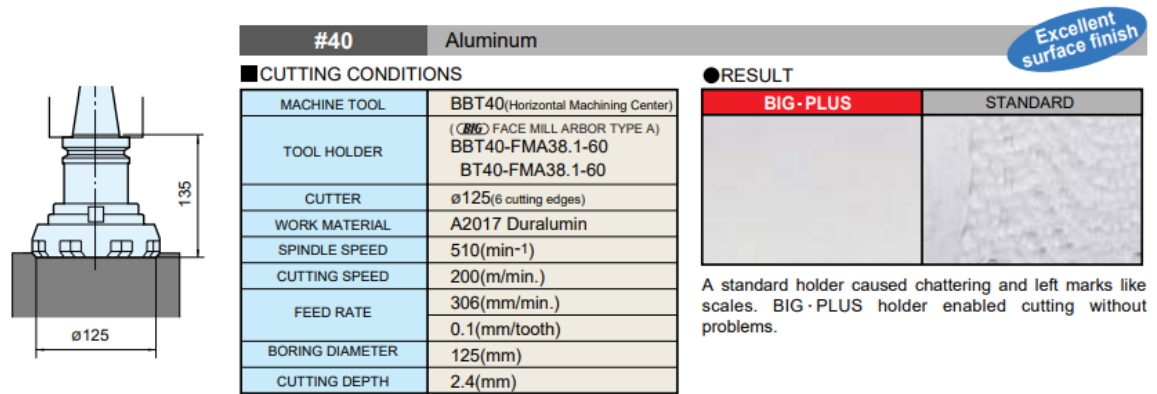


Obr. 17: Porovnání vlivu zatížení na deformaci nástroje [13]

U klasických upínačů s kuželovou stopkou 7:24 dochází během obrábění při vyšších otáčkách k rozpínání vnitřní dutiny vřetene vlivem odstředivých sil. Upínací síla je ale stále stejná, což způsobí vtažení držáku hlouběji do dutiny vřetene a k posunu nástroje v ose Z. Toto je u systému eliminováno díky kontaktu na čele vřetene. Z toho vyplývá další výhoda a tou je axiální stálost. Porovnání mezi systémem Big Plus a MAS BT z tohoto hlediska ne zobrazena na obr. 18. Díky tomu je možné nástrojové držáky Big Plus používat pro vysokorychlostní obrábění při otáčkách až 40 000 1/min.



Obr. 18: Porovnání posunutí nástroje v ose Z [13]



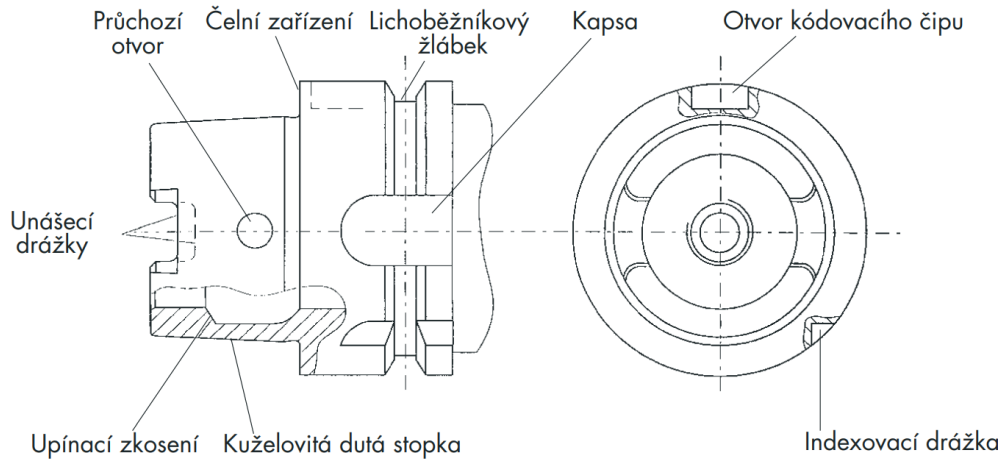
Obr. 19: Porovnání kvality obroběného povrchu materiálu A2017 při čelním frézování [13]

Mezi nevýhody systému patří hlavně pořizovací cena. Ta je vysoká kvůli nutnosti přesného opracování a vyvážení upínače. Další nevýhodou je, že každý upínač je vyroben jen k určenému vřetenu stroje a nemůže se zaměňovat. Upínací systém BIG – PLUS je určený pouze pro strojní výměnu v CNC obráběcích centrech.

### 2.2.2. Kuželová stopka se strmostí 1:10

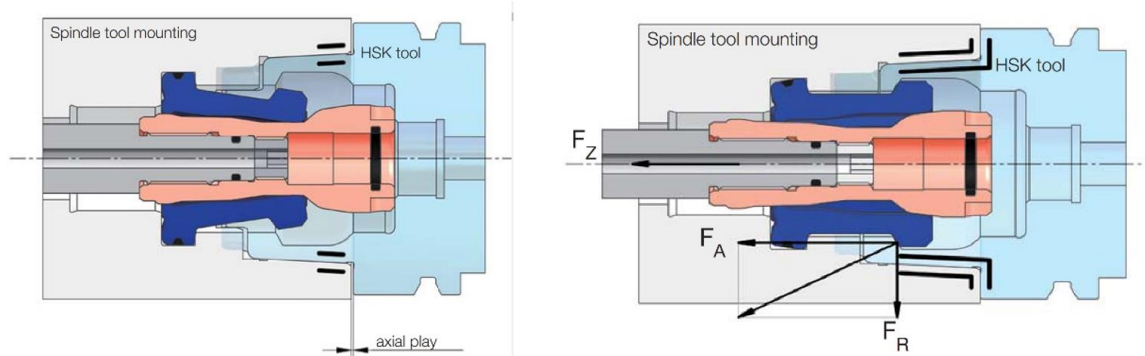
#### HSK [7], [16], [17]

Tento typ upínače byl vyvinut relativně nedávno v Německu a zkratka HSK znamená „Hohl Schaft Kegel“, což je v překladu „Dutý kuželový upínač“. Tyto upínače se řídí normou DIN 69893, viz obr. 20. Upínací rozhraní HSK bylo vyvinuto v průběhu několika let skupinou odborníků zabývajících se komplexně problematikou upínačů a obrábění. Kdežto upínače se stopkou 7/24 (ISO, BT, CAT) se vyvíjely v průběhu let, kdy později došlo k jejich standardizaci.



Obr. 20: Funkční prvky upínače HSK s rovinným dotykem podle DIN 69893, tvar A [7]

Jeden z hlavních rozdílů oproti upínačům ISO/BT/CAT je nulová vůle mezi přírubou upínače a čelem vřetena, stejně jako u upínače Big Plus, dutou kuželovou stopkou a menší rozměry (až o 1/3 menší a o 1/2 lehčí). Upínací mechanismus se nachází uvnitř duté kuželové stopky. Ten je tvořen dvěma do sebe zapadajícími kleštinami. Upnutí probíhá vtažením jedné kleštiny do druhé (obr. 21), ta se rozpíná v dutině stopky a upíná tím upínač. Při upnutí též dochází k elastické deformaci upínače a také ke dvojitému kontaktu mezi vřetenem a upínačem, a to na kuželové stopce i na čele příruby. Jelikož je upínání provedeno zevnitř upínače a upínací síla působí na jeho vnitřní plochy, tak při zvyšování otáček dochází k ještě lepšímu upnutí vlivem odstředivé síly. Krouticí moment se přenáší pomocí tření na kuželové ploše a tvarového styku unášecích kamenů v drážkách.



Obr. 21: Princip upínání systému HSK [16]

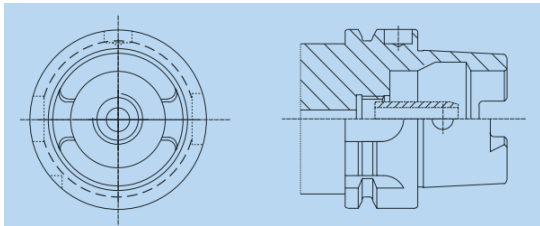
Výhodou HSK upínače oproti ISO držáku je axiální přesnost a veliká tuhost upnutí. Díky lehčí konstrukci upínače dojde ke snížení vedlejších časů během obrábění. Hodnoty obvodového házení jsou podobné jako u klasických upínačů (do 0,003 mm). Při kolizi nástroje s materiálem se upínač vypojí z kleštiny.

Nevýhodou tohoto upínacího systému je vysoká pořizovací cena vzhledem k náročné výrobě a vyšším nárokům na upínače. Pro dosažení výrobcem stanovených parametrů, je nutné udržet jak vřeteno, tak i nástrojový držák v čistotě.

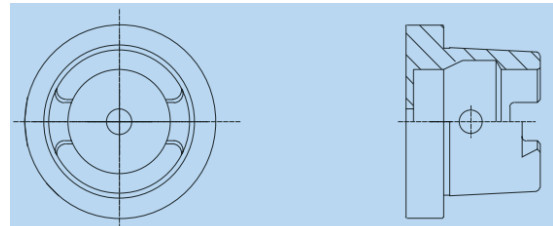
HSK upínače se používají hlavně pro vysokorychlostní obrábění od 12 000 - 35 000 1 /min. Z čehož plyne, že upínač musí být velmi přesně vyvážen. Problémy mohou nastat dokonce při asymetrii chladicích kanálků nebo při zanesení upínače nečistotami. Z tohoto důvodu se při vysokých rychlostech spíše používá externího chlazení.

Upínací systém HSK se vyrábí v šesti provedeních a v 35 rozměrech dle použití.

Typ HSK–A a C jsou určeny pro přenos malého kroutícího momentu a pro střední až vysoké otáčky vřetene, typ A (obr. 22) je pro automatickou výměnu nástroje a typ C (obr. 23) pro ruční výměnu nástroje, chlazení u těchto typů upínačů je řešeno středem držáků.

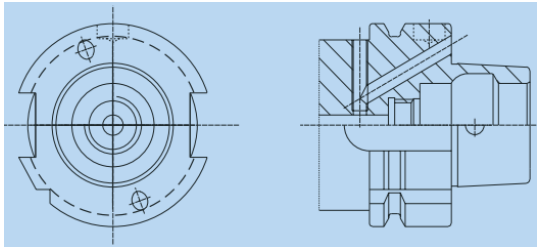


Obr. 22: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ A [7]

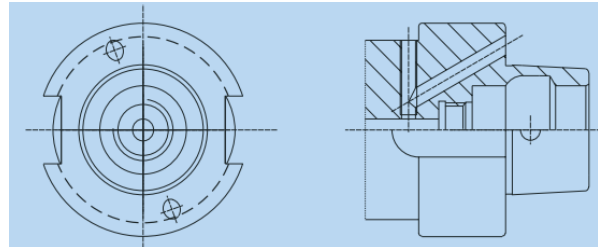


Obr. 23: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ C [7]

Typ HSK-B a D jsou určeny pro přenos velkého kroutícího momentu a pro střední až vysoké otáčky vřetene, typ B (obr. 24) je pro automatickou výměnu nástroje a typ D (obr. 25) pro ruční výměnu nástroje, chlazení u těchto typů upínačů je realizováno přes přírubu držáků.

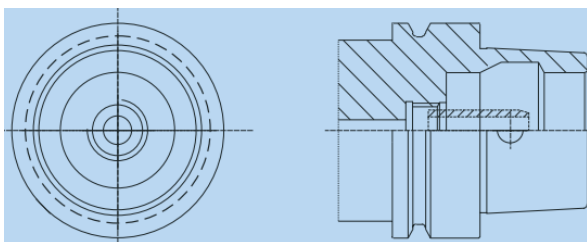


Obr. 24: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ B [7]

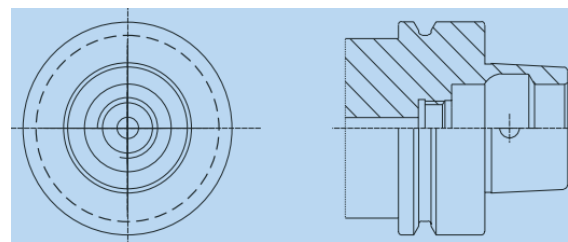


Obr. 25: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ D [7]

Typ E a F, viz obr 26 a 27, jsou určeny pro přenos malých kroutících momentů a pro velmi vysoké otáčky vřetene tzv. HSC obrábění (High Speed Cutting) oba typy jsou určeny pro automatickou výměnu nástroje a chlazení je řešeno přes střed držáku



Obr. 26: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ E [7]



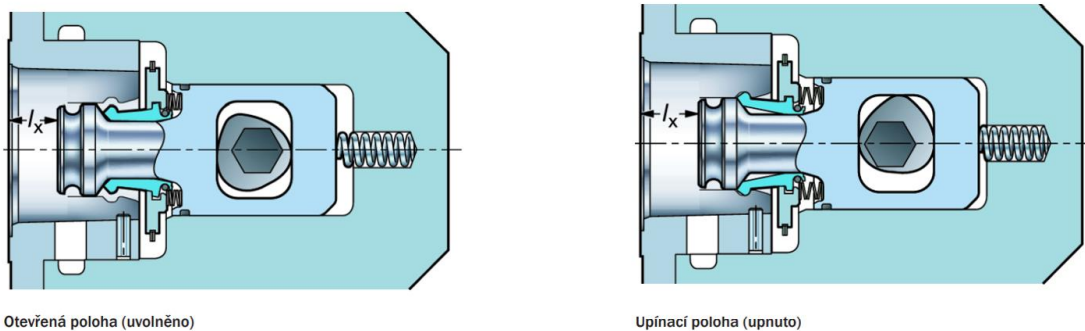
Obr. 27: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ F [7]

### 2.2.3. Kuželová stopka se strmostí 1:20

#### COROMANT CAPTO® [12], [16]

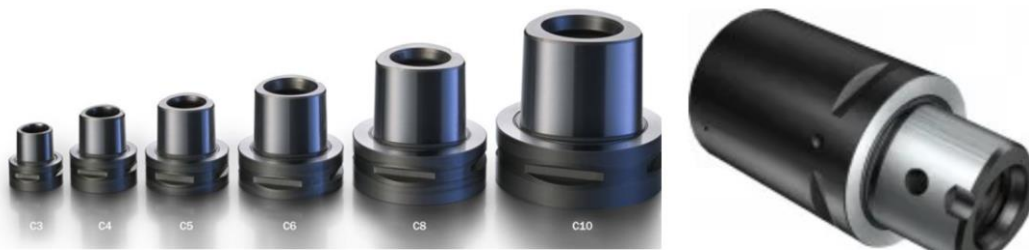
Tento systém byl představen v roce 1990 společností SANDVIK Coromant a od roku 2008 je zařazen do norem ISO, konkrétně norma ISO 26623.

Oproti předchozím typům upínačů se liší hlavně tvarem stopky, která zde má tvar trojbokého polygonu s kuželovitostí 1:20. Díky tomuto tvarovému spojení je prokluz kompletně eliminován. Stejně jako u upínače HSK a Big Plus, zde dochází ke dvojitému kontaktu – jak na čele vřetene, tak na kuželové stopce. Princip upínání je také podobný jako u systému HSK, kde se upíná za vnitřní konturu kuželové stopky pomocí kleštinového mechanismu, viz obr 28.



Obr. 28: Princip upínání systému CAPTO [1]

Tyto upínače se vyrábějí v 6 velikostech, které se označují písmenem C a číslem udávající velikost – C3 – 32 mm, C4 – 40 mm, C5 – 50 mm, C6 – 63 mm, C8 – 80 mm a C8x – 100 mm, viz obr. 29.



Obr. 29: Tvar stopky systému CAPTO [1]

Hlavními přednostmi tohoto systému jsou vysoká ohybová tuhost díky tvarové stopce, vysoká tuhost v krutu, schopnost přenosu velkých kroutících momentů, modulárnost, vysoká stabilita během obráběcího procesu, přesnost a opakovatelnost upnutí, rychlá ruční i automatické výměna nástroje atd.

Nevýhodou je vyšší pořizovací cena daná složitou výrobou polygonální stopky a vyšším nárokům na geometrickou přesnost upínací dutiny vřetene.

Používá se převážně pro vysokorychlostní obrábění až do 40 000 1/min při kvalitě vyvážení G 2.5, což odpovídá parametrům systémů Big Plus a HSK. Oproti těmto systémům ale nabízí vyšší tuhost a schopnost přenést vyšší kroutící moment.



### 2.3. Shrnutí rešerše

Trendem dnešní doby je snaha o co nejproduktivnější a nejehospodárnější obráběcí proces při zachování vysoké kvality obrobeného povrchu a geometrické přesnosti dílců. Toho se dosáhne maximálním využitím instalovaného výkonu obráběcího stroje a výkonovým obráběním s velkým úběrem materiálu při vysokých posuvech. Z tohoto důvodu je potřeba, aby byl uzel nástroje co nejtužší, a to především u nástrojů s velkým vyložením, ke vzniká velké ohybové zatížení.

Tyto požadavky uvedené výše splňuje systém Big Plus od japonské společnosti BIG DAISHOWA SEIKICO., LTD. Jedná se o vylepšenou verzi již zavedených upínacích systémů s kuželovou stopkou 7:24 (IS, CAT, BT) a výhody tohoto systému plynou z přídavného kontaktu na čele vřetena s přírubou nástrojového držáku.

Ze zpracované rešerše o používaných systémech pro upínání nástrojů a držáků vykryštovalo konkrétní zaměření této diplomové práce a tím je ověření výrobcem deklarovaných předností upínacího systému Big Plus a jeho porovnání s již zavedeným a na pořízení levnějším systémem ISO.

Cílem této práce je experimentální porovnání obou těchto systémů z pohledu dynamické poddajnosti (tuhosti), kvality obrobeného povrchu a mohutnosti vibrací během obráběcího procesu a s tím související stabilita při obrábění.

### 3. Úvod do problematiky měření vibrací

V oblasti obráběcích strojů je mechanické kmitání nežádoucím jevem, neboť způsobuje sníženou kvalitu obráběného povrchu, nadměrné opotřebení jak nástrojů, tak i obráběcího stroje. Vzniká zpravidla důsledkem nevyváženosti rotačních součástí (vřeteno, ložiska atd.), rázy při procesu obrábění nebo samotným řezným procesem (samobuzené kmitání).

#### 3.1. Mechanické kmitání [18]

Mechanické kmitání patří mezi dynamické jevy, kde hmotné body nebo pevná tělesa vykonávají vratný pohyb kolem rovnovážné polohy. Podmínkou dosažení rovnovážné polohy je nulová hodnota budící síly, naopak kmitání tělesa je vždy podmíněno budící silou externí nebo interní.

##### 3.1.1. Druhy mechanického kmitání [19], [20], [21]

Mechanické kmitání lze rozdělit dle mnoha kritérií. Pro účely této práce bude zmíněno pouze rozdělení dle působící síly, a to na vlastní kmitání, vynucené kmitání a samobuzené kmitání.

##### a) Vlastní kmitání

Vlastní kmitání je pouze myšlený jev, pomocí kterého se popisují dynamické vlastnosti zkoumané mechanické soustavy. Při vybuzení některých z vlastních frekvencí stroje, nastává jev, který se nazývá rezonance. Během tohoto jevu dochází k výraznému růstu amplitudy kmitání, které může v extrémních případech vést až k poruše stroje.

##### b) Vynucené kmitání

Jde o odezvu soustavy na buzení a vzniká působením periodicky proměnlivé budící síly. Frekvenční odezva (FRF) popisuje vztah mezi buzením (silou) a odezvou (výchytkou) systému.

Může být způsobeno silovými impulzy vznikajícími v obráběcím stroji jako např. nevyvaha rotujících hmot, nebo také silami vnesené do soustavy skrz základy obráběcího stroje.

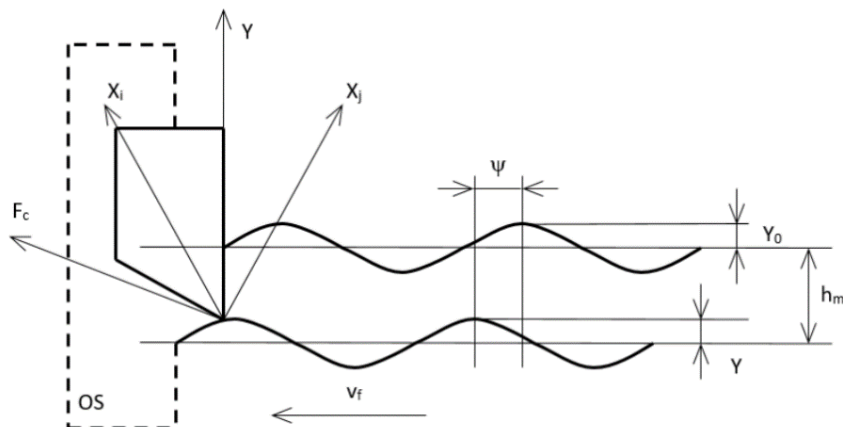
##### c) Samobuzené kmitání

Toto kmitání je způsobeno samotným řezným procesem, kde kmitá soustava stroj – nástroj – obrobek, a nastává pouze za určitých řezných podmínek. Dochází k růstu amplitudy výchytky kmitání, aniž by se zdálo, že existuje spojitost s frekvencí budící síly, což je v rozporu s principem FRF.

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, samobuzené kmitání má negativní vliv na výslednou kvalitu obrobeného povrchu a způsobuje zvýšené namáhání stroje a nástroje.

Z tohoto důvodu nelze maximálně využít instalovaný výkon obráběcího stroje, a tudíž je snížena i produktivita

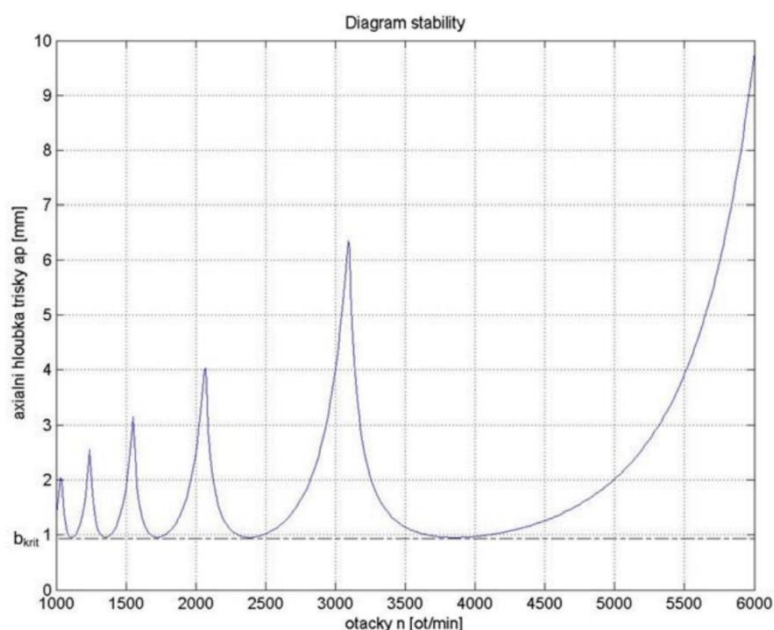
Jedna z teorií, která popisuje tento jev, se nazývá „Regenerativní princip“. Během obrábění s kmitajícím nástrojem dochází k vytvoření zvlněného povrchu obrobku. Při následujícím průchodu se nástroj pohybuje po zvlněném povrchu, jak je vidět na obr. 30. Fázový posun  $\psi$  mezi zvlněním  $Y_0$  a  $Y$  má za následek to, že se odebírá tříska s proměnlivou tloušťkou. Řezná síla je tímto modulována a dochází k rozkmitání systému. V případě nulového fázového posunu  $\psi$  by zůstala hloubka odřezávané třísky konstantní a nedocházelo by k samobuzenému kmitání.



Obr. 30: Regenerativní princip [21]

- **Diagram stability [21], [22], [23]**

Diagram stability (anglicky Stability Lobe Chart) určuje závislost mezi axiální hloubkou řezu a otáčkami vřetene při konstantní šířce řezu a posuvu. Slouží především pro stanovení řezných podmínek tak, aby se maximálně využil instalovaný výkon stroje, aniž by vznikalo samobuzené kmitání při obrábění.



Obr. 31: Příklad diagramu stability [23]

Diagram je křivkou v celém rozsahu rozdělen na dvě oblasti, a to na oblast stabilního obrábění, která se nachází pod křivkou a představuje takovou kombinaci otáček a axiální hloubky řezu, při kterých nedojde ke vzniku samobuzeného kmitání, přičemž oblast na křivkou znázorňuje opak. Jak lze vidět z obr. 31, mezní hloubka řezu  $a_{plim}$  (v grafu jako  $b_{krit}$ ) je stejná v celém rozsahu. Tuto hodnotu lze vypočítat dle vzorce (2) níže:

$$a_{plim} = -\frac{1}{2 \cdot K_c \min(RE(FRF))} \quad (1)$$

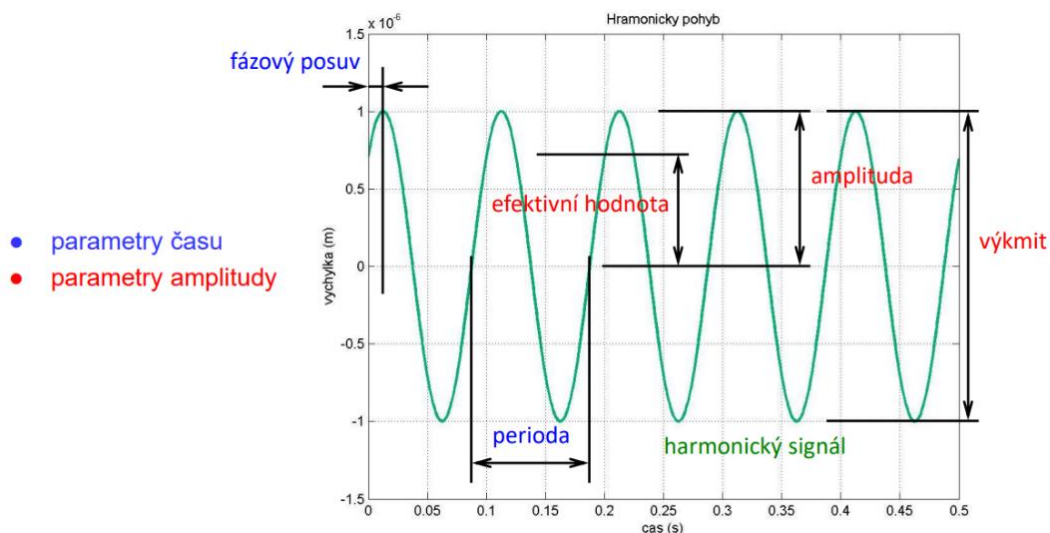
Kde  $k_c$  je měrný řezný odpor a  $\min(RE(FRF))$  jsou záporné hodnoty reálné složky FRF.

Diagram stability platí jenom pro jednu kombinaci řezných podmínek, neboť při změně hodnoty posuvu dojde k ke změně řezného odporu, tudíž se musí znova přepočítat.

### 3.1.2. Parametry kmitání

Hlavními parametry harmonického signálu (obr. 32) jsou:

- Amplituda – maximální výchylka
- Perioda [s] – nejkratší doba opakování jevu
- Frekvence [Hz] – obrácena hodnota periody
- Fáze (fázový posun) [rad] – posun dvou periodických veličin
- Efektivní hodnota – 70% amplitudy



Obr. 32: Harmonický signál [20]

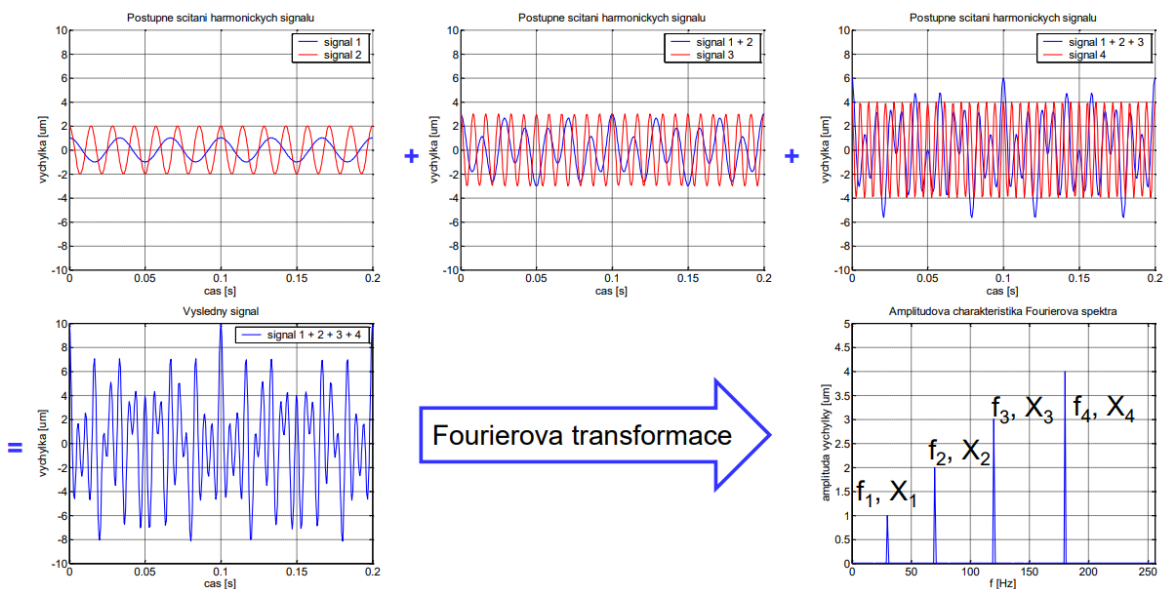
Efektivní hodnota neboli také RMS (Root Means Square), se u harmonického signálu rovná 70 % hodnotě amplitudy. Jde o parametr, umožňující kvantifikovat naměřené hodnoty vibrací a porovnávat je mezi sebou. Norma ČSN 20 0065 stanovuje přípustné hodnoty rychlosti vibrací pomocí tzv. mohutnosti vibrací, což je efektivní hodnota rychlosti

signálu vypočítaná z naměřených dat pro rozsah frekvencí 10–1000 Hz. Pro obecný signál, který se v praxi vyskytuje nejčastěji, se vypočítá dle vzorce (2).

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2)$$

### 3.2. FFT analýza [20], [24]

Skutečný naměřený signál se skládá ze součtu několika základních sinusovek o různých periodách a amplitudách. V analyzátoch nejčastěji používaný algoritmus, který umožňuje tento rozklad (převod mezi časovou a frekvenční oblastí), se nazývá FFT (Fast Fourier Transformation). Výsledkem je tzv. frekvenční spektrum, které zobrazuje velikost amplitudy na konkrétních frekvencích. Obecně platí, že objemnější části systému kmitají na nižších frekvencích a menší části zase naopak.



Obr. 33: Ukázka rozkladu signálu pomocí FFT [20]

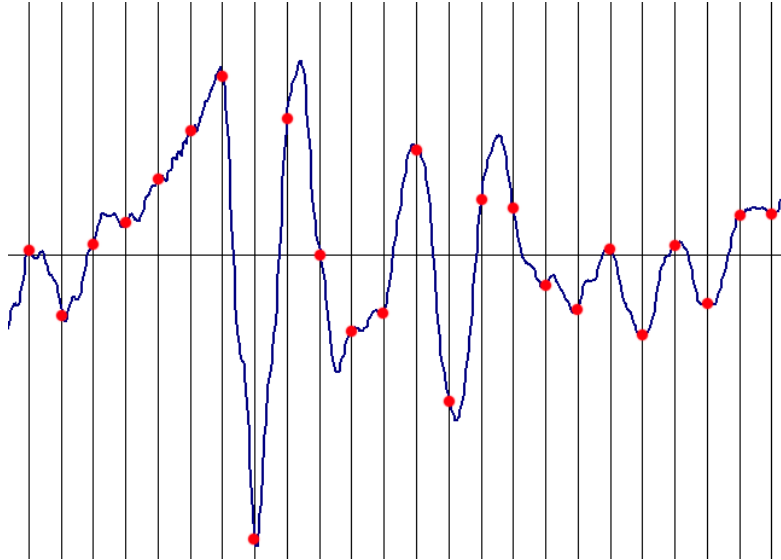
S ohledem na skutečnost, že se pro FFT používá diskretní signál, je potřeba znát jeho vlastnosti, které by mohly potenciálně způsobit nepřesnosti. Možnými zdroji chyb jsou:

- Diskretizace signálu (vzorkování a kvantování)
- Chyba zdánlivosti (Aliasing)
- Chyba únikem (Leakage)

Charakteristika těchto možných zdrojů nepřesností jsou podrobněji rozepsány na následující straně.

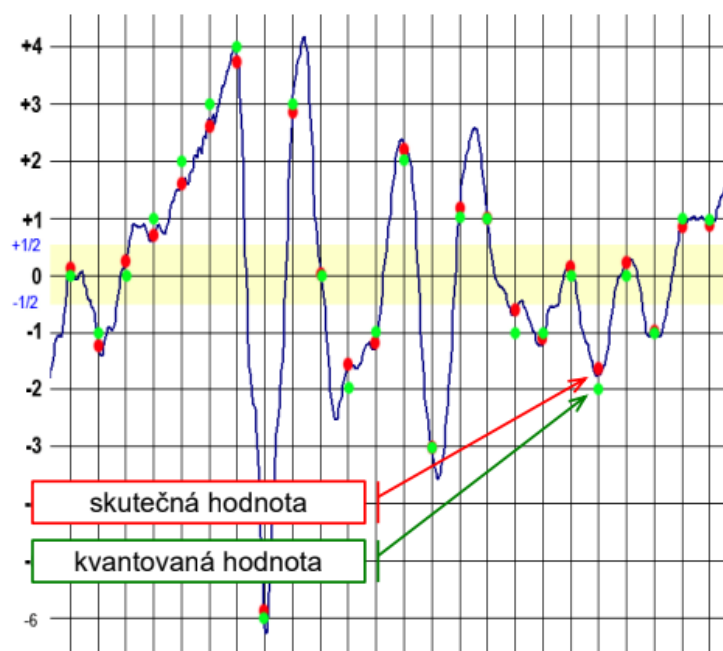
### a) Vzorkování a kvantování

Vzorkovací frekvence udává počet vzorků načtených ze spojitého analogového signálu za 1 sekundu při přeměně na diskretní signál. V oblasti mezi těmito body není k dispozici žádná informace o vlastnosti signálu, viz obr. 34.



Obr. 34: Vzorkování signálu [24]

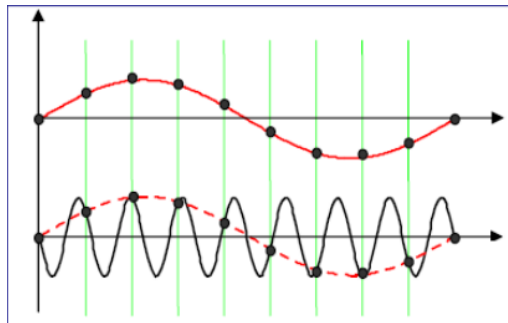
Kvantování ovlivňuje schopnost převodníku zobrazovat přesné hodnoty signálu. Při procesu diskretizace signálu je nutné hodnoty signálu zaokrouhlit, viz obr. 35, kde jsou červeně označeny reálné hodnoty a zeleně zaokrouhlené hodnoty. Čím vyšší je úroveň převodníku, tím větší je počet vzorků a tím se také zvyšuje rozsah oblasti snímání amplitudy.



Obr. 35: Kvantování [24]

### b) Chyba zdánlivosti (aliasing)

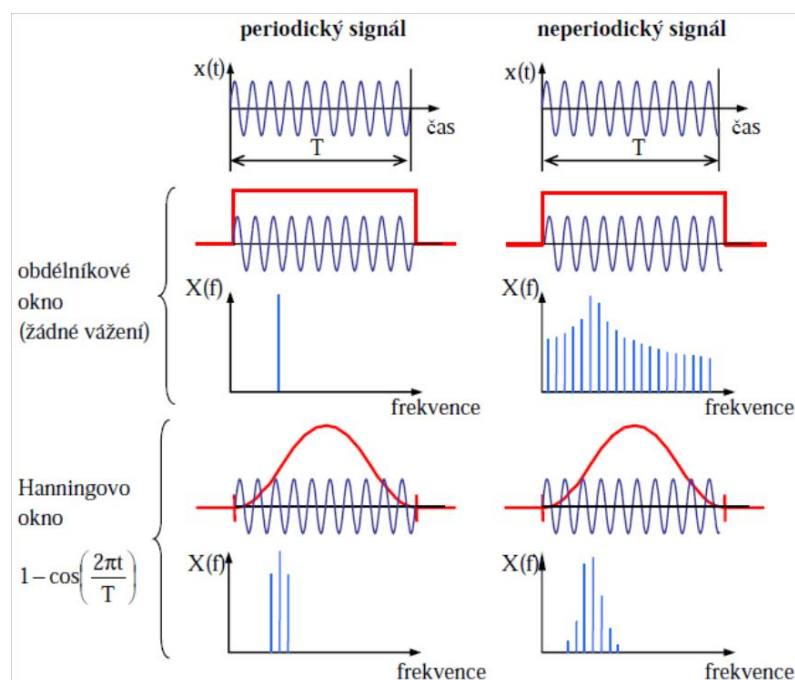
Vzniká v případě, kdy naměřený signál obsahuje frekvence vyšší než polovina vzorkovací frekvence. Projevuje se tak, že tato vysoká frekvence se jeví mnohem nižší. Jediným řešením je použití předřadného analogového filtru před A/D typu dolní propust. Charakteristika tohoto filtru je strmá, nikoliv kolmá, proto se musí dodržet pravidla  $f_{\max} = 0,8 \cdot f_s/2$ .



Obr. 36: Chyba typu aliasing [24]

### c) Chyba únikem (leakage)

Tato chyba je dána tím, že FFT počítá s délkou nahrávaného času jako s periodou, která není ve většině případů celistvé číslo. To se projevuje „únikem“ energie do mnoha spektrálních čar poblíž frekvence, a tudíž je spektrum rozprostřeno přes několik čar. Aby se tomuto efektu předešlo, signál musí být upraven pomocí váhového okna. Na obr. 37 je ukázáno Hanningovo okno, které je nejčastěji používané. Toto okno potlačuje signál na obou koncích a přibližuje ho k periodickému signálu. Výsledkem je pouze několik spektrálních čar.



Obr. 37: Rozdíl mezi periodickým a neperiodickým signálem a vliv použití Hannigova okna [24]

### 3.3. FRF – funkce frekvenčního přenosu [20],[25]

Funkci frekvenčního přenosu představuje odezvu systému na její dynamické buzení, poměr dynamického výstupu ku vstupu ze systému v ustáleném stavu. Jeho matematický popis je uvedený v rovnici (3).

$$H(i\omega) = FRF = \frac{x(i\omega)}{F(i\omega)} = \frac{\text{výstup}}{\text{vstup}} \quad (3)$$

Jedná se o komplexní veličinu, tudíž se jeho popis zahrnuje amplitudu a fázi signálu a obsahuje reálnou i imaginární složku. V závislosti na odečítané veličině kmitání (zrychlení, rychlost, výchylka) během experimentálního měření, lze funkci frekvenčního přenosu vyjádřit ve formě:

- Akcelerance [(m/s<sup>2</sup>)/N]
- Pohyblivost [(m/s)/N]
- Dynamická poddajnost [m/N]

Na základě změřené charakteristiky FRF jedné z těchto veličin lze matematicky odvodit dvě zbylé pomocí derivace či integrace.

Průběh FRF je závislý na hmotnosti, tuhosti a tlumení měřené soustavy. Jak lze vidět na obr. 38, pokud se zvýší hmotnost soustavy, dojde ke snížení hodnoty vlastní frekvence a taktéž mírně roste amplituda kmitání. Při zvýšení tuhosti naopak dochází k posunu vlastní frekvence k vyšším hodnotám a k útlumu amplitudy kmitání. Co se týče zvýšení tlumení, zde dojde pouze k útlumu kmitání.

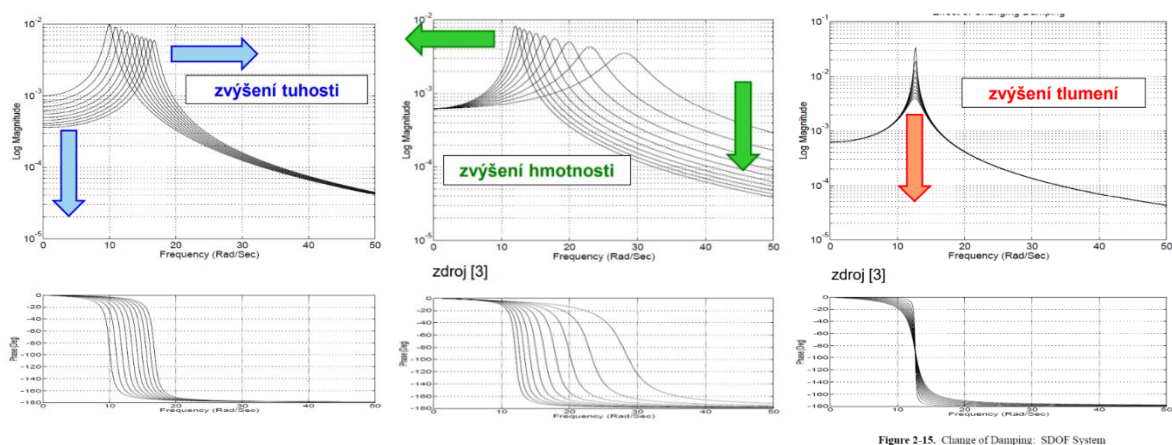


Figure 2-15. Change of Damping: SDOF System

Obr. 38: Vliv hmotnosti, tuhosti a tlumení na FRF [20]

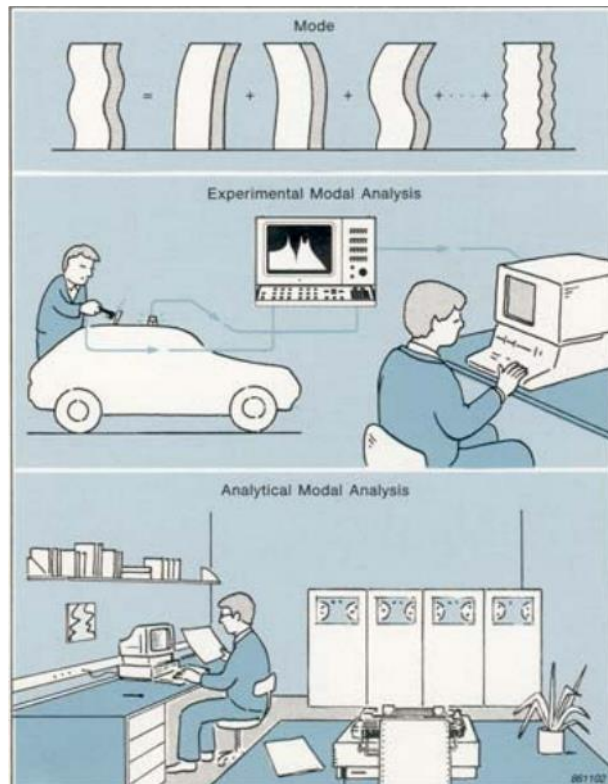


### 3.4. Modální analýza [25], [26], [27]

Modální analýza je obor dynamiky a používá se pro úplný popis zkoumané dynamické mechanické soustavy. Tato metoda umožňuje rozložit složité kmitavé chování na jednotlivé tzv. módy, viz obr. 39. Každý mód je charakterizován vlastní frekvencí, útlumem, modálním tvarem kmitání, modální tuhostí a hmotností. Tyto modální vlastnosti mají přímý vliv na poruchy spojené s nadměrným hlukem a chvěním, způsobené vlastnostmi samotného systému.

Modální analýzu lze provést buď analyticky nebo prakticky prostřednictvím experimentálního proměření skutečného stroje. V praxi se často provádí obě metody naráz a poté se mezi sebou porovnají, nicméně zřídka se výsledky shodují.

Analytická metoda spočívá v sestavení pohybových rovnic a následný výpočet modálních parametrů pomocí tzv. modální transformace. Tato transformace slouží k nahrazení soustavy vzájemně vázaných homogenních diferenciálních rovnic soustavou nezávislých, izolovaně řešitelných homogenních diferenciálních rovnic.



Obr. 39: Princip modální analýzy [25]

Experimentální modální analýza využívá k odhadu modálních parametrů experimentálně naměřenou odezvu systému v závislosti na známém buzení (FRF), které je vyvozené rázovým kladívkem nebo vibrátorem. Měření probíhá ve zvolených bodech rozmístěných po zkušebním stroji. Z naměřeného přenosu se pak určí vlastní tvary kmitů.

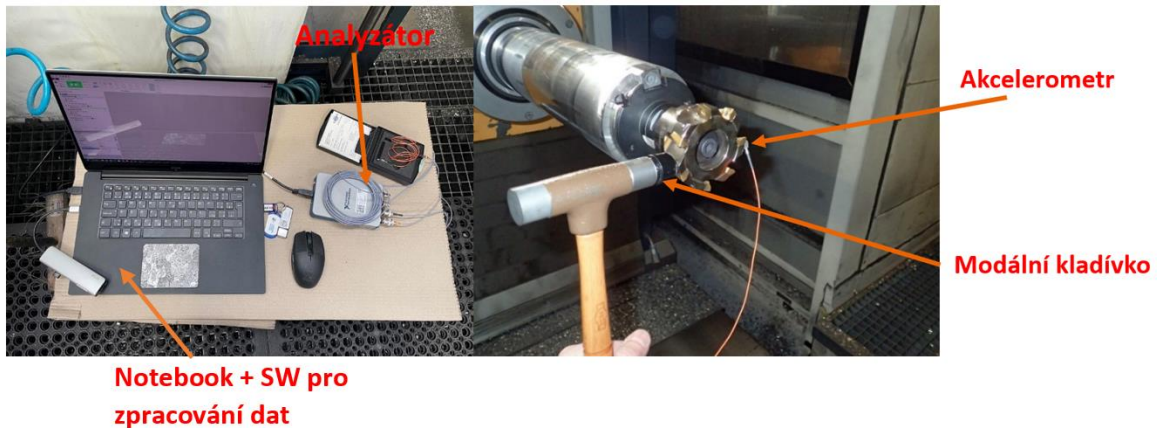
#### Využití modální analýzy:

- Určení vlastních frekvencí soustavy, na kterých by mohlo dojít k rezonancím
- Určení vlastních tvarů kmitání pro vizualizaci dynamických deformací vlivem působení vnitřního buzení
- Ověřování věrohodnosti matematických modelů porovnáním s experimentálními výsledky

### 3.5. Měřící aparatura [20], [25]

Měřící aparatura pro měření vibrací se v převážné většině skládá ze čtyř jednotek a to z:

- a) Budící zařízení
- b) Snímač signálu
- c) Analyzátor
- d) SW pro zpracování signál



Obr. 40: Příklad měřící aparatury

#### a) Budící zařízení

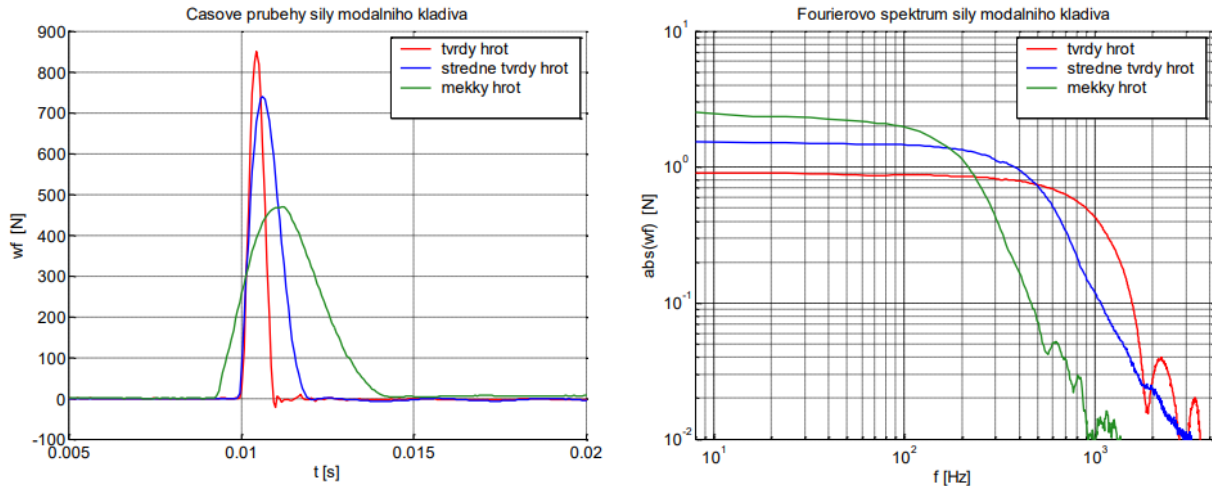
Volba budícího zařízení závisí na tom, zda je požadováno náhodné, pseudonáhodné nebo rázové buzení. V praxi se lze nejčastěji setkat s modálním kladivem nebo modálním vibrátorem.

Modální kladivo je nejčastěji používaný a nejjednodušší způsob pro vyvození rázového budícího signálu. Tato metoda nevyžaduje speciální přípravu a je možné ji použít i v provozu. Skládá se z hlavy, snímače síly, hrotu a rukojeti. Různé typy modálních kladiv je možné vidět na obr. 41.

Volba materiálu a hmotnosti hrotu závisí na požadovaném užitečném rozsahu frekvencí a typu zkušebního objektu. Platí, že čím je měkčí hrot (pryž) a větší kladivo, tím jsou frekvence nižší (cca 100 Hz). Naopak čím je hrot tvrdší, tím je vybuzen větší frekvenční rozsah. Na obr. 42 vpravo je možné vidět porovnání jednotlivých typů hrotů z pohledu užitečného frekvenčního rozsahu.



Obr. 41: Velikosti modálních kladiv [20]



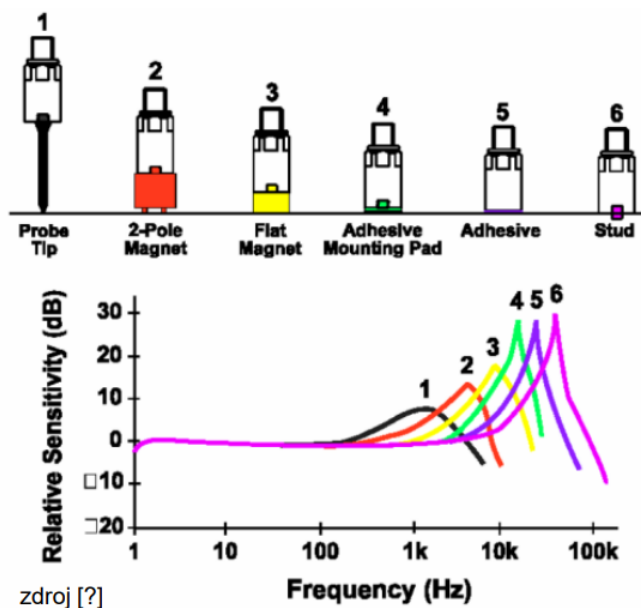
Obr. 42: Vliv použitého hrotu na rozsah frekvencí [20]

### b) Snímač signálu

Pro měření odezvy systému se v praxi nejčastěji používají absolutní snímače zrychlení (akcelerometry), které fungují na principu piezoelektrického jevu. Podstatou vzniku elektrického náboje generované deformací piezoelektrického členu vlivem pohybu pláště akcelerometru vůči seismické hmotě. Vzniklý náboj je úměrný zatížení. Hlavními parametry akcelerometru je citlivost, která udává přepočít z hodnoty napětí na měřenou veličinu, a dynamický rozsah, jenž určuje maximální hodnotu měřené veličiny.

Aby bylo měření co nepřesnější, je potřeba zvolit správný způsob upevnění akcelerometru na zkušební objekt. Způsob montáže ovlivňuje rozsah použitelného pásma, viz obr. 43. V praxi se běžně používá pro upevnění akcelerometru včelí vosk nebo magnetický držák, na kterou se připevní akcelerometr.

Dle požadavků měření je možné volit mezi jednoosým nebo tříosým akcelerometrem.



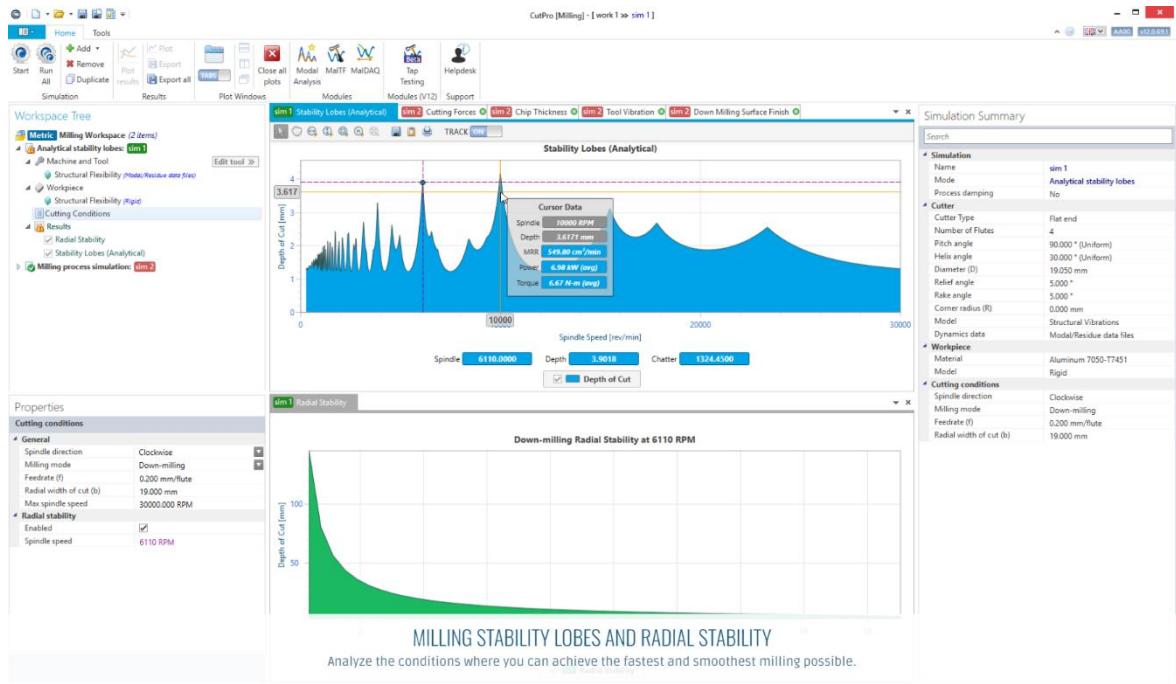
Obr. 43: Vliv volby montáže na vlastní frekvenci akcelerometru [20]

### c) SW pro zpracování signálu

Ke zpracování naměřeného signálu se většinou používá počítač/notebook s nainstalovaným příslušným softwarem pro vyhodnocení. Konkrétně se v rámci této práce pracovalo s profesionálním softwarem s názvem CutPro od společnosti MAL Inc.

Tento program lze použít pro simulování řezného procesu frézování, obrábění a vrtání. Dokáže také simulovat výslednou drsnost obrobeného povrchu. Především umožňuje měření FRF a tyto data následně použít pro sestavení diagramu stability.

Uživatelské rozhraní tohoto programu je vidět na obr. 44.



Obr. 44: Modul programu CUTPRO pro určení diagramu stability

## 4. Vlastní řešení

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 2.3, náplní této práce je experimentálně zjistit rozdíl mezi upínacím systémem BIG PLUS, od společnosti BIG DAISHOWA SEIKI, a zavedeným systémem ISO z pohledu dynamické poddajnosti, mohutnosti vibrací, stability během obrábění a kvalitou obrobeného povrchu. Tento experiment vznikl ve spolupráci se společností TOS Varnsdorf a.s. a byl proveden v jejich provozovnách na horizontálním vyvrtávacím stroji typu WHT110C.

Dalším úkolem této práce je zjistit, zda platí výrobcem uváděné výhody systému BIG PLUS i v případě upnutí nástrojového držáku s tímto upínacím systémem do vřetene převážně určené pro upínací kužele ISO.

Tento experiment probíhal v rozmezí dvou dnů od 06.03.2023 do 07.03.2023 a postup vlastního řešení, jenž se skládal ze sběru dat a jejich následného vyhodnocení, lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Definování testovaného stroje, nástrojů a obrobků
- 2) Měření odezvy pomocí modálního kladívka („Tap Test“)
- 3) Vyhodnocení dynamické poddajnosti
- 4) Odhad modálních parametrů a stanovení diagramu stability
- 5) Zkouška obráběním (měření vibrací během obrábění)
- 6) Výpočet mohutnosti vibrací z naměřených dat
- 7) Vyhodnocení stability obrábění

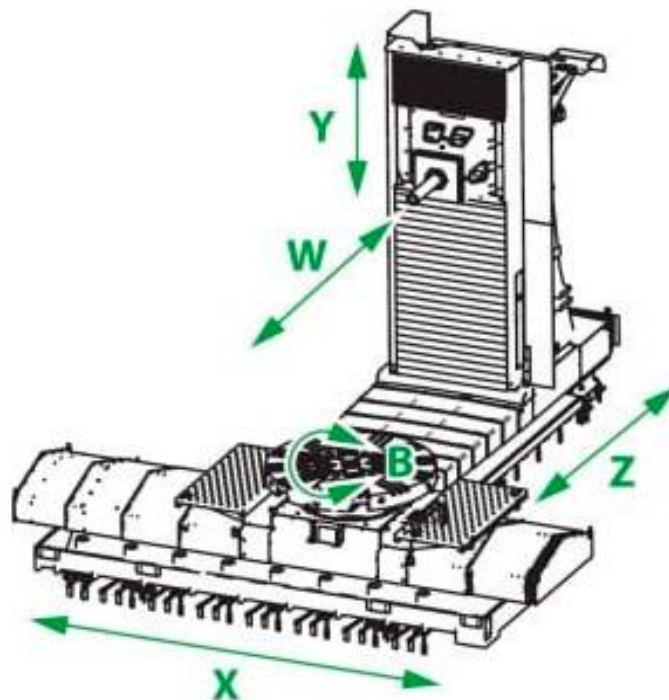
## 4.1. Použitý stroj, nástroj a obrobek

### 4.1.1. Stroj

Experiment byl proveden v provozech společnosti TOS Varnsdorf a.s. na tříosém horizontálním vyvrtávacím stroji WHT 110 C. Na obr. 45 je možné vidět celkový pohled na zakrytovaný stroj a na obr. 46 je vyobrazen souřadný systém stroje.



Obr. 45: Celkový pohled na zakrytovaný stroj WHT110C



Obr. 46: Souřadný systém stroje

Základní konstrukce stroje se skládá z k sobě spojeného příčného a podélného lože ze šedé litiny, na kterých je umístěn rotační stůl (osa X a B) a stojan s výsuvným vřetenem (osa Y, W a Z).

Tento obráběcí stroj je určen především k sériové výrobě rozměrově velkých a složitých dílců, většinou skříňového, deskového nebo rotačního tvaru. Hodí se jak na náročné hrubovací frézovací operace, tak i k vyvrtání, vyvrtávání a karuselovací operace.

Hlavní parametry tohoto stroje jsou shrnuty v následující tabulce 1 níže. Momentová charakteristika vřetena stroje je uvedena v příloze č. 1.

*Tab. 1: Hlavní parametry stroje WHT 110 C [28]*

<b>Pojezdy</b>		
Osa X	[mm]	2500
Osa Y	[mm]	1600
Osa Z	[mm]	2500
Osa W	[mm]	650
Rychlost posuvu	[mm/min]	40000
<b>Vřeteno</b>		
Výkon (S1/100 %)	kW	31
Kroutící moment (S1/100 %)	Nm	1375
Otáčky	1/min	6000
Upínací kužel		ISO 50
<b>Řídicí systém</b>		
SIEMENS Sinumerik 840D-SL		

#### 4.1.2. Nástroje

Pro vykonání experimentu byly zvoleny dva frézovací nástroje, každý určený pro jinou obráběcí operaci. Těmi jsou čelní fréza a válcová fréza. Jedná se o dva nejběžnější představitele používaných nástrojů, které se na tomto stroji používají během obráběcího procesu. Upínání obou zvolených nástrojů probíhalo mechanicky pomocí upínacích trnů, kde je kroutící moment přenášen pomocí unášecích kamenů v případě čelní frézy a tvarového polygonu CAPTO u válcové frézy. Ke každému nástroji byly příslušné nástrojové držáky obou systémů, jak ISO, tak BIG PLUS.

- **Čelní fréza**

Byla zvolena nástrčná čelní fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) od společnosti PRAMET, viz obr. 47, typ 80A07R-S90AD16E-C, o průměru 80 mm se 7 místy pro VBD po obvodu na čele. Pro zkoušku obráběním byly použity destičky ADMX 160608SR-M taktéž od společnosti PRAMET.

Pro upnutí tohoto nástroje do dutiny vřetene byly připraveny dva upínací trny, jeden se systémem Big Plus, označení C5-390.540-50 030 A, a druhý se systémem ISO 50, označení C5-390.140-50 030.



Obr. 47: Čelní fréza upnutá v držáku

- **Válcová fréza**

Druhým nástrojem byla nástrčná válcová fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami od společnosti WALTER, která se skládala ze dvou částí, a to z hlavního těla (Basic body helical cutter), označení M4258-080C8-03-80-B, a adaptéru (Front piece helical cutter), označení M4258-080P40-03-36-F, umožňující čelní frézování, viz obr. 48. Průměr této je 80 mm a nachází se zde 24 míst pro upevnění břitových destiček včetně 6 míst vyhrazené pro destičky určené k čelnímu frézování. Počet efektivních řezných hran  $z_{ef} = 3$  a je stejný jak pro čelní frézování, tak i pro válcové frézování. Při zkoušce obráběním byly tedy použity destičky LDMW170408R-A57 na čele adaptéru a SDMW120408-A57 na zbývajících místech.

Pro upnutí tohoto nástroje do dutiny vřetene byly připraveny dva upínací trny, jeden se systémem Big Plus, označení C8-390.540-50.07 C, a druhý se systémem ISO 50. Označení držáku ISO nebylo bohužel čitelné.

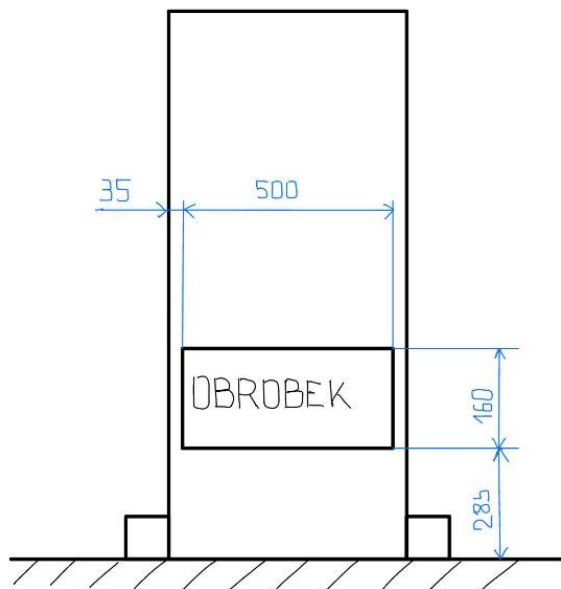


Obr. 48: Válcová fréza s adaptérem upnutá v držáku



### 4.1.3. Obrobek

Pro zkoušku obráběním byl vybrán obrobek o tvaru kvádrů s rozměry 500 x 160 x 93 mm (D x V x Š) z materiálu C45 (ČSN 12 050). Obrobek se upnul na úhelník ze šedé litiny v co nejnižší poloze, aby se co nejvíce snížil vliv poddajnosti úhelníku během měření. Na obr. 49 lze vidět způsob upnutí a poloha zvoleného obrobku.



Obr. 49: Poloha upnutí obrobku

## 4.2. Měření FRF (dynamická poddajnost)

Experiment proběhl v provozovnách společnosti TOS Varnsdorf a.s. Během měření se postupovalo tak, že se zvolená kombinace nástroj-držák oklepala modálním kladívkem (měření odezvy systému), přičemž se data ukládala do programu CutPro. Následně došlo k odepnutí držáku s nástrojem z vřetene a přepnutí nástroje do druhého testovaného držáku. Měření pro tuto kombinaci držák-nástroj probíhalo poté stejně.

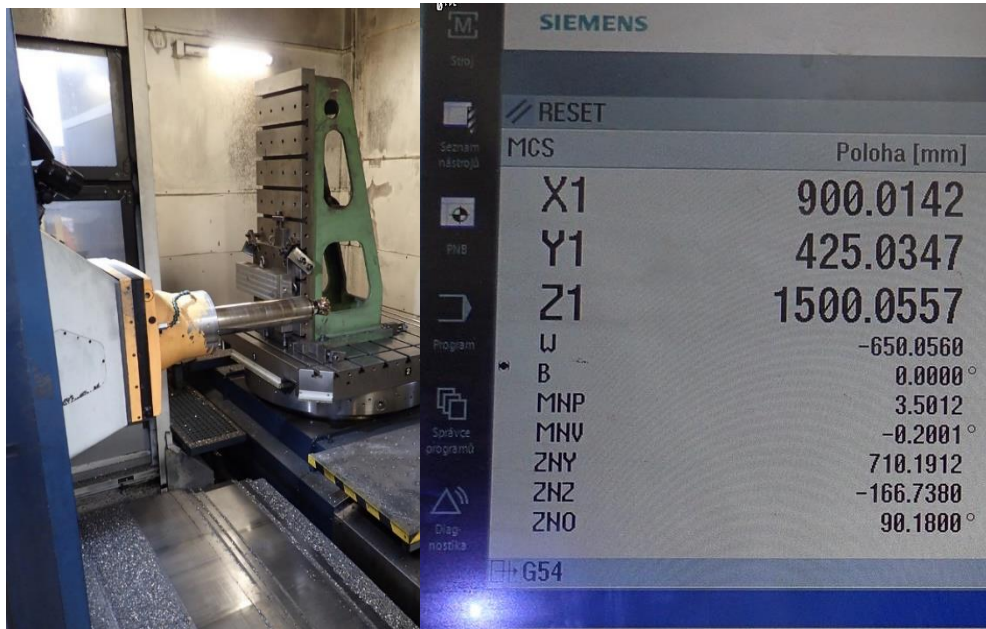
### 4.2.1. Měřicí aparatura a parametry měření

Měřicí aparatura použitá při měření funkce frekvenčního přenosu (FRF) je uvedena v tab. 2 níže.

Tab. 2: Seznam měřicí aparatury použité při měření FRF

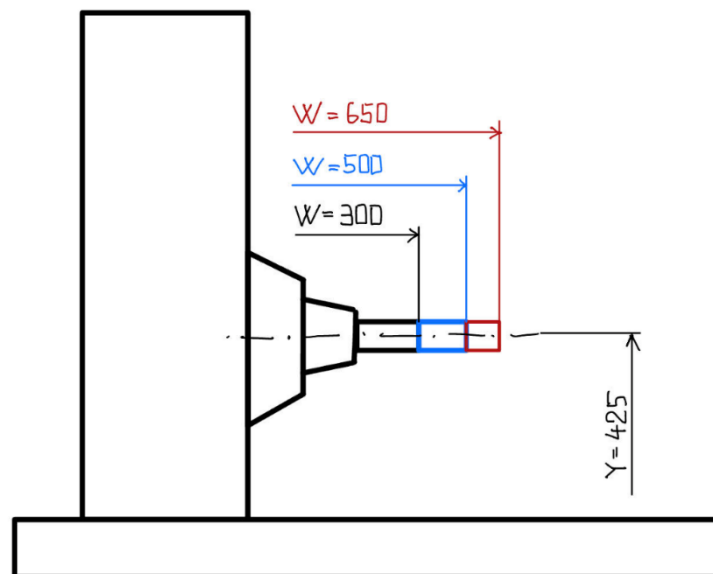
Název	Výrobce	Typ	SN
Notebook	DELL	Precision 5530	
Analyzátor	NI	cDAQ-9171	32777654
Jednoosý akcelerometr	Brüel&Kjaer	4517	68855
Modální kladivo		2303-1075	
Horizontální vyvrtávací centrum	TOS VARNSDORF	WHT110C	101

Prvním krokem bylo upnutí testovaného nástroje do zvoleného držáku a následně se celá tato sestava upnula do dutiny vřetena stroje. Obráběcí stroj se následně ustavil do požadované polohy, ve kterém se uskutečnilo měření, v souřadnicích X, Y, Z a W. Vřeteník byl ustaven do takové polohy, kde se předpokládalo minimální zkreslení naměřených výsledků vlivem poddajnosti stroje, viz obr. 50.



Obr. 50: Poloha vřetene během měření FRF

Měření probíhalo pro všechny čtyři kombinace držáků a nástrojů ve třech polohách vysunutí vřeteníku, a to v polohách  $W = 300$  mm,  $W = 500$  mm,  $W = 650$  mm, viz obr. 51 od předpokládaného nejtužšího po nejpoddajnější místo. V rámci všech měření byla na vřeteníku nasazená opěra.

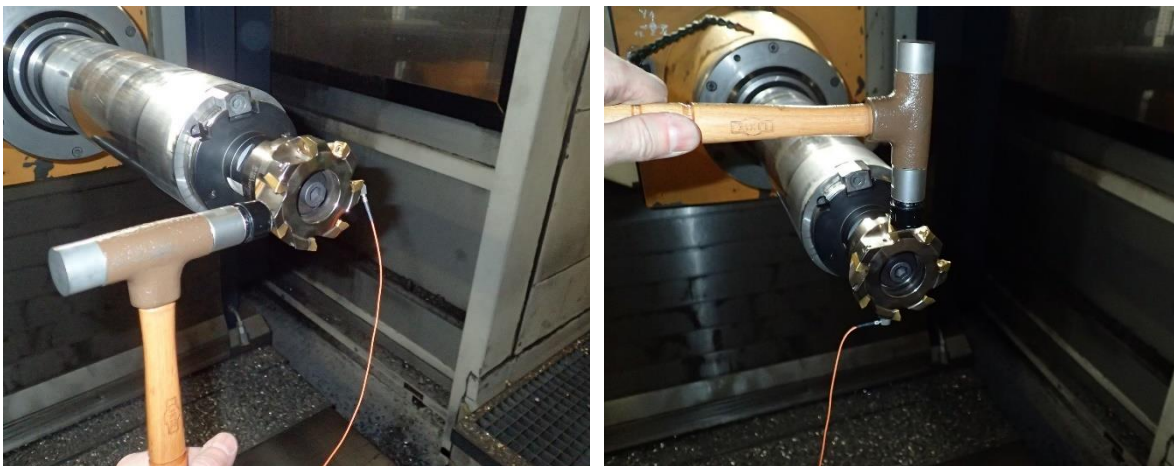


Obr. 51: Schéma poloh vřeteníku během měření FRF

Dále se zapojila měřící aparatura, viz tab. 2, a spustil se software CutPro pro zaznamenání a zpracování dat, konkrétně modul zabudovaný přímo v programu pro měření FRF pod anglickým názvem „Tap Test“. Zde bylo nutné zkontrolovat, zda kanál, který byl k jednotlivým měřícím zařízením (modální kladivo a akcelerometr), odpovídal fyzickému zapojení na analyzátoru. Následovalo nastavení parametrů měření, především vzorkovací frekvence a z ní vyplývající maximální rozsah měřené frekvence, a hodnoty citlivosti modálního kladívka (mV/F) a akcelerometru (mV/g), která se odečetla z kalibračních listů těchto přístrojů.

Jednoosý akcelerometr se na bok nástroje připevnil pomocí vosku, neboť zde nebyla dostatečně velká styková plocha pro použití magnetického držáku.

Nakonec proběhlo samotné měření FRF, které spočívalo v rázovém vybuzení soustavy stroj-držák-nástroj úderem modálního kladívka. Buzení proběhlo ve dvou směrech korespondující se souřadným systémem stroje ve (směru -X a -Y) při pěti opakováních. Poloha akcelerometru a směry buzení jsou vidět na obr. 52 níže.



*Obr. 52: Vlevo buzení čelní frézy ve směru -X; Vpravo buzení ve směru -Y*

Odezva ve formě akcelerace se snímala akcelerometrem a byla zaznamenávána a pomocí FFT zabudované přímo v programu CutPro převedena na FRF ve formě akcelerance, viz obr. 53. Dynamická poddajnost soustavy se získala tak, že se data reálné a imaginární složky FRF ve formě akcelerance vytvořené programem CutPro vyexportoval ve formátu .txt. Tato data se načetla a byla dále zpracována v programu Matlab 2022b, kde se jejich kombinací znova vytvořil komplexní obraz naměřené FRF, která se nakonec dvakrát integrovala

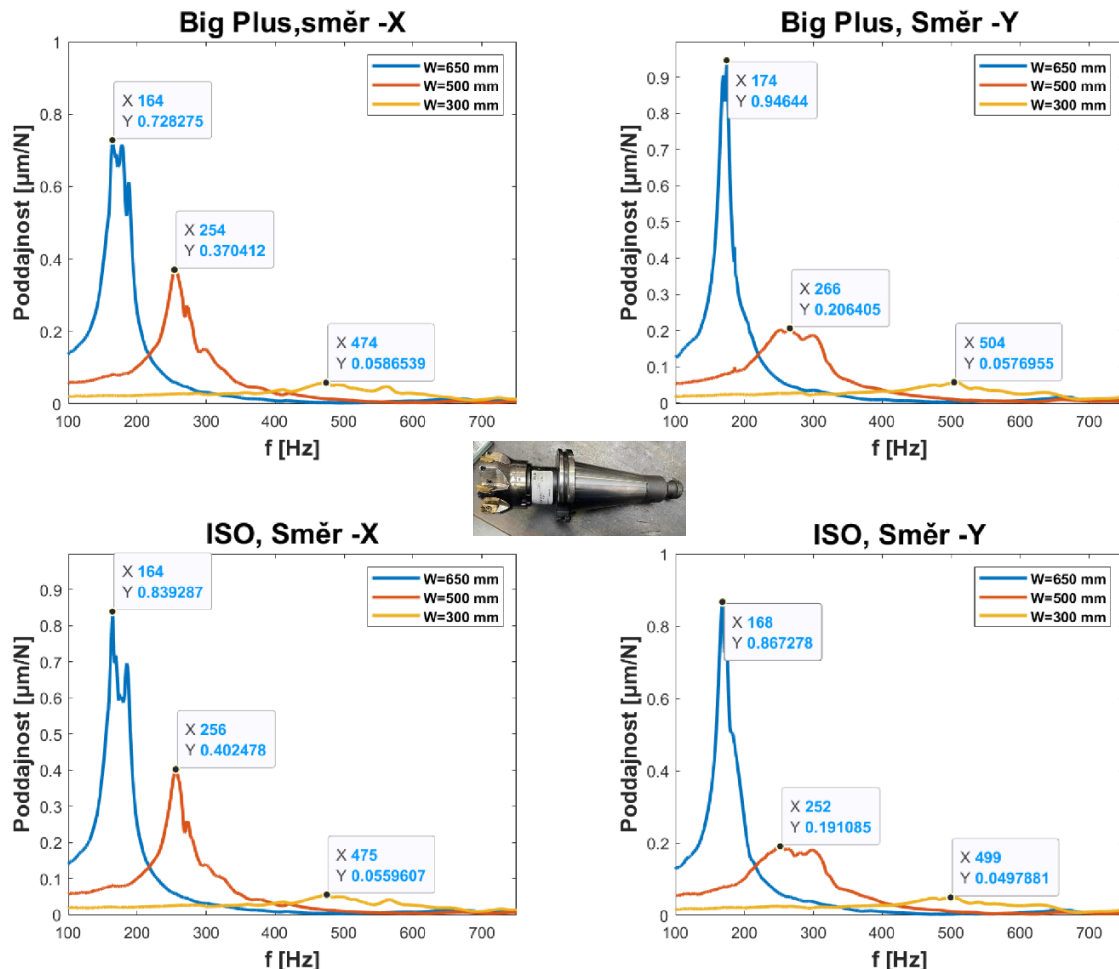
Jak již bylo zmíněno v pro každou kombinaci držák-nástroj se vykonala tři měření ve třech polohách vysunutí vřetene. V příloze č. 2 je seznam všech měření FRF, ve kterém je zaznamenána poloha stroje a vřeteníku během měření, směr buzení a v neposlední řadě den, kdy se měření uskutečnilo.



Obr. 53: Celkový pohled na uživatelské rozhraní modulu pro měření FRF

#### 4.2.2. Výsledky měření

Jako první jsou tu uvedené zpracované výsledky z měření pro čelní frézu 80A07R-S90AD16E-C. Na obr. 54 je možné vidět porovnání grafů dynamické poddajnosti ve třech polohách vysunutí vřetene (300 mm, 500 mm, 650 mm) pro oba testované systémy, kde první řádek reprezentuje systém Big Plus a druhý řádek systém ISO. Každý sloupec zase představuje směr měření.

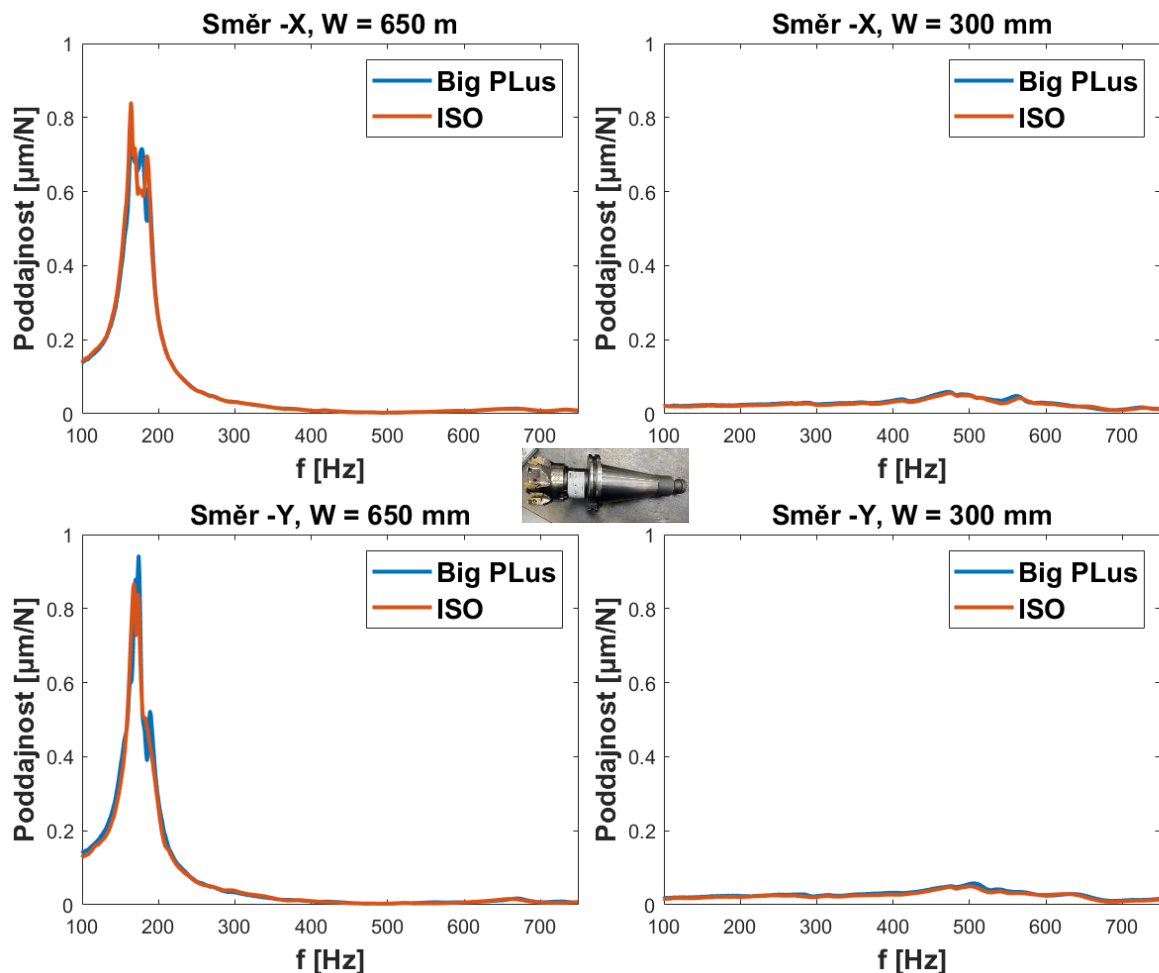


Obr. 54: Porovnání dynamické poddajnosti čelní frézy pro tři polohy vysunutí vřetene W

Z grafů výše je možné vypočítat u obou testovaných upínacích systémů to, že se vzrůstajícím vysunutím vřeteníku v souřadnici W dochází k nelineárnímu zvyšování amplitudy poddajnosti a snižování vlastní frekvence soustavy. Dominantní dynamická poddajnost byla zaznamenána u obou systémů při W650 ve směru -Y. Je velmi pravděpodobné, že se do výsledné hodnoty amplitudy promítá i poddajnost samotného vřeteníku.

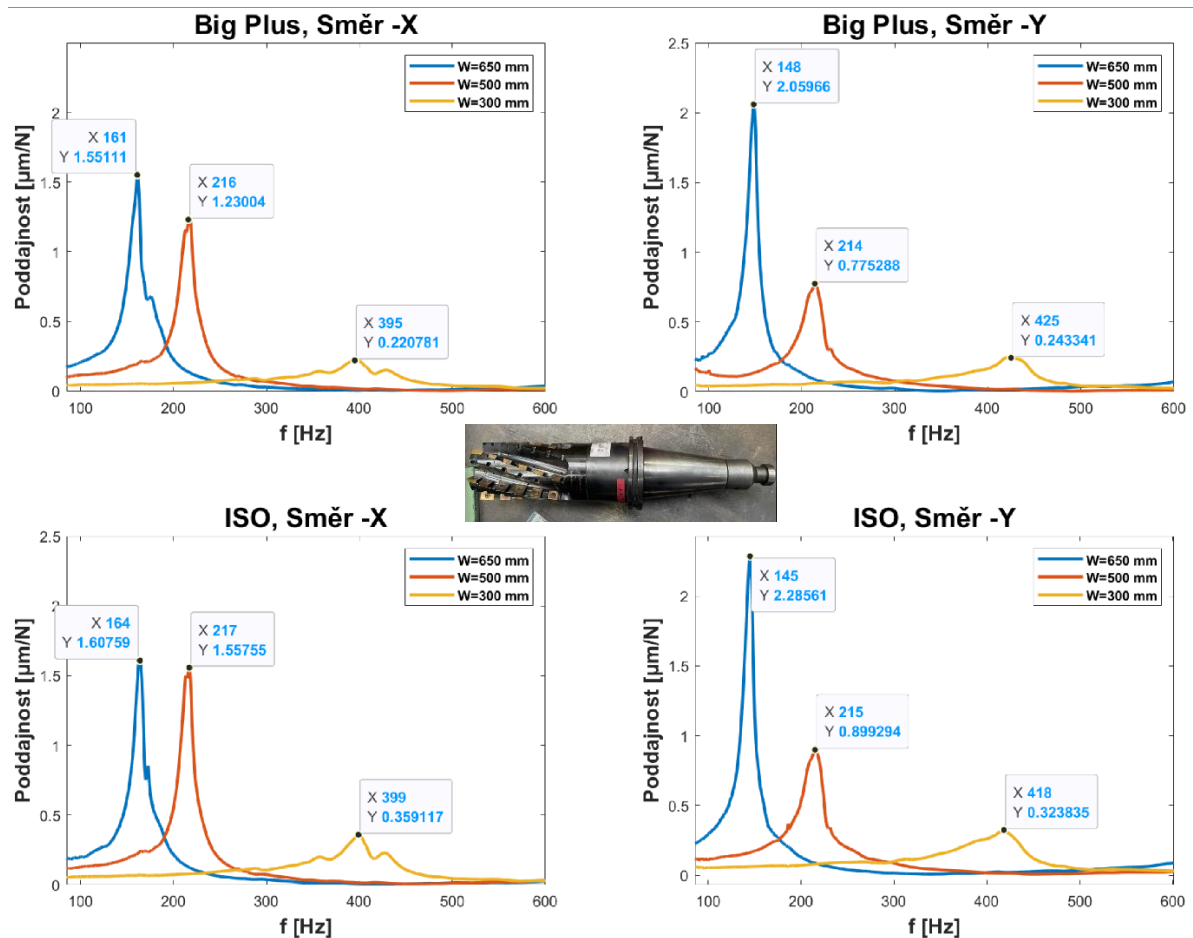
Velkým překvapením bylo zjištění, že se z naměřených dat systém Big Plus od systému ISO prakticky neliší, a naopak při některých měřeních byla dokonce naměřena mírně vyšší amplituda dynamické poddajnosti jako např. měření při W650 a W300 ve směru -Y.

Pro jednodušší a přehlednější srovnání obou systémů byly křivky poddajnosti obou upínacích systémů proloženy přes sebe. Výsledné grafy jsou zobrazeny na obr. 55 a je zde vidět porovnání ve dvou krajních polohách vysunutí vřetene, a to W650 v prvním sloupci a W300 v druhém sloupci. Tyto polohy byly vybrány také z důvodu toho, že při těchto polohách proběhla zkouška obrábění.



Obr. 55: Porovnání dynamické poddajnosti čelní frézy při vysunutí vřetene W650 a W300

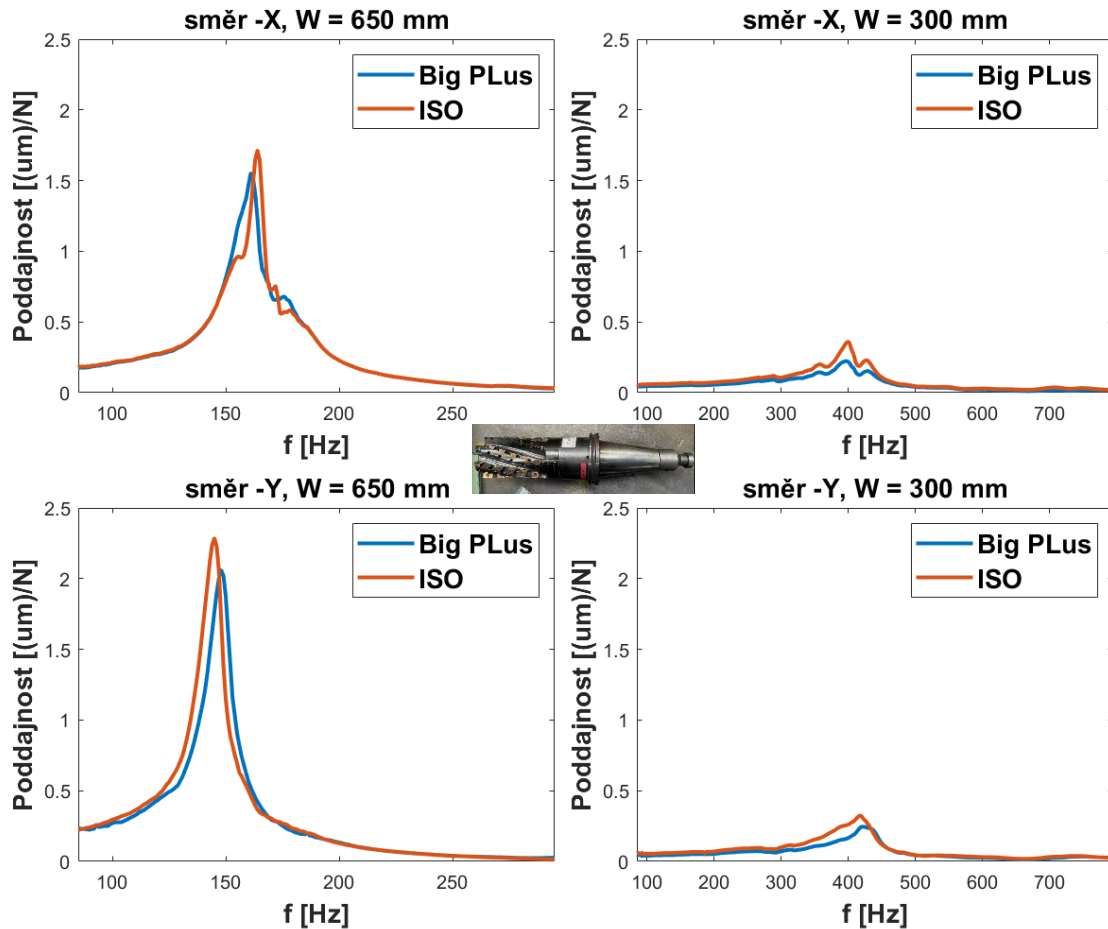
Dále jsou na obr. 56 uvedeny grafy dynamické poddajnosti pro válcovou frézu M4258-080C8-03-80-B s adaptérem M4258-080P40-03-36-F. Lze tu vypočítat stejné chování a to, že s se vzrůstající polohou W roste amplituda dynamické poddajnosti a klesá hodnota vlastní frekvence systému. Dominantní amplituda tu byla taktéž naměřena na souřadnici W650 ve směru -Y. I u tohoto nástroje je velmi pravděpodobné, že se do výsledné hodnoty amplitudy promítá i poddajnost samotného vřeteníku. V zasunuté poloze vřeteníku, tedy v souřadnici W300 již byla jasně zřetelná amplituda vlastní frekvence.



Obr. 56: Porovnání dynamické poddajnosti válcové frézy pro tři polohy vysunutí vřetene W

Narozdíl od čelní frézy, naměřená data pro válcovou frézu již vyšla dle očekávání. Z grafů je vidět, že systém ISO je oproti systému Big Plus ve všech polohách vysunutí vřeteníku a v obou směrech měření poddajnější, a to průměrně o 25 %.

Pro jednodušší porovnání držáku ISO a Big Plus byly stejně jako u čelní frézy proloženy křivky dynamické poddajnosti obou zmíněných systémů v krajních polohách vysunutí vřetene. Výsledné grafy jsou vidět na následující straně na obr. 57.



Obr. 57: Porovnání dynamické poddajnosti válcové frézy při vysunutí vřetene W650 a W300

#### 4.2.3. Shrnutí výsledků

Z vyhodnocených dat z měření FRF bylo zjištěno, že amplituda dynamické poddajnosti roste se vzrůstající souřadnicí W vysunutí vřetena, přičemž klesá hodnota vlastní frekvence soustavy. Amplituda dynamické poddajnosti je taktéž závislá na hmotnosti soustavy držák-nástroj a pro oba typy držáků vyšla dominantní při vysunutí poloze vřeteníku W650 ve směru -Y. Hodnota poddajnosti v tomto místě je ovlivněná samotnou poddajností výsuvného vřeteníku

Co se týče čelní frézy, naměřená data nekorespondovala s očekáváním a držák Big Plus se od držáku ISO téměř nelišil, ba naopak je některých měřeních mírně horší, jako např. měření při W650 a W300 ve směru -Y.

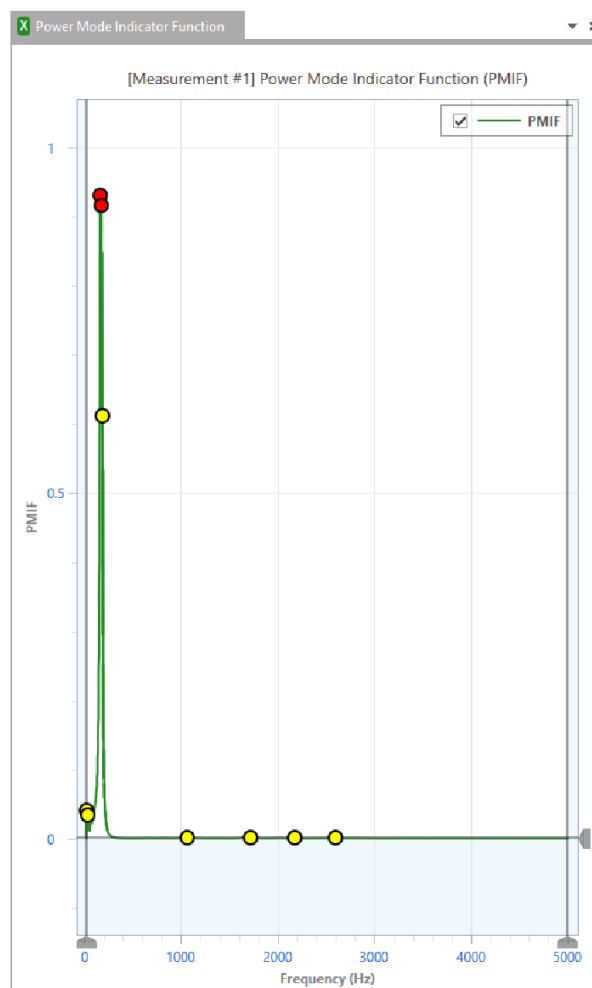
V případě válcové frézy, zde naměřená data již odpovídají teoretickým předpokladům a válcová fréza upnutá v držáku Big Plus vychází ve všech polohách vysunutí vřeteníku a v obou směrech měření tužší než ISO, konkrétně v souřadnici W350 ve směru -X je systém ISO o 1,6x poddajnější. Vyšší tuhost systému Big Plus je patrné dána dvojitým kontaktem mezi nástrojovým držákem a vřetenem, který vzniká na kuželové ploše stopky a na čelní ploše držáku. Díky tomu je dosaženo vyšší ohybové tuhosti.

### 4.3. Stanovení teoretického diagramu stability

#### 4.3.1. Postup zpracování dat

Dalším postupem bylo stanovení teoretických diagramů stability v programu CutPro z naměřených FRF pro oba zvolené nástroje. Nejdříve bylo ale nutné vytvořit matematický model systému z této FRF tím, že se provede identifikace jejích modálních parametrů. Toto je provedeno v k tomu určeném modulu v programu CutPro s názvem „Modal Analysis“, do kterého je možné se plynule přepnout z modulu „Tap Test“ pro měření FRF.

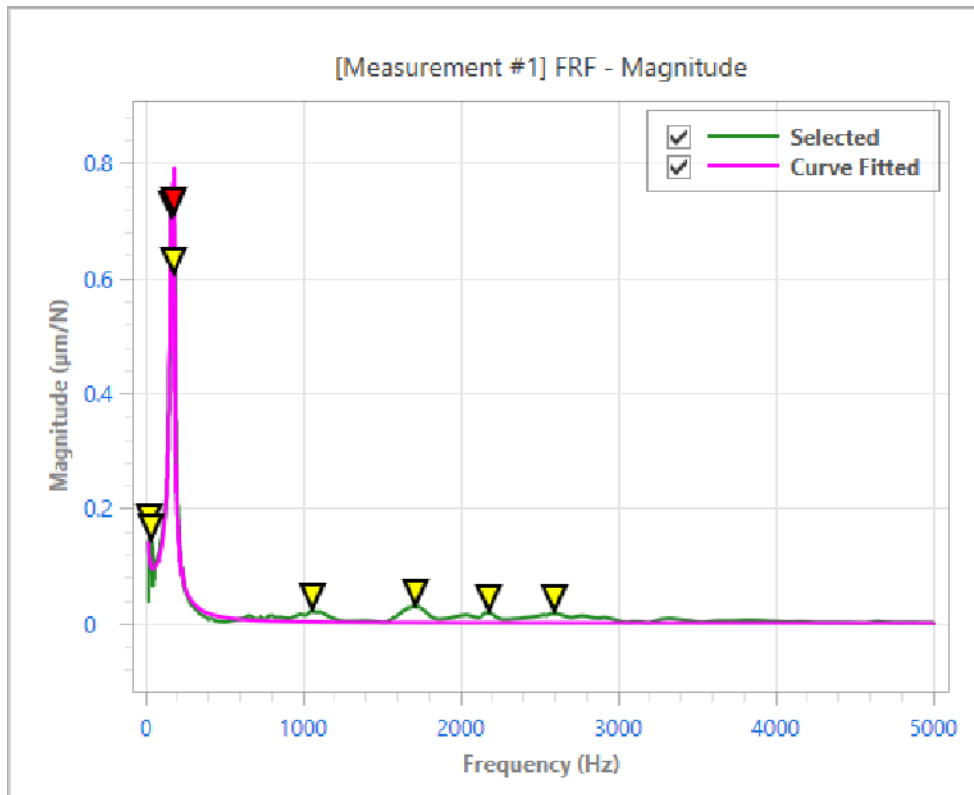
Prvním důležitým krokem je nahrání naměřených FRF (směr X a Y) v nativním formátu .cws do tohoto modulu. V případě, že je FRF ve formě akcelerance, dojde k automatickému převodu na dynamickou poddajnost. Následně se volí místo buzení a rozsah frekvencí, čímž se odfiltruje nežádáný šum vzniklý integrací, z čeho vyplývá podmínka nenulové frekvence. Poslední úkon spočívá ve volbě tzv. módu, což je v tomto případě první vlastní frekvence systému. Volba módu se provádí v okně, kde je zobrazena amplituda FRF. Na obr. 58 je ukázka volby módu pro naměřenou FRF čelní frézy s držákem Big Plus při W650.



Obr. 58: Volba módu v modulu pro modální analýzu



Nakonec se provede odhad modálních parametrů pro tento mód pomocí funkce „Curve Fit“ zabudované v modulu, čímž dojde k proložení reálné FRF vyrovnanou FRF. Příklad vyrovnané FRF vytvořené v modulu pro modální analýzu je na obr. 59.



Obr. 59: Příklad vyrovnané FRF

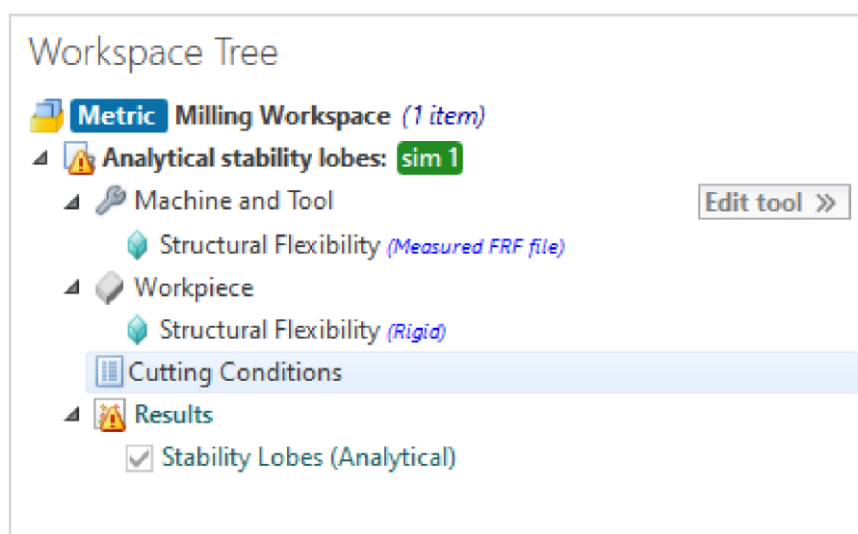
Výsledné modální parametry vygenerované algoritmem jsou v tomto případě vlastní frekvence [Hz], tlumení [%], modální tuhost [N/m] a modální hmotnost [kg]. Tyto modální parametry se následně exportují a slouží dále ke stanovení diagramu stability. Na obr. 60 níže je pro ukázkou vyobrazena tabulka s modálními parametry z FRF z obr. 59 vygenerované programem.

Optimized Modes					Export
Mode No:	Frequency [Hz]	Damping Ratio [%]	Modal Stiffness [N/m]	Modal Mass [kg]	
▶ 1	164.71	4.45	2.0070E07	18.739	
2	180.23	2.47	3.6692E07	28.611	

Obr. 60: Příklad tabulky s výslednými modálními parametry

Z kapitoly 3.6 je již známo, že diagram stability slouží k určení takových kombinací řezných podmínek, při kterých se dosáhne maximálního využití instalovaného výkonu stroje a nedojde ke vzniku samobuzeného kmitání. Tento diagram je možné získat buď experimentálně ze zkoušky obráběním nebo jako v tomto případě teoretický stanovený pomocí profesionálního programu pro simulaci obrábění, konkrétně program CutPro.

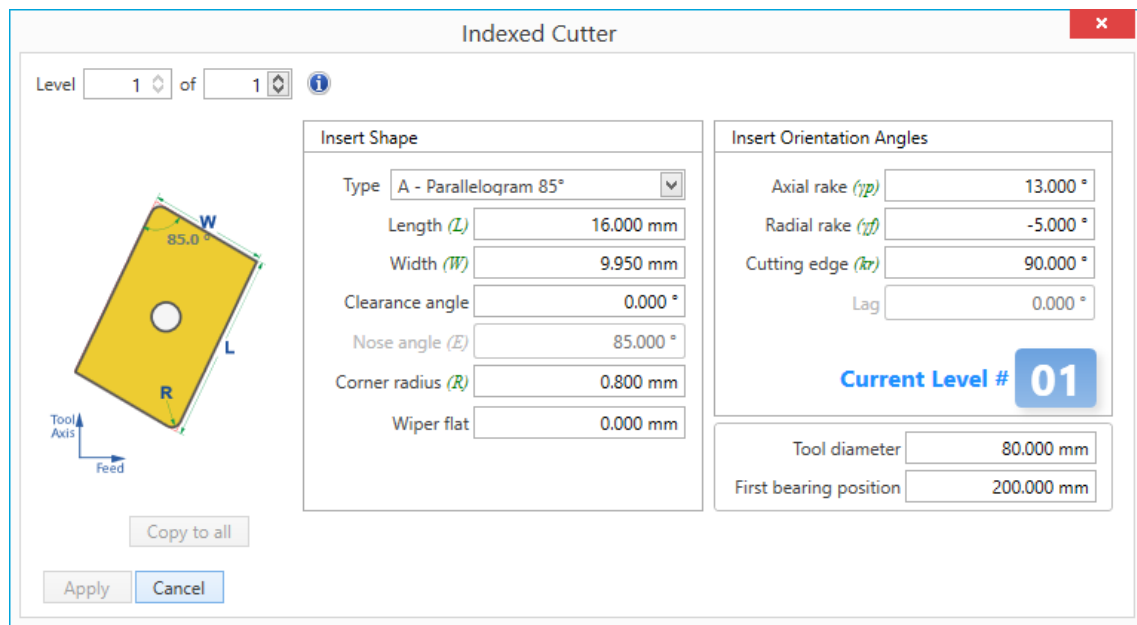
Pro určení teoretického diagramu stability ze získaných modálních parametrů z naměřené FRF se používá modul s anglickým názvem „Analytical Stability Lobe“, což ve volném překladu znamená „Analytický diagram stability“. Z názvu je zřejmé, že tento modul je určen k vytvoření diagramu stability analyticky ze získaných modálních parametrů soustavy stroj – držák – nástroj a popřípadě i samotného obrobku.



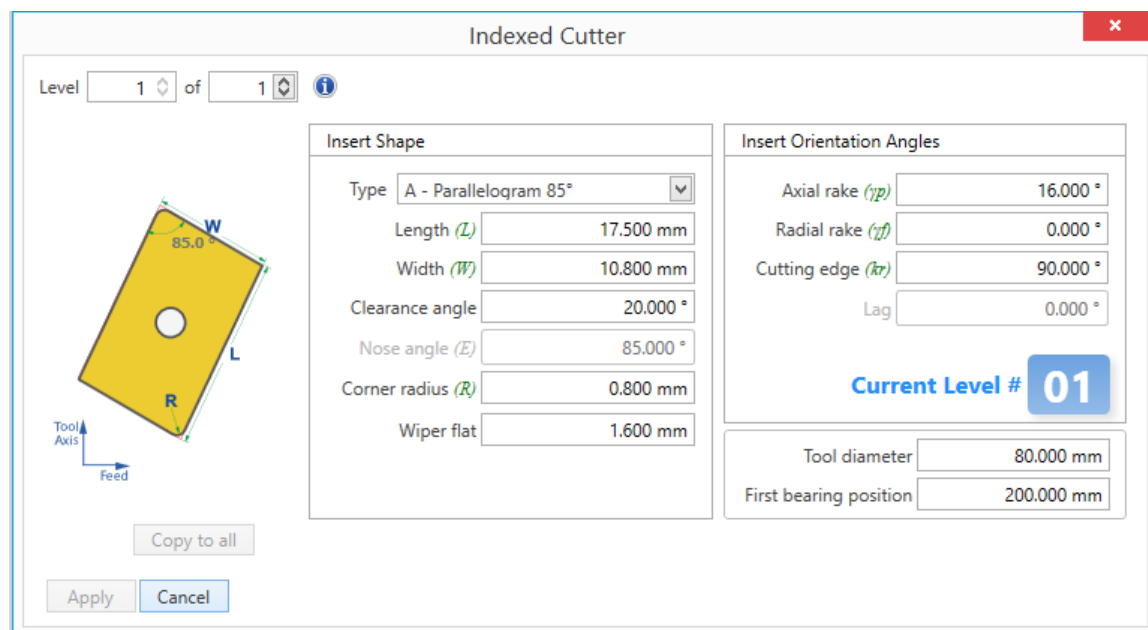
Obr. 61: Postup nastavení parametrů v modulu pro stanovení diagramu stability

Jak je, ze struktury postupu práce v modulu pro určení diagramu stability zobrazený na obr. 61, možné vidět, úplně prvním krokem je volba typu nástroje a jeho vlastnosti v záložce „Machine and Tool“, v tomto případě je to průměr nástroje, počet zubů a v případě použití nástroje s výměnnými břitovými destičkami, tak i volba jejich parametrů a počet úrovní pro upevnění destiček. Délka nástroje se při výpočtu diagramu stability neuvažuje a zadává se tu pouze pro kompletnost údajů.

Na obr. 62 jsou zobrazeny parametry VBD typu ADMX 160608SR-M použité u čelní frézy a pro válcovou frézu byly zadány pouze VBD typu SDMW120408-A57, viz obr. 63, neboť se během zkoušky obráběním bude frézovat pouze bokem nástroje a v záběru se budou nacházet převážně tyto VBD.



Obr. 62: Nastavené parametry pro VBD ADMX 160608SR-M



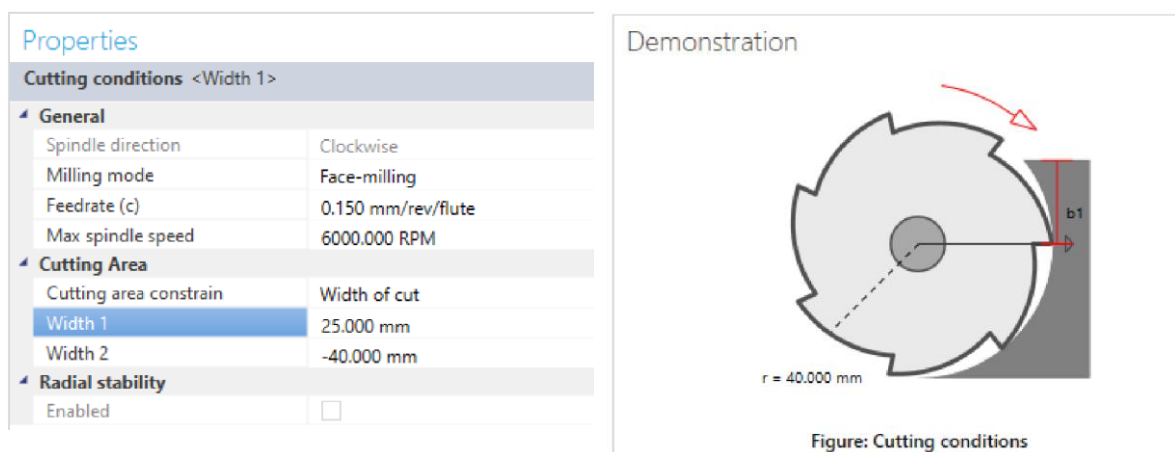
Obr. 63: Nastavené parametry pro SDM120408-A57

V záložce „Structural flexibility“ se nastavují dynamické vlastnosti soustavy stroj – držák – nástroj. Zde se buď ručně zadají hodnoty modálních parametrů matematického modelu FRF, které byly získány v modulu pro modální analýzu, nebo se mohou přímo nahrát exportovaná data získaná v předchozím kroku. Pro směr posuvu se nahrávají data z měření FRF ve směru X, do směru normály se zase nahrávají data z měření FRF ve směru Y, směr Z se uvažuje jako absolutně tuhý.

Následuje záložka „Workpice“, kde se definuje materiál frázovaného obrobku, na základě, kterého je určen měrný řezný odpor  $k_c$ , který program CutPro se použije pro výpočet diagramu stability. Zde byl zvolen materiál AISI 1045, což je ekvivalent oceli C45 (ČSN 12 050), která bude použita během zkoušky obráběním. V záložce „Structural flexibility“ se dále volí dynamické vlastnosti obrobku stejným způsobem, jako u nástroje výše. Vzhledem k tomu, že nebylo provedeno měření FRF obrobku, neboť předmětem zkoumání byl samotný držák a nástroj, z tohoto důvodu byl obrobek nastaven jako absolutně tuhý.

Poslední krok v záložce „Cutting conditions“ spočívá v nastavení řezných podmínek jako např. maximální otáčky vřetene a způsob frézování. Z principu diagramu stability se nastavuje konstantní šířka řezu a posuv na zub. Nastavené řezné podmínky byly stanovené dle doporučení výrobce řezných destiček a ze zkušenosti vedoucího a konzultanta této práce.

Na obr. 64 jsou pro ukázkou zobrazeny nastavené parametry a schéma obráběcího procesu pro sousledné čelní frézování čelní frézou s konstantní šířkou řezu  $a_e$  a posuvem na zub  $f_z$ .



Obr. 64: Nastavené řezné podmínky pro sousledné frézování čelní frézou

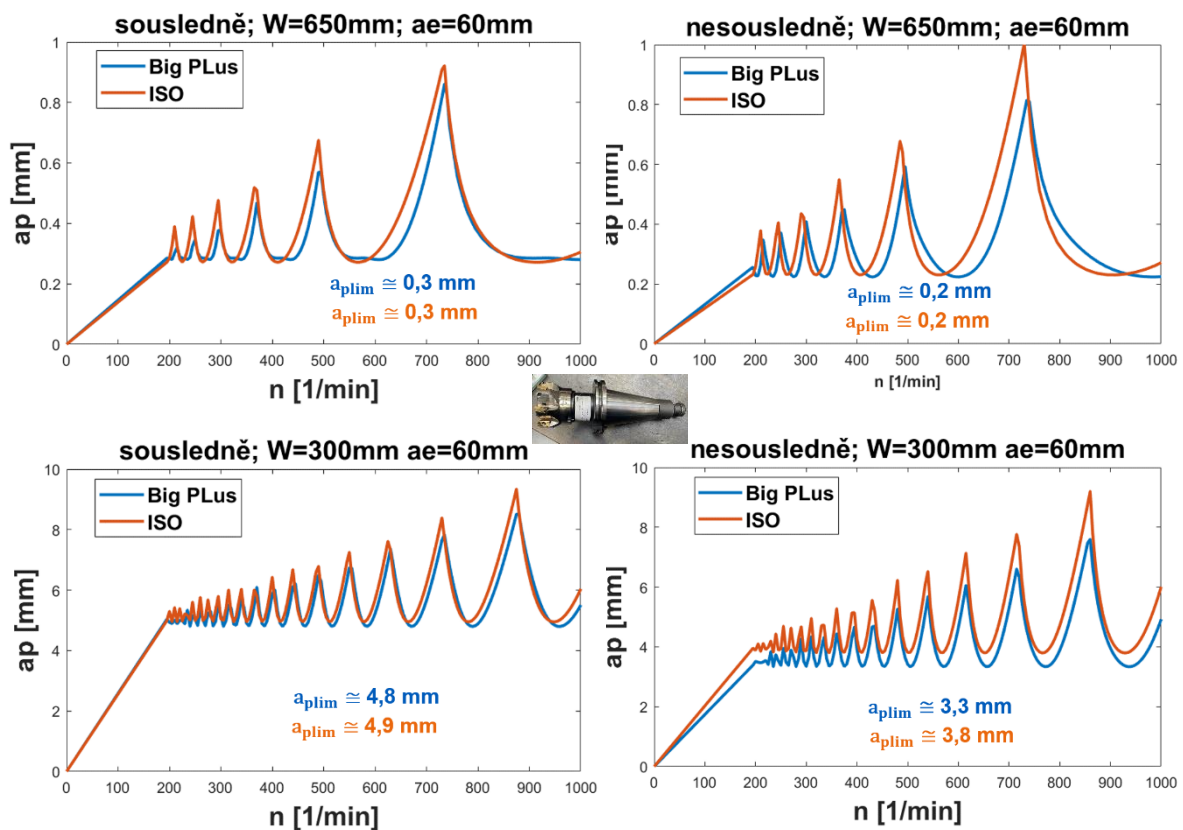
V případě válcové frézy se plánovalo pouze s bočním frézováním při konstantní hloubce řezu a proměnlivou šířkou řezu během zkoušky obráběním. Vzhledem k tomu, že tento modul neumožnil toto nastavení, musely být proveden výpočet diagramu stability zvlášť pro každou variaci radiální šířky řezu  $a_e$ .

Po zkontrolování všech nastavených hodnot se na závěr spustí simulace, ze které vzejde výsledný diagram stability pro daný nástroj a obrobek a zvolenou kombinaci řezných podmínek.

### 4.3.2. Vyhodnocení dat

Pro jednodušší porovnání výsledků mezi sebou byla výsledná data (vektor hloubky řezu  $a_p$  a otáčky vřetena) ze simulace vytvořená v modulu pro diagram stability exportována ve formátu .csv a dále zpracována v programu Matlab 2022b.

Pro čelní frézu 80A07R-S90AD16E-C byly vytvořeny diagramy stability pro dvě polohy vysunutí vřetene, a to pro W650 a W300. Tyto polohy byly zvoleny s ohledem na možnost porovnání s výsledky ze zkoušky obráběním. Rozsah otáček 0–1000 1/min byl zvolen z důvodu toho, že se během zkoušky obrábění nefrézovalo při vyšších otáčkách. Porovnání těchto diagramů stability pro při použití držáku ISO a Big Plus je zobrazeno níže na obr. 65. Sloupce zde reprezentují směr obrábění, kde první sloupec představuje sousledné frézování a druhý sloupec nesousledné frézování. Každý řádek zase představuje polohu vysunutí vřetene.



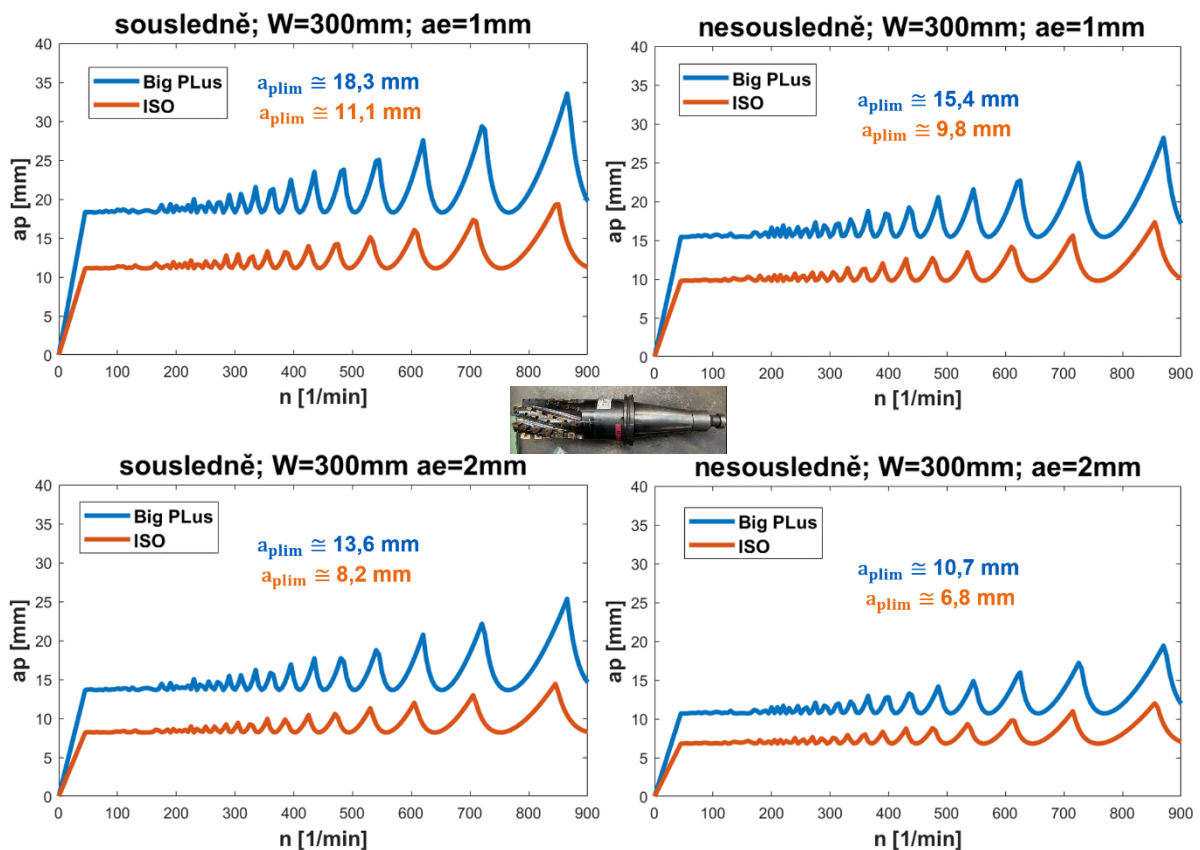
Obr. 65: Porovnání diagramů stability pro čelní frézu

Z výsledných grafů výše je možné vidět, že průběh křivky diagramů stability a oblast stabilního obrábění pro držák ISO a držák Big Plus je pro sousledné frézování při obou polohách vysunutí vřetena téměř totožný. V případě nesousledného frézování vychází oblast stabilního frézování mírně větší pro držák ISO a platí to pro obě polohy vysunutí vřetena, což koresponduje s daty z naměřené FRF, ze kterých byly určeny modální parametry. Co se týče mezní hodnoty hloubky řezu  $a_{plim}$ , větší odchylky jsou zaznamenány

pouze při nesousledném frézování při zasunutém vřetení (W300). Zde vychází  $a_{plim}$  přibližně o 15 % větší u držáku ISO. Taktéž lze z výsledných diagramů vyzpozorovat, že pro sousledné frézování vychází pro oba držáky oblast stabilního obrábění nepatrně větší.

Dále jsou na obr. 66 diagramy stability pro válcovou frézu M4258-080C8-03-80-B s adaptérem M4258-080P40-03-36-F, na kterých je vidět porovnání oblasti stability systému Big Plus a ISO. Při zkoušce obráběním se tímto nástrojem frézovalo pouze při zasunuté poloze vřetene (W300), a proto stačilo pro další porovnání stanovit diagram stability pouze pro tuto polohu. Rozsah otáček 0–900 1/min byl zvolen z důvodu toho, že se během zkoušky obrábění nefrézovalo při vyšších otáčkách.

V úvodu kapitoly bylo zmíněno, vzhledem k tomu, že modul pro určení diagramu stability v programu CutPro neumožnil nastavit konstantní hloubku řezu  $a_{plim}$  a proměnlivou radiální šířku řezu  $a_e$ , musela se provést zvlášť simulace pro  $a_e = 1 \text{ mm}$  a  $a_e = 2 \text{ mm}$ . Sloupce zde reprezentují směr obrábění, kde první sloupec představuje sousledné frézování a druhý sloupec nesousledné frézování, stejné jako u čelní frézy. Každý řádek zde naopak představuje proměnlivou radiální šířku řezu.



Obr. 66: Porovnání diagramů stability pro válcovou frézu

Zde jsou již vidět markantnější rozdíly mezi držákem ISO a Big Plus. Oblast stabilního obrábění vychází ve všech případech větší u držáku Big Plus, což jsou výsledky dle očekávání i dle naměřených FRF. Co se týče hodnoty mezní hloubky řezu  $a_{plim}$ , ta vyšla v obou metodách frézování a šířkách řezu větší ve prospěch systému Big Plus, a to přibližně o 65 % v sousledném směru a přibližně o 55 % v nesousledném směru. Lze tu vyzorovat stejné chování a to, že při sousledném frézování se dosahuje vyšší stability než při nesousledném frézování.

#### 4.3.3. Shrnutí výsledků

Ze stanovených diagramů stability v programu CutPro bylo zjištěno, že největší stability při obrábění je dosaženo při sousledném řezu. Toto chování se dá pravděpodobně vysvětlit tím, že při sousledném frézování vznikají rázy, které může způsobit vyskakování nástroje z řezu, což má za následek snížení doby buzení, a to má stejný účinek jako zkracování délky záběru, a tedy nárůstu stability.

Co se týče čelní frézy, zde vyšli diagramy stability pro oba systémy upínačů v případě sousledného frézování téměř totožné. Menší rozdíly se vyskytli u diagramů pro nesousledné frézování, kde je oblast stabilního obrábění širší u držáku ISO. Konkrétně u diagramu pro nesousledné frézování při zasunutém vřetení W300 vyšla mezní hloubka řezu  $a_{plim}$  přibližně o 15% větší než u Big Plus.

V případě válcové frézy, zde naměřená data již odpovídají teoretickým předpokladům i naměřeným FRF a ve všech případech vychází oblast stabilního obrábění u válcové frézy upnuté v držáku Big Plus výrazně širší. U nesousledného frézování je mezní hloubka  $a_{plim}$  u držáku Big Plus větší přibližně o 57 %, u sousledného až o 65 %.

#### 4.4. Zkouška obráběním

Druhá část vlastního řešení se skládala ze zkoušky obráběním, během které se obrábělo zvolenou kombinací nástroj – držák v testované poloze vysunutí vřetena, přičemž se měřili provozní vibrace tříosým akcelerometrem. Výchozí řezné podmínky pro oba nástroje byly zvoleny dle doporučení výrobců břitových destiček a podle zkušeností vedoucího, konzultanta této práce a pracovníka TOS Varnsdorf.

Co se týče čelní frézy, zde proběhlo měření při čelním frézování ve dvou krajních polohách vysunutí vřetene, a to při vysunutě (W650) a zasunutě (W300), radiální šířka řezu  $a_e$  a posuv na zub  $f_z$  byl konstantní a z měnily pouze axiální hloubka řezu  $a_p$  a otáčky vřetena  $n$ .

V případě válcové frézy proběhlo měření během bočního frézování pouze při zasunutě poloze vřetene (W300), neboť už samotný nástroj měl velké vyložení a v případě obrábění s vysunutým vřetenem by hrozilo poškození samotného výsuvného vřetene a ložisek, ve kterých je uloženo, vlivem ohybového zatížení. Neměnnými parametry během obrábění byla axiální hloubka řezu  $a_p$  a posuv na zub  $f_z$  a i u tohoto nástroje se měnily pouze dva parametry a těmi jsou radiální šířka  $a_e$  a otáčky vřetena  $n$ .

Na obr. 67 a obr. 68 jsou vidět polohy vřetene a obráběcí operace provedené během zkoušky.



Obr. 67: Příklad obráběcích operací pro čelní frézu





*Obr. 68: Příklad obráběcí operace pro válcovou frézu*

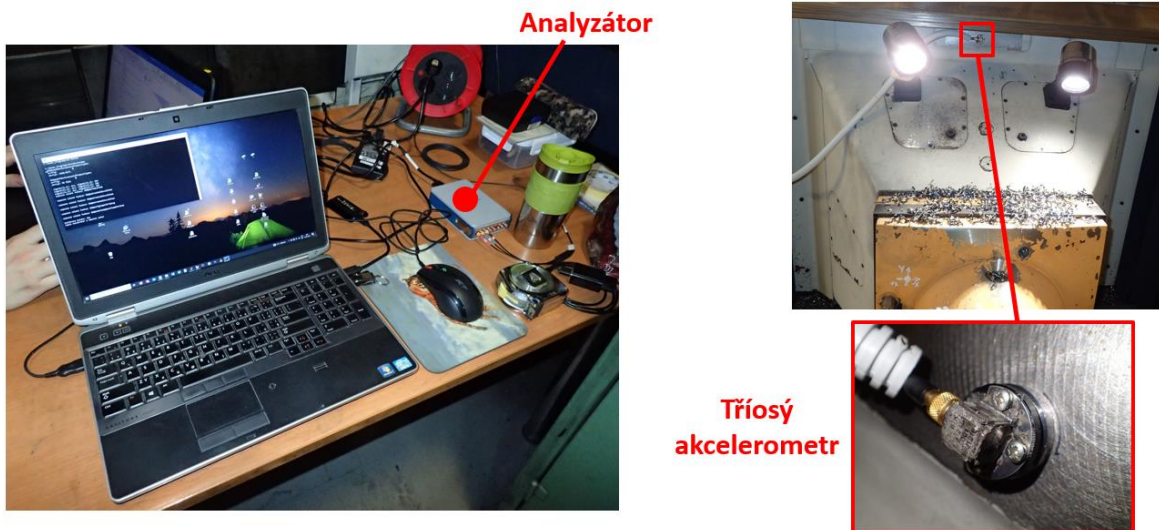
Data zaznamenaná z akcelerometru byla dále zpracována v programu Matlab 2022b a pomocí zabudované funkce pro rychlou Fourierovu transformaci (FFT) převedena na frekvenční spektrum, ze kterých byla zjištěna dominantní amplituda kmitů a její frekvence. Nakonec proběhlo porovnání obou použitých nástrojových držáků, které byly použity při obrábění čelní a válcovou frézou, z hlediska mohutnosti kmitání a stability během obráběcího procesu, kde hlavními kritérii pro posouzení jsou kvalita obrobeného povrchu, zvukový projev stroje a vibrace během obrábění. Detailní popis zpracování dat je uveden níže v následujících podkapitolách.

#### **4.4.1. Parametry zkoušky a způsob zpracování výsledků**

Aparatura použitá během zkoušky obráběním pro měření provozních vibrací se skládala z téměř stejných komponentů jako ta při měření FRF v kapitole 4.2. Jediným větším rozdílem je použití tříosého akcelerometru pro měření vibrací v osách X, Y a Z. Akcelerometr se na horní část vřeteníku umístil pomocí magnetického držáku a jeho umístění je zobrazení na obr. 69. Seznam použité měřicí aparatury je sepsán v tab. 3 níže.

*Tab. 3: Seznam měřicí aparatury použité během zkoušky obráběním*

<b>Název</b>	<b>Výrobce</b>	<b>Typ</b>	<b>SN</b>
Notebook	DELL	Latitude 5510	7X5CL63
Analyzátor NI cDAQ-9171	NI	cDAQ-9171	32777654
Tříosý akcelerometr Kabel: 1-4 28 UNF → 10-32 UNF	Brüel&Kjaer	4524 B1 AO-0527-D-100	31216 2019W36 1
Horizontální vyvrtávací centrum	TOS VARNSDORF	WHT110C	101



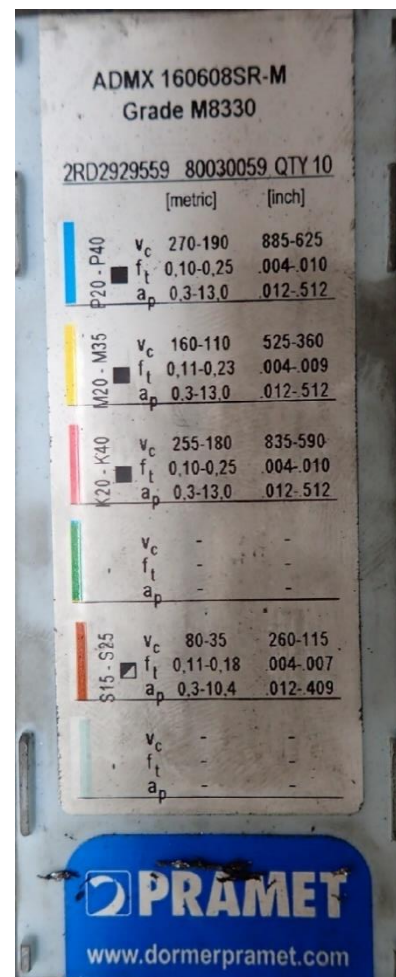
Obr. 69: Použitá aparatura a umístění akcelerometru

### Parametry zkoušky

Co se týče záběrových a řezných podmínek, ty byly zvoleny, jak již bylo zmíněno dříve, na základě doporučení výrobce řezných břitových destiček, viz obr. 70, a modifikovány dle praktických zkušeností vedoucího a konzultanta této práce a také pracovníka společnosti TOS Varnsdorf, který obsluhoval daný stroj. Zvolené řezné podmínky pro čelní frézu jsou zobrazeny v tab. 4.

Tab. 4: Řezné podmínky pro čelní frézu

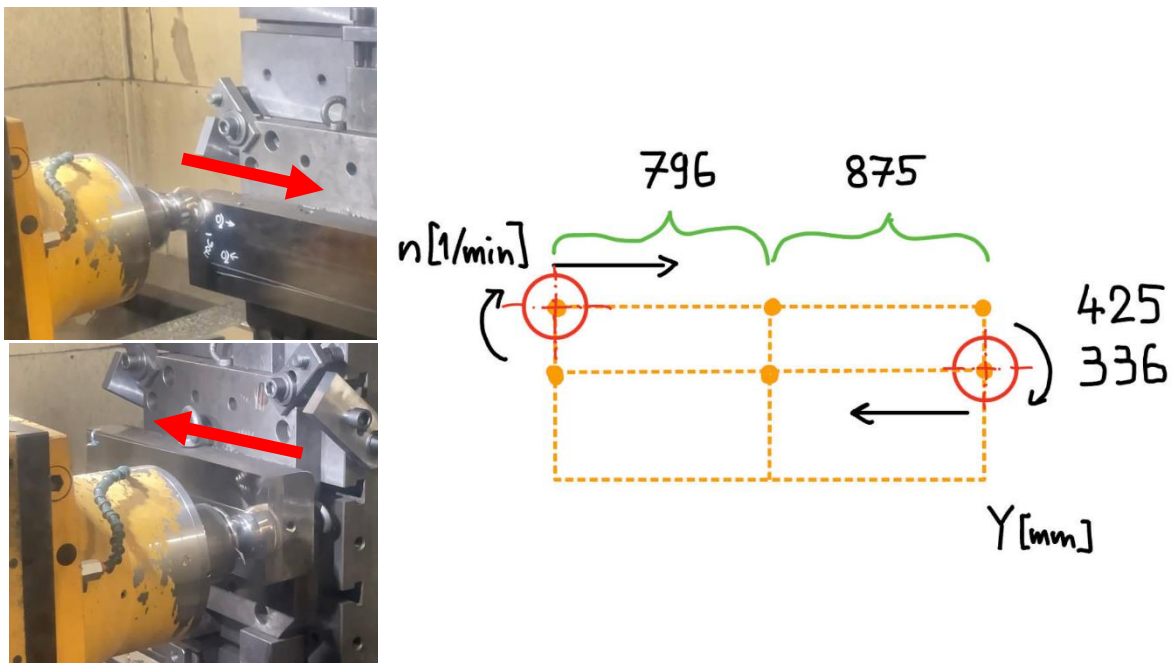
Parametr	Značení	Jednotka	Hodnota
Otáčky	n	1/min	796–875
Řezná rychlost	$v_c$	m/min	200-220
Posuv na zub	$f_z$	mm	0,15
Rychlost posuvu	$v_f$	mm/min	836-919
Axiální hloubka řezu	$a_p$	mm	0,5-1; 3-4
Radiální šířka řezu	$a_e$	mm	60



Obr. 70: Doporučené řezné podmínky pro

Zkouška obráběním čelní frézou probíhala ve dvou krajních polohách vysunutí vřetene (**W650** a **W300**). Nástroj se upnul do jednoho ze dvou testovaných držáků a ten byl poté upnut do dutiny vřetene. Obrábělo se po celé délce vrchní části obrobku a v půlce dráhy došlo vždy ke změně otáček vřetene, a tedy i řezné rychlosti  $v_c = 200-220 \text{ mm/min}$ . Při zpětném chodu (zprava doleva) došlo ke změně záběrových podmínek a obrábělo se nesousledně.

Během všech měření byla nastavena konstantní radiální šířka řezu  $a_e = 60 \text{ mm}$  a posuv na zub  $f_z = 0,15 \text{ mm}$ , axiální hloubka řezu  $a_p$  se měnila po každé provedené dvojici měření (sousedné  $\rightarrow$  nesousledné) a pro každou polohu vysunutí vřetena byly stanoveny dvě sady, pro W650 byla  $a_p = 0,5-1 \text{ mm}$ , pro W300 byla  $a_p = 3-4 \text{ mm}$ . Schéma zkoušky obráběním čelní frézou je zobrazen na obr. 71.



Obr. 71: Schéma zkoušky obráběním čelní frézou

Pro čelní frézu bylo tedy provedeno celkem 16 měření (M01-M16), z toho půlka měření byla s držákem Big Plus (M01-M08) a zbylá půlka s držákem ISO (M09-M16).

Pro úplnost a větší přehlednost je seznam všech provedených měření, poloh měření a řezných a záběrových podmínek použitých během zkoušky obráběním rozdělen do dvou tabulek dle použitého držáku viz příloha č. 3.

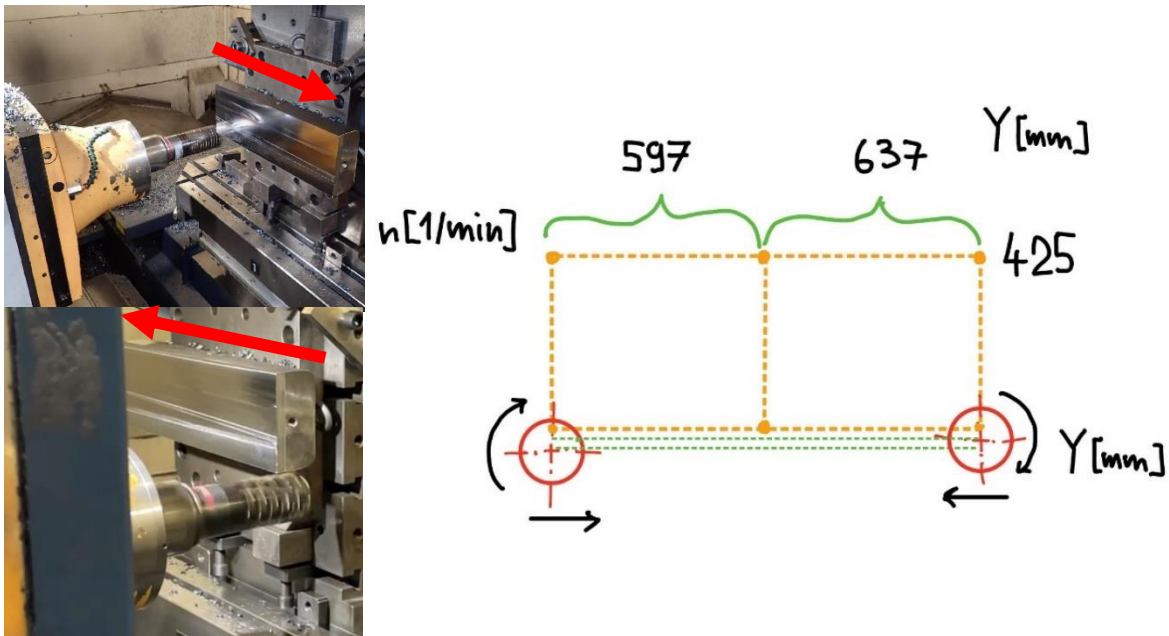
Značky  $\uparrow$  a  $\downarrow$  v kolonce „Směr“ značí v tomto případě směr záběru během zkoušky, kde šipka nahoru  $\uparrow$  udává frézování nesousledné (z angličtiny Up Milling) a šipka dolů  $\downarrow$  zase frézování sousledné (z angličtiny Down Milling).

Řezné podmínky pro válcovou frézu byly stanoveny stejným způsobem jako u čelní frézy a zvolené hodnoty jsou vypsány v tab. 5 níže.

Tab. 5: Řezné podmínky pro válcovou frézu

Parametr	Značení	Jednotka	Hodnota
Otáčky	n	1/min	597–637
Řezná rychlost	$v_c$	m/min	150-160
Posuv na zub	$f_z$	mm	0,15
Rychlost posuvu	$v_f$	mm/min	537–573
Axiální hloubka řezu	$a_p$	mm	35
Radiální šířka řezu	$a_e$	mm	1-2

V případě válcové hrany byla provedena zkouška obráběním pouze v zasunuté poloze vřetena (**W300**). Bokem nástroje se frézovala celá délka spodní hrany obrobku a oproti čelní fréze se tu nastavila pevná axiální hloubka řezu  $a_p = 35 \text{ mm}$  a měnila se radiální šířka řezu  $a_e = 1-2 \text{ mm}$  po každé dvojici měření. Způsob provedení zkoušky byl stejný jako u čelní frézy a vždy v půlce měření došlo ke změně řezné rychlosti  $v_c = 150-160 \text{ mm/min}$ . Při zpětném chodu (zprava doleva) došlo ke změně záběrových podmínek a obrábělo se sousledně. Na obr.72 je zobrazeno schéma zkoušky obráběním válcovou frézou.



Obr. 72: Schéma zkoušky obráběním válcovou frézou

S válcovou frézou bylo provedeno 8 měření (M17-M24), z čehož byla půlka měření s držákem Big Plus (M17-M20) a druhá polovina s držákem ISO (M21-M24). Seznam provedených měření je uveden v příloze č. 4.

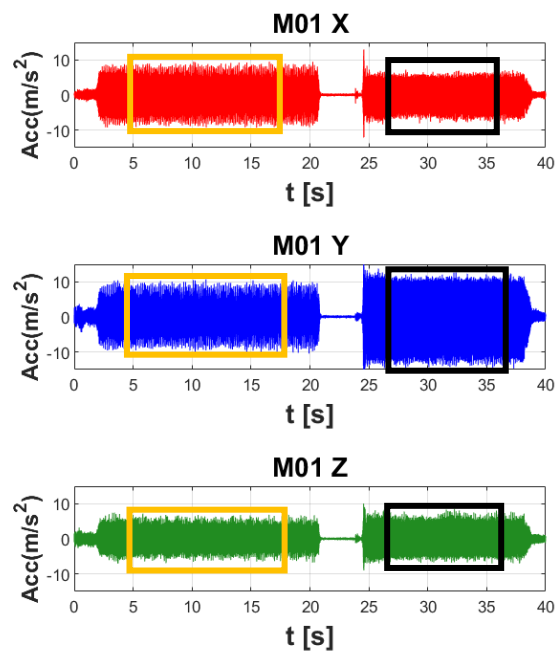
**Postup zpracování výsledků**

Vibrace vzniklé během obráběcího procesu se zaznamenávaly pomocí tříosého akcelerometru umístěného nad vřeteníkem. Během zkoušky se měřily vibrace ve třech osách, X, Y a Z, korespondující se souřadným systémem obráběcího stroje.

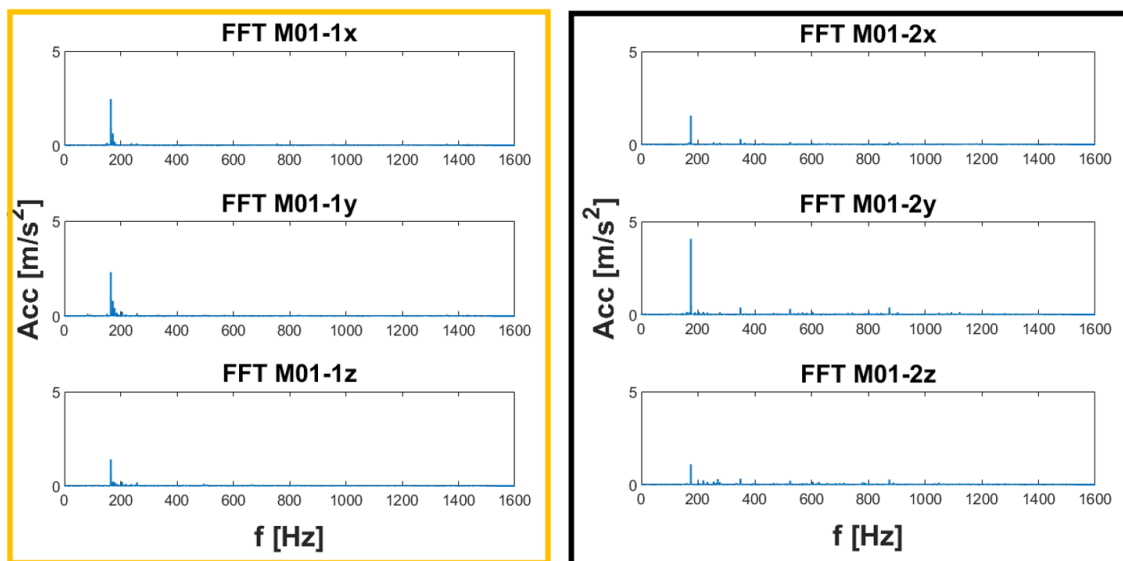
Naměřená data ve formě diskretizovaných hodnot signálu se dále zpracovávala v programu Matlab 2022b, kde se vybral úsek z časového záznamu, jenž nebyl nijak ovlivněný záběrovými podmínky při nájzdu a výjezdu do řezu. Tento úsek naměřených dat byl poté převeden pomocí FFT na frekvenční spektrum, které byly dále použity k dalšímu zpracování a vyhodnocování.

Příklad naměřeného časového záznamu vibrací z měření M01 ve směrech X, Y a Z je zobrazeno na obr. 73. Vzhledem k tomu, že v průběhu zkoušky došlo ke změně otáček vřetene, každé měření v sobě obsahuje dvě sady dat, konkrétně v případě měření M01 jsou to data z obrábění při otáčkách  $n = 796 \text{ 1/min}$  (úsek vlevo) a  $n = 875 \text{ 1/min}$  (úsek vpravo). Barevnými okny je znázorněn rozsah zvolených naměřených dat z akcelerometru, které byly dále zpracovávány a vyhodnocovány.

Na obr. 74 jsou již zpracovaná frekvenční spektra časového záznamu z měření M01, kde se frézovalo a při vysunutém vřetení (W650). Vlevo se nachází frekvenční spektra z frézování při otáčkách vřetena  $n = 796 \text{ 1/min}$  a vpravo při  $n = 875 \text{ 1/min}$ .



Obr. 73: Příklad naměřených dat



Obr. 74: Příklad vytvořených frekvenčních spekter

Dalším krokem bylo numerické integrování spektra zrychlení kmitání, čímž se získá spektrum rychlosti kmitání, které poslouží k výpočtu mohutnosti kmitání. Dle ČSN 20 0065 je mohutnost kmitání dána součtem efektivních hodnot harmonického signálu  $v_{\text{eff}}$  a počítá se pro frekvenční rozsah 10-1000 Hz. Výsledkem je reálné číslo, které charakterizuje celý naměřený signál. Tímto lze rychle a jednoduše porovnat oba testované držáky co se týče vibrací během obráběcího procesu.

Na závěr se oba upínací systémy porovnají z hlediska stability řezného procesu během obrábění. Nejdůležitějšími kritérii během vyhodnocování jsou:

- a) **Amplituda dominantní frekvence** – u nestabilního řezného procesu mívají vibrace amplitudu vyšší než  $0,6 \text{ m/s}^2$
- b) **Frekvence dominantní amplitudy** – u nestabilního řezného procesu není dominantní frekvence celočíselným násobkem otáčkové
- c) **Zvukový projev obráběcího procesu a stroje**
- d) **Výsledný obrobený povrch** – nestabilní řezný proces se projevuje zvlněným obrobeným povrchem, tzv. „chatter marks“

#### 4.4.2. Vyhodnocení stability řezného procesu pro čelní frézu

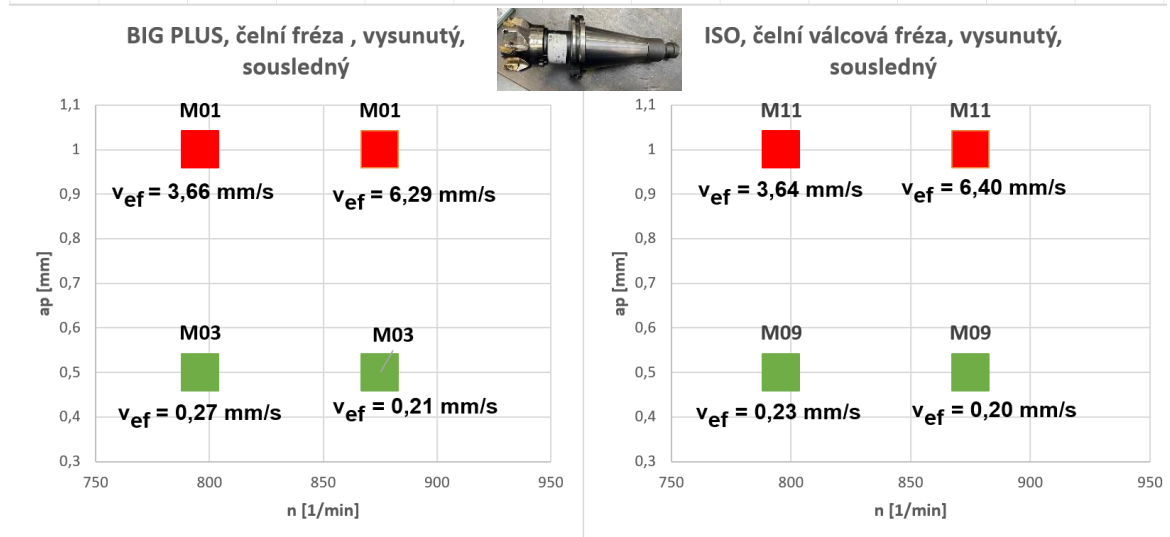
Jako první zde budou uvedeny zpracované výsledky a porovnání obou testovaných držáků v rámci zkoušky obráběním čelní frézou.

Nejprve byl proveden výpočet mohutností vibrací z FRF obou testovaných držáků ve směrech X, Y a Z a stanovení směru dominantního kmitání, viz příloha č. 5. Následně se porovnaly tyto dva nástrojové držáky z hlediska stability během obráběcího procesu, které bylo vyhodnoceno na základě výsledného obrobeného povrchu, zpracovaných frekvenčních spekter a subjektivního posouzení zvukového projevu stroje během obrábění. Z vyhodnocených dat se nakonec sestrojily mapy stability.

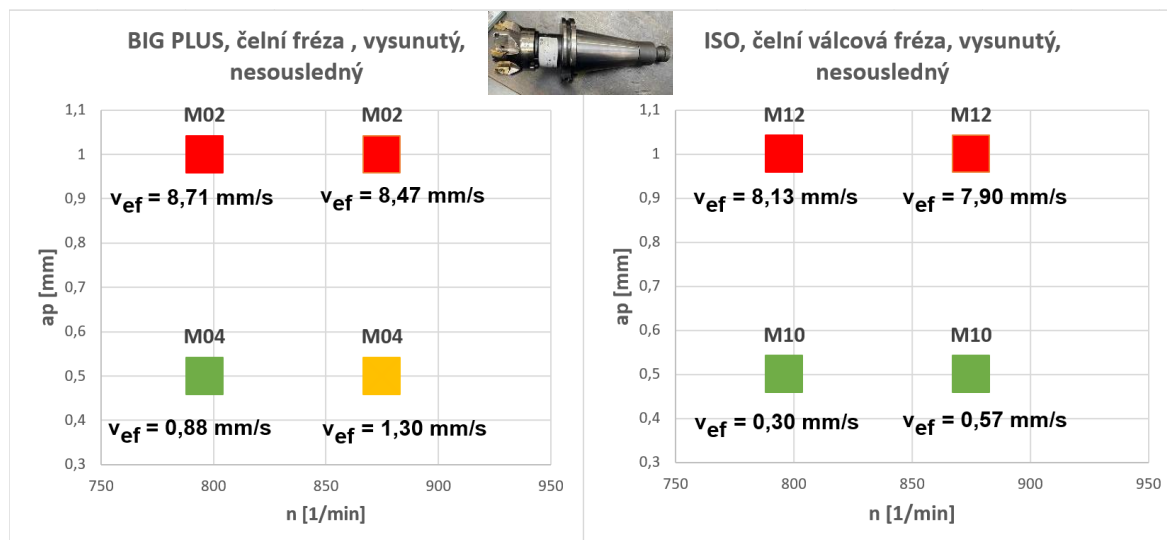
V případě frézování čelní frézou byly vytvořeny čtyři dvojice map stability dle směru záběru a polohy vysunutí vřetene W:

- Čelní frézování sousledné, vysunuté vřeteno W650 (obr. 75)
- Čelní frézování nesousledné, vysunuté vřeteno W650 (obr. 76)
- Čelní frézování sousledné, zasunuté vřeteno W300 (obr. 77)
- Čelní frézování nesousledné, zasunuté vřeteno W300 (obr. 78)

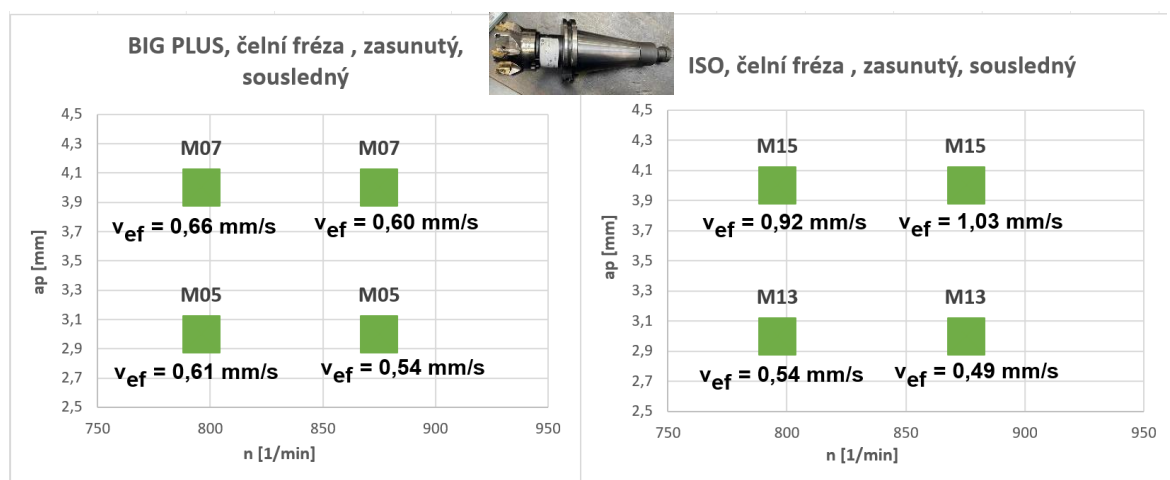
Výsledné mapy stability pro obrábění čelní frézou je možné vidět na druhé straně. V levé části se nachází mapa stability pro měření provedená s držákem Big Plus a v pravé části měření provedená s držákem ISO. Na těchto grafech jsou zobrazena čísla měření a k nim odpovídající hodnota mohutnosti vibrací dominantního směru vibrací. Barvy bodů značí stabilitu procesu (červená – nestabilní, žlutá – mez stability, zelená – stabilní).



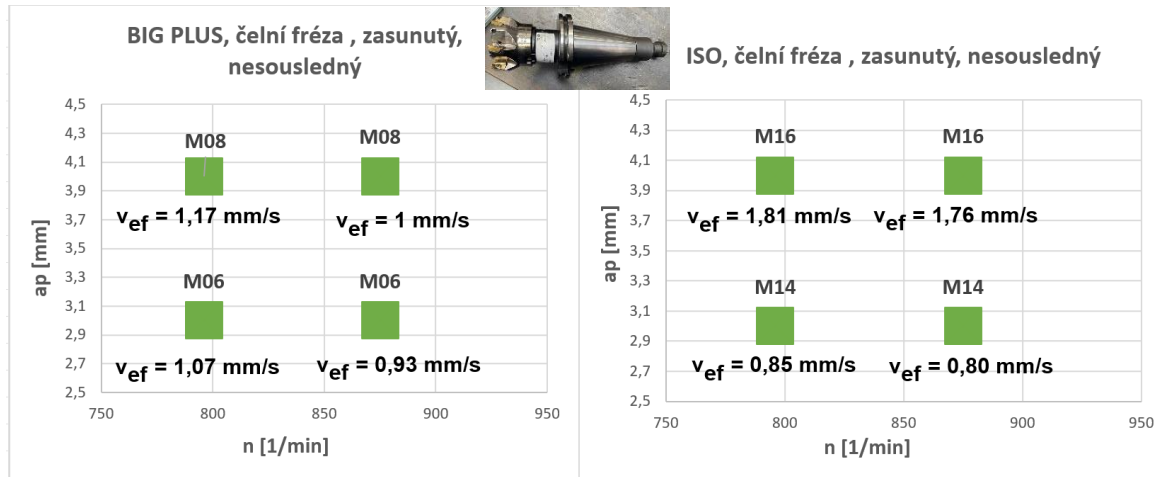
Obr. 75: Mapy stability pro čelní frézování sousledné, vysunuté vřeteno W650



Obr. 76: Mapy stability pro čelní frézování nesousledné, vysunuté vřeteno W650



Obr. 77: Mapy stability pro čelní frézování sousledné, zasunuté vřeteno W300



Obr. 78: Mapy stability pro čelní frézování nesousledné, zasunuté vřeteno W300

V převážné většině měření při čelním frézování se vyhodnocená stabilita/nestabilita obráběcího procesu pro oba testované držáky shodovala, což vyplývá i z vypočtených mohutností vibrací. Nestability bylo dosaženo u obou držáků pouze u frézování s vysunutým vřetenem (W650), kdy byla nastavena axiální hloubka řezu  $a_p = 1$  mm. Nečekanou anomálií bylo měření M04 (Big Plus) a M10 (ISO), kdy bylo frézování s držákem ISO stabilnější než s držákem Big Plus. Při zasunuté poloze vřetene (W300) již byly všechny obráběcí operace při všech nastavených kombinacích řezných podmínek stabilní. To nasvědčuje o tom, že je soustava stroj-držák-nástroj v této poloze velmi tuhá.

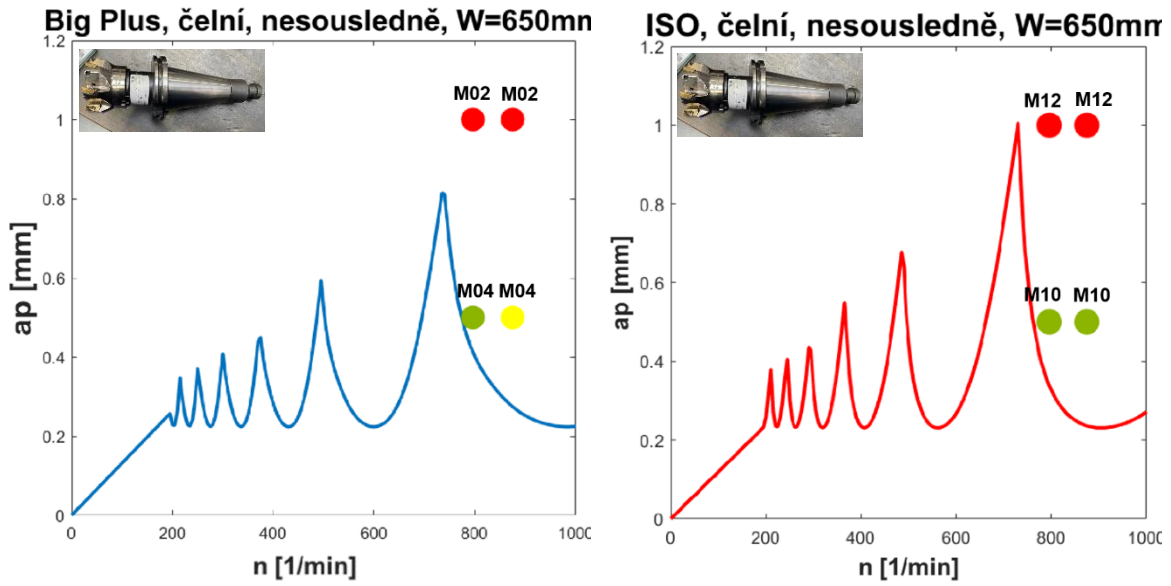
Pro ukázkou jsou zde uvedena porovnání frekvenčních spekter, kvalita obrobeného povrchu a porovnání mapy stability s teoretickým diagramem stability pouze těch frézovacích operací, kde byly naměřeny výraznější rozdíly mezi držákem Big Plus a ISO.

Prvním případem je nesousledné čelní frézování s vysunutým vřetenem (W650), konkrétně měření M04 (Big Plus) a M10 (ISO). Další operací je nesousledné čelní frézování se zasunutým vřetenem, v tomto případě se jedná o měření M08 a M16. Zbytek zpracovaných dat je uveden v příloze na konci této práce.

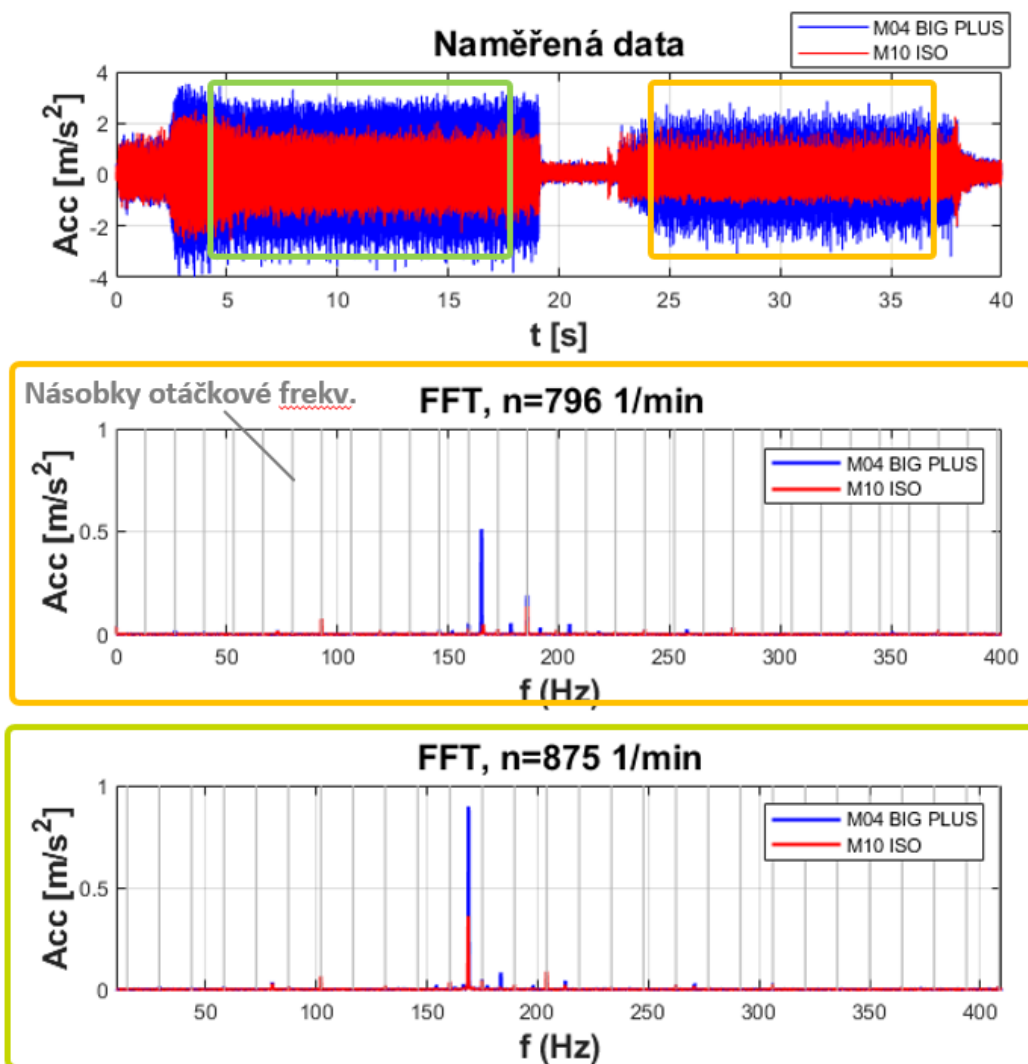
Na obr. 79 už je možné vidět porovnání vytvořených map stability s diagramy stability stanovené v programu CutPro pro první případ, kde byly naměřeny výraznější rozdíly mezi testovanými držáky, a to je nesousledné čelní frézování s vysunutým vřetenem (W650), konkrétně měření M04 a M10.

Jak lze vidět, teoretický diagram stability stanovený z FRF v programu CutPro neodpovídá naměřenému diagramu. To je nejspíše způsobeno tím, že při stanovení těchto teoretických diagramů nebyly brány v potaz dynamické vlastnosti obrobku a upínacího úhelníku, které se mohly projevit během zkoušky obráběním.





Obr. 79: Porovnání mapy stability s teoretickým diagramem stability z programu CutPro

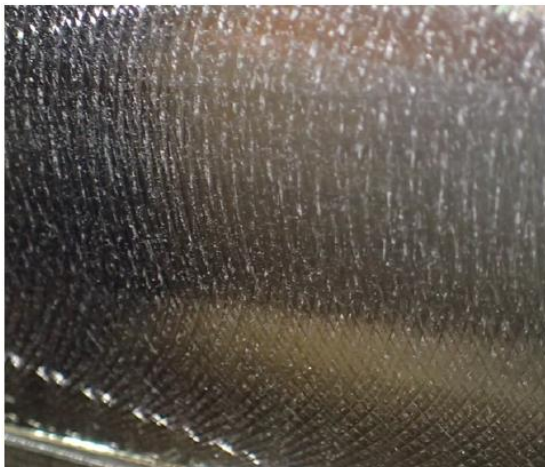


Obr. 80: Porovnání naměřených dat a frekv. spekter pro měření M04 (Big Plus) a M10 (ISO)

Porovnání časových záznamů měření M04 a M10 a jejich spekter ve směru Y je zobrazeno na obr. 80. V prvním grafu jsou proloženy grafy naměřených vibrací při frézování držákem Big Plus (modře) a držákem ISO (červeně). Jak již zde lze vidět, nejprve se frézovalo při otáčkách vřetena  $n = 875 \text{ 1/min}$  a v půlce dráhy došlo ke změně na  $n = 796 \text{ 1/min}$ . V obou případech bylo kmitání při frézování s držákem Big Plus výraznější.

Při pohledu na spektrum pro druhou polovinu měření (prostřední graf), dominantní amplituda vibrací pro ISO kmitá na 14. násobku otáčkové frekvence, přičemž u Big Plus došlo k vybuzení kmitů velmi blízké vlastní frekvenci naměřené z FRF. Tato amplituda vibrací ještě nepřekročila mez  $0,6 \text{ m/s}^2$  a tudíž byl obráběcí proces pro M04 vyhodnocený jako stabilní. V případě první poloviny měření, kdy se obrábělo při  $n = 875 \text{ 1/min}$  (poslední graf), zde už došlo k vybuzení kmitů blízko vlastní frekvence i u obrábění s držákem ISO. U Big Plus dominantní amplituda kmitání překračuje hraniční hodnotu  $0,6 \text{ m/s}^2$ , ale neovlivnila výrazně chod stroje, a proto byl tento obráběcí proces vyhodnocen jako mezní.

**M04,  $n=875 \text{ 1/min}$**



**M04,  $n=796 \text{ 1/min}$**



*Obr. 81: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M04*

**M10,  $n=875 \text{ 1/min}$**



**M10,  $n=796 \text{ 1/min}$**

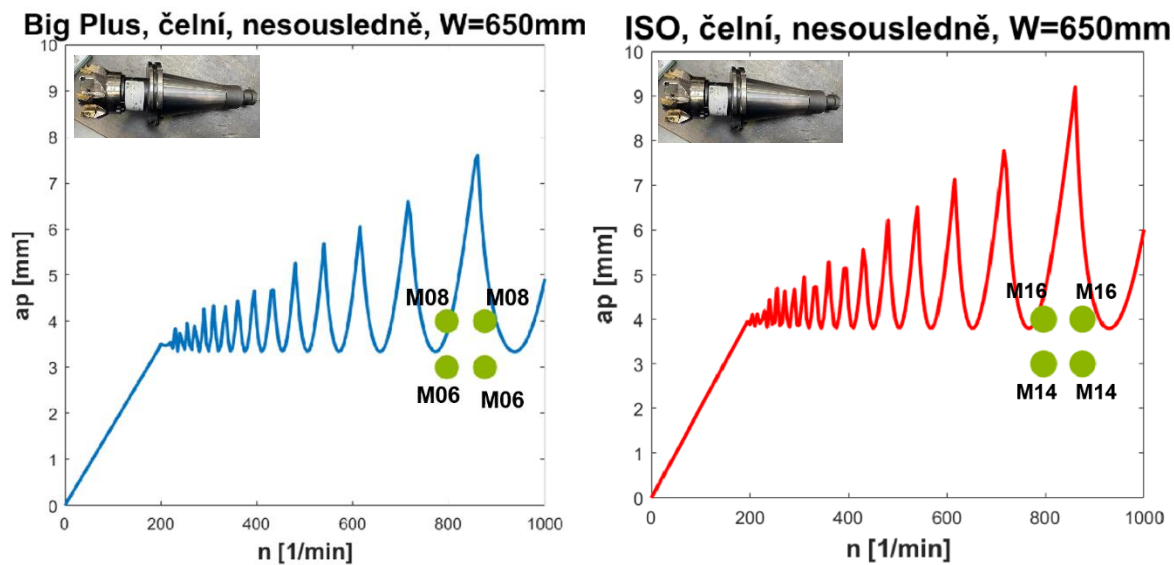


*Obr. 82: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M10*

Na předchozí straně se nacházejí snímky kvality obrobených povrchů pro měření M04, a to pro frézování při  $n = 875$  1/min a  $n = 796$  1/min, viz obr. 81, to samé je vyobrazeno pro měření M10 na obr. 82. Po důkladném zkoumání daných obrobených povrchů nebyly zjištěny žádné výrazné „chatter marks“ ani rozdíly mi povrchy obrobené s držákem Big Plus a držákem ISO.

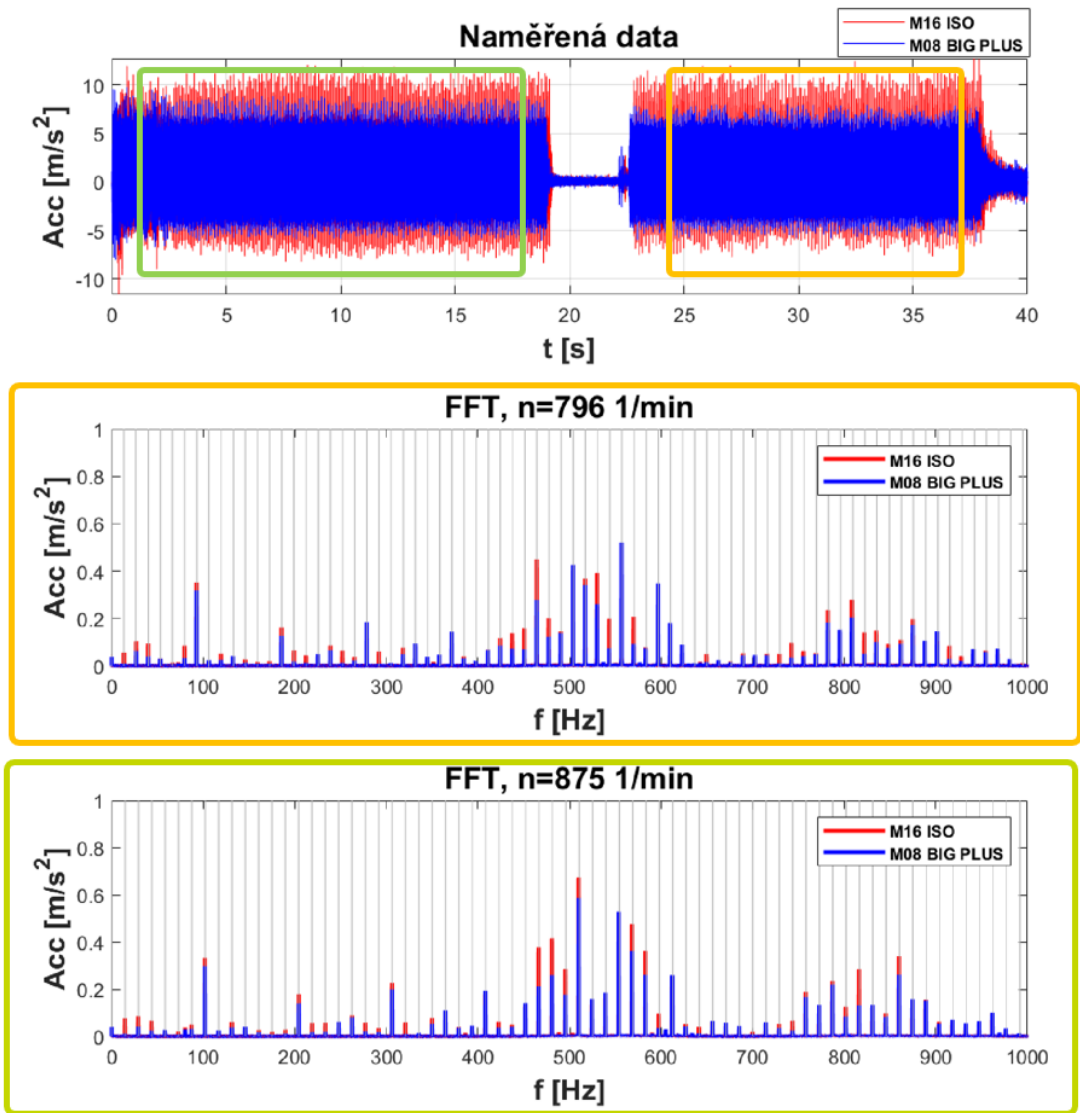
Další frézovací operace s čelní frézou, kde byly naměřeny výraznější rozdíly mezi systémem Big Plus a ISO, je frézování s nesousledným záběrem a zasunutým vřetenem (W650). Obráběcí proces byl při všech provedených měření stabilní a neprojevil se žádné známky samobuzeného kmitání. Předmětem komparací je v tomto případě měření M08 (Big Plus) a M16 (ISO), kde vyšla dominantní mohutnost kmitání ve směru Y při frézování držákem ISO průměrně o 64 % větší než s držákem Big Plus.

Na obr. 83 je porovnání vytvořených map stability s diagramy stability stanovené v programu CutPro. Jak lze vidět, teoretický diagram stability stanovený z FRF v programu CutPro relativně odpovídá naměřenému diagramu.



Obr. 83 Porovnání mapy stability s teoretickým diagramem stability z programu CutPro

Porovnání časových záznamů měření M08 a M16 a jejich spekter ve směru Y, kde byly zjištěny výraznější rozdíly mezi držákem Big Plus a držákem ISO, je zobrazeno na obr. 84. Při této zkoušce se obrábělo zleva doprava, stejně jako v předchozím případě. Zde již naměřená data vyšla dle očekávání a v obou nastavených konfiguracích otáček vřetene vyšly amplitudy kmitání větší při frézování s držákem ISO. Během obrábění nebyla vybudena žádná výrazná dominantní amplituda vibrací a všechny naměřené vibrace kmitají na násobcích otáčkové frekvenci vřetena. Na základě těchto dat byla obě měření vyhodnocena jako stabilní.



Obr. 84: Porovnání naměřených dat a frek. spekter pro měření M08 (Big Plus) a M16 (ISO)

M08, n=875 1/min

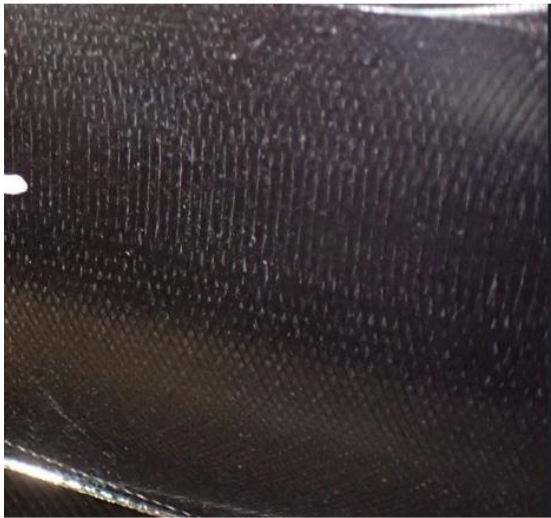


M08, n=796 1/min



Obr. 85: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M08

**M16, n=875 1/min**



**M16, n=796 1/min**



*Obr. 86: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M16*

Na obrázcích výše se nacházejí snímky kvality obrobeného povrchu pro měření M08 dvou frézovacích operací s rozdílnými otáčkami vřetena, viz obr. 86, to samé je vyobrazeno pro měření M16 na obr. 87. Po důkladném prohlédnutí daných obrobených povrchů nebyly zjištěny žádné známky samobuzeného kmitání ani rozdíly mi povrchy obrobené s držákem Big Plus a držákem ISO.

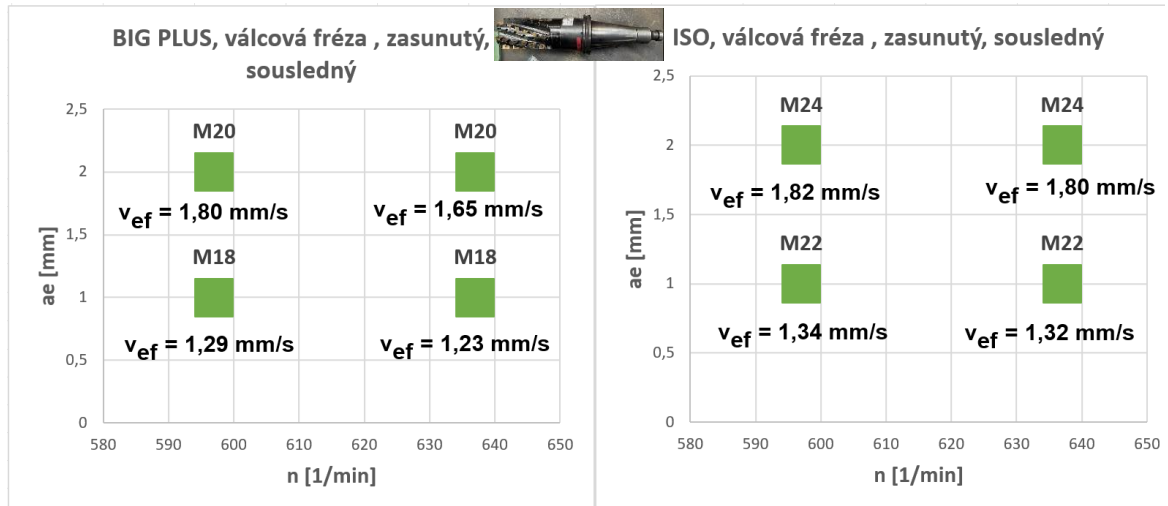
#### 4.4.3. Vyhodnocení stability řezného procesu pro válcovou frézu

Analýza naměřených dat a postup vyhodnocení stability obrábění válcovou frézou proběhla stejnou metodou jako u čelní frézy a z tohoto důvodu nebudou v této podkapitole detailně popisovány a rovnou se přejde ke zpracovaným výsledkům.

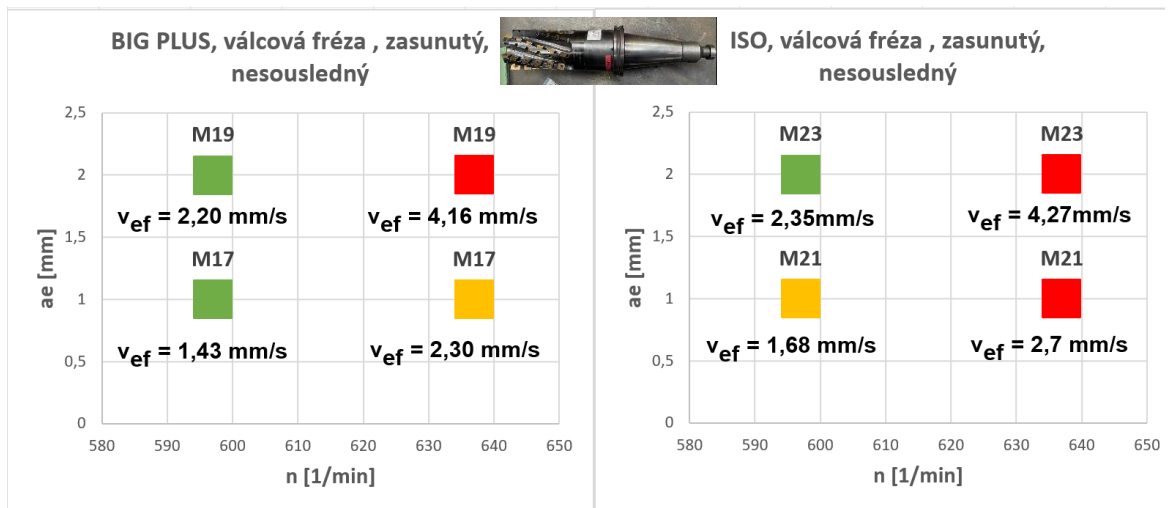
V případě frézování čelní frézou byly vytvořeny dvě dvojice map stability dle směru záběru, poloha vysunutí vřetene se nastavila na pevnou hodnotu W300:

- Boční frézování sousledné, zasunuté vřeteno W300 (obr. 87)
- Boční frézování nesousledné, zasunuté vřeteno W300 (obr. 88)

Výsledné mapy stability pro válcovou frézu pro oba testované držáky se nachází na další straně. Koncepte vizualizace je stejný jako u vyhodnocení pro čelní frézu. V levé části se nachází mapa stability pro měření provedená s držákem Big Plus a v pravé části měření provedená s držákem ISO. Na těchto grafech jsou zobrazena čísla měření a k nim odpovídající hodnota mohutnosti vibrací dominantního směru vibrací. Barvy bodů značí stabilitu procesu (červená – nestabilní, žlutá – mez stability, zelená – stabilní).



Obr. 87: Mapy stability pro boční frézování sousledné, zasunuté vřeteno W300



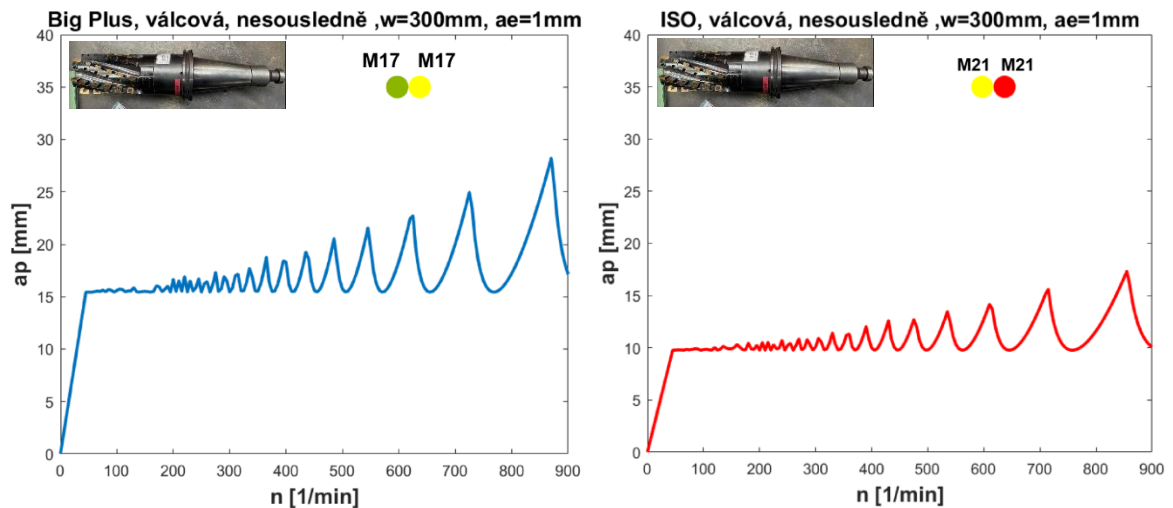
Obr. 88: Mapy stability pro boční frézování nesousledné, zasunuté vřeteno W300

V případě sousledného bočního frézování válcovou frézou (obr. 87) byl obráběcí proces při všech měření stabilní. Testované držáky se od sebe lišily pouze mohutností vibrací. Zde vychází ve všech případech mírně větší u frézovacích operací s držákem Big Plus.

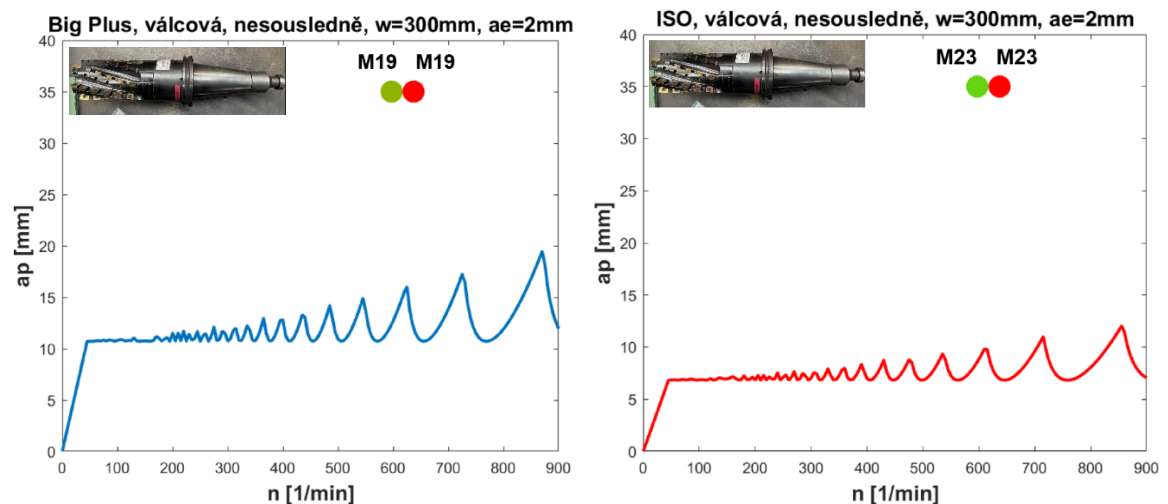
U nesousledného frézování jsou již vidět větší rozdíly i z pohledu stability řezného procesu. Nestability se při frézování s držákem Big Plus dosáhlo pouze při  $n = 637$  1/min a nastavené šířce řezu  $a_e = 2$  mm, přičemž frézování s držákem ISO bylo nestabilní i při  $a_e = 1$  mm.

Pro ukázkou vyhodnocení stability řezného procesu pro válcovou frézou je zde uvedeno frézování nesousledné při zasunutém vřeteni (W300), konkrétně měření M17 (Big Plus) a M21 (ISO), kde vyšla dominantní mohutnost kmitání ve směru X při frézování držákem ISO průměrně o 17 % větší než s držákem Big Plus.

Na obr. 89 a 90 je porovnání vytvořených map stability s diagramy stability stanovené v programu CutPro. Vzhledem k tomu, že v tomto programu nešla nastavit pevná axiální hloubka řezu  $a_p$  a proměnlivá radiální šířka řezu  $a_e$ , musely se vytvořit zvlášť diagramy stability pro  $a_e = 1 \text{ mm}$  a  $a_e = 2 \text{ mm}$ . Výsledné mezní hloubky třísky stanovené u teoretických diagramů stability neodpovídají realitě, neboť u měření M17, M19 a M23, kde se obrábělo při  $a_p = 35 \text{ mm}$ , byl obráběcí proces stále stabilní.



Obr. 89: Porovnání mapy stability s teoretickým diagramem stability z programu CutPro pro boční frézování  $a_e = 1 \text{ mm}$

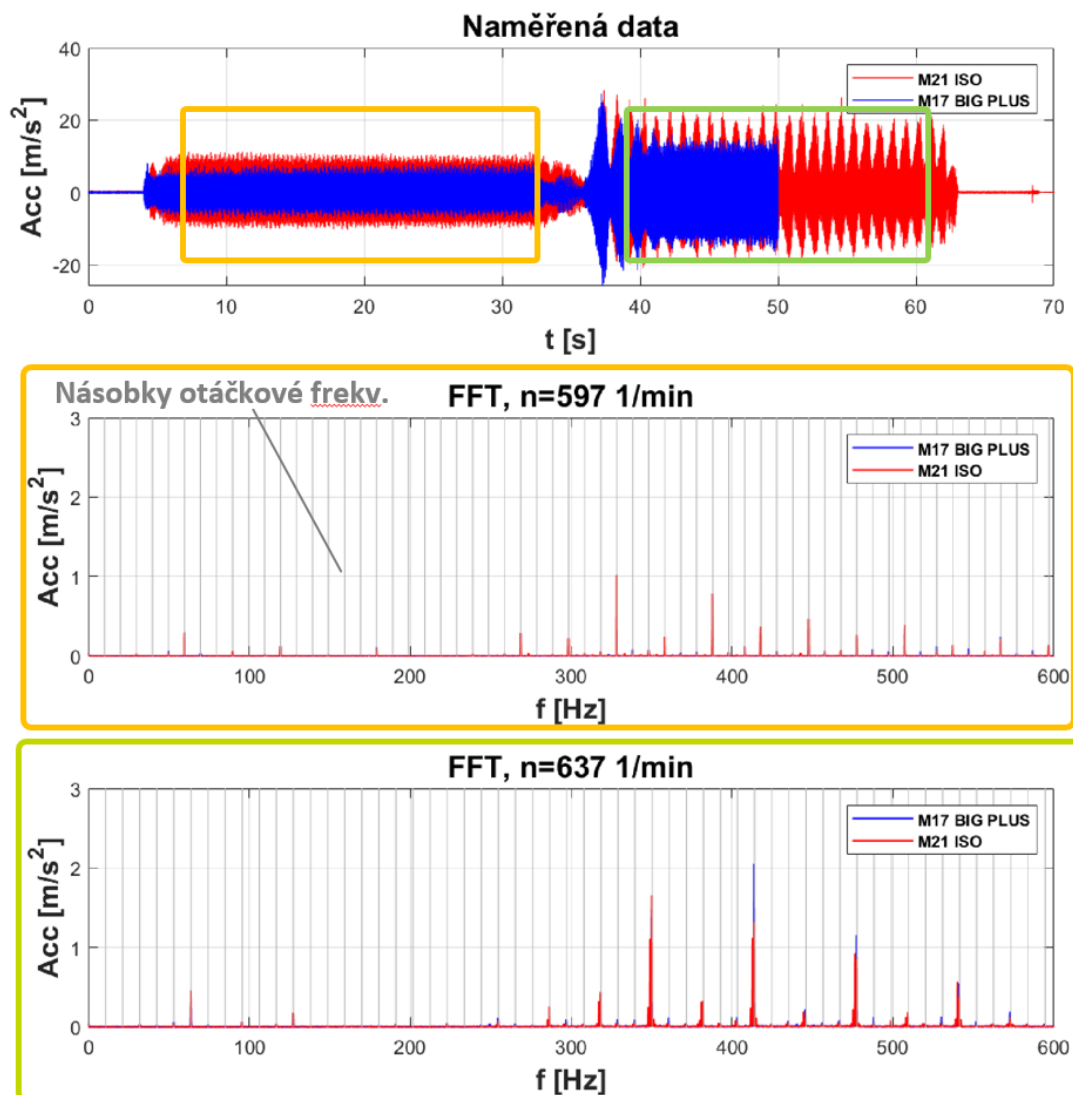


Obr. 90: Porovnání mapy stability s teoretickým diagramem stability z programu CutPro pro boční frézování  $a_e = 2 \text{ mm}$

Porovnání časových záznamů měření M17 a M21 a jejich spekter ve směru X, které bylo vyhodnoceno jako dominantní směr vibrací, je zobrazeno na obr. 91. V obou nastavených konfiguracích otáček vřetene vyšlo kmitání výraznější při frézování s držákem ISO.

Z naměřených dat pro obrábění při  $n = 637$  1/min je vidět, že při bočním frézování s držákem Big Plus došlo k rozkmitání soustavy pouze při nájezdu do řezu a po chvíli došlo k ustálení, přičemž s držákem ISO soustava kmitala po celou dobu zkoušky. Jak u měření M17, tak i u M21 došlo během zkoušky k vybuzení dominantních vibrací na násobcích zubové frekvence nástroje ( $f_z = 31,85$  Hz), navíc u M21 byly vybuzeny i boční pásma těchto kmitů, které nekmitají na celočíselných násobcích této frekvence. Z tohoto důvodu se tento řezný proces vyhodnotil jako nestabilní. I přesto, že je hodnota dominantní amplitudy vibrací u M17 větší, nebyl tento řezný proces vyhodnocen jako nestabilní, protože se jednalo o vybuzené kmity s velkou amplitudou.

Při obrábění otáčkami  $n = 597$  1/min se u obou konfigurací vybudili pouze kmity na násobcích otáčkové frekvence. Amplituda dominantních kmitů měření dosahovala přibližně hodnoty  $0,7$   $m/s^2$ , což je stále akceptovatelné, a proto byl tento řezný proces vyhodnocen jako stabilní. U měření M21 dominantní amplituda kmitání výrazně překračuje hraniční hodnotu, ale neovlivnila výrazně chod stroje, a proto byl tento obráběcí proces vyhodnocen jako mezní.



Obr. 91: Porovnání naměřených dat a frek. spekter pro měření M17 (Big Plus) a M21 (ISO)



Na obrázcích níže se nacházejí snímky kvality obrobených povrchů pro měření M17, a to pro frézování při  $n = 637 \text{ 1/min}$  a  $n = 597 \text{ 1/min}$ , viz obr. 92, to samé je vyobrazeno pro měření M21 na obr. 93.

Zhoršení kvality obrobeného povrchu bylo zaznamenáno u M17 při obrábění otáčkami  $n = 637 \text{ 1/min}$ , viz obr. 92 v pravém horním rohu, a u M21 při  $n = 597 \text{ 1/min}$ , viz obr. 93 ve spodním levém rohu. Výrazné zvlnění obrobeného povrchu je vidět u M21 při  $n = 637 \text{ 1/min}$ , kdy se řezný proces dostal do oblasti nestability.

**M17,  $n=597 \text{ 1/min}$**



**M17,  $n=637 \text{ 1/min}$**



*Obr. 92: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M17*

**M21,  $n=597 \text{ 1/min}$**



**M21,  $n=637 \text{ 1/min}$**



*Obr. 93: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M21*

## 5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo experimentální porovnání nástrojového držáku Big Plus od společnosti BIG DAISHOWA SEIKI se zavedeným systémem ISO z pohledu dynamické poddajnosti, mohutnosti vibrací a stability během obrábění.

Tato diplomová práce se skládá se dvou částí, a to z teoretické části a vlastního řešení. V teoretické části byla vytvořena rešerše nástrojových držáků, kde se sepsal stručný přehled používaných systémů, jejich charakteristika, přednosti a nevýhody. V této části byla také zpracována teorie stability obrábění a úvod do měření mechanického kmitání a dynamické poddajnosti, ve kterém byl popsána charakteristika těchto měřených veličin, postup jejich měření a používaná aparatura.

Vlastní řešení se skládalo experimentu, který se konal ve společnosti TOS Varnsdorf na horizontálním obráběcím centru WHT110C ve dnech 06.03.2023 a 07.03.2023. Tento experiment spočíval v měření dynamické poddajnosti zvolených konfigurací držák – nástroj a měření vibrací během obrábění. Předmětem porovnání byla čelní fréza a válcová frézy. Jedná se o dva nejběžnější představitele nástrojů, které se na tomto stroji používají během obráběcího procesu. Ke každému nástroji byly příslušné nástrojové držáky obou systému BIG PLUS a ISO.

Dynamická poddajnost se měřila pro oba nástroje ve třech polohách vysunutí vřetene. V případě měření poddajnosti čelní frézy neodpovídala data očekáváním. Dynamická poddajnost nástroje upnutého v držáku Big Plus se od nástroje upnutého v držáku ISO téměř nelišila, ale naopak byla v některých měřeních mírně poddajnější (W650 a W300 ve směru - Y).

Co se týče válcová frézy, zde vychází fréza upnutá v držáku Big Plus vychází ve všech polohách vysunutí vřeteníku a v obou směrech tužší než ISO.

Z naměřených FRF se dále v programu CutPro stanovily teoretické diagramy stability. Z výsledných diagramů bylo zjištěno, že vyšší stability při obrábění je dosaženo při sousledném řezu. Toto je pravděpodobné způsobení rozdílným působením sil, kdy při nesousledném frézování působí jedno složka řezné síly ven z obrobku, což způsobuje rozkmitání systému.

U čelní frézy vyšli teoretické diagramy stability pro oba systémy upínačů v případě sousledného frézování téměř totožné. Menší rozdíly se vyskytli u diagramů pro nesousledné frézování (W300, kde vyšla mezní hloubka řezu  $a_{plim}$  přibližně o 15% větší než u Big Plus.

Co se týče válcové frézy, zde stanovené teoretické diagramy již odpovídají teoretickým předpokladům i naměřeným FRF a ve všech případech vychází oblast stabilního obrábění u válcové frézy upnuté v držáku Big Plus výrazně širší. U nesousledného frézování je mezní hloubka  $a_{plim}$  u držáku Big Plus větší přibližně o 57 %, u sousledného až o 65 %.

Vypočítané mohutnosti kmitání z naměřených dat vibrací během zkoušky obráběním potvrdily to, že při nesousledném obrábění dochází u obou konfigurací ke kmitání s vyšší amplitudou než u sousledného frézování. Na základě těchto údajů se poté vytvořily mapy stability a vyhodnotila se stabilita řezného procesu pro obě konfigurace.

Při čelním obrábění v sousledném i nesousledném směru bylo naměřeno dominantní kmitání ve směru Y. Vypočítané mohutnosti vibrací pro držák Big Plus a ISO se ve většině případů mezi sebou jenom nepatrně lišily. Nestability bylo dosaženo u obou držáků pouze u frézování s vysunutým vřetenem (W650) a  $a_p = 1$  mm. Anomálií byla frézovací operace v nesousledném směru s vysunutým vřetenem a  $a_p = 0,5$  mm, kde byl řezný proces s držákem Big Plus na mezi stability, přičemž s držákem ISO za stejných řezných podmínek byl řezný proces stále stabilní. Obráběcí proces se zasunutým vřetenem byl během všech provedených měření stabilní a neprojevil se žádné známky samobuzeného kmitání, což vypovídá o velké tuhosti stroje. Teoretický diagram stability stanovený z FRF v programu CutPro relativně odpovídá diagramu vyhodnocený ze zkoušky obráběním pouze u obráběcího procesu se zasunutým vřetenem.

V případě válcové frézy vyšel směr dominantního kmitání rozdílný v závislosti na směru obrábění. Během sousledného frézování soustava nejvíce kmitala ve směru Y a v nesousledném naopak ve směru X. Při sousledném frézování byl obráběcí proces u všech měření stabilní, lišilo se pouze v mohutnosti vibrací, která vyšla nepatrně větší u frézovacích operací s držákem ISO. Tento trend platí i pro nesousledné frézování, avšak zde už jsou rozdíly mezi Big Plus a ISO o něco větší. Celkově lze říct, že při nesousledném frézování byl řezný proces stabilnější s držákem Big Plus. Mezní hloubka třísky u teoretických diagramů stability neodpovídá realitě, neboť u měření M17, M19 a M23, kde se obrábělo při  $a_p = 35$  mm, byl obráběcí proces stále stabilní.

Výrobce uváděné výhody systému Big Plus dané dvojitým kontaktem mezi držákem a vřetenem se projevily pouze u válcové frézy, z čehož lze tedy usoudit, že je tento systém vhodný především pro upínání delších nástrojů či nástrojů osazených prodlužovacími adaptéry, které jsou náchylnější k deformaci během obrábění.

## 6. Seznamy

### Seznam použité literatury

- [1] AB SANDVIK COROMANT. *Technická příručka obrábění*. Švédsko: Elanders, 2010. 895 s. C-2900: 7CZE/01.
- [2] JANDA, Zdeněk. *Porovnání nástrojových upínačů s ohledem na řezné síly a jakost obrobeného povrchu při frézování austenitické oceli*. In: *IV. ročník mezinárodní konference konané ve dnech 25.- 26.1.2011 v Plzni*. Vyd. 1. Plzeň: ZČU v Plzni, 2011, s. [1-6]. ISBN 978-80-7043-934-0
- [3] *Druhy a rozdělení fréz*. [online]. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: [https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1228?fbclid=IwAR2BSB8-rKrP8Dui-YQ36oPKa8QWnu5\\_pDebZlcmrwZrC2K2Ks43HSvjRLY#](https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1228?fbclid=IwAR2BSB8-rKrP8Dui-YQ36oPKa8QWnu5_pDebZlcmrwZrC2K2Ks43HSvjRLY#)
- [4] *Druhy upínačů (2)*. [online]. Praha, 2012 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/druhy-upinacu-2?fbclid=IwAR0CuOFotA0nqfGMY3xA-f2Q7QUscItlsfkVt2LfURv-GynuMK68hQmx63s>
- [5] *Upínače rotačních nástrojů*. [online]. PRAHA: ČVUT v Praze, Fakulta Strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://adoc.pub/upinae-rotanich-nastroj.html>
- [6] HAIMER [online]. *Toolholders*. Katalog výrobků. ©2020. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: [https://www.haimer-usa.com/fileadmin/assets/downloads/kataloge/US/2020-03-Toolholders-US-screen\\_01.pdf](https://www.haimer-usa.com/fileadmin/assets/downloads/kataloge/US/2020-03-Toolholders-US-screen_01.pdf)
- [7] HOFFMAN GROUP [online]. *GARANT Příručka obrábění*. Katalog výrobků. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/75385172/Garant-PRIRUCKA-OBABANIA>
- [8] HAIMER. *Steep taper DIN ISO 7388-1*. [online]. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.haimer-usa.com/products/tool-holders/din-iso-7388-1-sk30sk40sk50-formerly-din-69871.html>
- [9] SECO [online]. *TAPER-FACE TOOLHOLDERS*. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/75385172/Garant-PRIRUCKA-OBABANIA>
- [10] HAIMER. *Understanding Steep Taper Toolholders*. [online]. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.haimer-usa.com/news/blog/blog-articles-pages/2019/62019-understanding-steep-taper-toolholders.html>
- [11] TOOL HOLDER EXCHANGE. *Learn about tool holders*. [online]. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://toolholderexchange.com/learnaboutbttoolholders/>
- [12] SANDVIK COROMANT. *How to choose machine spindle*. [online]. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/pages/spindle-selection.aspx>
- [13] BIG DAISHOWA. *BIG-PLUS*. [online]. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.big-daishowa.com/feature/bigplus/index.php>
- [14] BIG DAISHOWA. *BIG-PLUS SPINDLE SYSTEM*. [online]. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: [http://www.nastroje-o.cz/w\\_up/big-plus.pdf](http://www.nastroje-o.cz/w_up/big-plus.pdf)
- [15] BIG DAISHOWA. *Volume 4 – High Performance Tooling Solutions*. [online]. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: [http://www.nastroje-o.cz/w\\_up/big-plus.pdf](http://www.nastroje-o.cz/w_up/big-plus.pdf)

- [16] *Rozhraní držák – obráběcí stroj (4)*. [online]. Praha, 2012 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/rozhrani-drzak-obrabeci-stroj-4>
- [17] *HSK: The Critical Link in High-Speed Milling*. [online]. Praha, 2012 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: [https://www.hskworld.com/articles/critical\\_link/critical\\_link.htm](https://www.hskworld.com/articles/critical_link/critical_link.htm)
- [18] ČSN ISO 2041/2010. *Vibrace, rázy a monitorování stavu – Slovník*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010 [cit. 2022-11-08]
- [19] BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK. *Mechanické kmitání*. 1. vydání. Praha: Sobotáles, 1994. ISBN 80-901684-8-5.
- [20] JANOTA, Miroslav. *P01: Dynamika I* [PDF]. 2023 [cit. 2022-11-08]. Výukové podklady z předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů II. ČVUT v Praze.
- [21] JANOTA, Miroslav. *P04: Stabilita obrábění (chatter)* [PDF]. 2023 [cit. 2022-11-08]. Výukové podklady z předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů II. ČVUT v Praze.
- [22] JANOTA, KOLÁŘ a SULITKA. Operational Method For Identification of Specific Cutting Force During Milling. *MM Science Journal* [online]. November 2019 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/november-2019/articles/operationalmethod-for-identification-of-specific-cutting-force-during-milling>
- [23] Fojtů, Petr. *Problematika samobuzeného kmitání při obrábění*. [Online] [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>
- [24] JANOTA, Miroslav. *P02: Zpracování signálu: FFT* [PDF]. 2023 [cit. 2022-11-08]. Výukové podklady z předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů II. ČVUT v Praze.
- [25] DØSSING, Ole. *Structural Testing I: Mechanical Mobility Measurements* [PDF]. Brüel & Kjær, 1998 [cit. 2022-11-08].
- [26] DØSSING, Ole. *Structural Testing II: Modal Analysis and Simulation* [PDF]. Brüel & Kjær, 1998 [cit. 2022-11-08].
- [27] JANOTA, Miroslav. *P03: Dynamika II* [PDF]. 2023 [cit. 2022-11-08]. Výukové podklady z předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů II. ČVUT v Praze.
- [28] *WHT 110 C* [online]. TOS Varnsdorf [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/cz/produkty/horizontalni-obrabeci-centra/wht-110-c/>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Nástrojový držák [1].....	- 11 -
Obr. 2: Druhy upínacích pouzder [2] .....	- 12 -
Obr. 3: Frézovací nástroje s kuželovou stopkou (Morse) [3] .....	- 13 -
Obr. 4: Princip kleštinového upínače [5] .....	- 13 -
Obr. 5: Přesný kleštinový upínač Fahrion HP plus [4].....	- 14 -
Obr. 6: Upínač Weldon (napravo) a Wistle notch (vlevo) [5] .....	- 14 -
Obr. 7: Nástrčný upínač [1].....	- 15 -
Obr. 8: Hydraulický upínač Schunk Tendo [4].....	- 15 -
Obr. 9: Typy tepelných upínačů [5] .....	- 16 -
Obr. 10: Princip tepelného upínače [3] .....	- 16 -
Obr. 11: Konstrukce upínače s kuželem 7:24 [6] .....	- 17 -
Obr. 12: Rozměry Kuželové stopky dle DIN 67891 [7] .....	- 18 -
Obr. 13: Princip upínání ISO upínače [9].....	- 19 -
Obr. 14: Rozměry kuželové stopky dle JIS 6339 [7] .....	- 19 -
Obr. 15: Rozměry kuželové stopky dle ANSI [7] .....	- 19 -
Obr. 16: Princip upnutí upínače BIG-PLUS [13].....	- 20 -
Obr. 17: Porovnání vlivu zatížení na deformaci nástroje [13] .....	- 20 -
Obr. 18: Porovnání posunutí nástroje v ose Z [13] .....	- 21 -
Obr. 19: Porovnání kvality obrobeného povrchu materiálu A2017 při čelním frézování [13] .....	- 21 -
Obr. 20: Funkční prvky upínače HSK s rovinným dotykem podle DIN 69893, tvar A [7] .....	- 22 -
Obr. 21: Princip upínání systému HSK [16].....	- 22 -
Obr. 22: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ A [7] .....	- 23 -
Obr. 23: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ C [7] .....	- 23 -
Obr. 24: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ B [7] .....	- 23 -
Obr. 25: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ D [7].....	- 23 -
Obr. 26: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ E [7] .....	- 23 -
Obr. 27: Tvar kuželové stopky upínače HSK typ F [7] .....	- 23 -
Obr. 28: Princip upínání systému CAPTO [1] .....	- 24 -
Obr. 29: Tvar stopky systému CAPTO [1].....	- 24 -
Obr. 30: Regenerativní princip [21] .....	- 27 -
Obr. 31: Příklad diagramu stability [23].....	- 27 -
Obr. 32: Harmonický signál [20] .....	- 28 -
Obr. 33: Ukázka rozkladu signálu pomocí FFT [20].....	- 29 -
Obr. 34: Vzorkování signálu [24] .....	- 30 -
Obr. 35: Kvantování [24].....	- 30 -
Obr. 36: Chyba typu aliasing [24] .....	- 31 -
Obr. 37: Rozdíl mezi periodickým a neperiodickým signálem a vliv použití Hannigova okna [24] .....	- 31 -
Obr. 38: Vliv hmotnosti, tuhosti a tlumení na FRF [20] .....	- 32 -
Obr. 39: Princip modální analýzy [25].....	- 33 -
Obr. 40: Příklad měřící aparatury .....	- 34 -
Obr. 41: Velikosti modálních kladiv [20].....	- 34 -
Obr. 42: Vliv použitého hrotu na rozsah frekvencí [20].....	- 35 -
Obr. 43: Vliv volby montáže na vlastní frekvenci akcelerometru [20].....	- 35 -
Obr. 44: Modul programu CUTPRO pro určení diagramu stability .....	- 36 -
Obr. 45: Celkový pohled na zakrytovaný stroj WHT110C .....	- 38 -
Obr. 46: Souřadný systém stroje .....	- 38 -
Obr. 47: Čelní fréza upnutá v držáku .....	- 40 -
Obr. 48: Válcová fréza s adaptérem upnutá v držáku .....	- 40 -
Obr. 49: Poloha upnutí obrobku .....	- 41 -
Obr. 50: Poloha vřetene během měření FRF .....	- 42 -
Obr. 51: Schéma poloh vřeteníku během měření FRF.....	- 42 -
Obr. 52: Vlevo buzení čelní frézy ve směru -X; Vpravo buzení ve směru -Y .....	- 43 -

Obr. 53: Celkový pohled na uživatelské rozhraní modulu pro měření FRF.....	- 44 -
Obr. 54: Porovnání dynamické poddajnosti čelní frézy pro tři polohy vysunutí vřetene W.....	- 44 -
Obr. 55: Porovnání dynamické poddajnosti čelní frézy při vysunutí vřetene W650 a W300 .....	- 45 -
Obr. 56: Porovnání dynamické poddajnosti válcové frézy pro tři polohy vysunutí vřetene W .....	- 46 -
Obr. 57: Porovnání dynamické poddajnosti válcové frézy při vysunutí vřetene W650 a W300 .....	- 47 -
Obr. 58: Volba módu v modulu pro modální analýzu.....	- 48 -
Obr. 59: Příklad vyrovnané FRF .....	- 49 -
Obr. 60: Příklad tabulky s výslednými modálními parametry .....	- 49 -
Obr. 61: Postup nastavení parametrů v modulu pro stanovení diagramu stability .....	- 50 -
Obr. 62: Nastavené parametry pro VBD ADMX 160608SR-M .....	- 51 -
Obr. 63: Nastavené parametry pro SDMW120408-A57.....	- 51 -
Obr. 64: Nastavené řezné podmínky pro sousledné frézování čelní frézou .....	- 52 -
Obr. 65: Porovnání diagramů stability pro čelní frézu.....	- 53 -
Obr. 66: Porovnání diagramů stability pro válcovou frézu .....	- 54 -
Obr. 67: Příklad obráběcích operací pro čelní frézu .....	- 56 -
Obr. 68: Příklad obráběcí operace pro válcovou frézu .....	- 57 -
Obr. 69: Použitá aparatura a umístění akcelerometru .....	- 58 -
Obr. 70: Doporučené řezné podmínky pro .....	- 58 -
Obr. 71: Schéma zkoušky obráběním čelní frézou .....	- 59 -
Obr. 72: Schéma zkoušky obráběním válcovou frézou.....	- 60 -
Obr. 73: Příklad naměřených dat.....	- 61 -
Obr. 74: Příklad vytvořených frekvenčních spekter.....	- 61 -
Obr. 75: Mapy stability pro čelní frézování sousledné, vysunuté vřeteno W650.....	- 63 -
Obr. 76: Mapy stability pro čelní frézování nesousledné, vysunuté vřeteno W650.....	- 63 -
Obr. 77: Mapy stability pro čelní frézování sousledné, zasunuté vřeteno W300.....	- 63 -
Obr. 78: Mapy stability pro čelní frézování nesousledné, zasunuté vřeteno W300.....	- 64 -
Obr. 79: Porovnání mapy stability s teoretickým diagramem stability z programu CutPro .....	- 65 -
Obr. 80: Porovnání naměřených dat a frek. spekter pro měření M04 (Big Plus) a M10 (ISO).....	- 65 -
Obr. 81: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M04.....	- 66 -
Obr. 82: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M10.....	- 66 -
Obr. 83 Porovnání mapy stability s teoretickým diagramem stability z programu CutPro .....	- 67 -
Obr. 84: Porovnání naměřených dat a frek. spekter pro měření M08 (Big Plus) a M16 (ISO) .....	- 68 -
Obr. 85: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M08.....	- 68 -
Obr. 86: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M16.....	- 69 -
Obr. 87: Mapy stability pro boční frézování sousledné, zasunuté vřeteno W300 .....	- 70 -
Obr. 88: Mapy stability pro boční frézování nesousledné, zasunuté vřeteno W300 .....	- 70 -
Obr. 89: Porovnání mapy stability s teoretickým diagramem stability z programu CutPro pro boční frézování a $a_e = 1$ mm .....	- 71 -
Obr. 90: Porovnání mapy stability s teoretickým diagramem stability z programu CutPro pro boční frézování a $a_e = 2$ mm .....	- 71 -
Obr. 91: Porovnání naměřených dat a frek. spekter pro měření M17 (Big Plus) a M21 (ISO) .....	- 72 -
Obr. 92: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M17.....	- 73 -
Obr. 93: Porovnání obrobené povrchu pro různé otáčky pro měření M21.....	- 73 -

## Seznam tabulek

Tab. 1: Hlavní parametry stroje WHT 110 C [28] .....	- 39 -
Tab. 2: Seznam měřící aparatury použité při měření FRF .....	- 41 -
Tab. 3: Seznam měřící aparatury použité během zkoušky obráběním .....	- 57 -
Tab. 4: Řezné podmínky pro čelní frézu.....	- 58 -
Tab. 5: Řezné podmínky pro válcovou frézu.....	- 60 -

## Seznam příloh

- Příloha č. 1 – Výkonová a momentová charakteristika vřetena
- Příloha č. 2 – Seznam měření FRF
- Příloha č. 3 – Seznam měření ze zkoušky obráběním čelní frézou
- Příloha č. 4 – Seznam měření ze zkoušky obráběním válcovou frézou
- Příloha č. 5 – Vypočítané mohutnosti vibrací
- Příloha č. 6 – Čelní fréza, sousledné,  $W=650$  mm,  $a_p=0,5-1$  mm,  $a_e=60$  mm
- Příloha č. 7 – Čelní fréza, nesousledné,  $W=650$  mm,  $a_p=0,5-1$  mm,  $a_e=60$  mm
- Příloha č. 8 – Čelní fréza, sousledné,  $W=300$  mm,  $a_p=3-4$  mm,  $a_e=60$  mm
- Příloha č. 9 – Čelní fréza, nesousledné,  $W=300$  mm,  $a_p=3-4$  mm,  $a_e=60$  mm
- Příloha č. 10 – Válcová fréza, sousledné,  $W=300$  mm,  $a_p=35$  mm,  $a_e=1-2$  mm
- Příloha č. 11 – Válcová fréza, nesousledné,  $W=300$  mm,  $a_p=35$  mm,  $a_e=1-2$  mm

## Elektronické přílohy (SD karta)

- Matlab skripty
- Datové soubory



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení

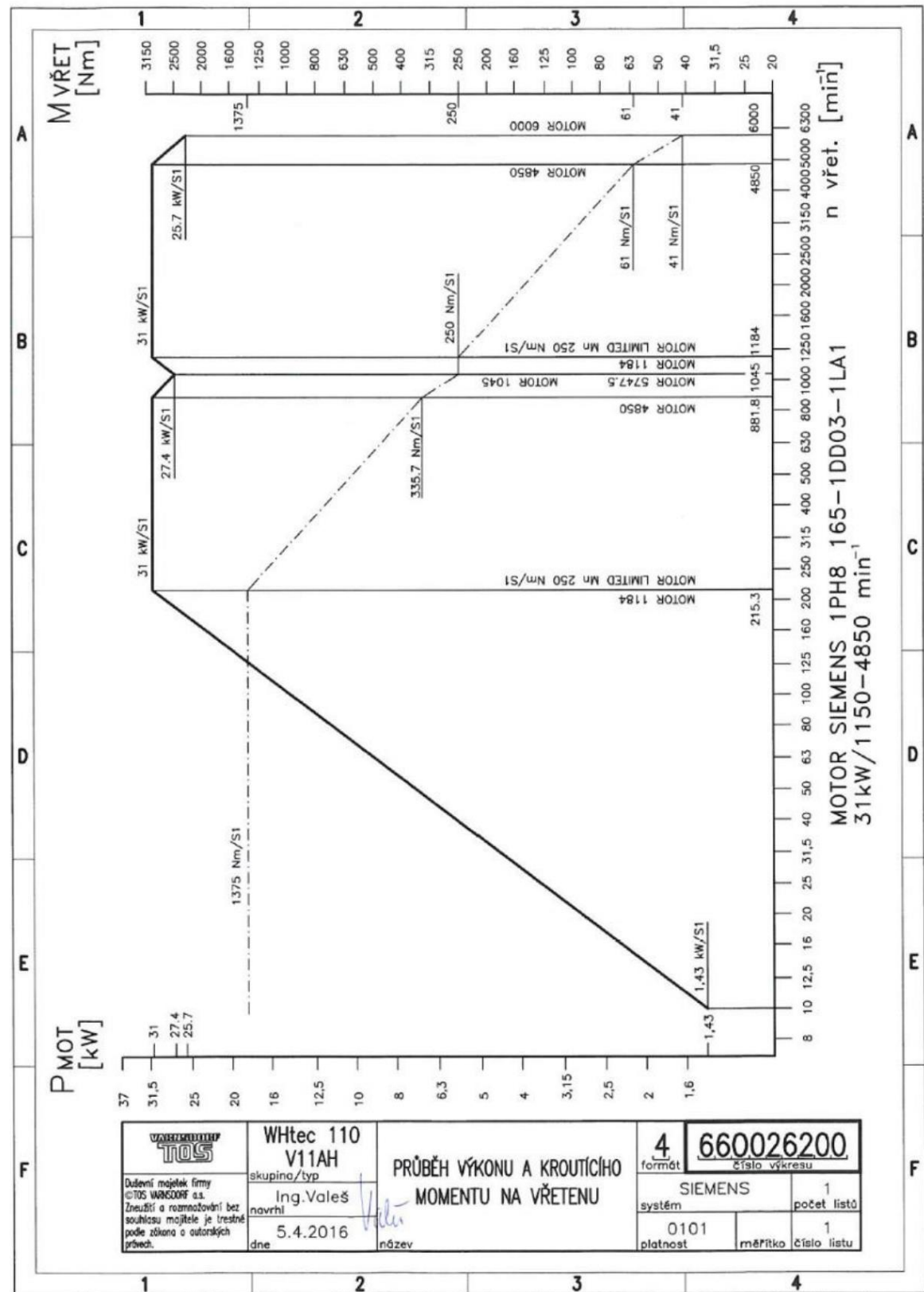


# Přílohy

Vliv použitého držáku na dynamickou poddajnost soustavy stroj – nástroj

*Bc. Quang Huy Bui*

Příloha č. 1 – Výkonová a momentová charakteristika vřetena



**Příloha č. 2 – Seznam měření FRF**

<b>Měření odezvy</b>									
<b>Čelní fréza 80A07R-S90AD16E-C BIG PLUS držák</b>									
Č. měření	Poloha měření				buzení		odezva		datum
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	W [mm]	místo	směr	místo	směr	
1	900	425	1500	-650	T-080-07-b	-X	T-080-07-b	-X	06.03.2023
1	900	425	1500	-650	T-080-07-b	-Y	T-080-07-b	-Y	06.03.2023
2	900	425	1500	-500	T-080-07-b	-X	T-080-07-b	-X	06.03.2023
2	900	425	1500	-500	T-080-07-b	-Y	T-080-07-b	-Y	06.03.2023
3	900	425	1500	-300	T-080-07-b	-X	T-080-07-b	-X	06.03.2023
3	900	425	1500	-300	T-080-07-b	-Y	T-080-07-b	-Y	06.03.2023
<b>Čelní fréza 80A07R-S90AD16E-C ISO držák</b>									
Č. měření	Poloha měření				buzení		odezva		datum
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	W [mm]	místo	směr	místo	směr	
1	900	425	1500	-650	T-080-07-i	-X	T-080-07-i	-X	07.03.2023
1	900	425	1500	-650	T-080-07-i	-Y	T-080-07-i	-Y	07.03.2023
2	900	425	1500	-500	T-080-07-i	-X	T-080-07-i	-X	07.03.2023
2	900	425	1500	-500	T-080-07-i	-Y	T-080-07-i	-Y	07.03.2023
3	900	425	1500	-300	T-080-07-i	-X	T-080-07-i	-X	07.03.2023
3	900	425	1500	-300	T-080-07-i	-Y	T-080-07-i	-Y	07.03.2023
<b>Válcová fréza M4258-080-C8-03-80-B BIG PLUS držák</b>									
Č. měření	Poloha měření				buzení		odezva		datum
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	W [mm]	místo	směr	místo	směr	
4	900	425	1500	-650	T-080-6-b	-X	T-080-6-b	-X	07.03.2023
4	900	425	1500	-650	T-080-6-b	-Y	T-080-6-b	-Y	07.03.2023
5	900	425	1500	-500	T-080-6-b	-X	T-080-6-b	-X	07.03.2023
5	900	425	1500	-500	T-080-6-b	-Y	T-080-6-b	-Y	07.03.2023
6	900	425	1500	-300	T-080-6-b	-X	T-080-6-b	-X	07.03.2023
6	900	425	1500	-300	T-080-6-b	-Y	T-080-6-b	-Y	07.03.2023
<b>Válcová fréza M4258-080-C8-03-80-B ISO držák</b>									
Č. měření	Poloha měření				buzení		odezva		datum
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	W [mm]	místo	směr	místo	směr	
7	900	425	1500	-650	T-080-6-i	-X	T-080-6-i	-X	07.03.2023
7	900	425	1500	-650	T-080-6-i	-Y	T-080-6-i	-Y	07.03.2023
8	900	425	1500	-500	T-080-6-i	-X	T-080-6-i	-X	07.03.2023
8	900	425	1500	-500	T-080-6-i	-Y	T-080-6-i	-Y	07.03.2023
9	900	425	1500	-300	T-080-6-i	-X	T-080-6-i	-X	07.03.2023
9	900	425	1500	-300	T-080-6-i	-Y	T-080-6-i	-Y	07.03.2023

**Příloha č. 3 – Seznam měření ze zkoušky obráběním čelní frézou**

Big Plus – čelní fréza 80A07R-S90AD16E-C							
Měření	n	vc	fz	ap	ae	W	Směr
	[1/min]	[m/min]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
M01	796	200	0,15	1,0	60	650	↓, +X
	875	220	0,15	1,0	60	650	↓, +X
M02	875	220	0,15	1,0	60	650	↑, -X
	796	200	0,15	1,0	60	650	↑, -X
M03	796	200	0,15	0,5	60	650	↓, +X
	875	220	0,15	0,5	60	650	↓, +X
M04	875	220	0,15	0,5	60	650	↑, -X
	796	200	0,15	0,5	60	650	↑, -X
M05	796	200	0,15	3,0	60	300	↓, +X
	875	220	0,15	3,0	60	300	↓, +X
M06	875	220	0,15	3,0	60	300	↑, -X
	796	200	0,15	3,0	60	300	↑, -X
M07	796	200	0,15	4,0	60	300	↓, +X
	875	220	0,15	4,0	60	300	↓, +X
M08	875	220	0,15	4,0	60	300	↑, -X
	796	200	0,15	4,0	60	300	↑, -X

ISO – čelní fréza 80A07R-S90AD16E-C							
Měření	n	vc	fz	ap	ae	W	Směr
	[1/min]	[m/min]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
M09	796	200	0,15	0,5	60	650	↓, +X
	875	220	0,15	0,5	60	650	↓, +X
M10	875	220	0,15	0,5	60	650	↑, -X
	796	200	0,15	0,5	60	650	↑, -X
M11	796	200	0,15	1,0	60	650	↓, +X
	875	220	0,15	1,0	60	650	↓, +X
M12	875	220	0,15	1,0	60	650	↑, -X
	796	200	0,15	1,0	60	650	↑, -X
M13	796	200	0,15	3,0	60	300	↓, +X
	875	220	0,15	3,0	60	300	↓, +X
M14	875	220	0,15	3,0	60	300	↑, -X
	796	200	0,15	3,0	60	300	↑, -X
M15	796	200	0,15	4,0	60	300	↓, +X
	875	220	0,15	4,0	60	300	↓, +X
M16	875	220	0,15	4,0	60	300	↑, -X
	796	200	0,15	4,0	60	300	↑, -X

**Příloha č. 4 – Seznam měření ze zkoušky obráběním válcovou frézou**

<b>Big Plus – válcová fréza M4258-080-C8-03-80-B + M4258-080-P40-03-36-F</b>							
<b>Měření</b>	<b>n</b>	<b>vc</b>	<b>fz</b>	<b>ap</b>	<b>ae</b>	<b>W</b>	<b>Směr</b>
	<b>[1/min]</b>	<b>[m/min]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[-]</b>
<b>M17</b>	597	150	0,15	35	1	300	↑, +X
	637	160	0,15	35	1	300	↑, +X
<b>M18</b>	637	160	0,15	35	1	300	↓, -X
	597	150	0,15	35	1	300	↓, -X
<b>M19</b>	597	150	0,15	35	2	300	↑, +X
	637	160	0,15	35	2	300	↑, +X
<b>M20</b>	637	160	0,15	35	2	300	↓, -X
	597	150	0,15	35	2	300	↓, -X

<b>ISO – válcová fréza M4258-080-C8-03-80-B + M4258-080-P40-03-36-F</b>							
<b>Měření</b>	<b>n</b>	<b>vc</b>	<b>fz</b>	<b>ap</b>	<b>ae</b>	<b>W</b>	<b>Směr</b>
	<b>[1/min]</b>	<b>[m/min]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[-]</b>
<b>M21</b>	597	150	0,15	35	1	300	↑, +X
	637	160	0,15	35	1	300	↑, +X
<b>M22</b>	637	160	0,15	35	1	300	↓, -X
	597	150	0,15	35	1	300	↓, -X
<b>M23</b>	597	150	0,15	35	2	300	↑, +X
	637	160	0,15	35	2	300	↑, +X
<b>M24</b>	637	160	0,15	35	2	300	↓, -X
	597	150	0,15	35	2	300	↓, -X

**Příloha č. 5 – Vypočítané mohutnosti vibrací**
**Vypočítaná mohutnost vibrací pro čelní frézování sousledné, vysunuté vřeteno W650**

<b>Mohutnost vibrací – sousledné frézování, W650</b>					
<b>Big Plus</b>					
<b>Měření</b>	<b>a<sub>p</sub></b>	<b>n</b>	<b>v<sub>eff</sub> - X</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Y</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Z</b>
	<b>[mm]</b>	<b>[1/min]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>
<b>M01</b>	1	796	3,73	3,66	2,16
	1	875	2,44	6,29	1,51
<b>M03</b>	0,5	796	0,24	0,27	0,25
	0,5	875	0,19	0,21	0,2
<b>Aritmetický průměr</b>			1,65	2,61	1,03
<b>ISO</b>					
<b>M11</b>	1	796	4,02	3,64	2,30
	1	875	2,87	6,40	1,73
<b>M09</b>	0,5	796	0,20	0,23	0,22
	0,5	875	0,18	0,20	0,17
<b>Aritmetický průměr</b>			1,82	2,62	1,11

**Vypočítaná mohutnost vibrací pro čelní frézování nesousledné, vysunuté vřeteno W650**

<b>Mohutnost vibrací – nesousledné frézování, W650</b>					
<b>Big Plus</b>					
<b>Měření</b>	<b>a<sub>p</sub></b>	<b>n</b>	<b>v<sub>eff</sub> - X</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Y</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Z</b>
	<b>[mm]</b>	<b>[1/min]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>
<b>M02</b>	1	796	7,25	8,71	2,51
	1	875	5,03	8,47	2,11
<b>M04</b>	0,5	796	0,93	0,88	0,66
	0,5	875	1,13	1,30	0,79
<b>Aritmetický průměr</b>			3,59	4,84	1,52
<b>ISO</b>					
<b>M12</b>	1	796	7,53	8,13	2,49
	1	875	5,18	7,90	2,23
<b>M10</b>	0,5	796	0,19	0,3	0,24
	0,5	875	0,56	0,57	0,50
<b>Aritmetický průměr</b>			3,37	4,23	1,37

**Vypočítaná mohutnost vibrací pro čelní frézování sousledné, zasunuté vřeteno W300**

<b>Mohutnost vibrací – sousledné frézování, W300</b>					
<b>Big Plus</b>					
<b>Měření</b>	<b>a<sub>p</sub></b>	<b>n</b>	<b>v<sub>eff</sub> - X</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Y</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Z</b>
	<b>[mm]</b>	<b>[1/min]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>
<b>M07</b>	4	796	0,62	0,69	0,42
	4	875	0,47	0,61	0,52
<b>M05</b>	3	796	0,64	0,62	0,34
	3	875	0,49	0,54	0,40
<b>Aritmetický průměr</b>			0,56	0,62	0,42
<b>ISO</b>					
<b>M15</b>	4	796	0,99	0,92	0,74
	4	875	1,10	1,04	1,11
<b>M13</b>	3	796	0,50	0,54	0,34
	3	875	0,46	0,49	0,39
<b>Aritmetický průměr</b>			0,76	0,75	0,65

**Vypočítaná mohutnost vibrací pro čelní frézování nesousledné, zasunuté vřeteno W300**

<b>Mohutnost vibrací – nesousledné frézování, W300</b>					
<b>Big Plus</b>					
<b>Měření</b>	<b>a<sub>p</sub></b>	<b>n</b>	<b>v<sub>eff</sub> - X</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Y</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Z</b>
	<b>[mm]</b>	<b>[1/min]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>
<b>M08</b>	4	796	0,43	1,18	0,70
	4	875	0,43	1,00	0,58
<b>M06</b>	3	796	0,45	1,09	0,58
	3	875	0,43	0,94	0,54
<b>Aritmetický průměr</b>			0,44	1,05	0,60
<b>ISO</b>					
<b>M16</b>	4	796	1,13	1,82	1,96
	4	875	0,91	1,76	1,14
<b>M14</b>	3	796	0,39	0,87	0,58
	4	875	0,45	0,80	0,52
<b>Aritmetický průměr</b>			0,72	1,31	1,02

**Vypočítaná mohutnost vibrací pro boční frézování sousledné, zasunuté vřeteno W300**

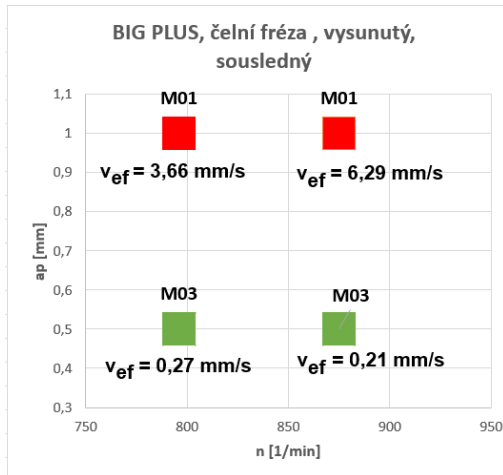
<b>Mohutnost vibrací – sousledné frézování, W300</b>					
<b>Big Plus</b>					
<b>Měření</b>	<b>a<sub>e</sub></b>	<b>n</b>	<b>v<sub>eff</sub> - X</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Y</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Z</b>
	<b>[mm]</b>	<b>[1/min]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>
<b>M20</b>	2	597	1,52	1,80	1,50
	2	637	2,05	1,65	1,62
<b>M18</b>	1	597	1,06	1,29	1,15
	1	637	1,17	1,23	1,12
<b>Aritmetický průměr</b>			1,45	1,49	1,35
<b>ISO</b>					
<b>M24</b>	2	597	1,55	1,82	1,47
	2	637	2,03	1,80	1,71
<b>M22</b>	1	597	1,08	1,34	1,14
	1	637	1,17	1,32	1,12
<b>Aritmetický průměr</b>			1,46	1,57	1,36

**Vypočítaná mohutnost vibrací pro boční frézování nesousledné, zasunuté vřeteno W300**

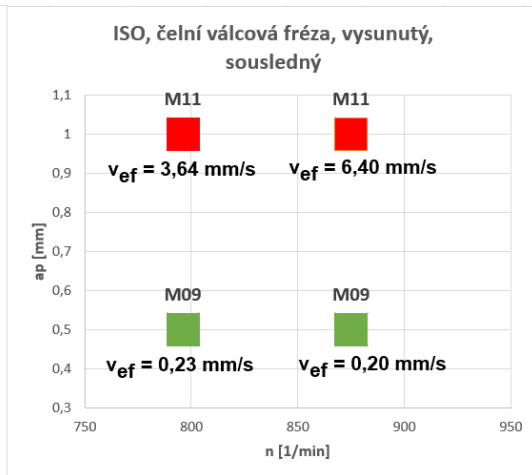
<b>Mohutnost vibrací – nesousledné frézování, W300</b>					
<b>Big Plus</b>					
<b>Měření</b>	<b>a<sub>e</sub></b>	<b>n</b>	<b>v<sub>eff</sub> - X</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Y</b>	<b>v<sub>eff</sub> - Z</b>
	<b>[mm]</b>	<b>[1/min]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>	<b>[mm/s]</b>
<b>M19</b>	2	597	2,20	1,26	1,17
	2	637	4,16	2,0	3,10
<b>M17</b>	1	597	1,43	1,01	1,21
	1	637	2,30	1,58	2,54
<b>Aritmetický průměr</b>			2,52	1,46	2,00
<b>ISO</b>					
<b>M23</b>	2	597	2,35	1,34	1,42
	2	637	4,27	2,10	2,97
<b>M21</b>	1	597	1,68	1,26	1,52
	1	637	2,70	1,66	2,62
<b>Aritmetický průměr</b>			2,75	1,59	2,13



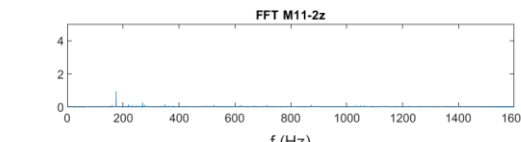
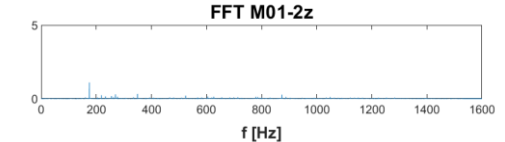
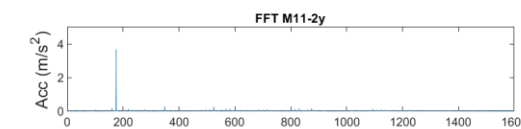
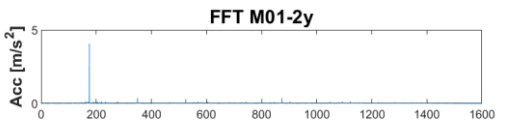
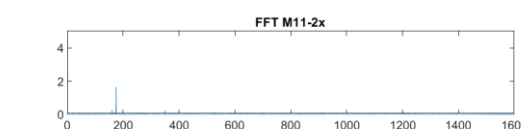
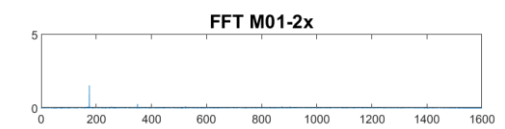
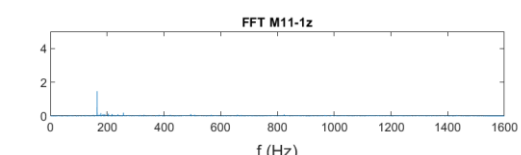
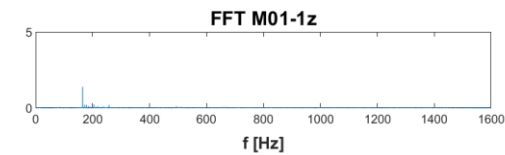
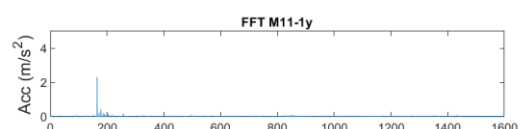
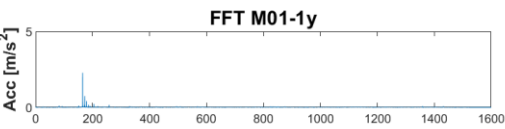
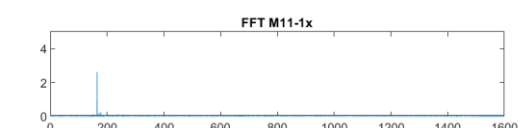
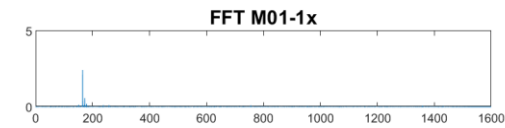
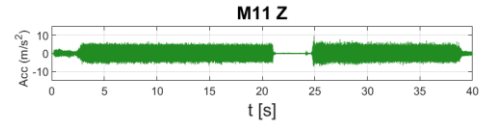
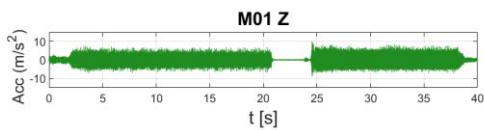
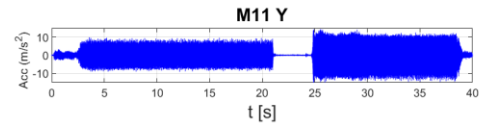
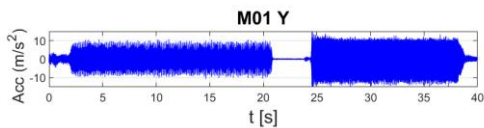
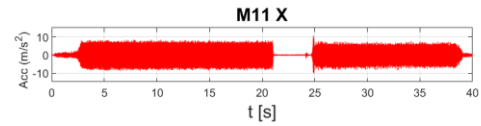
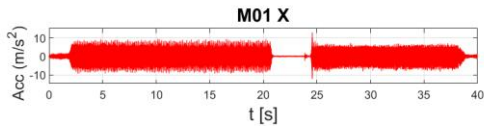
Příloha č. 6 – Čelní fréza, sousledné,  $W=650$  mm,  $a_p=0,5-1$  mm,  $a_e=60$  mm

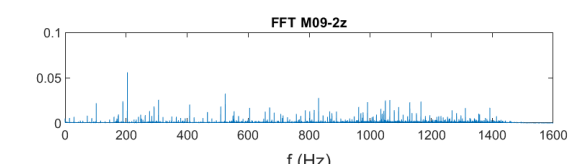
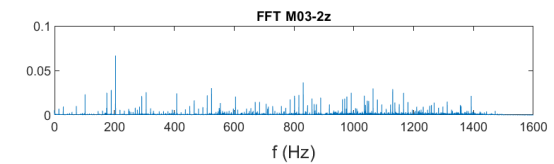
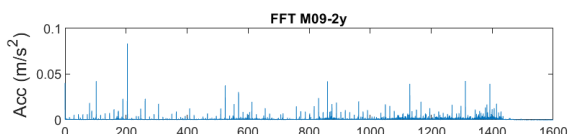
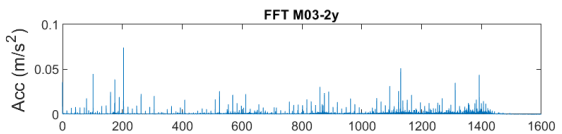
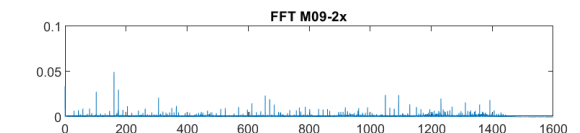
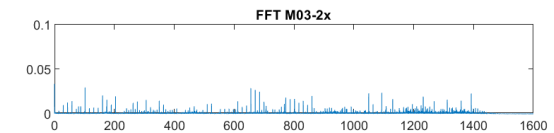
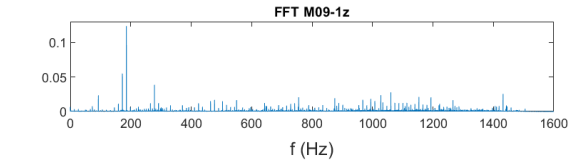
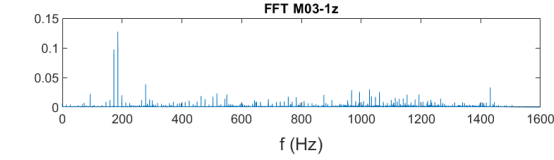
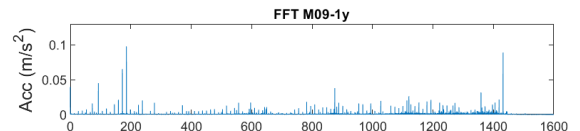
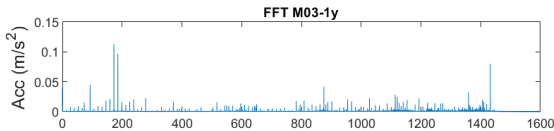
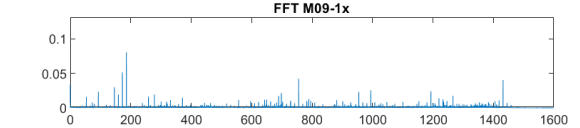
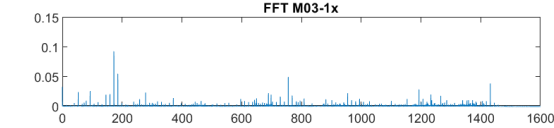
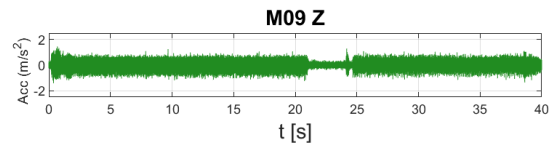
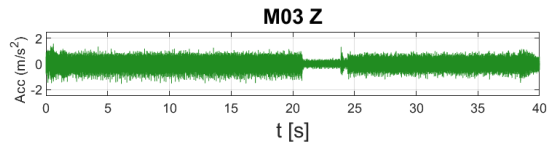
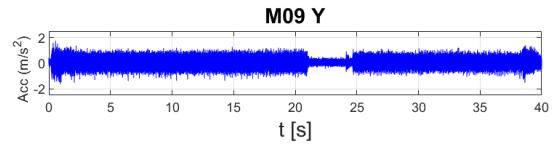
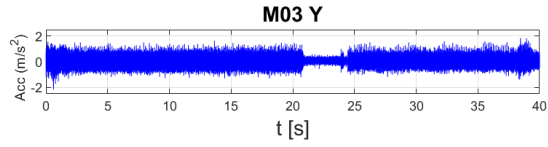
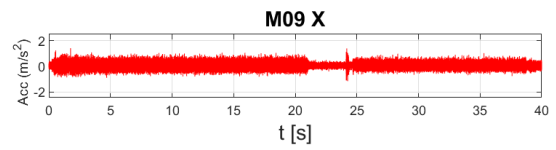
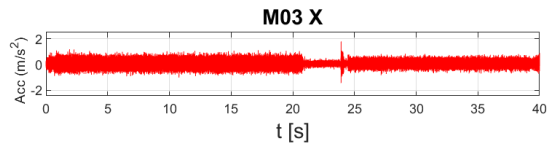


**Big Plus**



**ISO**





M01 n=796 1/min



M11 n=796 1/min



M01 n=875 1/min



M11 n=875 1/min



M03 n=796 1/min



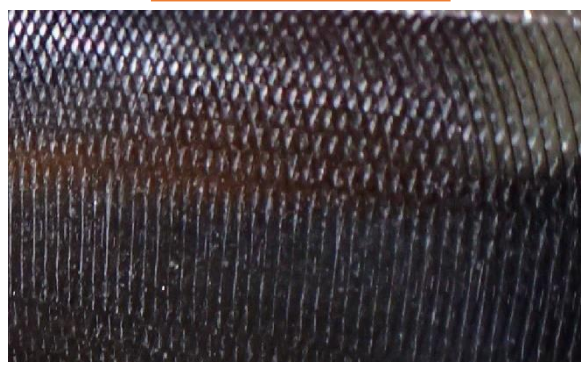
M09 n=796 1/min



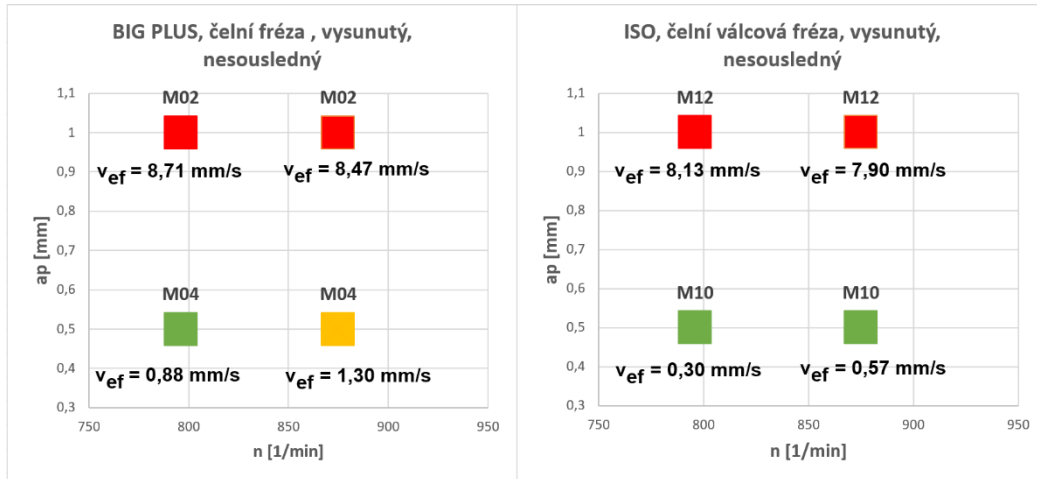
M03 n=875 1/min



M09 n=875 1/min

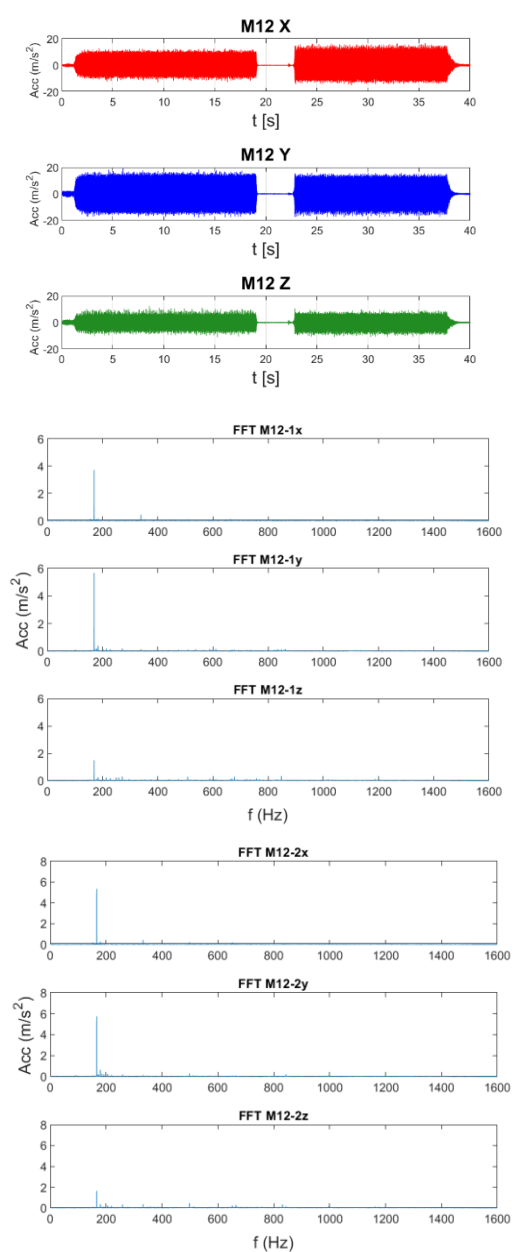
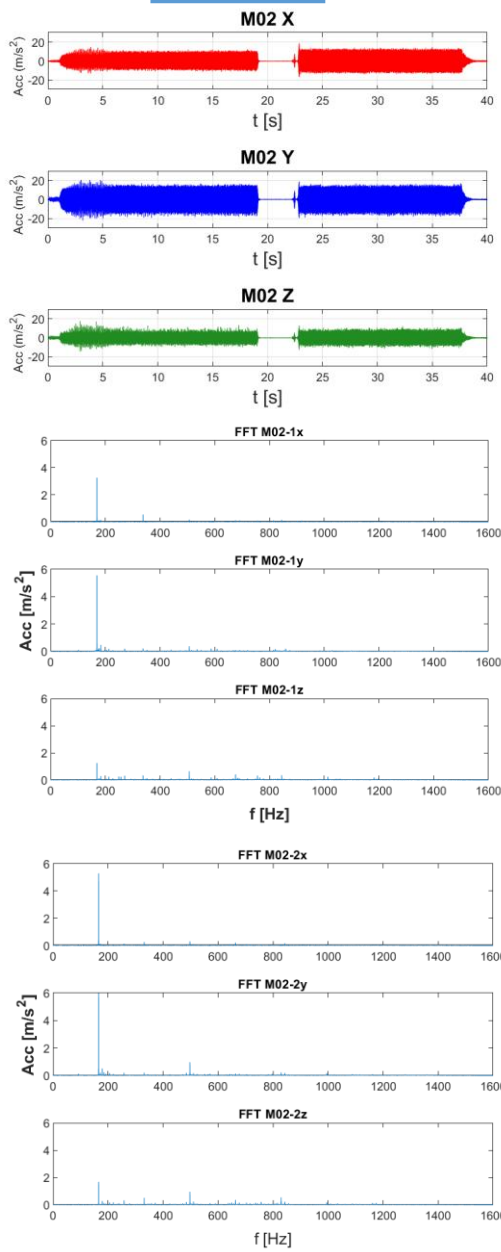


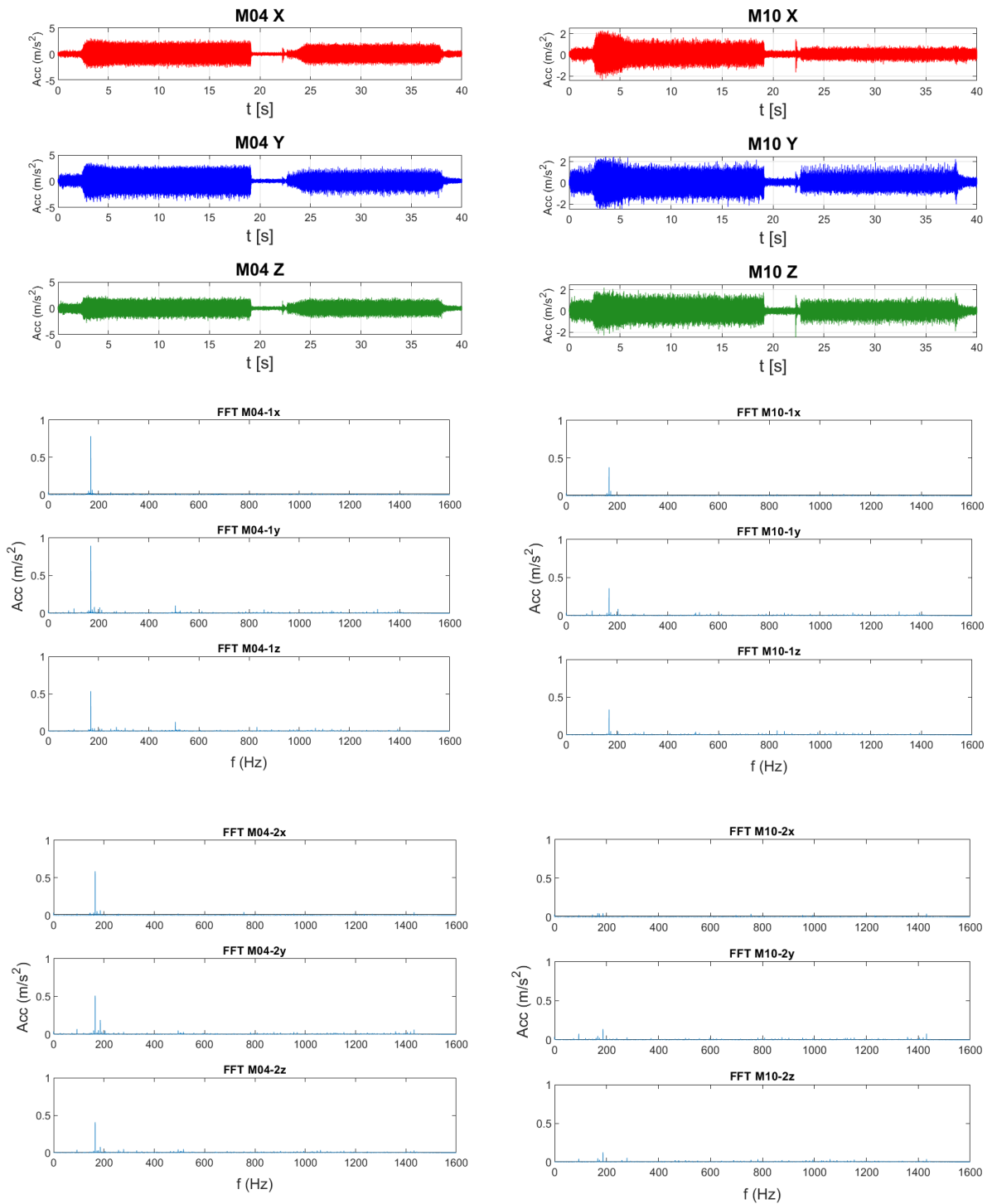
Příloha č. 7 – Čelní fréza, nesousledné,  $W=650$  mm,  $a_p=0,5-1$  mm,  $a_e=60$  mm



**Big Plus**

**ISO**

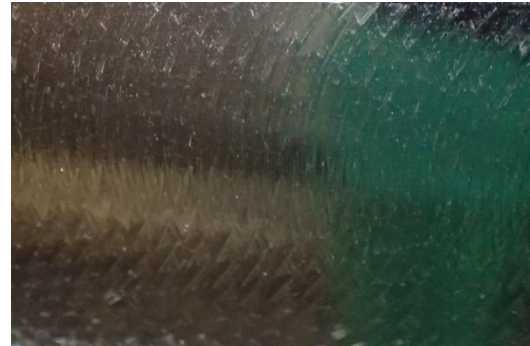




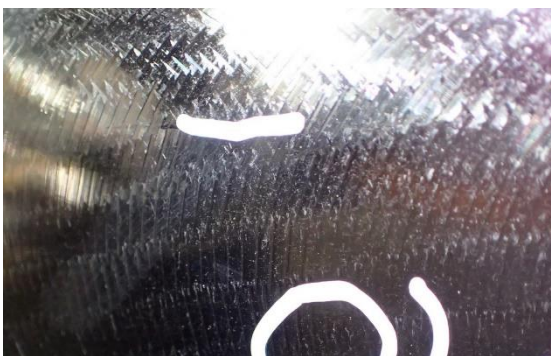
M02 n=875 1/min



M12 n=875 1/min



M02 n=796 1/min



M12 n=796 1/min



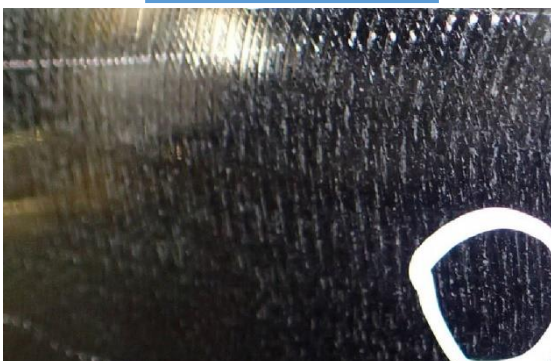
M04 n=875 1/min



M10 n=875 1/min



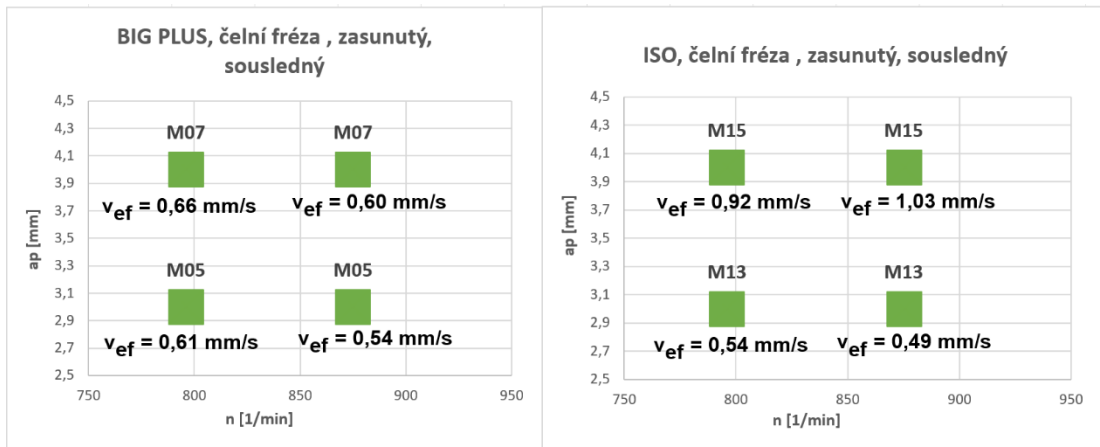
M04 n=796 1/min



M10 n=796 1/min

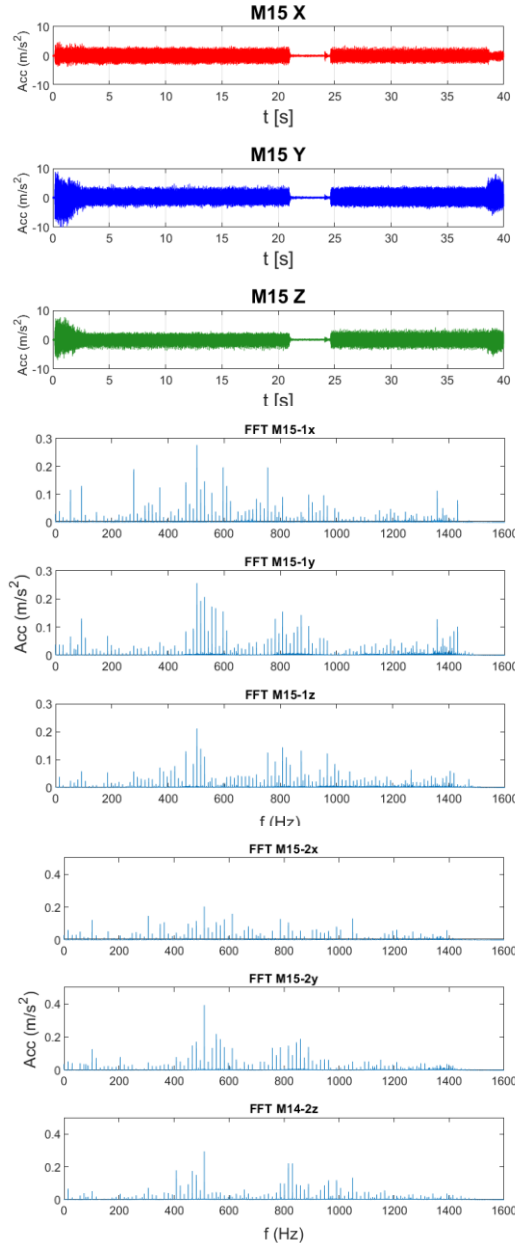
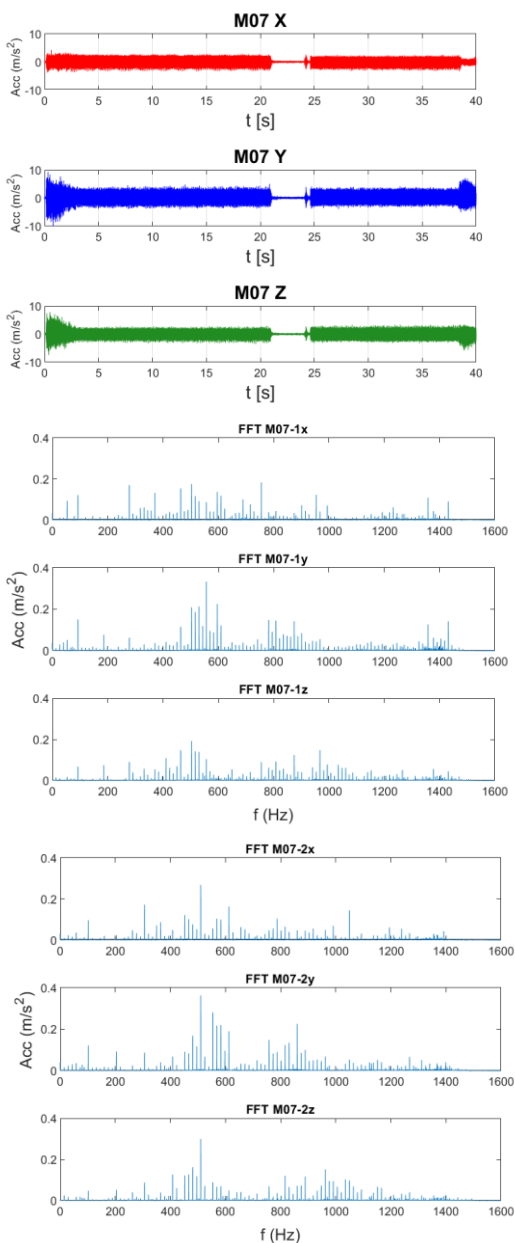


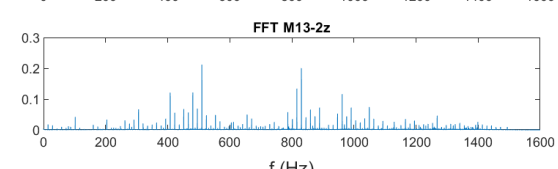
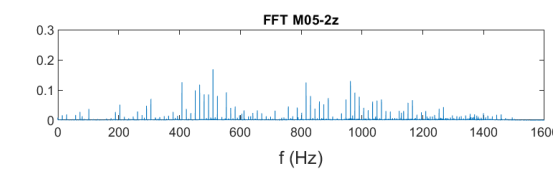
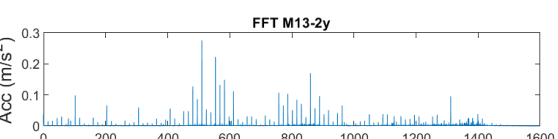
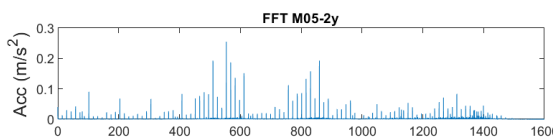
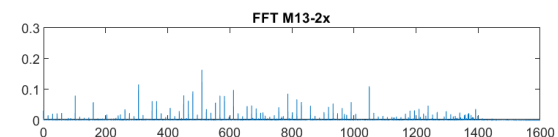
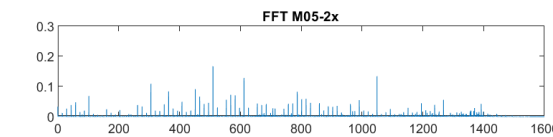
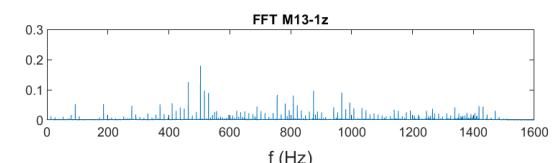
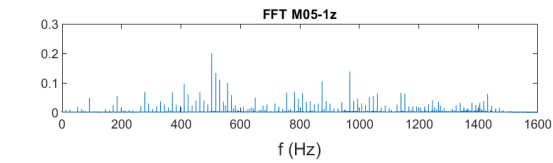
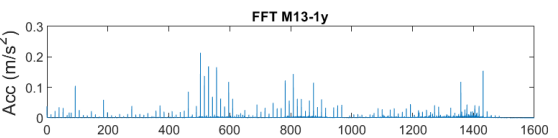
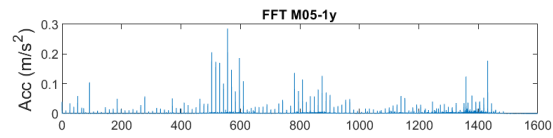
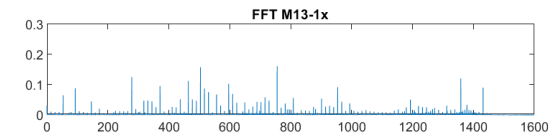
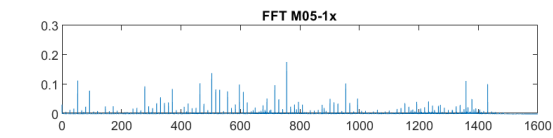
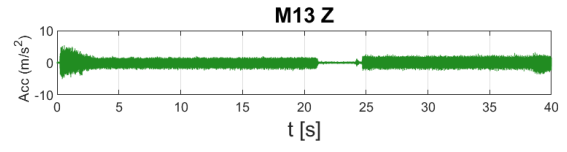
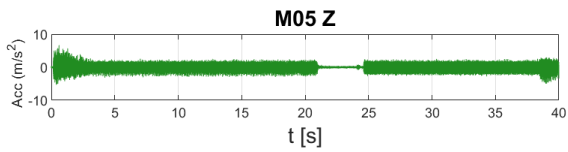
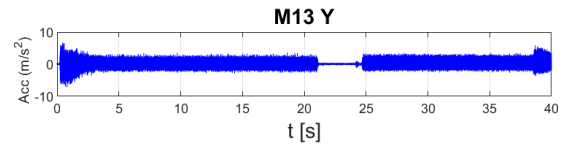
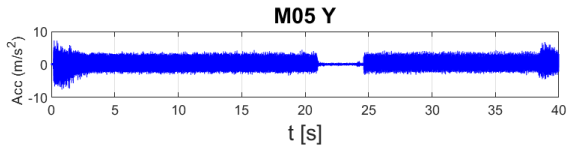
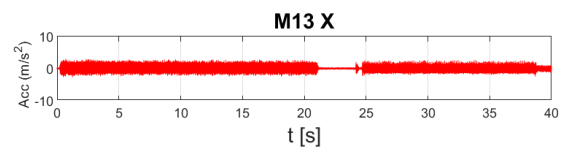
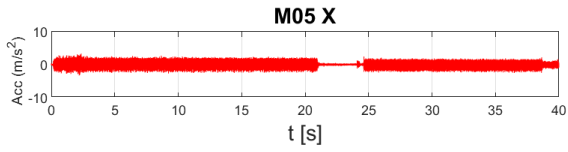
Příloha č. 8 - Čelní fréza, sousledné,  $W=300$  mm,  $a_p=3-4$  mm,  $a_e=60$  mm



Big Plus

ISO







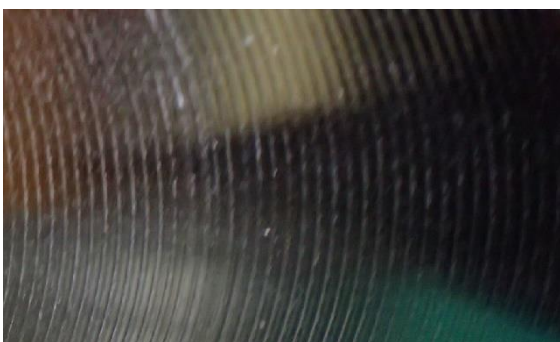
M07 n=796 1/min



M15 n=796 1/min



M07 n=875 1/min



M15 n=875 1/min



M05 n=796 1/min



M13 n=796 1/min



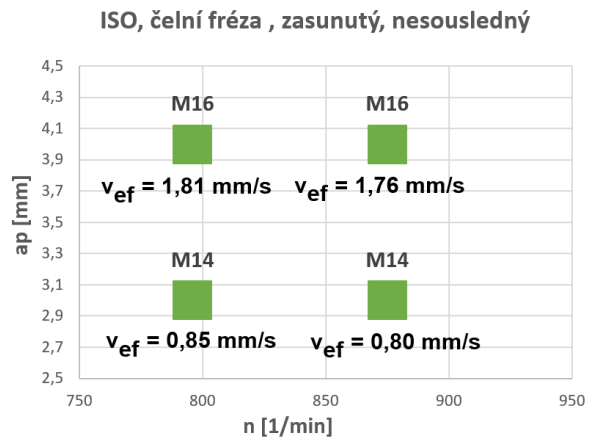
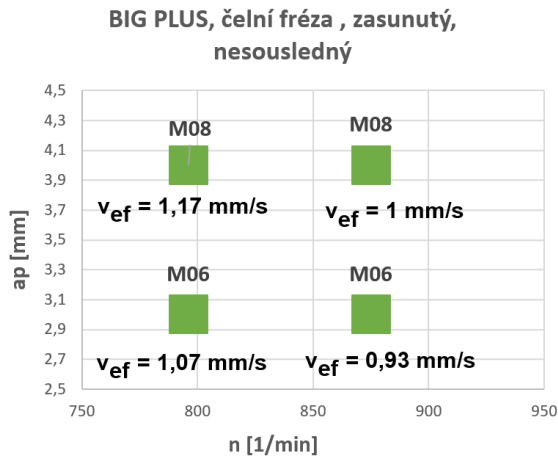
M05 n=875 1/min



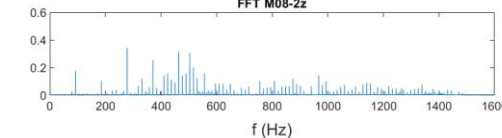
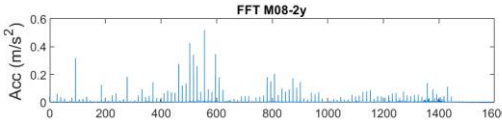
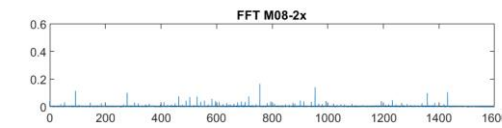
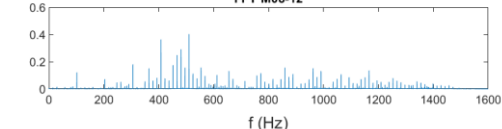
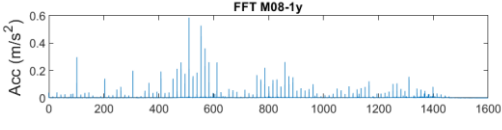
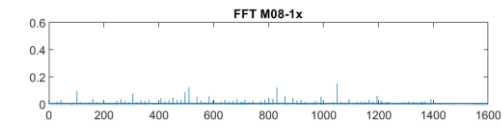
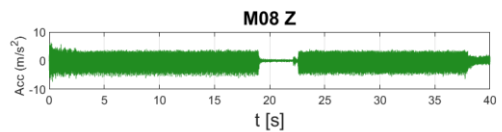
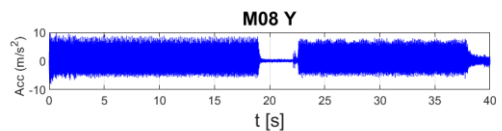
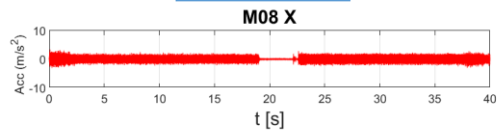
M13 n=875 1/min



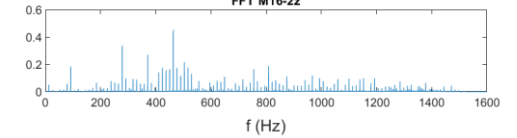
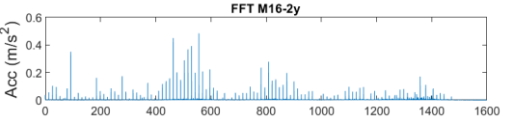
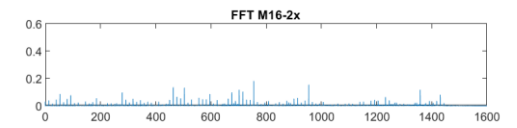
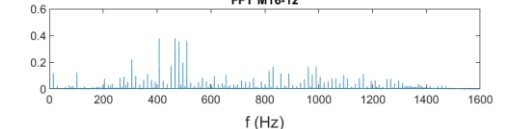
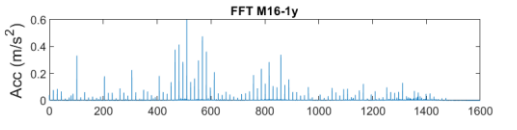
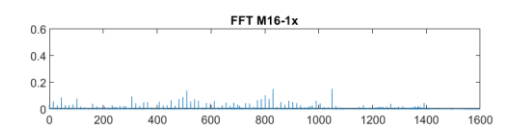
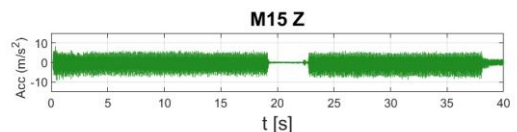
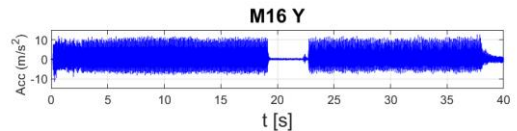
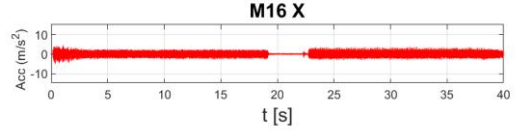
Příloha č. 9 - Čelní fréza, nesousledné,  $W=300$  mm,  $a_p=3-4$  mm,  $a_e=60$  mm

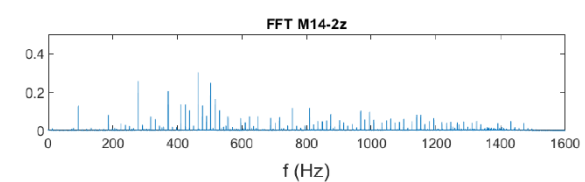
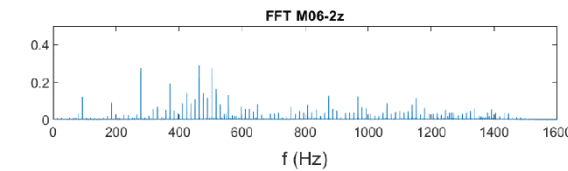
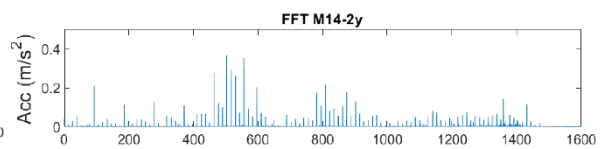
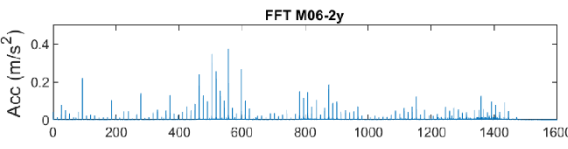
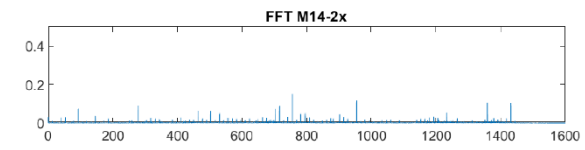
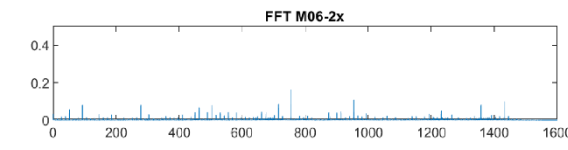
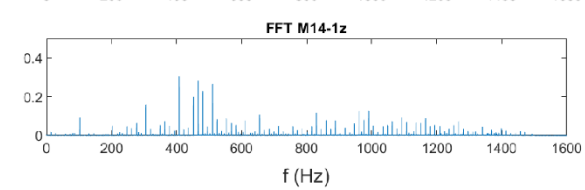
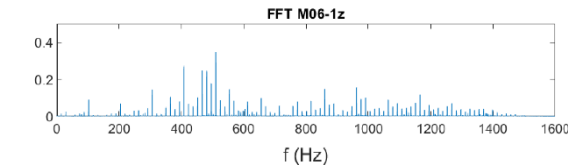
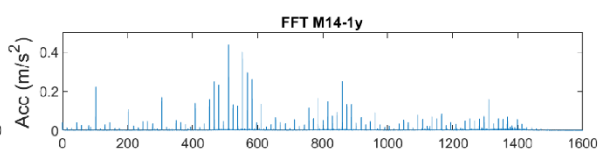
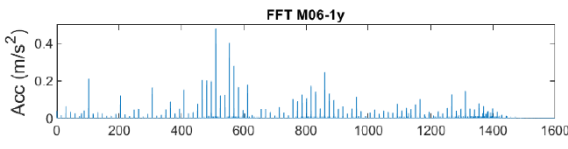
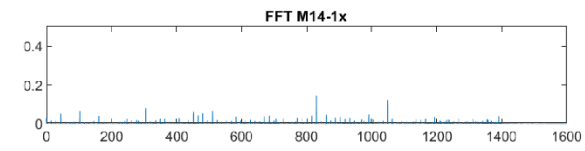
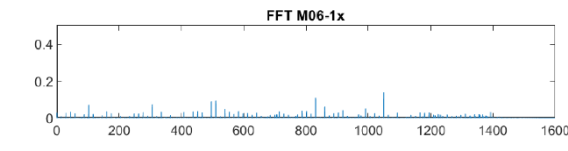
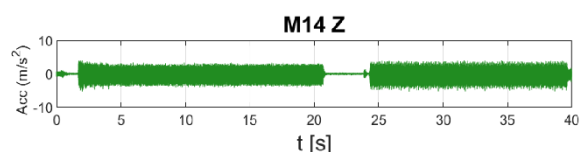
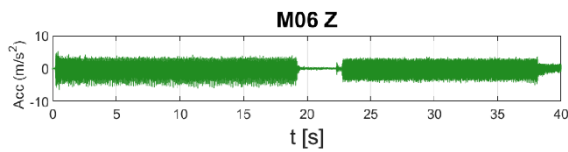
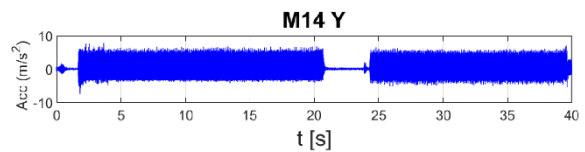
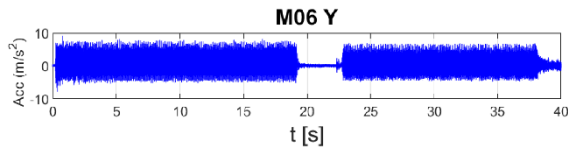
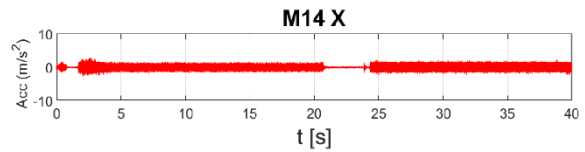
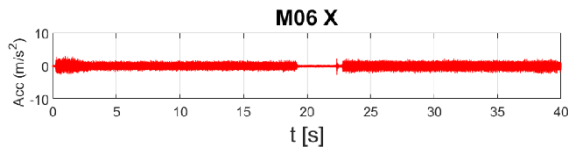


**Big Plus**



**ISO**





M08 n=875 1/min



M16 n=875 1/min



M08 n=796 1/min



M16 n=796 1/min



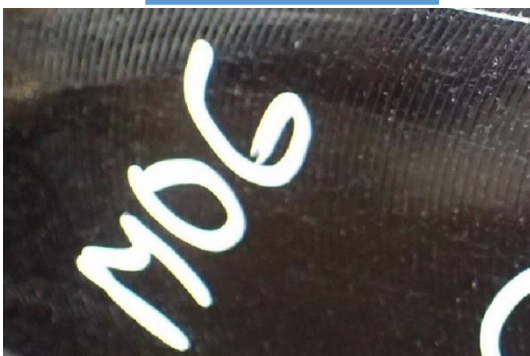
M06 n=875 1/min



M14 n=875 1/min



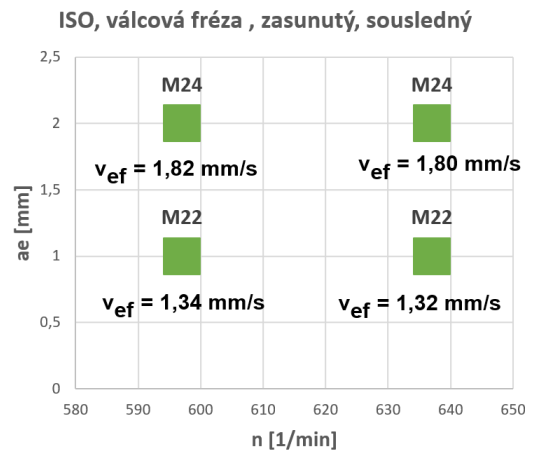
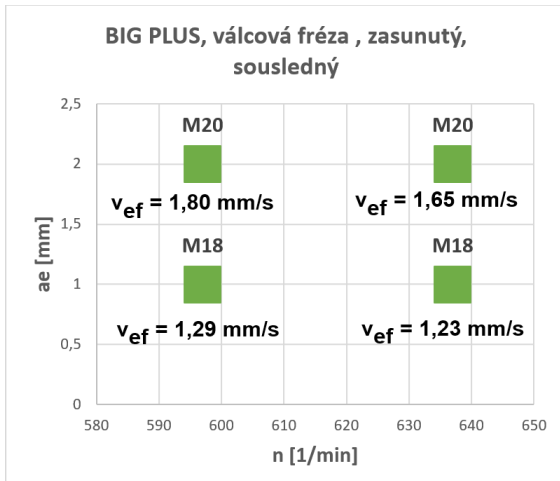
M06 n=796 1/min



M14 n=796 1/min

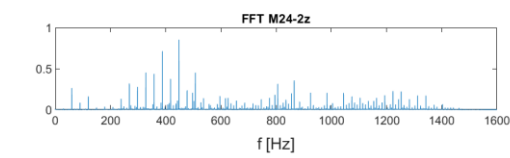
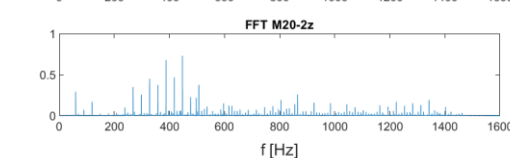
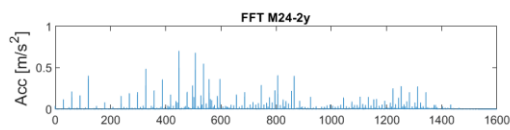
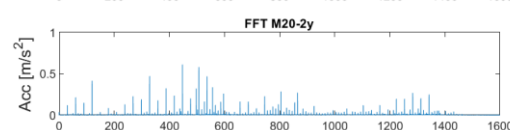
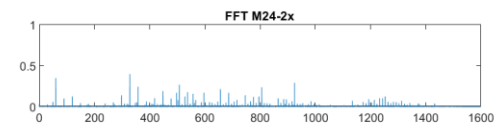
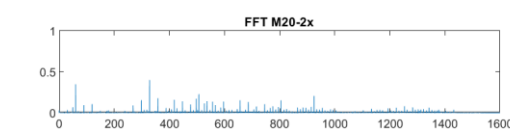
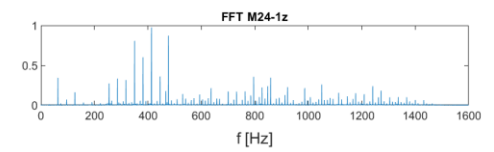
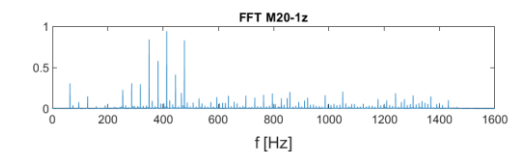
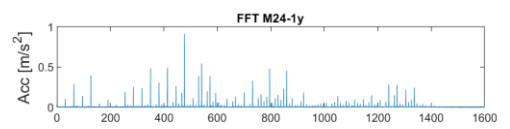
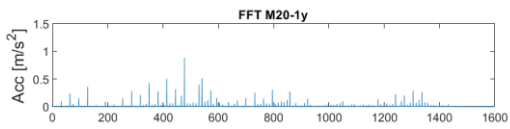
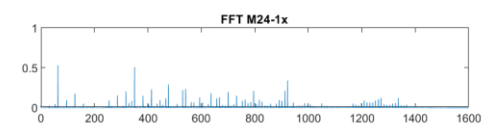
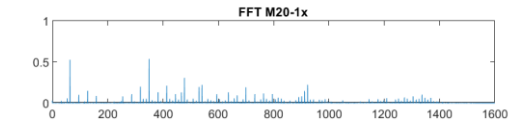
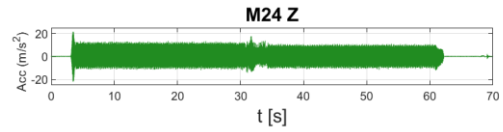
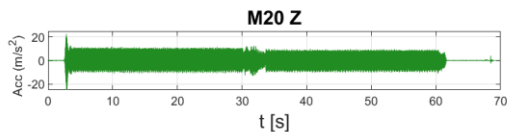
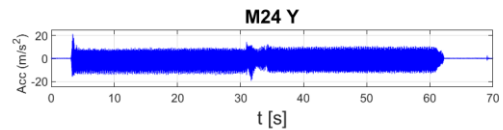
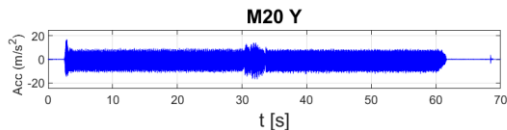
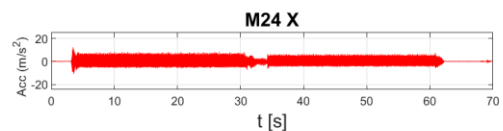
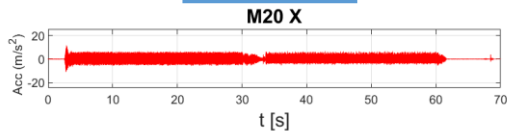


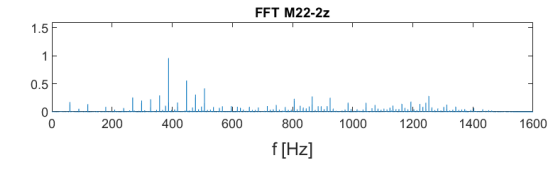
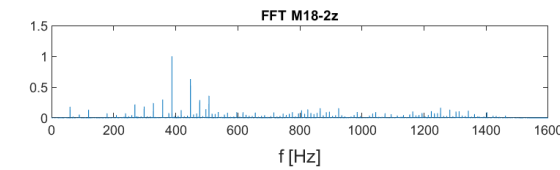
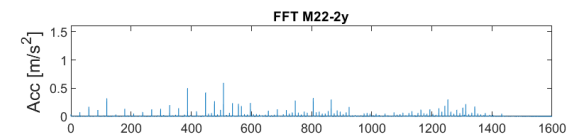
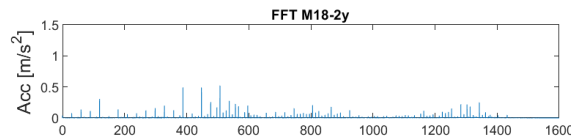
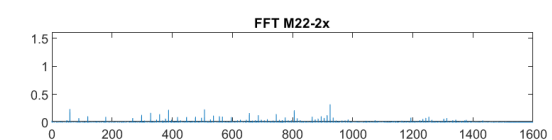
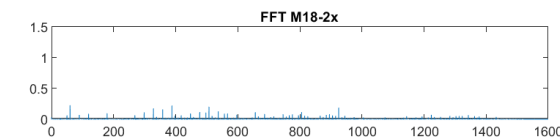
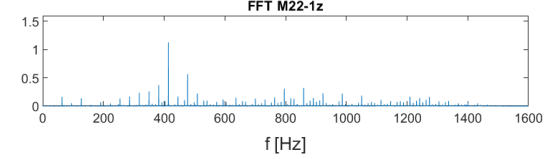
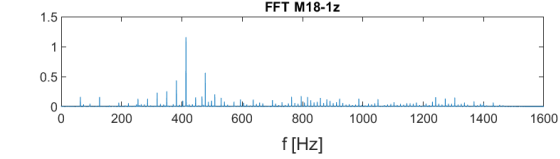
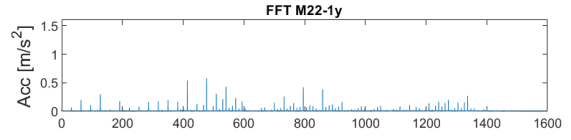
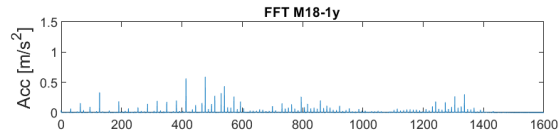
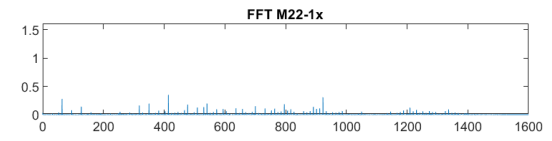
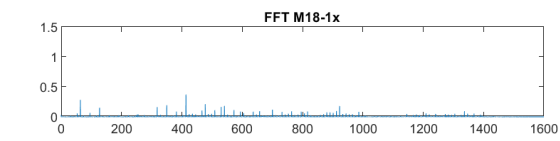
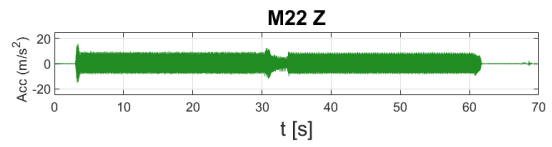
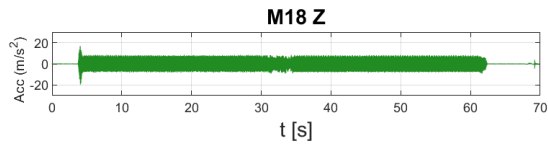
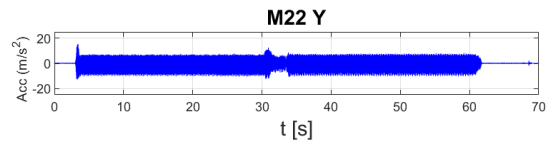
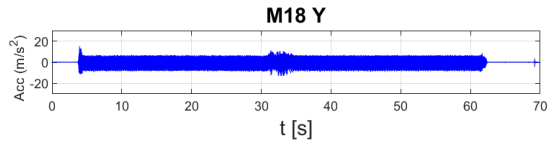
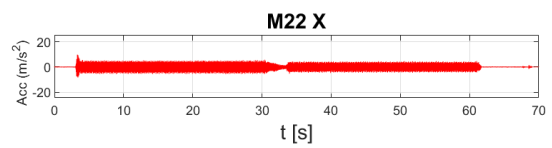
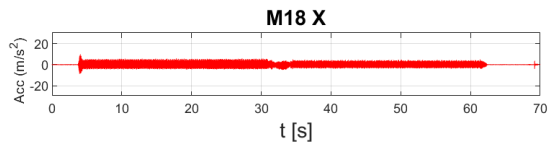
Příloha č. 10 – Válcová fréza, sousledné, W=300 mm, ap=35 mm, ae=1-2 mm



**Big Plus**

**ISO**

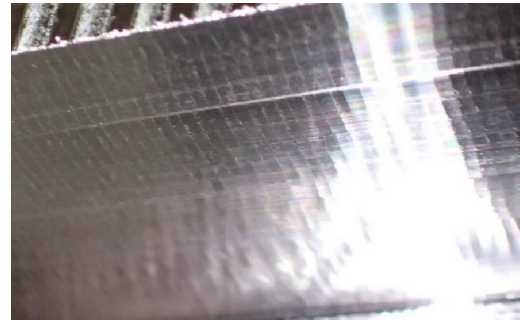




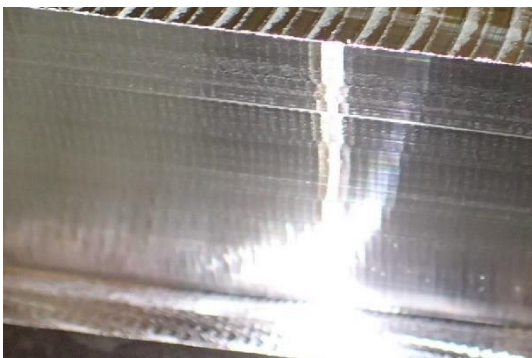
M20 n=637 1/min



M24 n=637 1/min



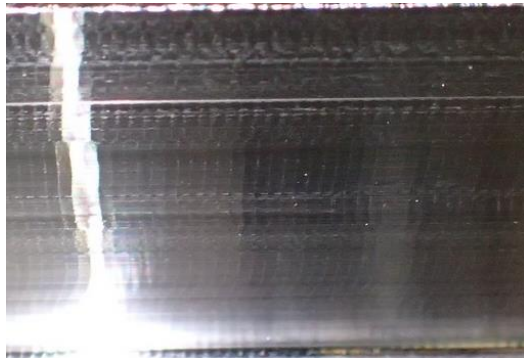
M20 n=597 1/min



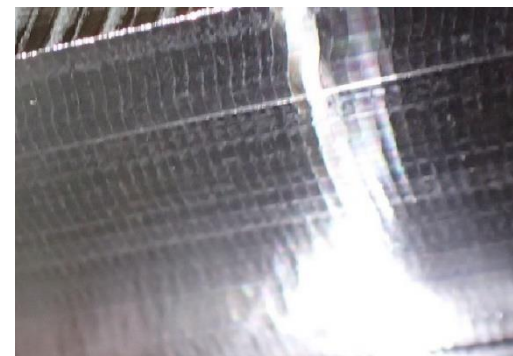
M24 n=597 1/min



M18 n=637 1/min



M22 n=637 1/min



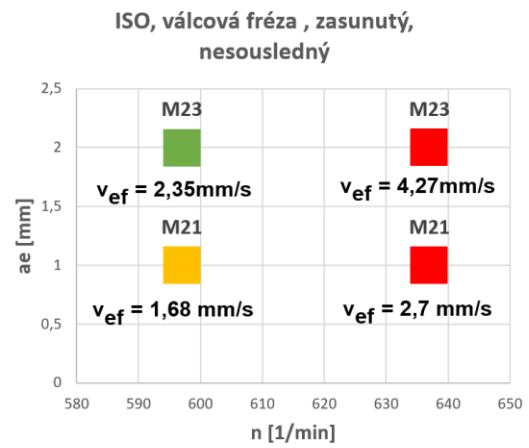
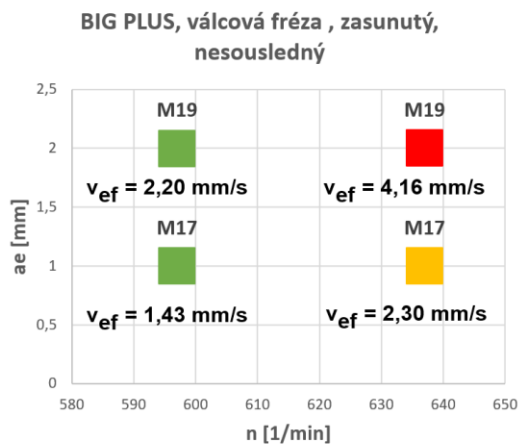
M18 n=597 1/min



M22 n=597 1/min

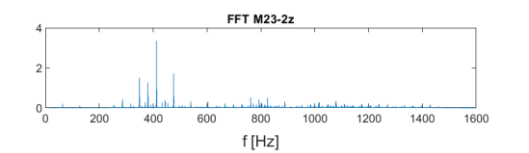
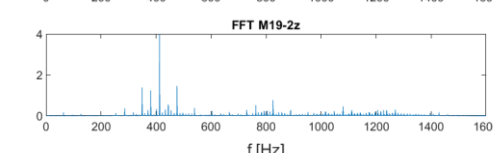
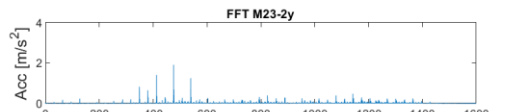
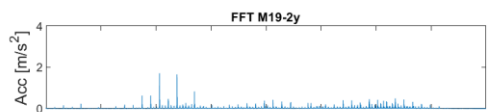
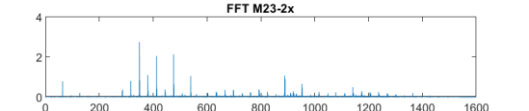
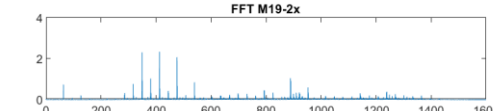
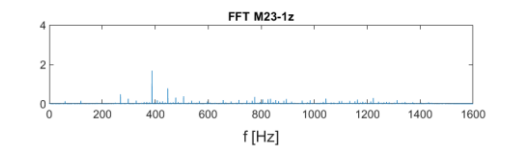
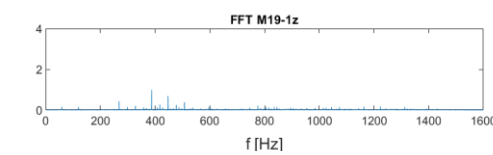
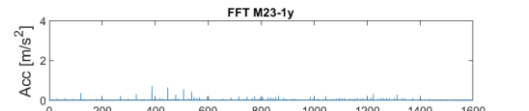
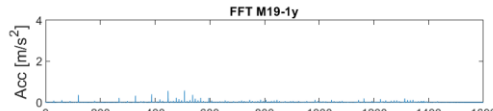
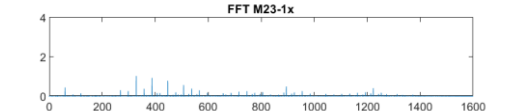
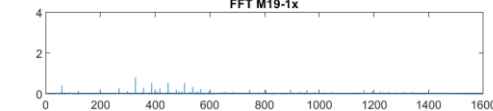
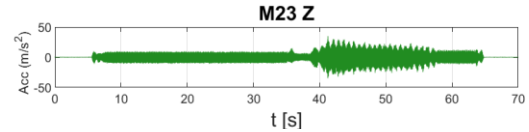
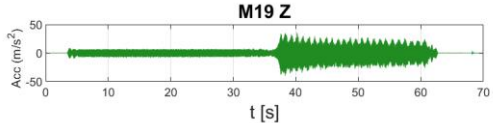
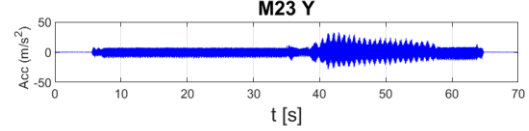
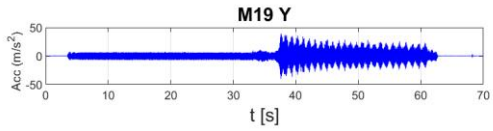
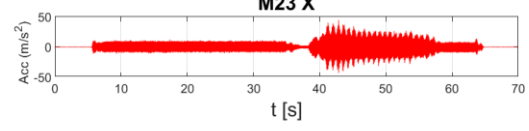
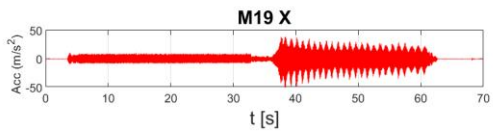


Příloha č. 11 – Válcová fréza, nesousledné,  $W=300$  mm,  $a_p=35$  mm,  $a_e=1-2$  mm

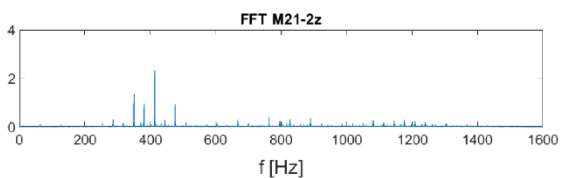
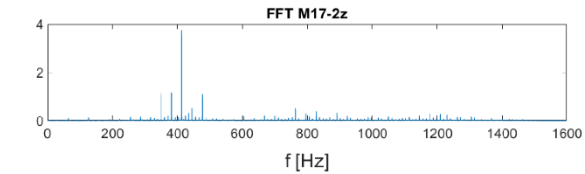
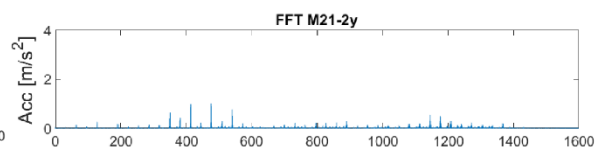
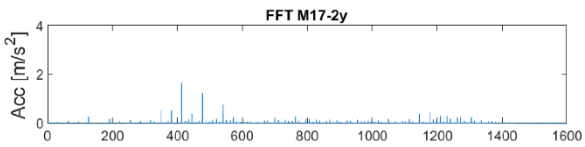
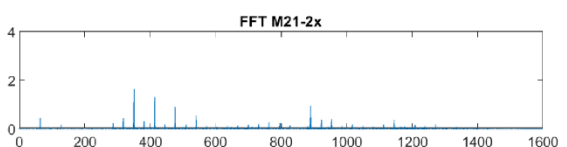
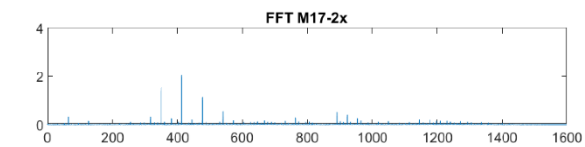
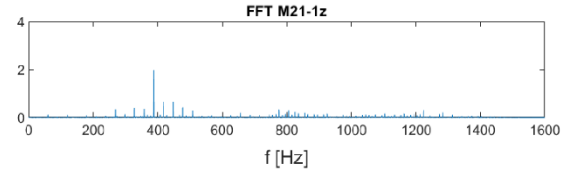
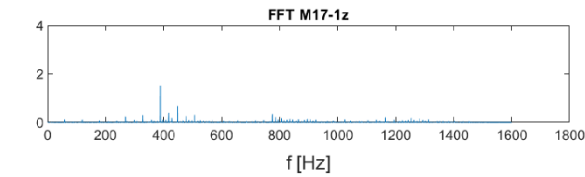
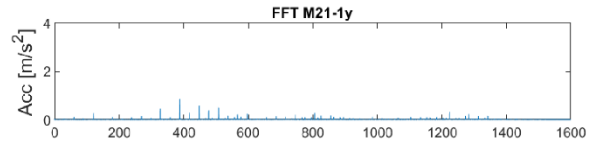
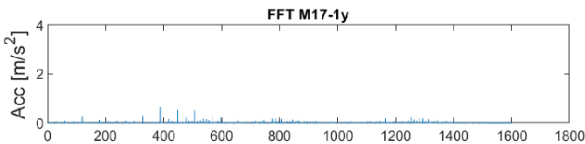
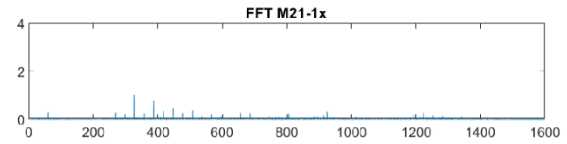
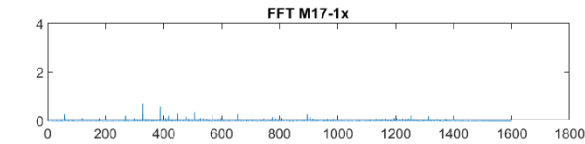
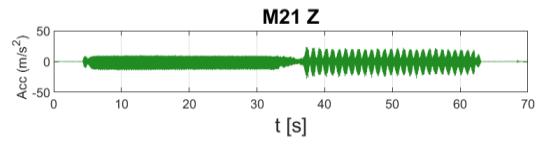
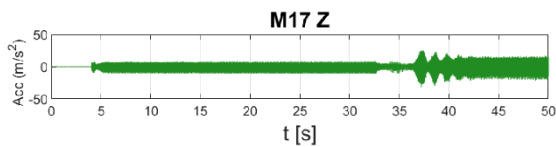
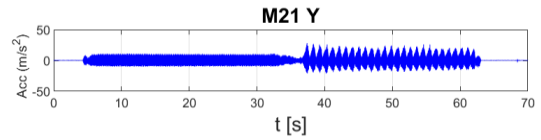
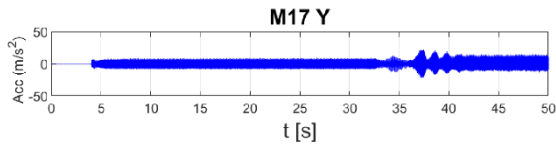
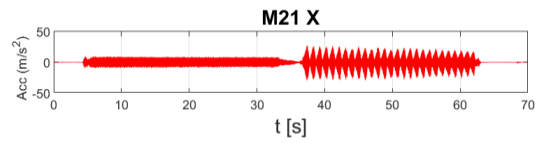
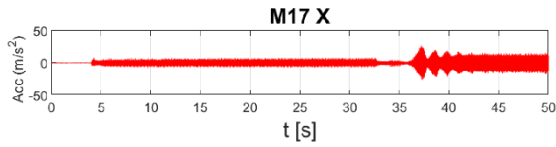


**Big Plus**

**ISO**







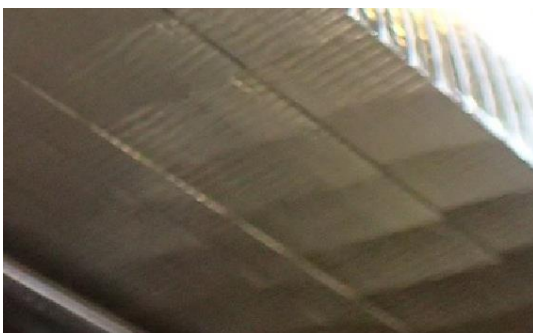
M19 n=597 1/min



M23 n=597 1/min



M19 n=637 1/min



M23 n=637 1/min



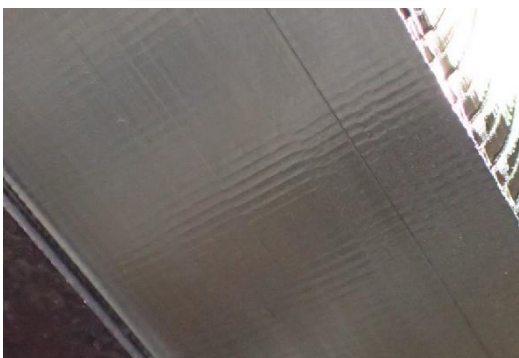
M17 n=597 1/min



M21 n=597 1/min



M17 n=637 1/min



M21 n=637 1/min

