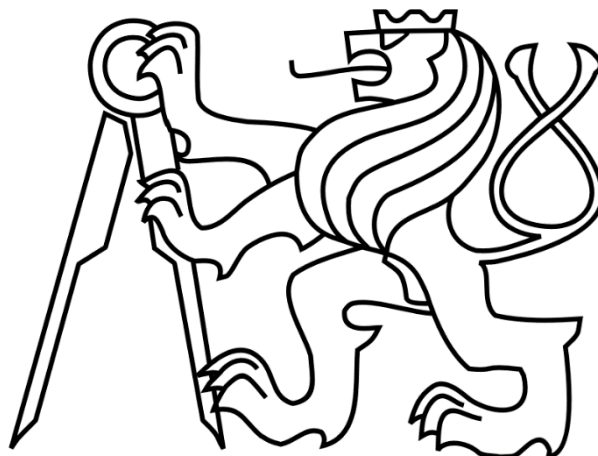


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

**Analýza dynamické poddajnosti frézovacího stroje
a zkouška využití výkonu**

2021

Richard Steiger

(Zadání)

Prohlášení

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

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

V Praze dne do 4.7.2021

.....

podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Petrovi Kolářovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, trpělivost a čas, který mi věnoval. Dále bych rád poděkoval konzultantům Ing. Miroslavovi Janotovi, Ph.D. (RCMT) a Ing. Tomášovi Kozlokovi (TOS Varnsdorf a.s.) za věcné připomínky a odborný dohled nad prací.

Velký podíl na úspěšném dokončení práce mají také lidé z TOS Varnsdorf a.s., kteří umožnili provedení zkoušek na daném obráběcím stroji.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří mi byli vždy během studia oporou a umožnili mi tak se soustředit na dokončení této práce.

Řešení této diplomové práce bylo podpořené projektem "Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství" CZ.02.1.01./0.0/0.0/16_026/0008404 prostřednictvím Operačního programu Výzkum, vývoj, vzdělávání (poskytovatel MŠMT ČR) a spolufinancován Evropskou unií.

Anotace

Autor:	Bc. Richard Steiger
Název DP:	Analýza dynamické poddajnosti frézovacího stroje a zkouška využití výkonu
Rozsah práce:	90 str., 71 obr., 8 tab., 16 příloh
Školní rok vyhotovení:	2020/2021
Škola:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
Konzultanti:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D., Ing. Tomáš Kozlok
Zadavatel:	TOS Varnsdorf a.s.
Využití:	Použití výkonových map a map limitní axiální hloubky třísky jako pomůcky pro zrychlení výkonových zkoušek a při volbě technologických parametrů stroje WHT110C pro dosažení stabilního obráběcího procesu s konkrétními nástroji.
Klíčová slova:	frézovací stroj, dynamická poddajnost, výkonové zkoušky, modální parametry, dynamické vlastnosti
Anotace:	Tato práce se zabývá měřením dynamické poddajnosti frézovacího stroje a výkonovými zkouškami, které mají za cíl ověřit, zda je možno přenést do řezu (stabilně obrábět) instalovaný výkon na vřetení. Pro zkrácení časů zkoušek obráběním bylo využito omezeného počtu měřících bodů, které byly následně pomocí modelu rozšířeny na celý pracovní prostor stroje. Výsledkem jsou mapy limitní axiální hloubky třísky a mapy využitelného výkonu pro měřené nástroje.

Annotation

Autor:	Bc. Richard Steiger
Title:	Analysis of milling machine dynamic compliance and test of spindle power utilization
Extent:	90 p., 71 fig., 8 tab., 16 attachments
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	doc. Ing. Petr kolář, Ph.D.
Consultants:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D., Ing. Tomáš Kozlok
Submitter of the Theme:	TOS Varnsdorf a.s.
Application:	Use of performance maps and limit axial chip depth maps as an aid to speed up performance tests and when selecting technological parameters of the WHT110C machine to achieve a stable machining process with specific tools.
Key words:	milling machine, dynamic compliance, performance tests, modal parameters, dynamic characteristics
Annotation:	This thesis deals with the measurement of the dynamic compliance of the milling machine and performance tests, which aim to verify whether it is possible to transfer to the cut (stable machining) the installed power on the spindle. To shorten the test times by machining, a limited number of measuring points were used, which were subsequently extended to the entire working space of the machine using a model. The result is maps of the limit axial depth of the chip and maps of usable power for the measured tools.



Obsah

Obsah	7
Seznam použitých zkratk a veličin.....	8
1 Úvod	10
2 Cíl práce.....	11
3 Stávající znalosti v problematice	12
3.1 Dynamické vlastnosti obráběcích strojů	12
3.2 Měření vibrací a dynamické poddajnosti	13
3.3 Samobuzené kmitání.....	32
3.4 Software pro identifikaci diagramu stability	36
3.5 Výkonové zkoušky obráběcích strojů	38
3.6 Shrnutí stávajících znalostí v problematice.....	40
4 Vlastní měření a vyhodnocení	42
4.1 Postup provedení zkoušky	42
4.2 Měřený stroj, nástroje a obrobek	43
4.3 Měření dynamické poddajnosti	46
4.4 Výkonové zkoušky obráběním	55
4.5 Kritické závěry z testů stroje WHT110C	72
4.6 Náhradní model poddajnosti stroje	73
4.7 Simulační model stability obrábění pro naměřená data.....	74
4.8 Simulace meze stability a výkonnostní mapy v celém pracovním prostoru stroje	77
5 Závěrečné shrnutí	81
Seznamy.....	82



Seznam použitých zkratk a veličin

Seznam použitých zkratk

FFT	Rychlá Fourierova transformace
FRF	Funkce frekvenčního přenosu
MKP	Metoda konečných prvků
MRR	Objem odebraného materiálu
PTK	Provozní tvary kmitů
RMS	Efektivní hodnota
SLD	Stability lobe diagram (diagram stability)
VBD	Vyměnitelná břitová destička

Seznam použitých veličin

A_d	Průřez třísky	[mm ²]
a_e, b	Radiální šířka záběru	[mm]
a_p	Axiální hloubka řezu	[mm]
$a_{p_{lim}}$	Mezní hloubka řezu	[mm]
B	Impedance systému	[dle odezvy]
c	Tlumení	[N.s/m]
c_q	Modální tlumení	[N.s/m]
F	Budící síla	[N]
F_c	Řezná (tangenciální) síla	[N]
FRF_{orient}	Orientovaná FRF	[m/N]
F_x	Složka řezné síly ve směru osy x	[N]
F_y	Složka řezné síly ve směru osy y	[N]
f	Frekvence	[Hz]
f_z	Posuv na zub	[mm]
H	funkce frekvenčního přenosu	[dle odezvy]
h_m	Střední tloušťka třísky	[mm]
j	Imaginární jednotka	[-]
K_c	Měrný řezný odpor	[MPa]



K_s	Měrný řezný odpor do směru aktivní složky síly	[MPa]
k	Tuhost	[N/m]
k_{cI}	Nominální řezný odpor	[MPa]
k_q	Modální tuhost	[N/m]
MRR	Objem odebraného materiálu	[cm ³ /min]
m	Hmotnost	[kg]
m_c	Katalogová konstanta pro výpočet řezného odporu	[-]
m_q	Modální hmotnost	[kg]
N_t	Počet zubů v záběru	[-]
P	Výkon vřetene	[W]
s	Laplaceova oblast	[-]
T	Perioda	[s]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
x	Výchylka	[m]
x	Osa x	[-]
y	Osa y	[-]
z	Počet zubů	[-]
β	Úhel do směru aktivní složky síly	[°]
γ	Koherence	[0 až 1]
ζ_q	Poměrný útlum	[-]
μ_x	Orientační faktor ve směru x	[-]
μ_y	Orientační faktor ve směru y	[-]
φ	Fáze	[°]
ω	Kruhová frekvence	[rad/s]
ω_n	Vlastní frekvence	[Hz]



1 Úvod

Nosná struktura by měla zajišťovat stroji takovou tuhost, aby bylo možno přenést do řezu stabilním obráběním výkon instalovaný na vřeteni. Toto je ověřováno pomocí zkoušky výkonového obrábění.

Z hlediska výrobních strojů je důležitým parametrem dynamická poddajnost. Jedná se o frekvenčně závislou charakteristiku stroje, která závisí na statické tuhosti a tlumení. Popisuje odezvu stroje na dynamické buzení.

Z tohoto důvodu se provádí zkoušky využití výkonu, aby se identifikovaly limity stroje pro konkrétní technologii a zjistilo se, zda konstrukce stroje umožňuje při této technologii přenést instalovaný výkon vřetena do stabilního řezného procesu.



2 Cíl práce

Cílem práce bude provést měření dynamické poddajnosti (FRF) na konci výsuvného vřetena s nasazenými třemi různými nástroji a na obrobku v mapě bodů v pracovním prostoru obráběcího stroje TOS Varnsdorf WHT110C.

Následně provést zkoušky obráběním, tj. určení velikosti přenositelného výkonu vřetena do řezu konkrétním nástrojem.

Jelikož je experimentální určení meze stability časově náročný úkon, bude identifikován řezný odpor nástrojů, což ve vazbě na měření FRF umožní zmenšit počet nutných testů.

Za využití modelu vznikne hustší síť pracovního prostoru stroje, kde se pak následně bude moci vykreslit mapa mezní třísky a využití výkonu vřetena pro daný nástroj. Vznikne tak možný návod pro volbu řezných a záběrových podmínek při použití daného nástroje.



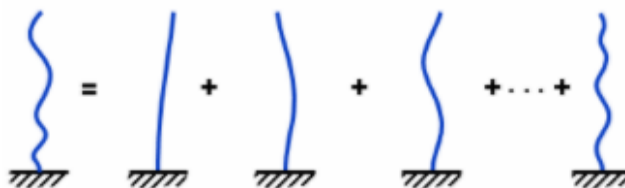
3 Stávající znalosti v problematice

3.1 Dynamické vlastnosti obráběcích strojů

Mezi dynamické vlastnosti obráběcích strojů, které se sledují, patří zejména vlastní frekvence, vlastní tvary kmitu a dynamická poddajnost. Tyto vlastnosti můžeme buďto simulovat nebo měřit. [1]

Matematických simulačních modelů (např. MKP analýza) je využíváno při prvotním návrhu stroje pro předvídání chování při dynamickém zatížení. Dalším využitím může být simulace odezvy konstrukce v důsledku změny některého z prvků systému. To je užitečné z důvodu, že se nemusí pokaždé provádět nákladné experimentální měření, které je nejen časově náročné, ale stroj je zároveň nucen být odstaven z provozu. Tyto modely pracují s hodnotami hmotností a tuhostí při aplikaci vazebních a okrajových podmínek, aby byla zachována podstata modelovaného tělesa, či systému těles. [2]

Příkladem komplexní analýzy struktury stroje pomocí experimentálních měření může být modální analýza (lze také provádět počtne pomocí MKP). Cílem modální analýzy je určit modální parametry: vlastní frekvence, vlastní tvary, relativní útlumy a průběh dynamické poddajnosti. Odezva systému na známé buzení lze rozložit na jednotlivé vlastní tvary kmitů neboli módy (*mode shapes*) pro jednotlivé vlastní frekvence soustavy (viz Obr. 3.1). Pro každý vlastní tvar kmitu se následně definují jeho modální parametry. Výsledek modální analýzy se často pro přehlednost vizualizuje jako síťové těleso složené z množství bodů, které kmitají s danou amplitudou a fází. [3]



Obr. 3.1 Vlastní tvary kmitů [3]



3.1.1 Základní rozdělení kmitání

Mechanické kmitání můžeme dělit podle několika kritérií. Jednou z nich je užitečnost kmitání. Obvykle považujeme kmitání za nežádoucí. To platí především u obráběcích strojů. Narušují obráběcí proces a mají škodlivý vliv na lidské tělo. Existují ale případy, kdy jsou vibrace užitečné, ba dokonce vyžadovány. Příkladem mohou být vibrační dopravníky nebo sbíječky. [4]

Důležitějším kritériem dělení je způsob vzniku, dle kterého můžeme kmitání rozdělit do tří kategorií – vlastní, vynucené a samobuzené kmitání. [4]

Vlastní kmitání je jev, pomocí kterého popisujeme dynamické vlastnosti daného systému. Vynucené kmitání je způsobená odezva na vnější buzení. Vztah mezi buzením (silou) a odezvou (výchylkou) popisuje FRF. Jedná se o zcela přirozený jev. Pokud dojde ke snížení budící amplitudy, sníží se také amplituda vibrací. [4, 5]

Samobuzené kmitání je ve výrobním procesu nežádoucí jev, který způsobuje nenadálé zvýšení amplitudy kmitání při obráběcím procesu bez zdánlivé vazby na frekvenci budícího signálu (obvykle zubová frekvence), což se zdá v rozporu s podstatou FRF. [6]

3.2 Měření vibrací a dynamické poddajnosti

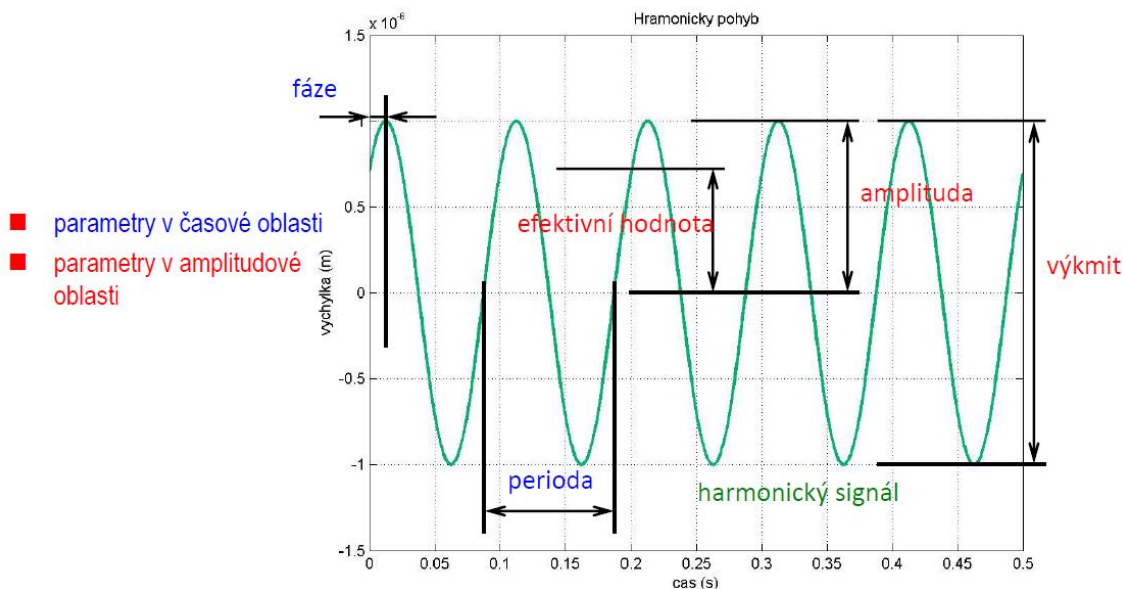
Vibrace lze popsat jako kmitání tělesa s konečnou amplitudou (výchylkou) kolem své rovnovážné polohy. [7]

Vibrace jsou způsobovány dynamickými silami, které budí konstrukci stroje. V reakci na budící sílu vzniká v buzeném materiálu odezva ve formě vibrací, tedy změny výchylky v čase. Dynamická poddajnost je frekvenčně závislý podíl výchylky kmitání a amplitudy budící síly. Čím je větší, tím je struktura poddajnější, a tedy pro buzení stejnou silou bude stroj kmitat s vyšší amplitudou. [2]

Zejména nebezpečným dynamickým chováním stroje je stav rezonance, který nastává, je-li stroj buzen některou z jeho vlastních frekvencí. V takovém případě razantně roste amplituda výchylky vibrací, která nežádoucím způsobem ovlivňuje řezný proces a může poškodit i samotný stroj. [2]

3.2.1 Frekvenční analýza

Při měření zaznamenáváme sledované veličiny jako spojitý signál v časové oblasti (viz Obr. 3.2). U harmonického signálu sledujeme především jeho periodu T a amplitudu A , potažmo fázi φ . Ostatní parametry lze dopočítat. Jak je vidět z obrázku, amplitudu odečítáme jako absolutní hodnotu výchylky. [4]

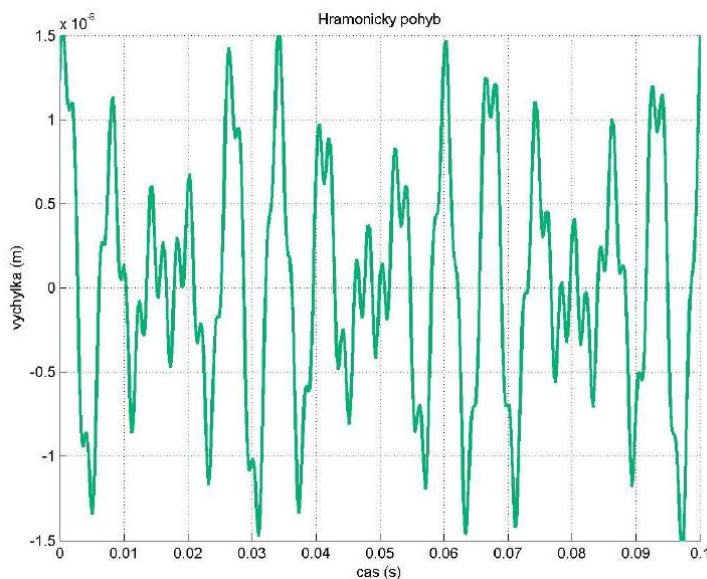


Obr. 3.2 Harmonický signál [4]

Efektivní hodnota (RMS) se získá podle rovnice (3.1). Tím lze vyjádřit signál jako jedinou hodnotu, což je vhodné například, chceme-li rychle porovnat více signálů. Ztrácí se zde ale informace o jeho charakteru. [4, 7]

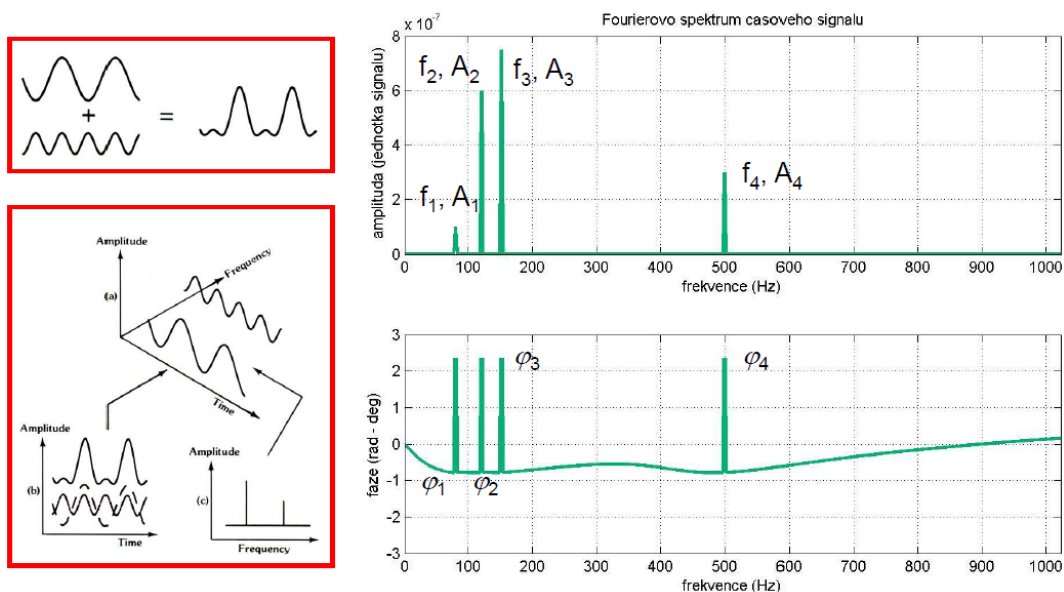
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t)^2 dt} \quad (3.1)$$

V praxi naneštěstí obvykle nenarazíme na signály s jedinou frekvencí, ale na signál, který se skládá z více harmonických funkcí, jako je vidět na Obr. 3.3. [4]



Obr. 3.3 Složený signál v časové oblasti [4]

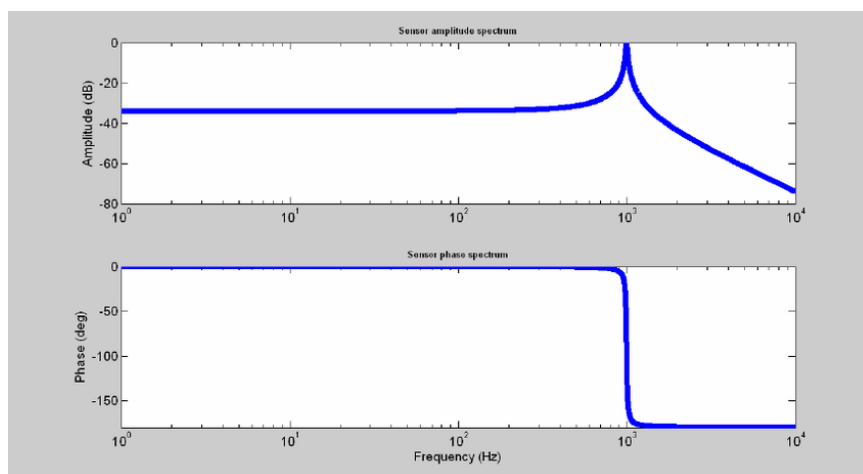
Časový průběh signálu ale není pro diagnostiku příliš informativní. Z tohoto důvodu je vhodné převést signál na frekvenční spektrum pomocí Laplaceovy a Fourierovy transformace (viz Obr. 3.4). Nyní jasně vidíme, z kolika jednotlivých harmonických signálů byl výsledný signál složen a jaké jsou jejich hodnoty amplitudy A , periody T (převrácená hodnota frekvence f) a fáze φ . Toto je preferované zobrazování v analýze signálů. Frekvenční spektrum zobrazuje velikost amplitudy kmitání na konkrétní frekvenci. Umožňuje nám rychle analyzovat signál a výsledky použít při dalším zpracovávání. [7]



Obr. 3.4 Frekvenční spektrum složeného signálu [4]



Po určení vlastních frekvencí konstrukce z modální analýzy nám pomůže k ověření, zda se skutečně jedná o vlastní frekvence systému vykreslení ve amplitudo-fázové charakteristice, známé také jako Bode diagram (viz Obr. 3.5). Zde můžeme vidět, že vlastní frekvence je doprovázena změnou fáze o 180° . To může být jedním z možných nástrojů pro kontrolu. Další vlastností vlastní frekvence je, že hodnota koherence je na ní vždy velmi blízká jedné (viz kapitola 3.2.4). [8]



Obr. 3.5 Příklad změny fáze o 180° na vlastní frekvenci v Bode diagramu [9]

3.2.2 Funkce frekvenčního přenosu – FRF

Mechanický systém s jedním stupněm volnosti můžeme zapsat pomocí rovnice (3.2). Kde m je hmotnost, c tlumení, k tuhost systému, F budící síla a x výchylka. [4]

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = F(t) \quad (3.2)$$

Pokud vytkneme proměnnou x a provedeme Laplaceovu transformaci nahrazením derivace násobkem s , pak dostaneme rovnici (3.3). [4]

$$(m \cdot s^2 + c \cdot s + k) \cdot x(s) = F(s) \quad (3.3)$$

Obsah závorky před x nazveme impedance systému B . Následně dosazením H za převrácenou hodnotu B do rovnice (3.3) a její úpravou získáme vztah (3.4). S náhradou Fourierovou transformací dostaneme v rovnici (3.5), závislost odezvy x na buzení F ve frekvenční oblasti $j\omega$. Proměnná H zde značí funkci frekvenčního přenosu (*frequency response function* – FRF) a jedná se o stěžejní parametr při frekvenční analýze. [2, 4]

$$x(s) = H(s) \cdot F(s) \quad (3.4)$$



$$H(j\omega) = \frac{x(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{\text{výstup}}{\text{vstup}} = FRF \quad (3.5)$$

V závislosti na tom, jakou veličinu odečítáme jako odezvu se FRF označuje jako:

- Akcelerance [(m/s²)/N]
- Pohyblivost [(m/s)/N]
- Dynamická poddajnost [m/N]

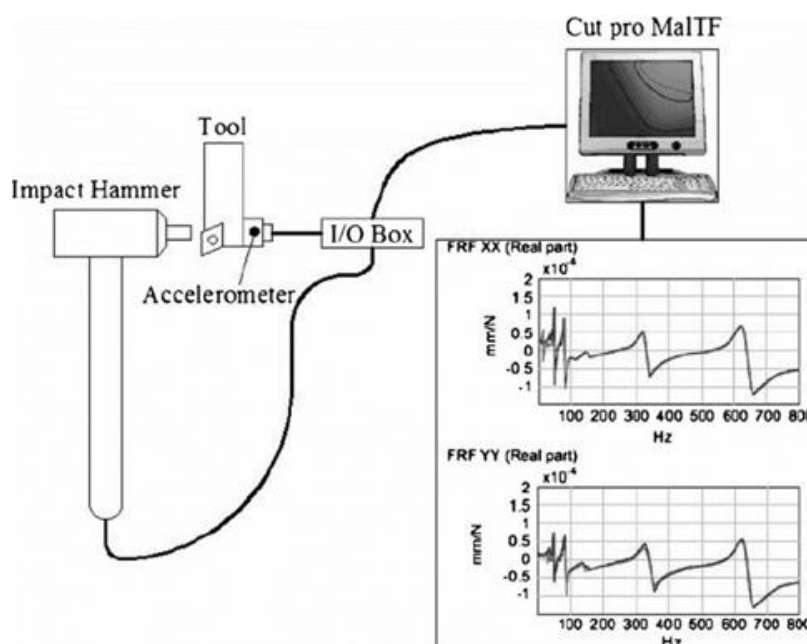
Z předchozích řádek lze konstatovat, že FRF popisuje vztah mezi dynamickým vstupem a výstupem ze systému v ustáleném stavu, má reálnou a imaginární složku a je závislá na konstrukci stroje, tj. závisí na distribuci hmoty a tuhosti. Mezi jednotlivými typy FRF můžeme snadno přecházet pomocí integrací a derivací. [7]

Jak již bylo popsáno, na průběh FRF má vliv hmotnost, tuhost a tlumení systému. Statickou poddajnost (převrácenou hodnotu tuhosti), můžeme odečíst na nulové frekvenci. V praxi se tato hodnota odečítá jen stěží, protože při měření je v této oblasti velký šum. S rostoucí tuhostí se také posouvají vlastní frekvence systému k vyšším hodnotám. To je pro nás výhodné zejména z důvodu, že budící frekvence z řezného procesu a od motorů se obvykle nachází na nižších hodnotách. S rostoucím tlumením klesá amplituda beze změny vlastní frekvence. Dochází čistě k jejímu útlumu. Při zvýšení hmotnosti se vlastní frekvence posouvá k nižším hodnotám a mírně roste jejich amplituda. Navíc dochází rychlejšímu poklesu amplitudy ve vyšších frekvencích. [4]

3.2.3 Princip experimentálního měření FRF

Jak již bylo řečeno, princip experimentálního měření dynamické poddajnosti spočívá v měření odezvy systému na budící sílu. [2]

Na Obr. 3.6 vidíme, že pro buzení síly se nejčastěji používá rázové kladivo (někdy také nazývané též modální nebo impulzní kladivo). Součástí rázového kladiva je akcelerometr, který po integrování signálu odesílá do měřícího programu informace o průběhu budící síly v čase. Naproti kladivu vidíme na konci nástroje upnutý akcelerometr. Ten odesílá informace o průběhu odezvy zrychlení v čase. Toto jsou potřebné informace, které se přes měřící kartu nahrají do vyhodnocovacího programu, kde dojde k vykreslení obou průběhů. [2]

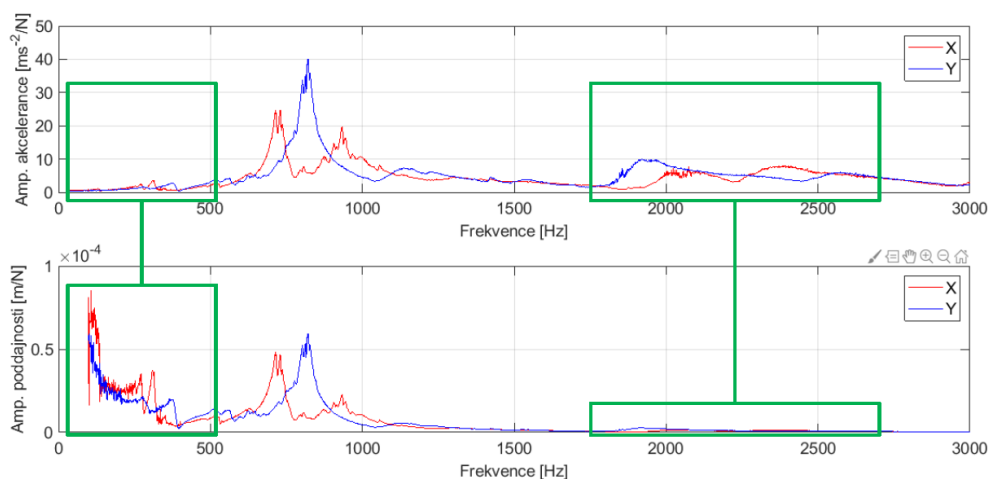


Obr. 3.6 Schéma procesu měření FRF [10]

V závislosti na orientaci akcelerometru a směru úderu kladiva získáme z měření výsledné odezvy v různých směrech (osách nástroje). Systém bude kmitat pouze na svých vlastních frekvencích, takže pokud tyto budící frekvence nejsou obsaženy v úderu impulzního kladiva, systém se nerozkmitá. [2]

Pro další možnosti zpracování se oba signály převedou na frekvenční spektrum pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Následně dojde k jejich podílu odezva / buzení, čímž dostaneme funkci frekvenčního přenosu neboli FRF. Tím získáme výsledný přenos mezi místem kde působila budící síla a místem odezvy. [5]

Primárním výsledkem tohoto přenosu je akcelance (viz Obr. 3.7 nahoře). Pokud se chceme dostat k samotné dynamické poddajnosti, musíme přenos nejprve integrovat (viz Obr. 3.7 dole). Měřící softwary mají naštěstí tuto funkci již vestavěnou. Z obrázku je také patrné, že integrací signálu se zesilují amplitudy na nízkých frekvencích a naopak, u vysokých frekvencí dochází k útlumu amplitudy. Proto je například vhodné hledat vlastní frekvence systému v průběhu akcelance, protože pokud se nachází na vyšších frekvencích, v průběhu dyn. poddajnosti bychom je vůbec nemuseli registrovat. [4, 5]



Obr. 3.7 Vizualizace FRF akcelerance (nahore) a dyn. poddajnosti (dole) [5]

3.2.4 Metody měření odezvy a vlastnosti signálů

Provozní tvary kmitů

Měření PTK neboli provozních tvarů kmitů se provádí, jak už název sám napovídá, za provozu stroje. K měření nám poslouží pouze akcelerometry pro měření odezvy. Nepotřebujeme budící aparaturu, protože systém je buzen svou běžnou činností (např. řezným procesem). Z tohoto důvodu neznáme přesnou povahu budící síly. Výhodou tohoto typu měření je fakt, že stroj zůstává v provozu a nemusí být odstaven. K měření PTK přistupujeme obvykle pokud zaznamenané, že za provozu stroje nastává nějaký problém, který chceme odstranit. [11]

Lze tak identifikovat původce problému dle frekvence, kde se objevuje nepřirozeně vysoká amplituda. Příkladem může být nevyváženost soustavy, vůle nebo poškození valivých těles ložisek. Ve skutečnosti ovšem identifikace takových problémů není jednoduchá a je vyžadována praxe v oboru. [7]

Systém měříme v diskrétních bodech dle dostupného počtu akcelerometrů buďto najednou nebo postupně. Převádíme tak spojitou strukturu na síťový model, kde máme informace o odezvě pouze v uzlových bodech. Zbytek modelu slouží čistě k lepší názornosti zobrazovaného objektu. Jediným požadavkem na měření PTK je, aby budící proces, přestože je neznámého charakteru, byl stálý (neměnila se jeho frekvence) po celou dobu výkonu měření. Proměnná frekvence buzení by vracela nepoužitelné výsledky. [12]



Modální analýza

Základ modální analýzy je stejný jako v případě PTK. Také se měří odezva v závislosti na buzení. Odlišnost je v tom, že při modální analýze budíme systém známou silou. Toho můžeme dosáhnout pomocí rázového kladiva nebo jiného budiče, například vibrátoru. Výsledkem jsou pak vlastní tvary kmitů na vlastních frekvencích. Vlastní tvary kmitů lze následně vizualizovat např. na síťovém modelu systému pro lepší znázornění dynamického chování. Lze tak často odhalit slabá místa konstrukce, která se mohou vyztužit, aby stroj při buzení danou frekvencí tolik nekmital. [11]

Druhou částí modální analýzy po získání FRF z měření je odhad tzv. modálních parametrů. Tedy vlastních frekvencí, modálního tlumení, hmotnosti a tuhosti pro jednotlivé módy. S tím úzce souvisí určování pólů z FRF. [12, 13]

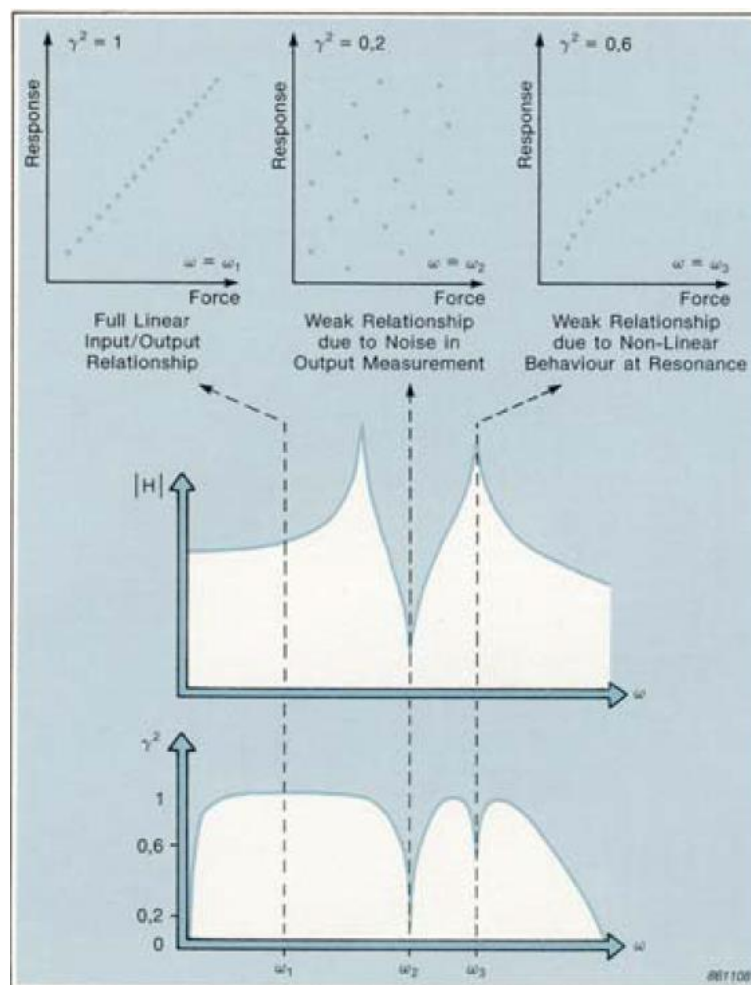
Koherence

Průběh koherentní funkce nám říká, jak kvalitní měření bylo provedeno, tedy linearitu mezi vstupem a výstupem (viz Obr. 3.8). Koherence se značí γ a je závislá na auto spektrech a cross spektrech přenosu, jak plyne z rovnice (3.6). [2]

Nabývá hodnot od 0 do 1, jak je vidět v rovnici (3.7), kde jednička značí, že v měření není žádný šum (*noise*), tedy kvalitní měření. A nula označuje, že měření obsahuje pouze šum. Při měření se vždy snažíme docílit co největší hodnoty koherence pro frekvenční oblast, kde očekáváme měřenou odezvu. [2]

$$\gamma(\omega)^2 = \frac{|G_{FX}(\omega)|^2}{G_{XX}(\omega) \cdot G_{FF}(\omega)} \quad (3.6)$$

$$0 \leq \gamma(\omega)^2 \leq 1 \quad (3.7)$$



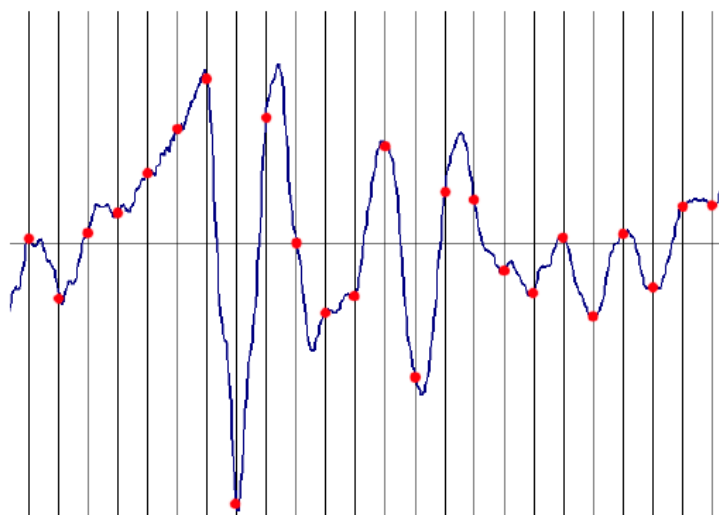
Obr. 3.8 Vliv koherence na kvalitu vyhodnocovaného přenosu [2]

Koherenci používáme při vícekanálových měřeních ke zjištění závislosti mezi dvěma signály. To znamená, že pokud je koherence nízká, je odezva závislá i na nějakém jiném signálu než na buzení. Příčinou může být rušení z cizího zdroje nebo poškození akcelerometru, popřípadě jeho kabelu. [2, 14]

Koherenci je třeba stanovit až po provedení opakovaného měření, protože po prvním měření má koherence vždy hodnotu rovnou jedné. Míra závislosti mezi signály se projeví až s opakováním daného měření. [14]

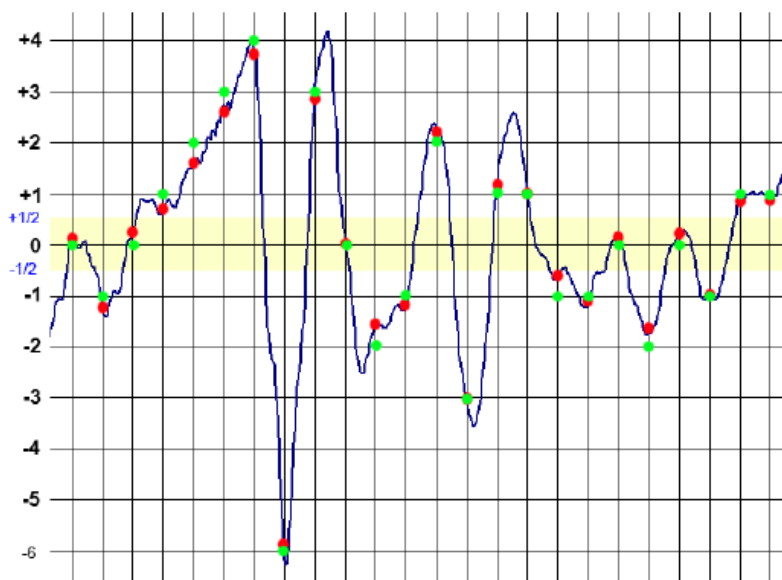
Diskretizace signálu pomocí převodníku

Vzorkovací frekvence (viz Obr. 3.9) nám udává, po jakých časových intervalech provádíme diskretizaci analogového signálu. V „mezerách“ mezi těmito body nemáme informaci o charakteru signálu. [15]



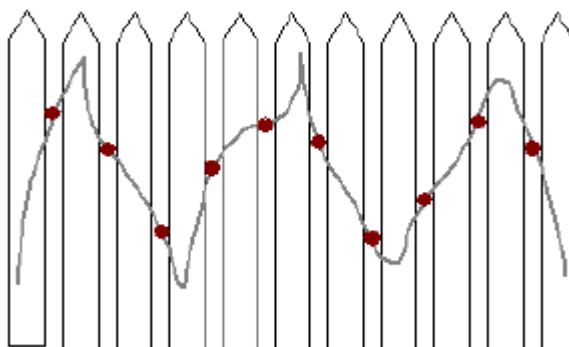
Obr. 3.9 Vzorkování analogového signálu [15]

Kvantování (kvantizační úroveň) udává schopnost převodníku zobrazovat přesné hodnoty. Pro realizaci diskretizace signálu je třeba hodnoty funkce aproximovat (zaokrouhlit). S rostoucí úrovní převodníku se zvyšuje počet vzorků, což zvyšuje rozlišení snímání amplitudy. Na Obr. 3.10 můžeme vidět červeně označené reálné hodnoty odpovídající analogovému signálu a zeleně označené kvantované hodnoty. Žluté pásmo značí zaokrouhlovací oblast dané hodnoty. [15]



Obr. 3.10 Kvantování signálu [15]

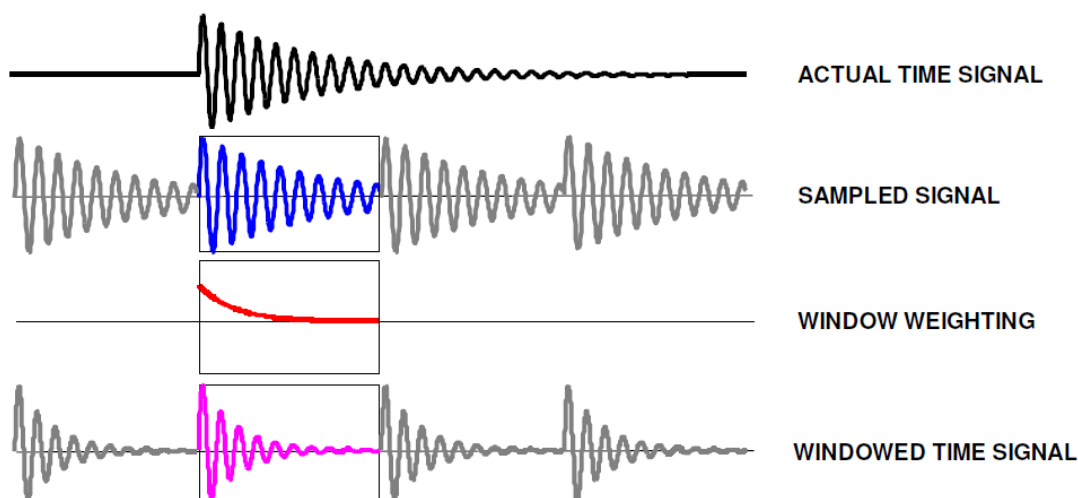
S nevhodným vzorkováním se nám může diskretizovaný signál výrazně lišit od původního analogového signálu. Tento fenomén se v angličtině označuje jako „*The Picket Fence Effect*“, neboli efekt plaňkového plotu. Jak je z Obr. 3.11 vidět, kvůli hrubé vzorkovací frekvenci nebyl postihnut celkový průběh signálu a jisté extrémní tak zůstaly nezaznamenány, přestože se v měřeném signálu vyskytovaly. [16]



Obr. 3.11 Efekt plaňkového plotu [16]

Časová okna

Pokud se měřený signál neutlumí během doby jednoho časového vzorku (viz Obr. 3.12), bude nejspíš zapotřebí použití časových oken. Časová okna (*windows*) slouží k tlumení signálu v rámci časového vzorku pomocí váhové funkce. Někdy může postačovat prodloužení doby časového vzorku. To se provede zvětšením frekvenčního rozsahu spektra nebo zvýšením počtu spektrálních čar FFT analyzátoru. [15, 17]

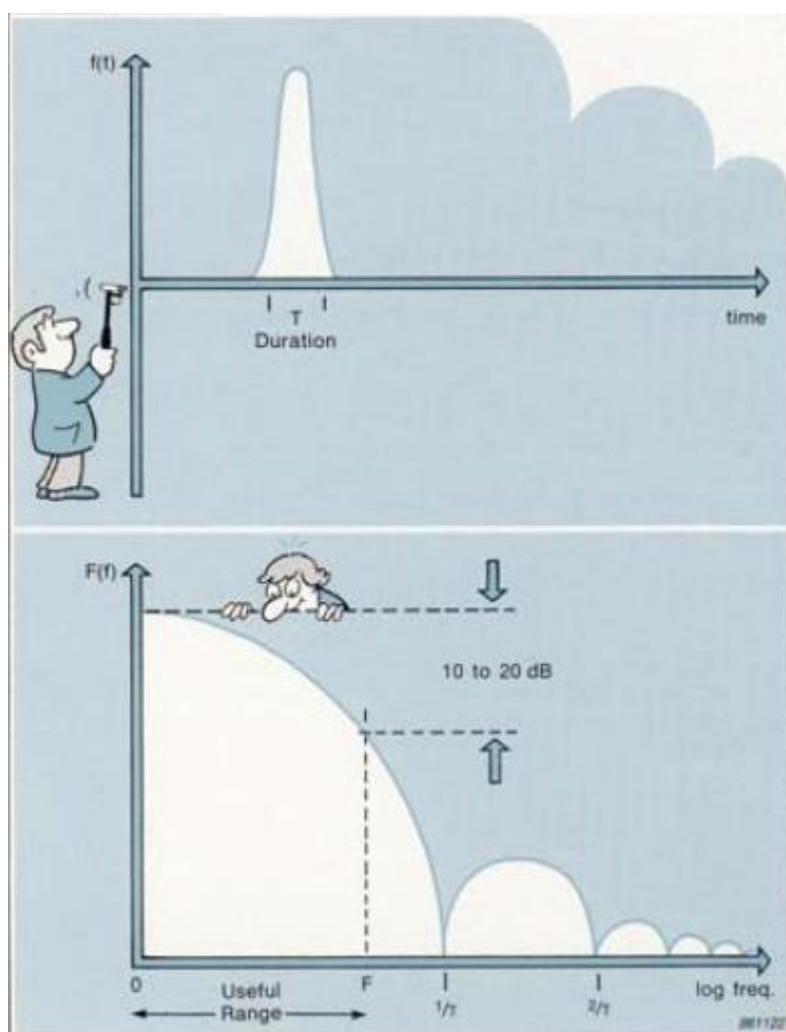


Obr. 3.12 Použití časového okna [17]

3.2.5 Měřicí aparatura

Rázové kladivo

Rázové (modální) kladivo je nástroj, který se běžně využívá pro vyvození budícího impulsu síly do systému, ze kterého požadujeme odezvu. Tento typ kladiva je speciální v tom, že jeho součástí je siloměr, který zaznamenává hodnotu síly v závislosti na čase. Pro správnou funkčnost je též vybaveno snímačem, který eliminuje parazitní sílu, která vzniká při úderu kladivem v důsledku změny jeho zrychlení. [18]



Obr. 3.13 Užitečný frekvenční rozsah v závislosti na délce úderu [2]

Frekvenční rozsah, který jsme s kladivem schopni vybudit závisí výrazně na délce úderu. Čím je úder kratší, tím je pásmo vybuděných frekvencí širší. Délka úderu klesá s tvrdostí hrotu. Použijeme-li kladivo s tvrdým (ocelovým) hrotem dokážeme vybudit výrazně vyšší frekvence (až 7 kHz) než s použitím měkkého (pryžového hrotu). To, jaký hrot



použijeme závisí na typu testovaného objektu. S použitím tvrdého hrotu může dojít k nevratnému poškození malých součástí. Nejlepších výsledků bychom dosáhly, kdybychom systém budili Diracovým impulsem. Ten má nekonečnou amplitudu v nulovém čase a byl by tedy schopen vybudit celé spektrum frekvencí. Realisticky toho bohužel nejsme schopni dosáhnout. [18]

Průběh budící síly je spojitá klesající funkce s maximální amplitudou síly na frekvenci 0 Hz. Průběh je periodického charakteru s nulovou amplitudou v násobcích periody trvání úderu, jak je vidět na Obr. 3.13. V praxi ale uvažujeme užitečný frekvenční rozsah jako oblast frekvencí, než amplituda poklesne zhruba o 10 až 20 dB. Přepočet na decibely je vidět na rovnici (3.8). [2, 7]

$$N[dB] = 20 \cdot \log_{10}(N[abs]) \quad (3.8)$$

V některých případech se může stát, že s malým kladivem nedokážeme vyvinout dostatečnou sílu pro to, abychom systém rozvibrovali. V takovém případě jsme nuceni k použití většího kladiva nebo přidání dodatečné hmoty na kladivo (viz Obr. 3.14). S rostoucí hmotností kladiva sice klesá užitečné spektrum frekvencí, ale obvykle nás při vibrodiagnostice zajímají nižší frekvence (obvykle desítky až stovky Hz). [2]



Obr. 3.14 Různé velikosti rázových kladiv [18]

Vibrátory

Jak je někdy mylně považováno, vibrátory neslouží k vyvozování větších budících sil než rázová kladiva. Jejich specifikou je to, že na rozdíl od rázových kladiv, u nichž má průběh budící síly charakter jednoho pulsu, dokážou vibrátory budit funkci takřka o libovolném průběhu. To může být užitečné, chceme-li například simulovat průběh řezného procesu a sledovat tak chování stroje. [2]



Budit můžeme například náhodným signálem. Na každé frekvenci v daném rozsahu má signál náhodnou hodnotu amplitudy a fáze. Kdybychom hodnoty amplitud na jednotlivých frekvencích zprůměrovali, získali bychom relativně hladkou vodorovnou křivku. To značí, že energie pro buzení jednotlivých frekvencí je přibližně shodná. Budící signál vzniká jako spojitý, ale s konečnou délkou. To může způsobit jisté potíže. Proto je dobré použití vibrátoru kombinovat s využitím váhové funkce, například Hanningova okna. [2]

Dalším příkladem může být pseudo-náhodný signál. Ten se periodicky opakuje. Vznikají tak informace pouze na diskrétních frekvencích. [2]

Relativní snímače

Snímače dělíme na relativní a absolutní. Relativní snímač je umístěn na pevné neklidující základně, která musí být od měřené konstrukce patřičně odizolována. Jejich výhodou je, že jsou často bezkontaktní a umožňují tak měřit například rotující objekty nebo části, u kterých by použití kontaktního snímače (např. akcelerometru) způsobilo významné zvýšení hmotnosti a s tím spojené změny vlastností, především změnu vlastní frekvence. Nemají také omezení způsobené změnou teploty objektu. [4]

Příkladem relativního snímače je dopplerovský laser, který umožňuje bezdotykové měření rychlosti. Omezen je pouze drsností a odrazivostí měřeného povrchu. Snímač je teoreticky schopen měřit až na vzdálenost 25 m, ale jelikož pracuje na principu odrazu laserového paprsku, je vyžadován volný průchod mezi snímačem a měřeným objektem. To vznáší nároky na čistotu provozu, protože velké množství prachu v ovzduší by způsobovalo chybné výsledky. [4]

Eddy Current sonda je dalším zástupcem relativních snímačů. Na rozdíl od dopplerovského laseru pracuje na principu vířivých proudů. To do značné míry omezuje její použití. Má velmi malý měřicí rozsah (2 mm) a musí být napájena. Jedná se opět o bezdotykové měření vibrací povrchu objektu, ale z povahy snímače lze použít pouze pro měření kovových součástí. [4]

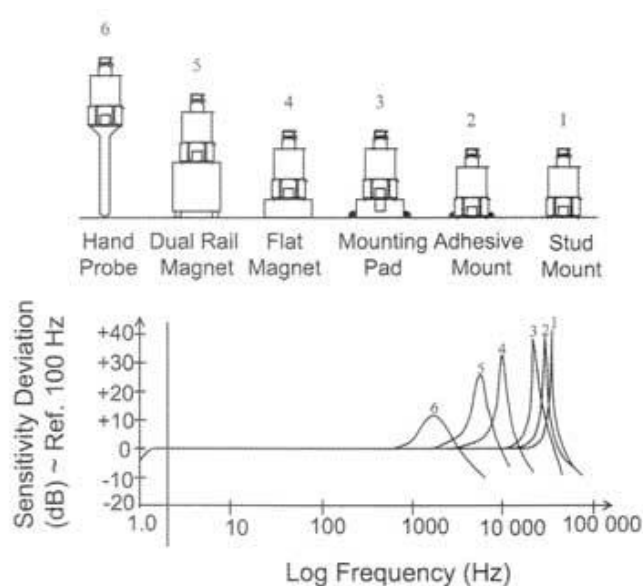


Absolutní snímače

Absolutní snímač je pevně spojen s měřenou strukturou a kmitá spolu s ní. Typickým příkladem je piezoelektrický akcelerometr. Jeho základem je piezokrystal, který se v důsledku zrychlení hmoty deformuje a my tak odečítáme elektrický signál (napětí), který je úměrný měřenému zrychlení. [7]

Hlavní vlastnosti, které je u akcelerometrů třeba sledovat jsou citlivost a dynamický rozsah. Citlivost nám značí, pro jakou velikost napětí přiřazujeme hodnotu významové fyzikální veličiny (zde zrychlení). Dynamický rozsah určuje maximální velikost měřitelného zrychlení. Zde je důležité si uvědomit, že pro správnou funkci akcelerometru musíme používat pouze lineární část charakteristiky mezi zrychlením a napětím. [7]

Jelikož se jedná o snímač měřící zrychlení je zcela jasné, že při nulové frekvenci bude výstupem nula. Sám snímač můžeme vnímat jako samostatnou soustavu hmota, pružina tlumič. Tudíž má také vlastní frekvenci. Právě vlastní frekvence akcelerometru omezuje jeho frekvenční rozsah. S přibližováním se vlastní frekvenci už totiž citlivost není konstantní. [7]



Obr. 3.15 Vliv způsobu montáže akcelerometru na jeho vlastní frekvenci [19]

U akcelerometrů je důležitý způsob montáže na měřený objekt. Způsob montáže přímo ovlivňuje použitelné (měřící) frekvenční pásmo. Nejlepším způsobem je montáž pomocí šroubu (viz Obr. 3.15). To ale znamená, že do měřené struktury musejí být vyřezány závity, což je obvykle nežádoucí, zvláště jedná-li se o ojedinělé měření. Pokud se na stroji

měří častěji, může být uvažováno o zhotovení permanentních měřících bodů. Dalšími běžně používanými metodami jsou připevnění pomocí magnetu nebo pomocí včelího vosku. [7, 19]

Akcelerometry se vyrábějí ve dvou základních provedeních – jednoosé a tříosé. Pro změření FRF postačuje i dvou kanálová měřící karta se vstupy pro rázové kladivo a jednoosý akcelerometr. Pokud se ale provádí měření odezvy ve více osách, je nutné akcelerometr vždy přemístit do směru patřičné osy a měření opakovat. S přesností napolohování akcelerometru pak souvisí regulérnost provedeného měření. Pokud to podmínky dovolují, je dobré použít vícekanálovou měřící kartu v kombinaci s tříosým akcelerometrem, kde pak stačí provést jen jedno měření (budíme-li pouze v jednom směru). [20, 21]

Některé typy akcelerometrů potřebují ještě ke správnému fungování zesilovač kvůli nižší hodnotě citlivosti. Takové snímače jsou označovány jako ICP. [19]

Při umísťování snímačů je třeba brát zřetel na způsob vedení jejich kabelů. Stínění kabelů nesmí být porušeno, kabely by se neměly křížit a neměly by se nacházet v blízkosti energetických kabelů z důvodu možného rušení signálu. Pokud možno, v průběhu měření by se s kabely ani nemělo pohybovat. Na Obr. 3.16 vidíme sestavení měřící aparatury pro cvičné měření, kde byla zároveň provedena i kalibrace. [7]



Obr. 3.16 Zapojení měřící aparatury pro cvičné měření FRF



Kalibrace: rázové kladivo & akcelerometr

Před každým měřením je vždy dobré ověřit, zda naše snímače správně fungují, a že se nezměnily jejich vlastnosti. Nejjednodušším způsobem je kalibrace měřením akcelerance u tělesa o známé hmotnosti. Z Newtonova zákona (3.9) máme vztah pro zrychlení. Pro akceleranci platí, že se jedná o zrychlení ku síle (3.10). Po dosazení z (3.9) nám vyjde, že se rovněž rovná jedna ku hmotnost tělesa. [2]

$$F = m \cdot a \quad (3.9)$$

$$A(\omega) = \frac{a}{F} = \frac{1}{m} \quad (3.10)$$

Aby byla dvojice měřidel nastavena správně, pro všechny frekvence, kde budeme chtít měřit by měla hodnota akcelerance být rovna $1/m$, kde m je celková hmotnost měřené hmoty a připojeného akcelerometru. [2]

Samotné měření se provádí tak, že se hmota volně zavěsí jako závaží, aby se mohla pohybovat pouze v jednom směru (ve směru buzení – úderu rázovým kladivem). Toto měření několikrát opakujeme. Výsledné hodnoty by se od teoretické neměly lišit o více jak 7 %. V případě velkých rozdílů je třeba v měřícím software přenastavit hodnotu citlivosti některého ze snímačů. Proces se opakuje, dokud naměřená a teoretická hodnota akcelerance nejsou v patřičných mezích. [2, 22]

Důležité je si uvědomit, že takto provedená kalibrace je platná pouze pro danou kombinaci akcelerometru a rázového kladiva. Pro jinou dvojici snímačů je třeba provést novou kalibraci. [22]

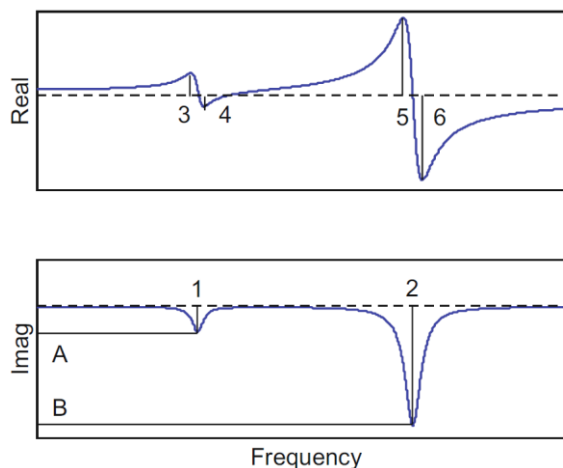
Výrobci měřící aparatury

Toto jsou pouze některé z mnoha společností, které se zabývají výrobou a prodejem snímačů a vibrodiagnostikou. [12]

- Brüel & Kjær
- ROGA Instruments
- AURA a.s.
- PCB Piezotronics
- Endevco
- Adash

3.2.6 Identifikace modálních parametrů ze změřené FRF

Z naměřeného průběhu FRF jsme schopni identifikovat modální parametry, které můžeme následně použít pro virtuální model FRF. Jak jsme si již řekli, průběh FRF je tvořen komplexními čísly, takže ji můžeme zobrazit odděleně jako reálnou a imaginární složku, jak je vidět na Obr. 3.17. [23]



Obr. 3.17 Reálná a imaginární složka FRF [23]

Z lokálních minim imaginární složky jsme schopni odečíst hodnotu vlastních frekvencí ω_{n1} a ω_{n2} jednotlivých vlastních kmitů (modů), zde označené čísly 1 a 2. Na tomto příkladu vidíme dvě vlastní frekvence. Bude se tedy jednat o systém se dvěma stupni volnosti. Z této informace již nyní víme, že rozměry modálních matic hmotnosti, tuhosti a tlumení budou 2x2. [23]

Na reálné složce FRF jsme schopni v blízkosti vlastní frekvence odečíst lokální extrémní funkce ω_3 a ω_4 pro první mód a ω_5 , ω_6 pro druhý mód. Dle rovnic (3.11) jsme schopni vypočítat hodnoty poměrného útlumu ξ_{q1} a ξ_{q2} , kde ω je v Hz. [23]

$$\xi_{q1} = \frac{\omega_4 - \omega_3}{2 \cdot \omega_{n1}} \quad ; \quad \xi_{q2} = \frac{\omega_6 - \omega_5}{2 \cdot \omega_{n2}} \quad (3.11)$$

Z hodnot **A** a **B** imaginární složky na vlastních frekvencích určíme modální tuhosti k_{q1} a k_{q2} jednotlivých módů dle rovnic (3.12). [23]

$$k_{q1} = \frac{-1}{2 \cdot \xi_{q1} \cdot A} \quad ; \quad k_{q2} = \frac{-1}{2 \cdot \xi_{q2} \cdot B} \quad (3.12)$$

Z hodnot vlastních frekvencí a modálních tuhostí jsme schopni určit modální hmotnosti m_{q1} a m_{q2} dle rovnic (3.13). Aby odpovídali jednotky, musíme frekvenci ω v Hz vynásobit 2π , abychom získali jednotku rad/s. [23]



$$m_{q1} = \frac{k_{q1}}{(2 \cdot \pi \cdot \omega_{n1})^2} ; m_{q2} = \frac{k_{q2}}{(2 \cdot \pi \cdot \omega_{n2})^2} \quad (3.13)$$

Jak je vidět na rovnicích (3.14), nyní máme všechny potřebné veličiny pro výpočet posledního modálního parametru – modálního tlumení c_{q1} a c_{q2} . [23]

$$c_{q1} = 2 \cdot \xi_{q1} \cdot \sqrt{k_{q1} \cdot m_{q1}} ; c_{q2} = 2 \cdot \xi_{q2} \cdot \sqrt{k_{q2} \cdot m_{q2}} \quad (3.14)$$

Nyní jsme schopni zapsat modální matice M_q , C_q a K_q jak je ukázáno v rovnicích (3.15). Jak již bylo řečeno dimenze matic odpovídají počtu módů. Ze zápisu je též vidět, že se jedná čistě o diagonální matice. [23]

$$M_q = \begin{bmatrix} m_{q1} & 0 \\ 0 & m_{q2} \end{bmatrix} kg; K_q = \begin{bmatrix} k_{q1} & 0 \\ 0 & k_{q2} \end{bmatrix} \frac{N}{m}; C_q = \begin{bmatrix} c_{q1} & 0 \\ 0 & c_{q2} \end{bmatrix} N \cdot s/m \quad (3.15)$$

Nyní když známe podální parametry, můžeme je použít k rekonstrukci původního signálu FRF. Jak vyplývá z rovnic (3.16) a (3.17), lze výpočet opět rozložit na reálnou a imaginární složku kde $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ pro příslušný mód. [23]

$$Re\left(\frac{X}{F}\right) = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{1-r^2}{(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2} \right) \quad (3.16)$$

$$Im\left(\frac{X}{F}\right) = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{-2 \cdot \xi \cdot r}{(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2} \right) \quad (3.17)$$

Což můžeme sloučit do celkového předpisu pro komplexní FRF dle vzorce (3.18), protože celková FRF je součet jednotlivých módů, kde N je počet módů, z kterých rekonstruujeme původní naměřenou FRF a j je imaginární jednotka. [21]

$$FRF\left(\frac{X}{F}\right) = \sum \left(\frac{1}{k_{qN}} \cdot \left(\frac{(1-r_N^2) - j \cdot (2 \cdot \xi_{qN} \cdot r_N)}{(1-r_N^2)^2 + (2 \cdot \xi_{qN} \cdot r_N)^2} \right) \right) \quad (3.18)$$

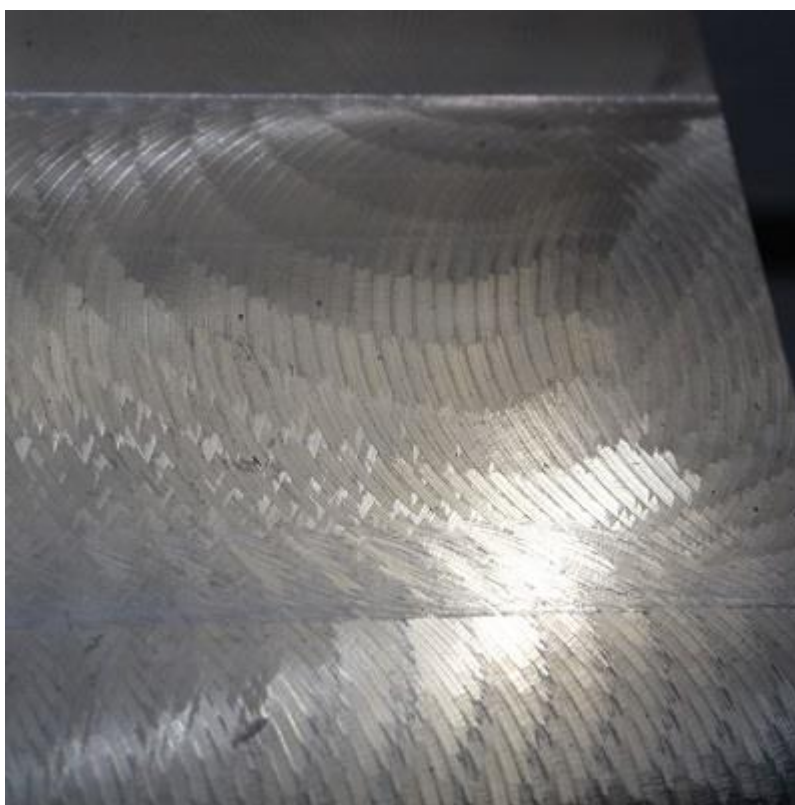
Někdy se stane, že nám původní a rekonstruovaná FRF amplitudově neseďí. To může být způsobeno tím, že ve frekvenčním spektru, které používáme pro výběr módů, které nejlépe postihnou celkový průběh FRF, nejsou obsaženy módy na vyšších frekvencích, které sice nemáme v záznamu, ale ve skutečnosti existují. V tom případě můžeme rovnici přenásobit koeficientem $\frac{1}{k}$ dle rovnice (3.19), kde k volíme tak, aby nám křivky co nejlépe odpovídaly. [23]

$$FRF\left(\frac{X}{F}\right) = \frac{1}{k} \cdot \sum \left(\frac{1}{k_{qN}} \cdot \left(\frac{(1-r_N^2) - j \cdot (2 \cdot \xi_{qN} \cdot r_N)}{(1-r_N^2)^2 + (2 \cdot \xi_{qN} \cdot r_N)^2} \right) \right) \quad (3.19)$$



3.3 Samobuzené kmitání

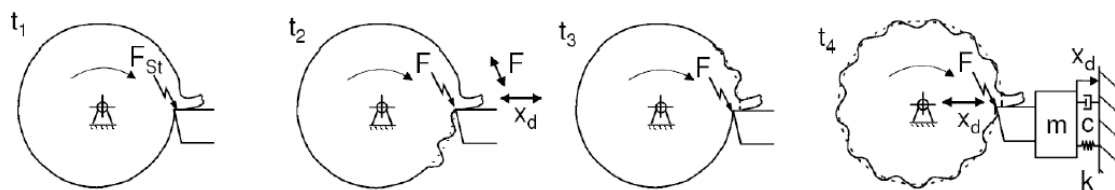
Samobuzené kmitání, jak už název napovídá, vzniká buzením struktury stroje vlastním obráběcím procesem. Důsledkem je výrazné rozvibrování stroje spojené se zvýšenou hlučností řezného procesu a zhoršením kvality obrobeneho povrchu (viz Obr. 3.18). Příčinou vzniku je tzv. regenerativní princip. [6]



Obr. 3.18 Stopy na obrobku po nestabilním obrábění [24]

Regenerativní princip spočívá v průchodu nástroje již po obrobeneém povrchu. V důsledku řezných sil a výstupu a vstupu zubů nástroje do materiálu (při frézování) vzniká zvlněný povrch. Při záběru dalším zubem dochází k dalšímu rozvibrování nástroje. Při nepříznivé kombinaci fázového posunutí mezi předchozím a následujícím řezem nastane nestabilní obrábění. Regenerativní princip je tedy založen na zpětnovazebním procesu mezi budící silou a výchylkou, kde povrch obrobku figuruje jako „paměť“. [5]

Příkladem může být Obr. 3.19, kde je ve čtyřech fázích vidět proces oddělování třísky při soustružení, kdy při průchodu po již obrobeneém (pokmitaném) povrchu dochází ke změně průřezu třísky. [5]



Obr. 3.19 Vznik nestabilního obrábění při soustružení [5]

Kromě identifikace vzniku samobuzeného kmitání sluchem nebo dle povrchu obrobeneho materiálu můžeme hledat výrazné amplitudy vibrací na záznamu měření, které neodpovídají celočíselným násobkům otáčkové frekvence. Důvodem pro jeho identifikaci je informace pro obsluhu, aby změnila procesní parametry a řezný proces se dostal do stavu stabilního obrábění. Problematikou oblastí stability a nestability řezného procesu se zabývá diagram stability. [5]

3.3.1 Diagram stability

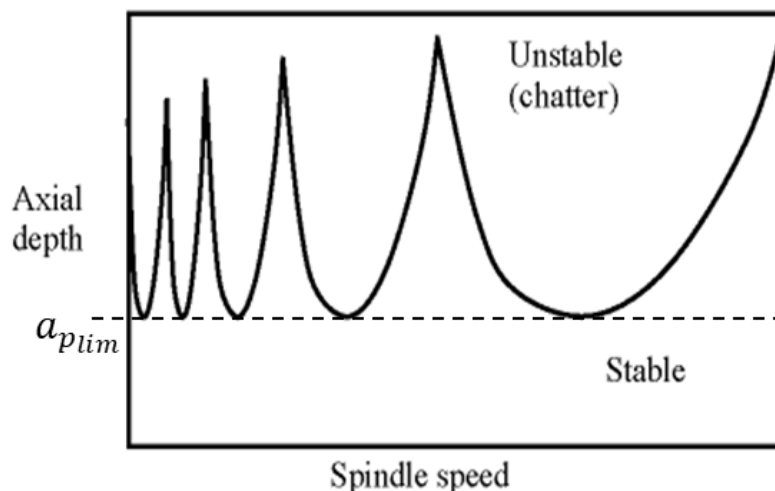
Diagram stability (*Stability Lobe Diagram – SLD*) nám udává, zda pro daný nástroj a dané řezné podmínky nastane nestabilní obrábění (*chatter*) nebo stabilní obrábění (*chatter free*). Abychom získali diagram stability, potřebujeme znát dvě věci: orientovanou FRF a měrný řezný odpor K_c . [25]

Budící silou při samobuzeném kmitání je samotná řezná síla F_c , která se spočítá dle vztahu (3.20), kde A_d je průřez třísky, a_p axiální hloubka řezu a a_e radiální šířka záběru. Z tohoto důvodu se na svislé ose diagramu stability obvykle uvádí limitní hodnota a_p nebo a_e (někdy značeno jako b), dle toho, který z těchto dvou parametrů je momentálně konstantní. Na vodorovné ose se zpravidla udávají otáčky. [26, 27]

$$F_c = K_c \cdot A_d = K_c \cdot a_p \cdot a_e \quad (3.20)$$

Jak je na Or. 3.20 vidět, mezní hloubka řezu $a_{p_{lim}}$ je konstantní pro všechny „loby“ napříč otáčkovou frekvencí. Jedná se o limitní hodnotu, pod kterou se budeme vždy nacházet ve stabilní části grafu. S rostoucími otáčkami se rozestup jednotlivých „lobů“ zvyšuje. Pro vysokou hodnotu otáček je prostor mezi „loby“ natolik veliký, že můžeme volit parametry tak, abychom se s rezervou nacházeli od hranice nestabilní oblasti, a přitom se nacházeli nad hodnotou $a_{p_{lim}}$. Tomuto trendu se říká vysokorychlostní obrábění neboli *high speed cutting*, neboť se zde dosahuje velkých hodnot úběru materiálu MMR , a to je cílem

moderní strojařiny – odebírat stabilně co nejvíce materiálu, protože to vede ke kratším výrobním časům a zvýšené produktivitě. [27, 28, 29]



Obr. 3.20 Diagram stability (SLD) [30]

Hodnotu $a_{p_{lim}}$ můžeme vypočítat dle rovnice (3.21), kde $\min(\text{Re}(\text{FRF}_{orient}))$ je minimální hodnota reálné složky orientované FRF, N_t je počet zubů v záběru a K_s měrný řezný odpor do směru aktivní složky síly. [5, 23]

$$a_{p_{lim}} = \frac{-1}{2 \cdot K_s \cdot \min(\text{Re}(\text{FRF}_{orient})) \cdot N_t} \quad (3.21)$$

Diagram stability je vždy unikátní pro danou kombinaci FRF, nástroje, materiálu a záběrových podmínek. Výpočet pracuje s řadou zjednodušení a předpokladů, jako je jedna dominantní hodnota vlastní frekvence. [5]

3.3.2 Identifikace měrného řezného odporu

Hodnota měrného řezného odporu K_c udává, jaká síla je potřeba pro překonání odporu materiálu při obrábění pro jednotkovou plochu. Jeho hodnota závisí na typu materiálu, geometrii nástroje a záběrových podmínkách. Jedním z možných postupů odhadu K_c je použití Kienzleho vztahu v rovnici (3.22), kde k_{c1} je nominální řezný odpor, h_m je střední tloušťka třísky a m_c je katalogová konstanta. [26]

$$K_c = k_{c1} \cdot h_m^{-m_c} \quad (3.22)$$

V praxi se stává, že katalogové hodnoty řezného odporu jsou nižší, než jaká je jejich skutečná hodnota. Proto pokud chceme znát přesnější hodnotu K_c pro daný nástroj

a dovolují to okolnosti, je vhodnější ji vypočítat přímo z měření řezného procesu dle (3.23), kde P je průměrná hodnota výkonu vřetene a MRR je objem odebraného materiálu. [26]

$$\frac{MRR}{P} = \frac{1}{K_c} \quad (3.23)$$

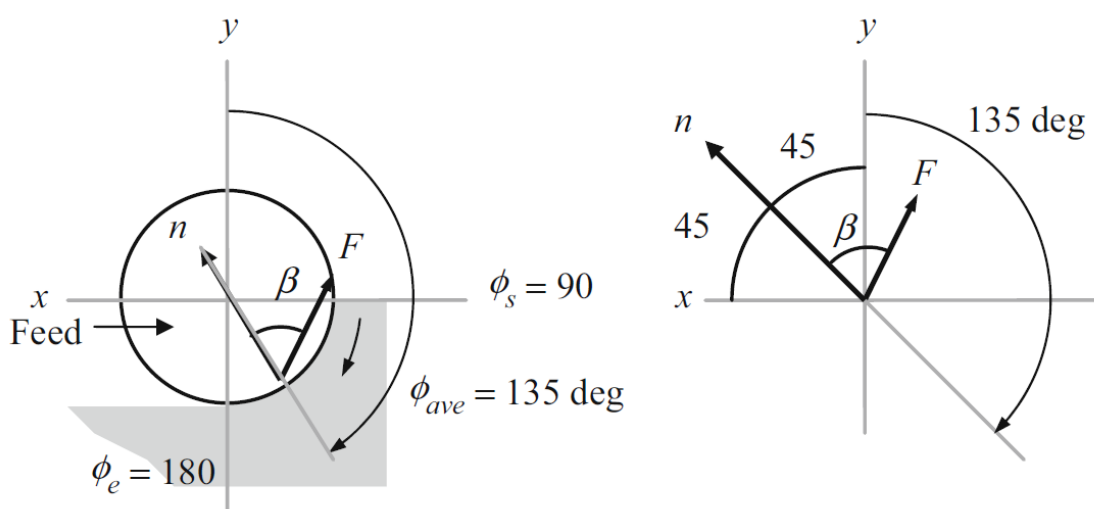
3.3.3 Orientovaná FRF

Pro výpočet mezní hloubky řezu z diagramu stability potřebujeme znát FRF_{orient} , ta ale závisí na směru tangenciální řezné síly. Jelikož obvykle měříme FRF ve dvou na sebe kolmých osách x a y (FRF_x , FRF_y), musíme pro výpočet použít orientační faktory μ_x a μ_y , jak je ukázáno v rovnici (3.24). [23]

$$FRF_{orient} = \mu_x \cdot FRF_x + \mu_y \cdot FRF_y \quad (3.24)$$

Výpočet si ukážeme na případu frézování s 50 % využitím průměru frézy, jak je vidět na Obr. 3.21. Nejprve si musíme vypočítat průměrnou hodnotu úhlu záběru zubu Φ_{ave} dle rovnice (3.25), kde Φ_s je úhel vstupu zubu do řezu a Φ_e úhel výstupu zubu z řezu. Pro náš případ vychází $\Phi_{ave} = 135^\circ$. Následně si zavedeme normálu k povrchu (v Obr. 3.21 značenou n) a k ní řeznou sílu F pod úhlem β , kde β je úhel do směru aktivní složky síly. [23]

$$\Phi_{ave} = \frac{\Phi_s + \Phi_e}{2} = \frac{90 + 180}{2} = 135^\circ \quad (3.25)$$



Obr. 3.21 Výpočet orientované FRF s využitím 50 % průměru frézy [23]



Potřebujeme získat vztahy pro sílu působící do směru n od složek řezné síly F_x a F_y . Na základě geometrických vztahů z obrázku dostaneme rovnice (3.26) a (3.27). Z nich jsou již přímo vidět orientační faktory μ_x a μ_y , samostatně zapsané v rovnici (3.28). [23]

$$F_n = F_x \cdot \cos(45) = F \cdot \cos(\beta + 45) \cdot \cos(45) \quad (3.26)$$

$$F_n = F_y \cdot \cos(45) = F \cdot \cos(\beta - 45) \cdot \cos(45) \quad (3.27)$$

$$\mu_x = \cos(\beta + 45) \cdot \cos(45) \quad ; \quad \mu_y = \cos(\beta - 45) \cdot \cos(45) \quad (3.28)$$

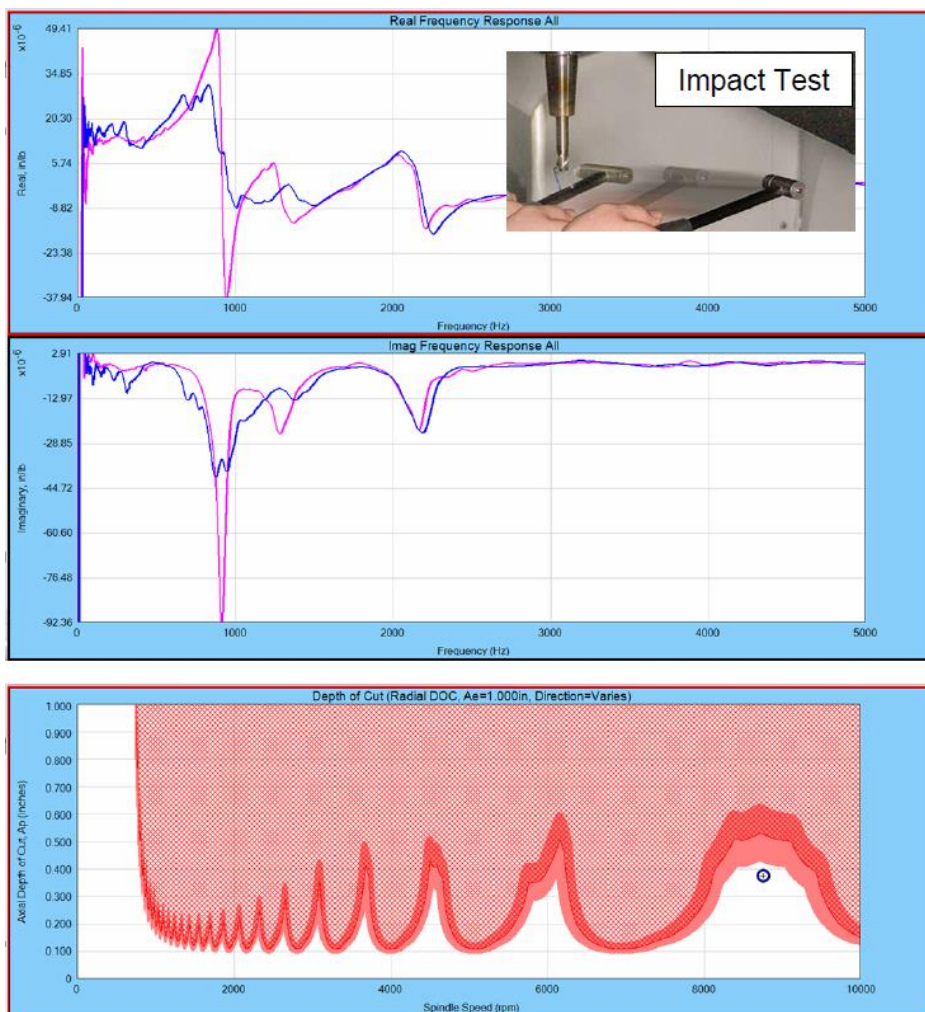
Orientační faktory nyní můžeme dosadit zpět do rovnice (2.24) a vypočítat orientovanou FRF. Pro jinou strategii frézování by se postupovalo stejným způsobem. To, co nám ještě zbývá pro výpočet limitní hloubky řezu v rovnici (3.21) je počet zubů v záběru N_t . Ten získáme z rovnice (3.29), kde z je celkový počet zubů frézy. [23]

$$N_t = \frac{\phi_e - \phi_s}{\frac{360}{z}} \quad (3.29)$$

3.4 Software pro identifikaci diagramu stability

3.4.1 Metalmax (BlueSwarf)

MetalMAXTM od americké společnosti BlueSwarf je příkladem měřicího balíčku nástrojů pro měření a frekvenční analýzu signálů. Měřicí aparatura obsahuje mimo jiné rázové kladivo, jednoosý akcelerometr a dvoukanálovou měřicí kartu. Kromě fyzických nástrojů poskytuje také softwarovou výbavu tvořenou řadou programů, z nichž nejzásadnější je modul TXFTM (viz Obr. 3.22), který lze využít pro měření FRF a tvorbu diagramu stability. Produkt MetalMAXTM byl také používán pro cvičná měření před samotným měřením cílového frézovacího stroje. [31]



Obr. 3.22 Vykreslení FRF a diagramu stability v prostředí MetalMAX TXF [22]

3.4.2 CUTPRO (MAL Inc.)

Dalším prostředkem pro simulaci řezného procesu je software CUTPRO® od společnosti MAL Inc. (Manufacturing Automation Laboratories). Jedná se o podobný typ programu, který rovněž umožňuje měřit FRF a vytvářet diagramy stability. Dále umí simulovat výslednou drsnost povrchu po obrábění. Lze mimo jiné použít pro simulace a analýzu procesů frézování, soustružení i vrtání. Modul pro modální analýzu obsahuje například funkci pro predikci a vizualizaci vlastních tvarů kmitů (viz Obr. 3.23). [32]



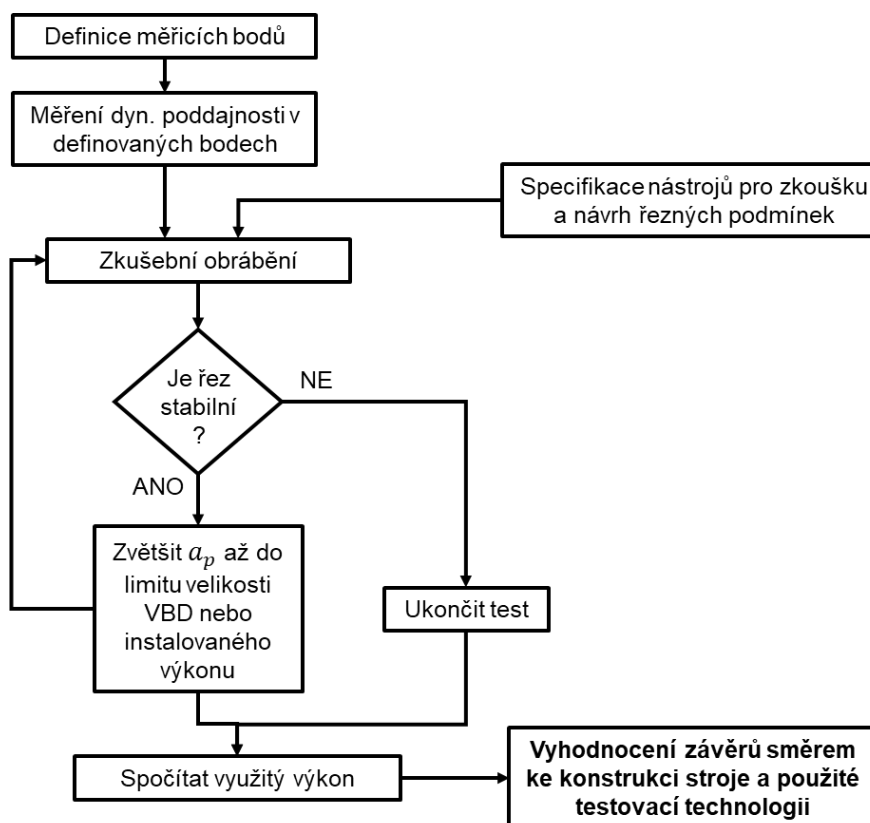
Obr. 3.23 Predikce vlastních tvarů kmitů v prostředí CUTPRO [32]

3.5 Výkonové zkoušky obráběcích strojů

Cílem výkonových zkoušek je ověřit, zda je stroj zkonstruován a vyroben tak, aby byl schopen přenést do řezu (a stabilně obrábět) instalovaný výkon vřetene. Tím se také ověří limity konstrukce daného stroje. Pokud bude stroj poddajný, velké vibrace vybudí i malá síla. Špatně navržená konstrukce stroje také má za následek to, že bude velice brzo docházet k *chatteru* i při lehkých zátěžových podmínkách. Pak se může stát, že stroj i ve své nejužší konfiguraci (např. zasunuté vřeteno a vřeteník v dolní úvrati) nepřenese stabilně do řezu ani polovinu instalovaného výkonu. [33]

Výsledkem výkonové zkoušky je tak výkonnostní mapa pracovního prostoru stroje, vzniklá na základě zkoušek obráběním pro identifikaci limitů dané konfigurace os stroje, nástroje a obrobku. Vynáší se obvykle v procentech instalovaného výkonu. [33]

Výsledky těchto výkonnostních testů mohou dále sloužit jako vstup pro maximalizaci výkonnosti, tedy pro daný užitný výkon nalézt optimální řezné podmínky, aby se docílilo co možná největšího úběru materiálu. Proto je třeba před zahájením zkoušek určit, co se bude testovat – stroj nebo technologie. V důsledku toho se může povaha testů lišit. [33]



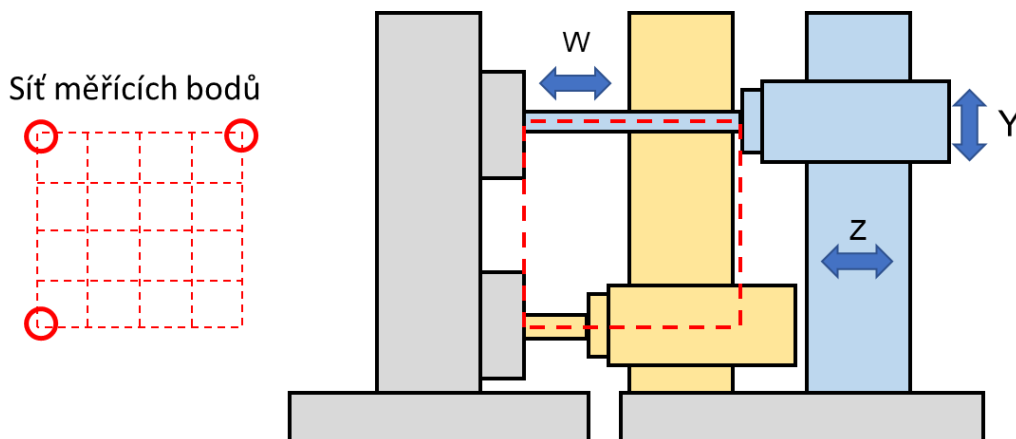
Obr. 3.24 Postup výkonové zkoušky obráběním

Parametry zkoušky obráběním (viz Obr. 3.24) pro frézovací stroje se volí tak, abychom se dostali do oblasti nestability ještě před využitím plného instalovaného výkonu vřetena. Z tohoto důvodu se volí nižší řezná rychlost v_c . Abychom zvýšily sklony stroje ke kmitání během zkoušky, volí se obvykle větší hodnota posuvu na zub f_z . [34]

Postup zkoušky obráběním je přehledně rozepsán ve vývojovém diagramu na Obr. 3.24. Pro zvolenou síť měřicích bodů (viz Obr. 3.25) se pro daný nástroj a řezné podmínky určí jeden parametr, který se bude měnit. Obvykle to je a_p nebo a_e . Následně se zvolí hodnota otáček (řezné rychlosti) a postupně se obrábí s krokovým přírůstkem zvoleného technologického parametru. Postup se opakuje, dokud nenastane samobuzené kmitání, které značí, že se použitými parametry již nacházíme v oblasti nestability v SLD. Zaznamená se poslední hodnota parametru, kdy byl řez ještě stabilní a příslušná hodnota využitého výkonu. Abychom si ověřili, že se nenacházíme někde mezi „loby“, můžeme ještě mírně změnit hodnotu otáček a postup opakovat. Celý postup měření opakujeme pro všechny měřicí body. Správně by se mělo frézovat v každém měřicím bodě ve všech čtyřech směrech, tedy +X, -X, +Y a -Y. Stroj totiž může v každém směru vykazovat jiné



chování. Reálně se na této síti bude obrábět cca ve třech bodech. V každém bodě vzniká graf a_p vs otáčky, do kterého se zaznamenávají výsledky stability/nestability. [34]



Obr. 3.25 Uspořádání frézovacího stroje a síť měřících bodů v pracovním prostoru

3.6 Shrnutí stávajících znalostí v problematice

Každý stroj má kromě svých statických vlastností i vlastnosti dynamické, které nás zajímají, působí-li na stroj dynamické síly. Jedním z vhodných nástrojů pro popis dynamických vlastností stroje je modální analýza. Tu můžeme provádět experimentálně nebo analyticky.

Dynamika znamená, že se zátěžné síly mění v čase. Z tohoto hlediska je nepostradatelná alespoň základní znalost signální a frekvenční analýzy. Chceme-li zjistit dynamickou poddajnost stroje na dané frekvenci a kde má konstrukce vlastní frekvence, je vhodné provést měření FRF. K měření lze využít celou řadu prostředků. Typickými nástroji pro provedení rychlého měření jsou rázové kladivo a akcelerometr.

Při obráběcím procesu se snažíme dosahovat co největší přesnosti a kvality povrchu obrobku. Z tohoto hlediska je kritické, aby řezný proces byl stabilní. Vodítko pro volbu limitních parametrů pro danou kombinaci nástroje, záběrových a řezných podmínek a materiálu zobrazuje diagram stability. Nacházíme-li se v oblasti nestability, s největší pravděpodobností pro zvolené podmínky vznikne samobuzené kmitání, což je zcela nežádoucí jev, který vede k znehodnocení obrobku a může poškodit stroj.

Výkonovými zkouškami obráběcích strojů se snažíme zjistit, zda konstrukce stroje umožňuje přenést do stabilního řezu celý instalovaný výkon, popřípadě jakou jeho část.



Jelikož jsou tyto zkoušky obráběním časově velice náročné, přistupuje se často k nahrazení části testu virtuálním modelem řezného procesu.

Z měření FRF se určí modální parametry struktury a samotné obrábění se provede pouze v několika bodech. Pomocí získaných informací dojde k simulaci procesu obrábění v hustší síti, než byla původní síť měřících bodů. Výsledkem výkonové zkoušky je pak mapa využití výkonu stroje v rámci pracovního prostoru pro daný nástroj, záběrové podmínky a směr obrábění.

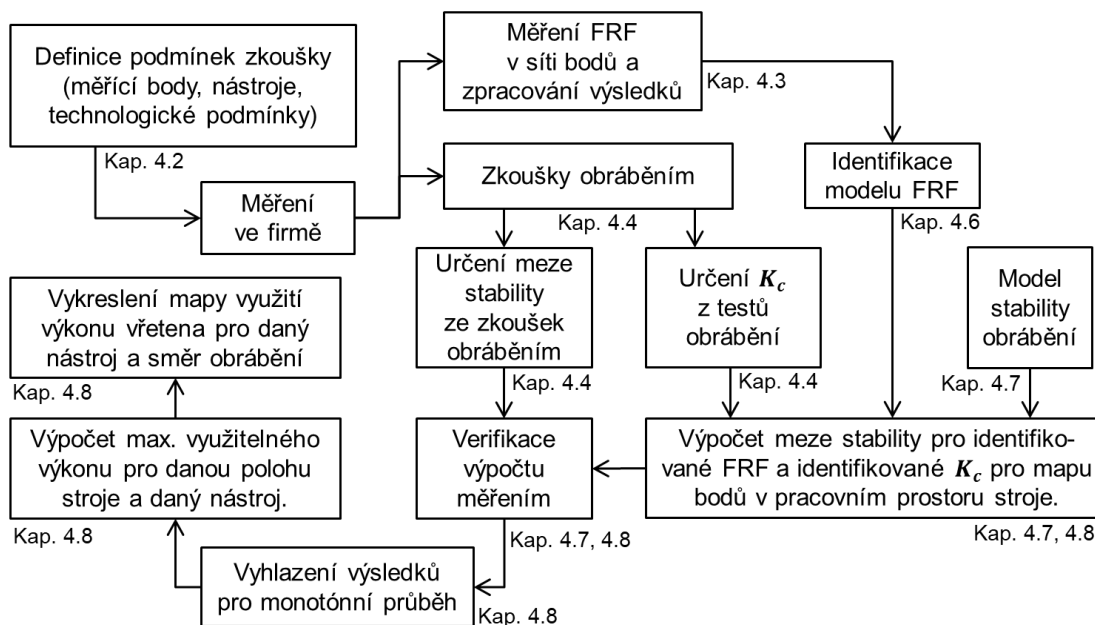


4 Vlastní měření a vyhodnocení

4.1 Postup provedení zkoušky

Postup provedení měření a získání výsledků pro vyhodnocení zkoušky lze rozložit do několika na sebe navazujících operací, jak je znázorněno na Obr. 4.1 včetně odkazů na konkrétní kapitoly. V podstatě lze tento poněkud složitý diagram shrnout do několika hlavních bodů:

- Definování měřeného stroje, nástrojů, obrobků atd.
- Provedení vlastního měření dynamické poddajnosti a zkoušek obráběním v omezené síti diskretních bodů.
- Vyhodnocení zkoušek, určení meze stability a měrného řezného odporu.
- Vytvoření modelu FRF a stability obrábění.
- Aplikace modelů v kombinaci s výsledky z reálných zkoušek pro tvorbu finálních map mezní třísky a využitelného výkonu v celém pracovním prostoru stroje.

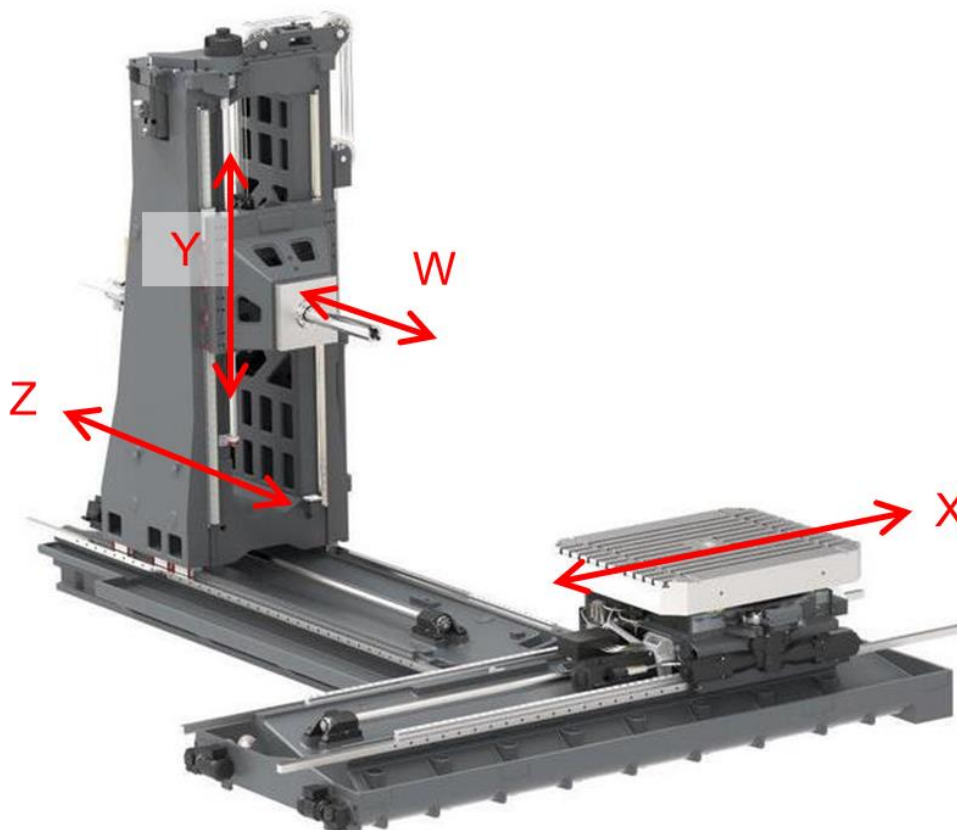


Obr. 4.1 Schéma postupu vlastní části diplomové práce

4.2 Měřený stroj, nástroje a obrobek

4.2.1 Horizontální frézovací centrum WHT110C

Měření probíhalo na stroji WHT110C (viz Obr. 4.2) od společnosti TOS Varnsdorf a.s., která nám umožnila měření provést. Konkrétně se jednalo o stroj s v.č. 0101, který disponoval výsuvným vřetenem o průměru 112 mm, zakončen přípojovacím rozhraním ISO 50, s výkonem 31 kW a maximálními otáčkami 6000 min^{-1} . Výkonovou a momentovou charakteristiku je možné nalézt v příloze č. 1.



Obr. 4.2 Horizontální frézovací centrum WHT110C [35]

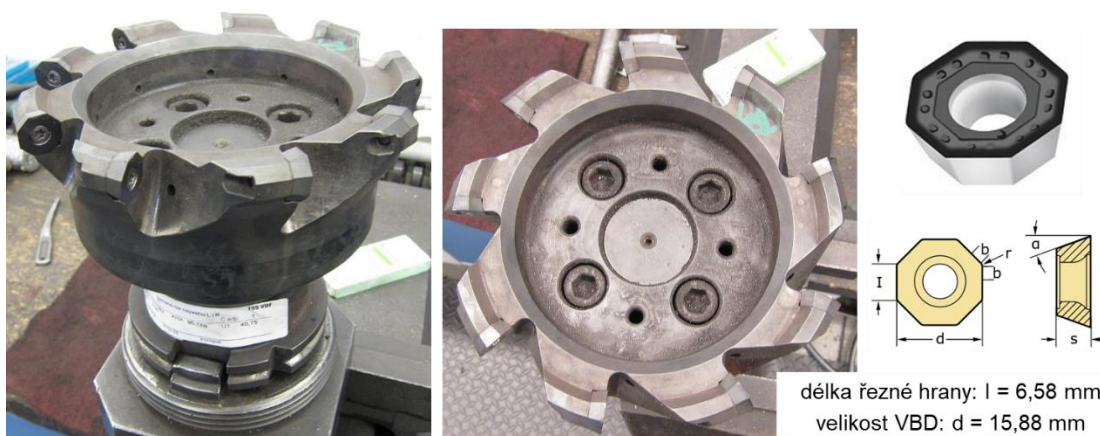
Lože tvaru T je zhotoveno ze dvou spojených částí. Osa X a B se nachází na straně obrobku, zbylé osy jsou umístěny na straně nástroje. Maximální zdvihy jednotlivých lineárních os jsou: X 2500 mm, Y 1600 mm, Z 2500 mm a W 650 mm. Stroj je dále doplněn řídicím systémem SIEMENS Sinumeric 840D-SL.

4.2.2 Měřené nástroje

Bylo provedeno měření se třemi nástroji rozdílného charakteru, aby byla podchycena co možná nejširší paleta operací, které je možno na takovémto stroji vykonávat.

Čelní fréza D160/Z9

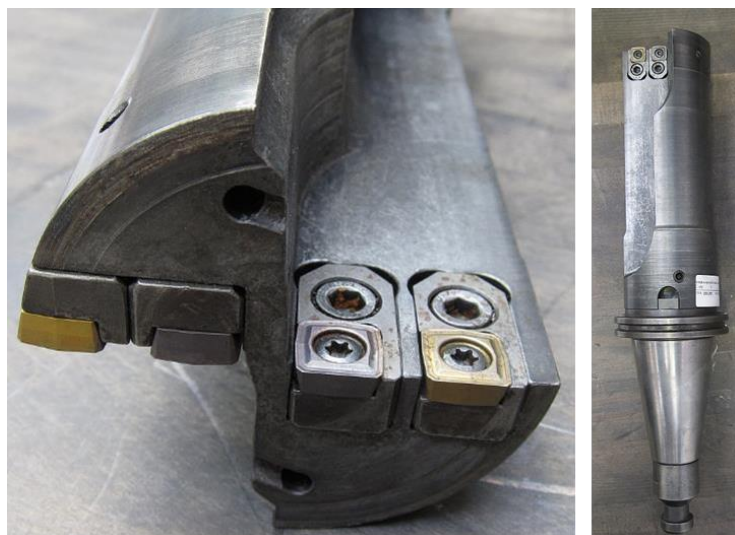
Prvním nástrojem byla čelní fréza (viz Obr. 4.3) o průměru 160 mm s 9 zuby. Jednalo se o nástroj s vyměnitelnými břitovými destičkami oktagonálního tvaru Walter ODHT0605ZZN-F57 WSP45S. Samotný nástroj měl vyložení 133 mm a hmotnost 9,8 kg.



Obr. 4.3 Čelní fréza D160/Z9

Vrták D78/Z1

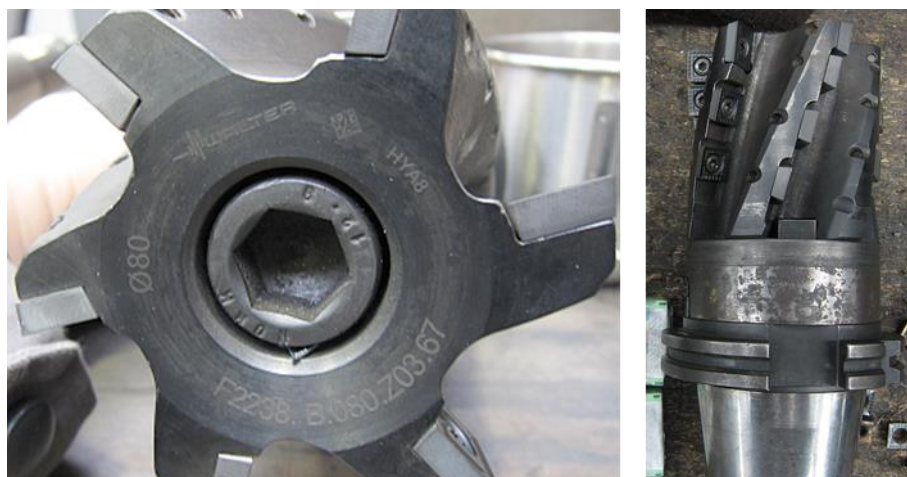
Dalším nástrojem byl vrták (viz Obr. 4.4) o průměru 78 mm, jedním zubem a taktéž s vyměnitelnými břitovými destičkami – vnější pár: P28475-5 WTP35, vnitřní pár: P2841S-5N-E57 WXP40. Vyložení nástroje činilo 250 mm s celkovou hmotností 8 kg.



Obr. 4.4 Vrták D78/Z1

Ježková fréza D80/Z3

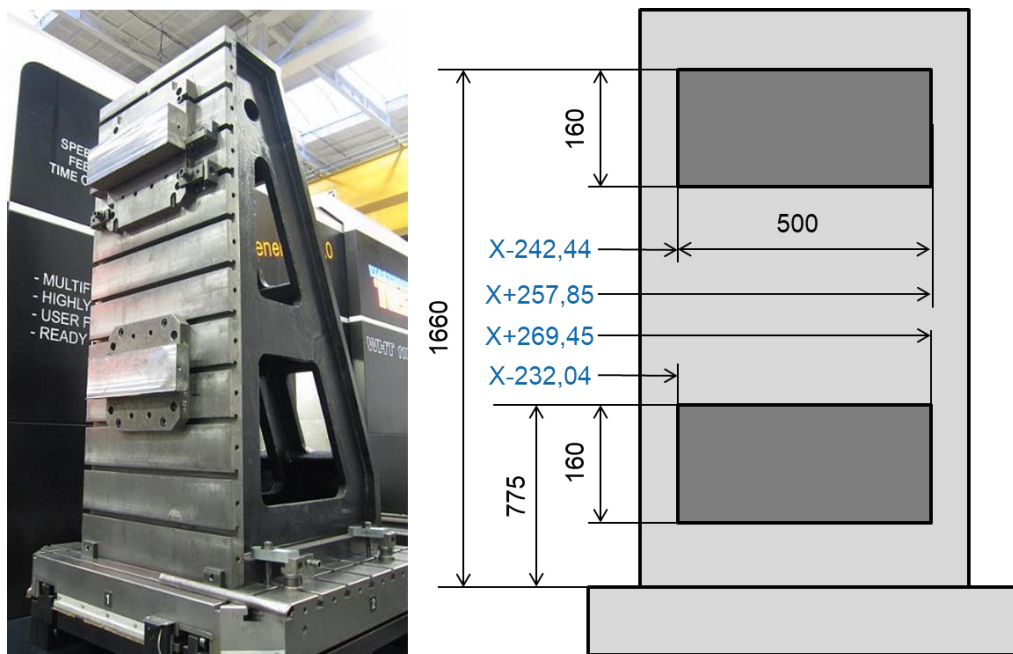
Posledním zkoušeným nástrojem byla ježková fréza Walter F2238.B.080.Z03.67 (viz Obr. 4.5) o průměru 80 mm se třemi zuby a celkové hmotnosti 6 kg. Stejně jako u předešlých dvou nástrojů i v tomto případě se jednalo o nástroj s VBD – čelní: LPMT150412R-D51 WKP35S a obvodové: SPMT120408-D51 WKP35S.



Obr. 4.5 Ježková fréza D80/Z3

4.2.3 Obráběný materiál

Materiál použitý při zkouškách obráběním tvořily dva bloky oceli 12050, které se běžně používají pro výkonové zkoušky. Jak je vidět na Obr. 4.6, bloky oceli byly upnuty na litinovém úhelníku ve dvou polohách osy Y.



Obr. 4.6 Bloky obráběného materiálu upnuté na úhelníku

4.3 Měření dynamické poddajnosti

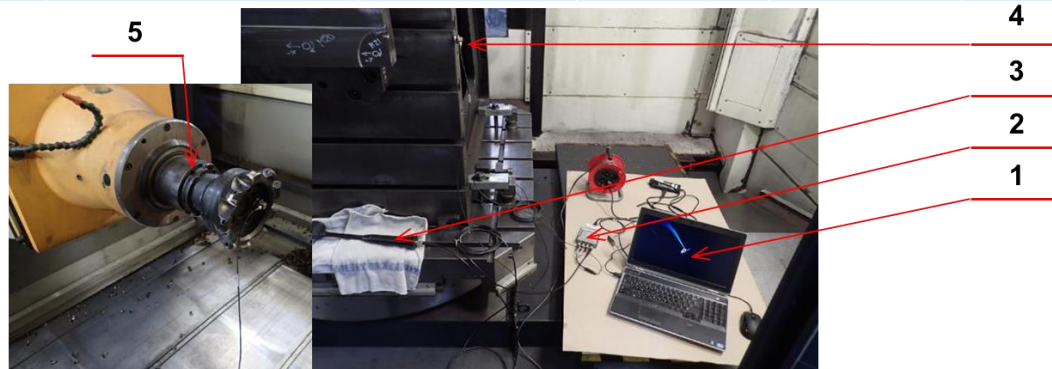
Samotné měření včetně výkonových zkoušek obráběním proběhlo ve dnech 2. a 3. února 2021 v TOS Varnsdorf. Vzhledem k dosavadní celosvětové pandemii nákazou Covid-19 nebylo umožněno autorovi této práce se měření zúčastnit osobně. Měření z tohoto důvodu provedli pracovníci RCMT ČVUT (M. Janota a P. Kolář) ve spolupráci s techniky z TOS Varnsdorf. Diplomand následně výsledky měření pod vedením zpracovával.

4.3.1 Použitá měřicí aparatura a síť měřících bodů

Hlavními nástroji pro naměření přenosů dynamické poddajnosti byly modální kladivo a tříosý akcelerometr. Celý výčet měřicí aparatury včetně jejího umístění je vidět na Obr. 4.7.

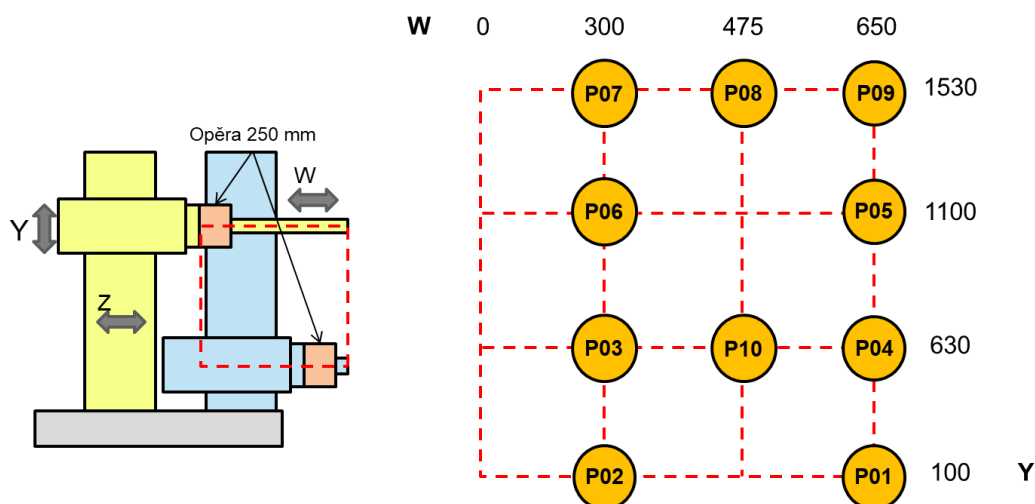


Číslo	Název	Výrobce	Typ	S/N	Kanál
1	Notebook	DELL	E6530	9XKGLX1	-
2	Analyzátor NI USB-9234	NI	NI USB-9162 NI 9234	146D6E0 17E0BD7	Dev1
3	Modální kladivo Kabel: BNC → BNC	PCB Spectris	086D20 old horse	31608 old horse	Dev1/ai0
4	Třiosý akcelerometr Kabel: 1-4 28 UNF → BNC	Brüel&Kjaer Brüel&Kjaer	4524 B1 AO-0526-D-100	31216 2012W05	Dev1/ai1 Dev1/ai2 Dev1/ai3
5	Obráběcí centrum	TOS VARNSDORF	WHT110C	0101	-



Obr. 4.7 Měření dynamické poddajnosti: použitá aparatura

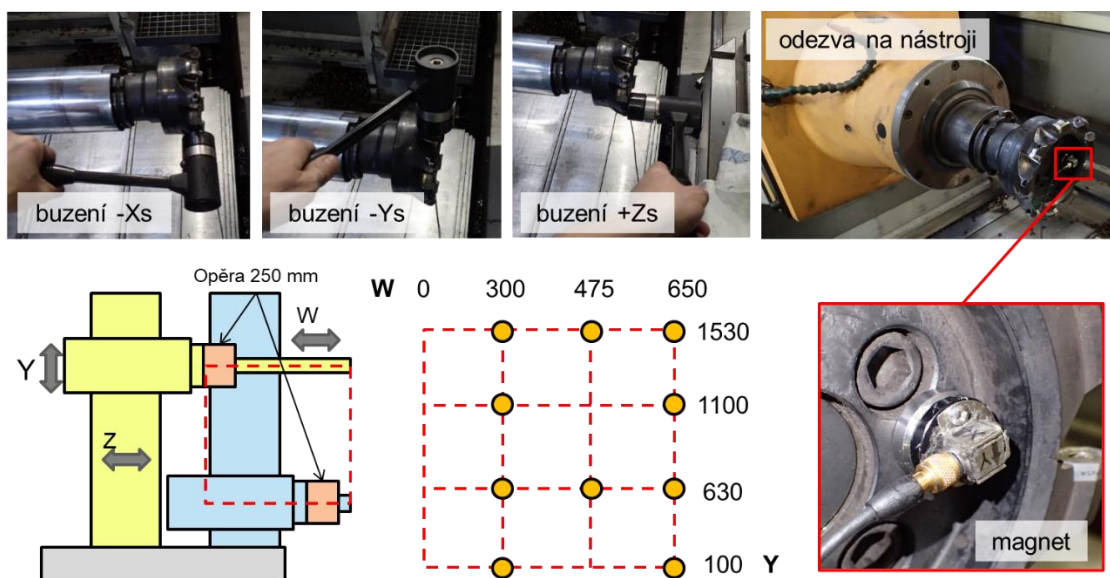
Měření dynamické poddajnosti probíhalo na předem definované síti diskrétních bodů (viz Obr. 4.8) v rovině YW, která byla totožná pro všechny tři nástroje. Kromě nástrojů samotných bylo měřeno také samotné vřeteno a obrobek. Veškerá měření byla provedena s nasazenou opěrou na vřeteni o délce 250 mm.



Obr. 4.8 Schéma sítě poloh a jejich značení pro měření FRF

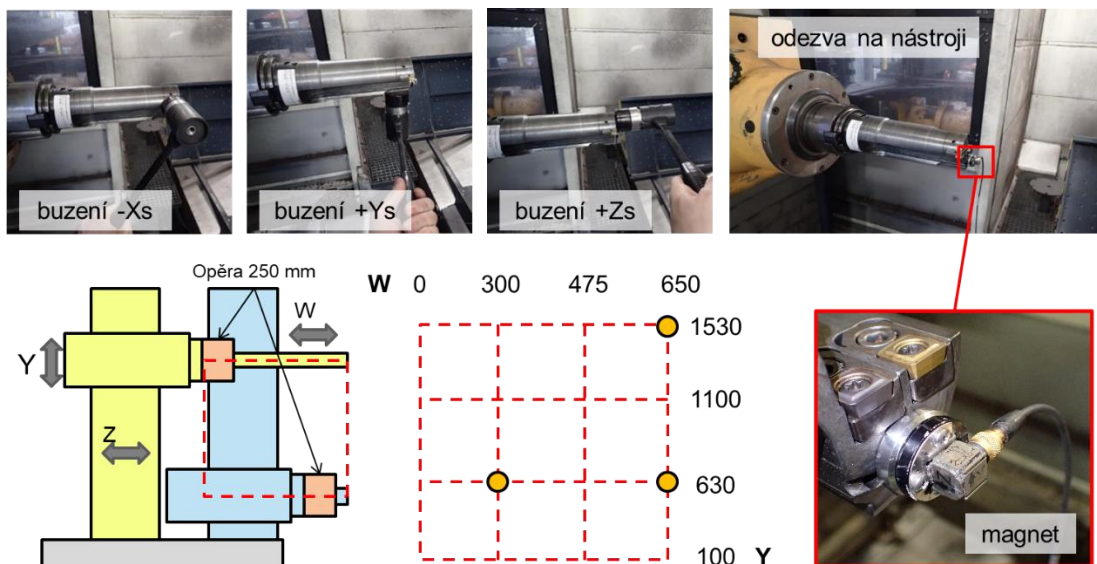
4.3.2 Průběh měření FRF

Měření spočívalo ve vybudění kmitavé reakce na nástroji pomocí impulzu síly [N] od modálního kladiva. Odezva ve formě zrychlení [m/s^2] byla zachycena akcelerometrem. Podíl těchto dvou veličin vrátí přenosovou funkci FRF ve formě akcelerance [$(m/s^2)/N$]. Pomocí dvojité integrace získáme námi požadovanou FRF ve formě dynamické poddajnosti [m/N].



Obr. 4.9 Schéma sítě poloh pro měření FRF s frézou D160/Z9

Buzení se provádělo vždy ve všech třech směrech odpovídajícím lineárním osám stroje. Ve všech deseti bodech sítě se měřilo v případě obou fréz a samotného vřetene. U vrtáku bylo provedeno měření pouze ve třech bodech (viz Obr. 4.10). Pro připevnění akcelerometru k měřenému povrchu byl zpravidla použit magnet. Pouze při měření ježkové frézy byl použit vosk z důvodu malé nosné plochy pro použití magnetu. Příklad umístění senzoru a provedení buzení je možné vidět na Obr. 4.9, kde je znázorněno měření pro nástroj D160/Z9. Veškeré další obrázky ukazující postup a použitou síť měřících bodů pro jednotlivé nástroje jsou obdobné a nejsou zde tedy uvedeny.

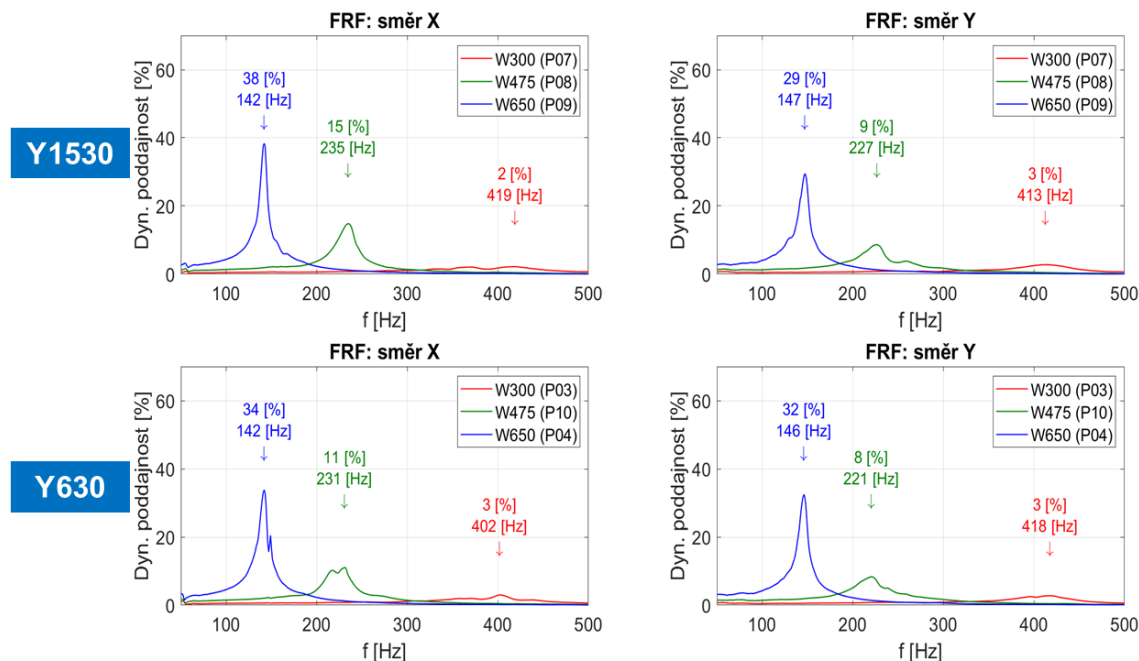


Obr. 4.10 Schéma sítě poloh pro měření FRF s vrtákem D78/Z1

4.3.3 Výsledky měření FRF na nástrojích

Pro zachování anonymních údajů byly naměřené hodnoty dynamické poddajnosti vynásobeny konstantou o stejných jednotkách a převedeny tak na procenta. Aby bylo možné výsledky porovnávat mezi různými nástroji a směry měření, byla tato konstanta pro všechny případy totožná. Jednotlivé velikosti amplitud vůči sobě tedy nejsou zkreslené.

Prvním výsledkem jsou grafy FRF z měření na čelní fréze D160/Z9. Pro vizualizaci a porovnání výsledků v různých kinematických konfiguracích stroje byla zvolena koncepce viditelná na Obr. 4.11. V každém sloupci grafů je zobrazen jeden směr. V tomto případě směry X a Y. V každém ze dvou řádků reprezentující dvě hodnoty souřadnice osy Y jsou zobrazené tři výsuvy vřetene W. Na vodorovné ose je frekvence a na svislé ose hodnota dynamické poddajnosti.

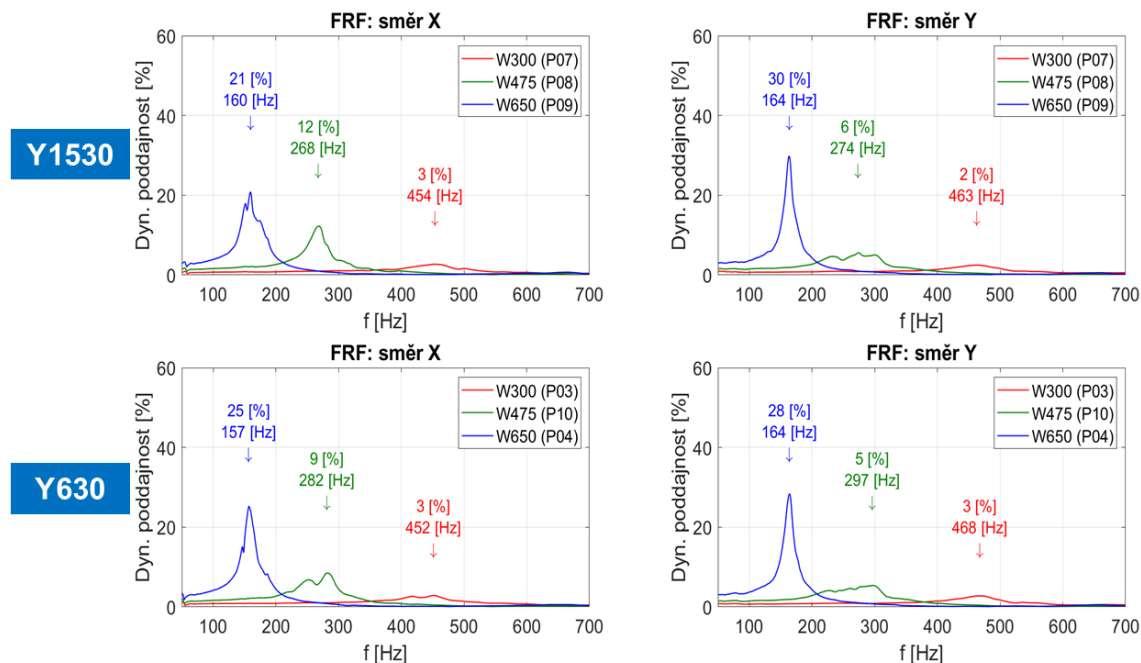


Obr. 4.11 Výsledky měření FRF s frézou D160/Z9

Jak je z Obr. 4.11 patrné, s rostoucím výsuvem vřetena W roste amplituda dominantní dynamické poddajnosti a klesá její frekvence. Je vidět, že závislost mezi výsuvem a hodnotou FRF není lineární. Při dvojnásobném výsuvu z W300 na W650 vzroste dyn. poddajnost cca 10x.

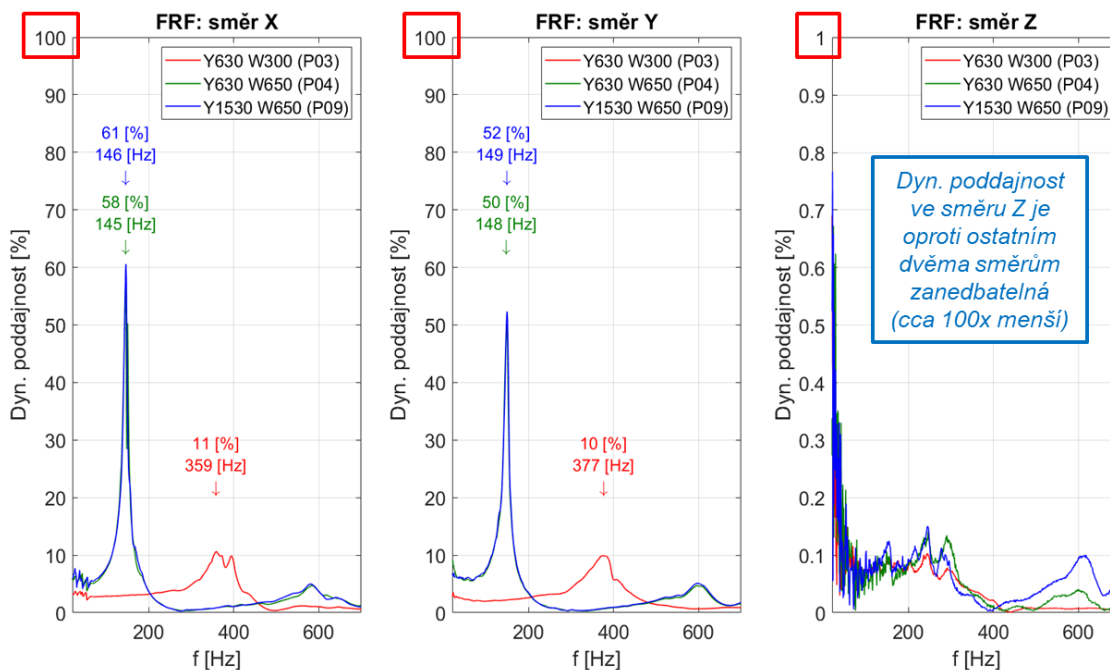
Je také zajímavé pozorovat, že při změně polohy ve směru Y nedochází k výraznější změně v amplitudách. To značí kvalitně navrženou konstrukci stojanu, který je velice tuhý.

Na Obr. 4.12 reprezentující výsledky ježkové frézy D80/Z3 lze pozorovat podobný trend jako v případě frézy čelní. To že výsledky v bodech lišících se pouze hodnotou souřadnice Y jsou někdy nižší v horní poloze je přisuzováno možné chybě měření. Hodnoty v rozmezí 5 % lze považovat za rovnocenné.



Obr. 4.12 Výsledky měření FRF s frézou D80/Z3

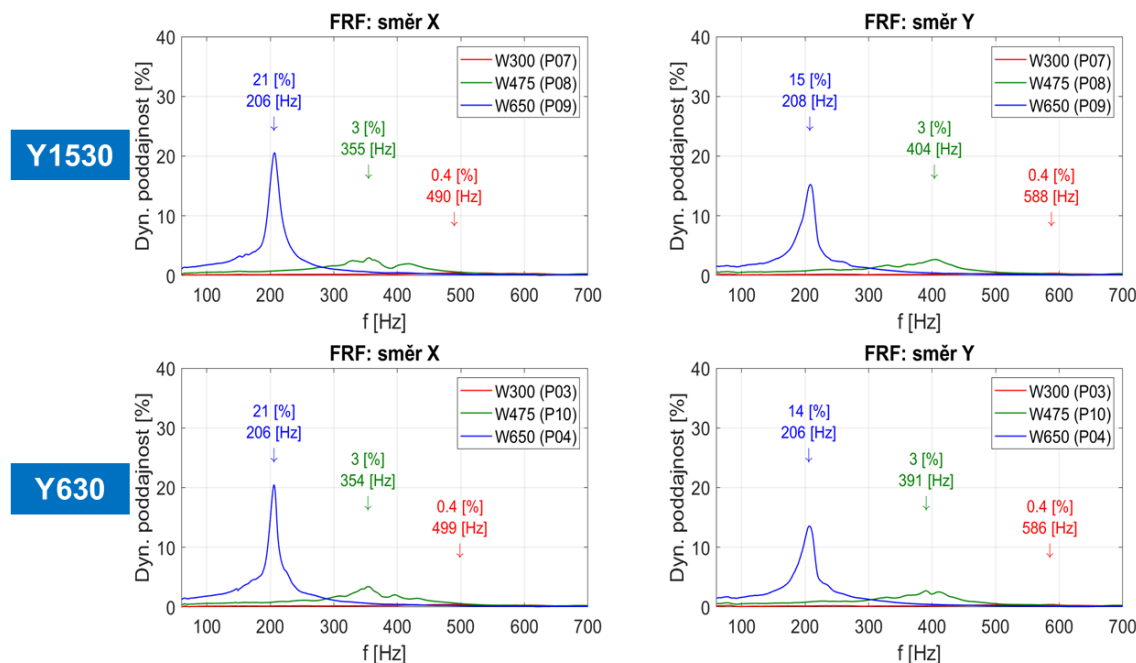
Na Obr. 4.13 je koncepce vizualizace mírně odlišná. Pro vrták D78/Z1 jsou pro porovnání zobrazeny všechny tři směry. Jak je z grafu patrné, dyn. poddajnost ve směru Z je zde cca 100x menší. Což je dobré, protože právě tento směr je z hlediska vrtání důležitý.



Obr. 4.13 Výsledky měření FRF s vrtákem D78/Z1



Bylo provedeno i měření samotného vřetene (viz Obr. 4.14) bez upnutého nástroje pro porovnání vlivu hmotnosti jednotlivých nástrojů na FRF. Trend je obdobný jako u obou fréz.



Obr. 4.14 Výsledky měření FRF samotného vřetene

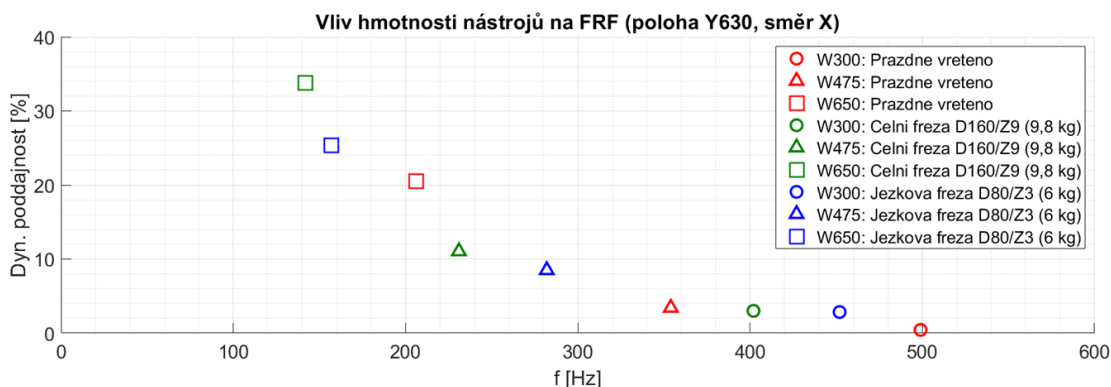
4.3.4 Shrnutí výsledků měření FRF na nástrojích

Jak bylo z předešlých obrázků patrné, v naměřených FRF se vždy vyskytuje většinou jedna vlastní frekvence s dominantní amplitudou dyn. poddajnosti.

Její amplituda je výrazně závislá na rostoucím výsuvu vřetene v ose W. Pro větší výsuvy roste dominantní poddajnost a klesá hodnota její frekvence. Závislost na poloze osy Y je velice malá, prakticky nevýznamná.

Dynamická poddajnost dále dle očekávání roste pro vyšší hmotnosti nástrojem, jak je možno vidět v souhrnném grafu na Obr. 4.15.

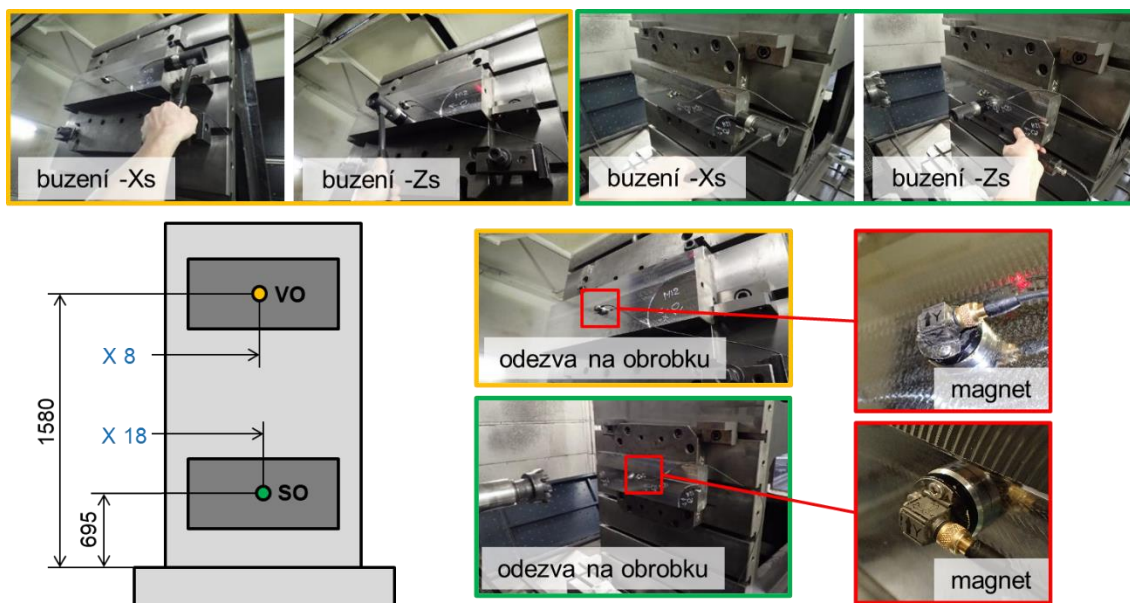
Poddajnost byla obvykle výraznější ve směru X, z tohoto důvodu byly následné výsledky zkoušky obráběním vizualizovány vibracemi právě v tomto směru. Výjimku tvoří vrták, kde nás zajímá především chování ve směru Z.



Obr. 4.15 Porovnání vlivu hmotnosti nástrojů na dyn. poddajnost

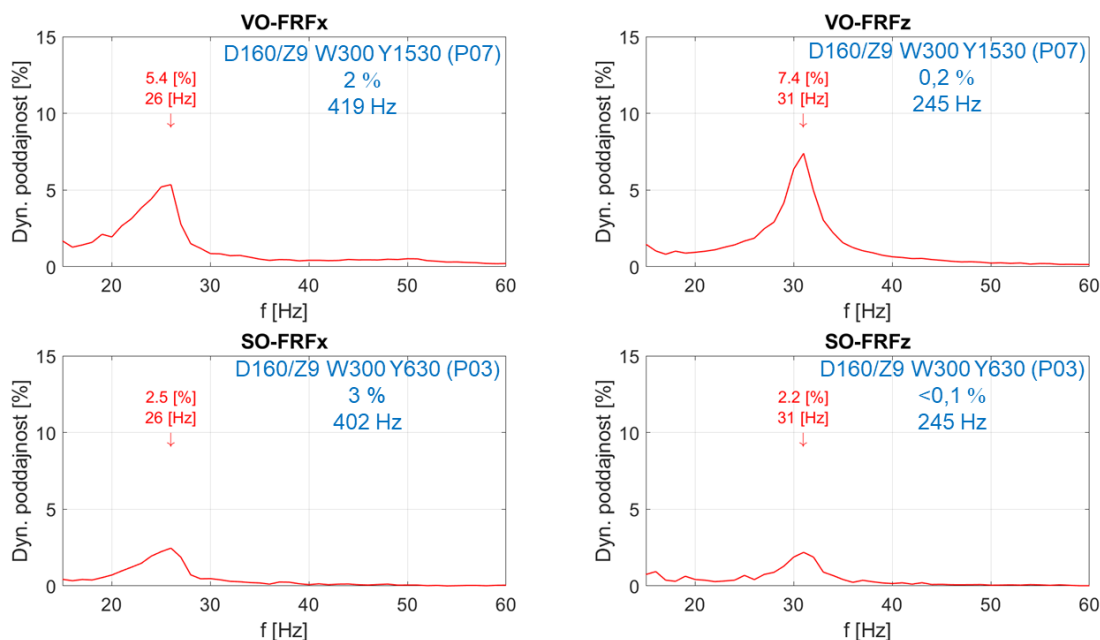
4.3.5 Porovnání FRF na nástroji a obrobku

Aby se zjistilo, zda nebude mít na následné zkoušky obráběním výraznější vliv obrobek, bylo provedeno měření FRF i na něm, jak je vidět na Obr. 4.16. Zde se měřilo pouze ve směrech X a Z, a to vždy uprostřed každého ocelového bloku. Body byly označeny VO (vrchní obrobek) a SO (spodní obrobek).



Obr. 4.16 Schéma sítě poloh pro měření FRF na obrobku

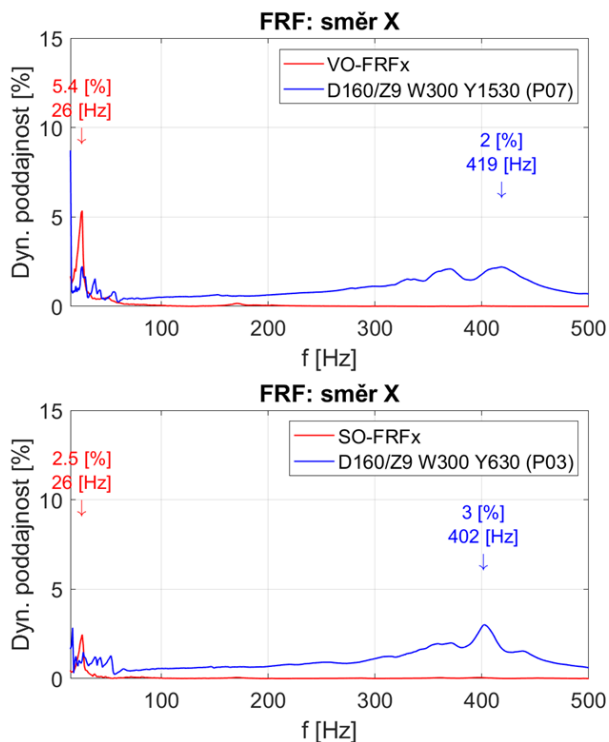
Výsledky měření jsou vidět na Obr. 4.17, kde je pro porovnání vždy uvedena i hodnota dominantní amplitudy a její frekvence pro frézu D160/Z9 při zasunutém vřetenu (W300).



Obr. 4.17 Výsledky měření FRF na obrobku

Jak je z obrázku patrné, amplituda dyn. poddajnosti u obrobku je celkově malá. Zajímavé ovšem je zjištění, že při zasunutém vřetenu je amplituda v dolní poloze srovnatelná s nástrojem a v horní poloze je dokonce upínací úhelník s obrobkem poddajnější než nástroj. Nástroj a obrobek se liší především frekvencí na které se vyskytuje dominantní poddajnost, jak je patrné z Obr. 4.18.

Tato skutečnost vede k zamyšlení, zda kromě vývoje konstrukce samotného stroje, která je již nyní na velice dobré úrovni, není záhodno použít jiných než klasických litinových úhelníků. V kombinaci s kvalitně nakonstruovaným strojem se může právě upínací přípravek projevit jako slabé místo a omezit tak výkonové možnosti stroje.



Obr. 4.18 Porovnání dyn. poddajnosti na nástroji a obrobku

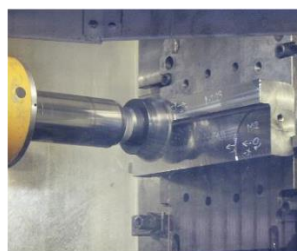
Z naměřených dat je známá frekvence dominantní poddajnosti obrobku. Ta je ve směru X 26 Hz a ve směru Z 31 Hz. Frekvence dominantní poddajnosti měřené na nástrojích při vysunutí W300 jsou nad 400 Hz. Podle toho lze při vzniku *chatteru* určit kritický zdroj poddajnosti.

4.4 Výkonové zkoušky obráběním

Se třemi nástroji byly provedeny celkem 4 obráběcí operace, které jsou stručně shrnuty na Obr. 4.19. Pro každou operaci byly zvoleny jedny výchozí rezné a záběrové podmínky a ty byly zachovány napříč všemi měřeními dané operace. S ohledem na čas se měnil pouze vždy jeden parametr, který zvyšoval silové zatížení stroje. V případě čelní frézy to byla hodnota axiální hloubky záběru a_p , u vrtáku posuv na otáčku f_o a u ježkové frézy radiální šířka záběru a_e .



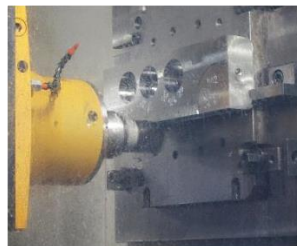
2.2.2021
Fréza oktg. D160/Z9,
frézování do rohu,
vřetení W dvě polohy,
vřeteník Y nahoře a dole;
 $v_c = 181$ m/min,
 $f_z = 0,349$ mm,
 $a_e = 110$ mm,
proměnlivé a_p .



2.2.2021
Fréza oktg. D160/Z9,
frézování čelní plochy,
vřetení W jedna poloha,
vřeteník Y nahoře a dole;
 $v_c = 181$ m/min,
 $f_z = 0,349$ mm,
 $a_e = 50$ mm,
proměnlivé a_p .



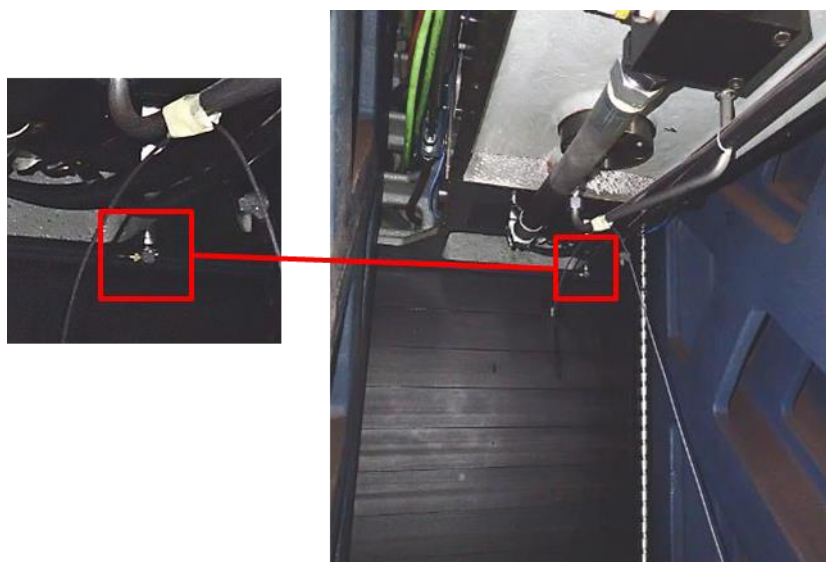
3.2.2021
Vrták D78/Z1,
vrtání v ose Z,
vřetení W dvě polohy,
vřeteník Y nahoře a dole;
 $v_c = 100$ m/min,
proměnlivý posuv f_o .



3.2.2021
Fréza ježková D80/Z3,
frézování boční plochy,
vřetení W dvě polohy,
vřeteník Y pouze nahoře;
 $v_c = 120$ m/min,
 $f_z = 0,2$ mm,
 $a_p = 40$ mm,
proměnlivé a_e .

Obr. 4.19 Stručný přehled provedených obráběcích operací

Cílem testů bylo určit, při jakých hodnotách vstupních parametrů se stroj dostane do oblasti samobuzeného kmitání. Při obrábění byly pomocí interního osciloskopu zaznamenávány polohy pohybových os a výkon na vřetení. Dále byly měřeny vibrace na stroji pomocí tříosého akcelerometru umístěného ve spodní části vřeteníku (viz Obr. 4.20).

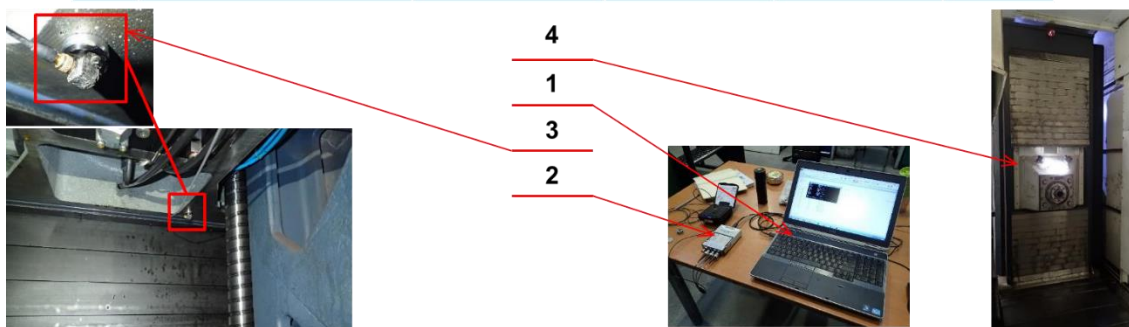


Obr. 4.20 Umístění akcelerometru pod vřeteníkem při zkouškách obráběním

Sestava aparatury pro měření vibrací je k vidění na Obr. 4.21. Jedná se o stejné nástroje jako při měření FRF, jen zde nebylo použito modální kladivo.



Číslo	Název	Výrobce	Typ	S/N	Kanál
1	Notebook	DELL	E6530	9XKGLX1	-
2	Analyzátor NI USB-9234	NI	NI USB-9162 NI 9234	146D6E0 17E0BD7	Dev1
3	Tříosý akcelerometr Kabel: 1-4 28 UNF → BNC	Brüel&Kjaer Brüel&Kjaer	4524 B1 AO-0526-D-100	31216 2012W05	Dev1/ai1 Dev1/ai2 Dev1/ai3
4	Obráběcí centrum	TOS VARNSDORF	WHT110C	0101	-



Obr. 4.21 Výkonové zkoušky obráběním: použitá aparatura

4.4.1 Popis metodiky měření a zpracování výsledků

V průběhu obrábění byly zaznamenávány pomocí ručně spouštěného interního osciloskopu tyto veličiny:

- Čas [sec]
- Výkon na vřeteni [%]
- Otáčky vřetena [min^{-1}]
- Poloha X
- Poloha Y
- Poloha Z

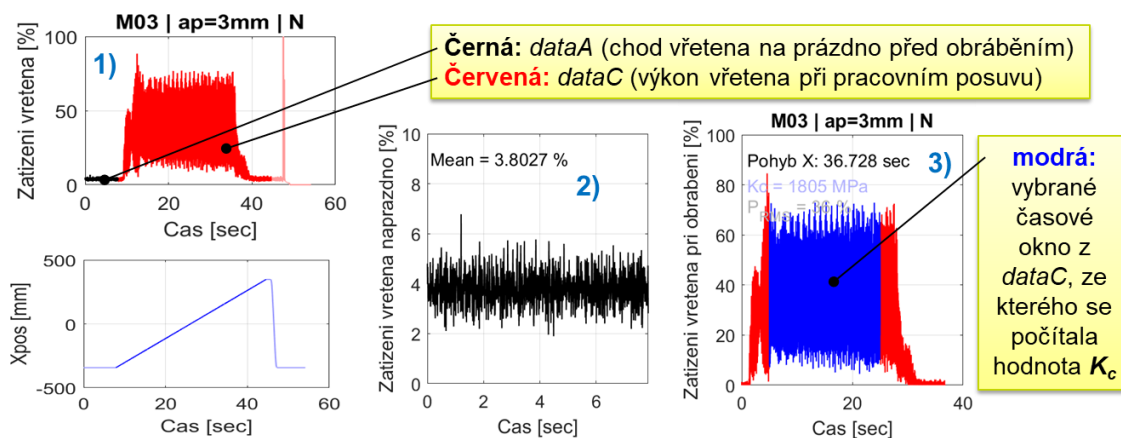
Zaznamenaná data slouží primárně k operačnímu určení rezného odporu dle rovnice (4.1) vycházející z předešlých publikovaných výsledků RCMT ČVUT [36], kde bylo zjištěno, že takto získaná hodnota měrného rezného odporu K_c je přesnější než běžná hodnota z katalogu.

$$K_c = \frac{P}{MRR} ; \left[Pa = \frac{W \cdot s}{m^3} \right] \quad (4.1)$$

Ze záznamu výkonu je podle pohybu klíčové pohybové osy odečítán výkon při chodu naprázdno před obráběním (*dataA*) a během obrábění (*dataC*) **1**). Následně je určena



střední hodnota chodu naprázdno 2), která je odečtena od záznamu výkonu při obrábění 3) (viz Obr. 4.22).

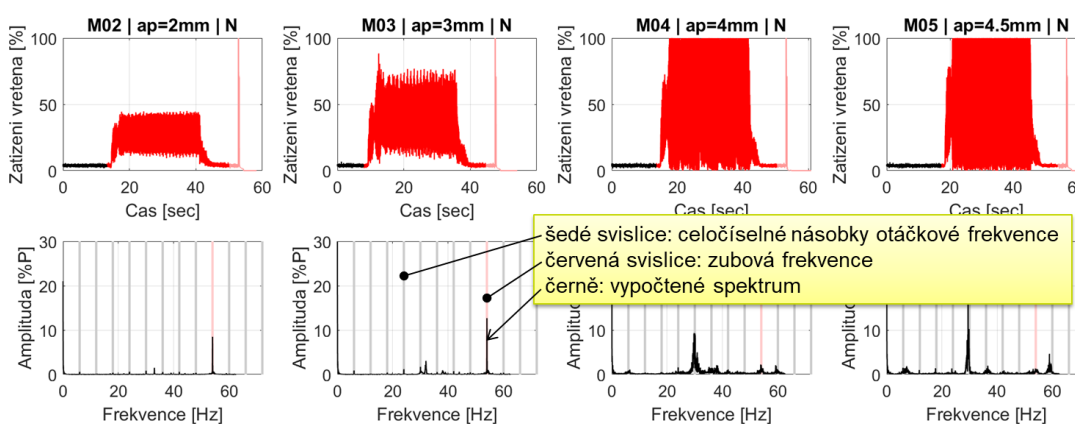


Obr. 4.22 Interpretace naměřených dat výkonu

Záznam výkonu vřetena 3) je numericky integrován v čase, tzn. vypočtena práce spotřebovaná procesem [J]. Tento výsledek je podělen objemem odebraného materiálu.

K_c je hodnota vypočtená z modře vyznačeného časového okna 3) – tento postup umožňuje eliminovat vlivy záběrových podmínek při nájezdu/výjezdu do řezu.

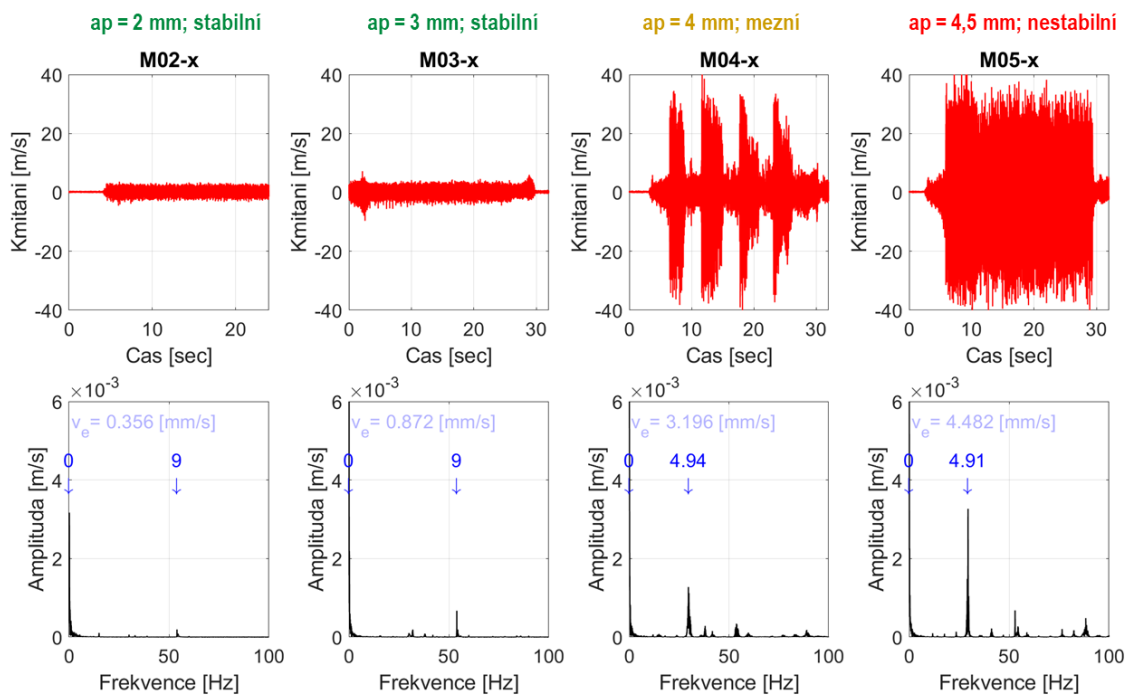
Data jsou z řídicího systému vyčítána s periodou 0,008 sec, tzn. 125 Hz. Jako pomocnou informaci bylo vypočteno spektrum časového signálu *dataC* (viz Obr. 4.23). S ohledem na malou vzorkovací frekvenci je spektrum omezeno do 60 Hz. Jedná se pouze o pomocnou informaci, hlavní informace o procesních vibracích jsou zaznamenané z akcelerometru pod vřeteníkem.



Obr. 4.23 Interpretace frekvenčního spektra z naměřených dat výkonu



Pro vyhodnocování stability řezného procesu byly primárně použity informace z akcelerometru pod vřeteníkem (viz. Obr. 4.20). Příklad takovéto vizualizace je vidět na Obr. 4.24. Součástí analýzy byly také kvalita obrobeného povrchu a celkový hluk, kterážto projevy jsou také dobrým indikátorem samobuzeného kmitání.

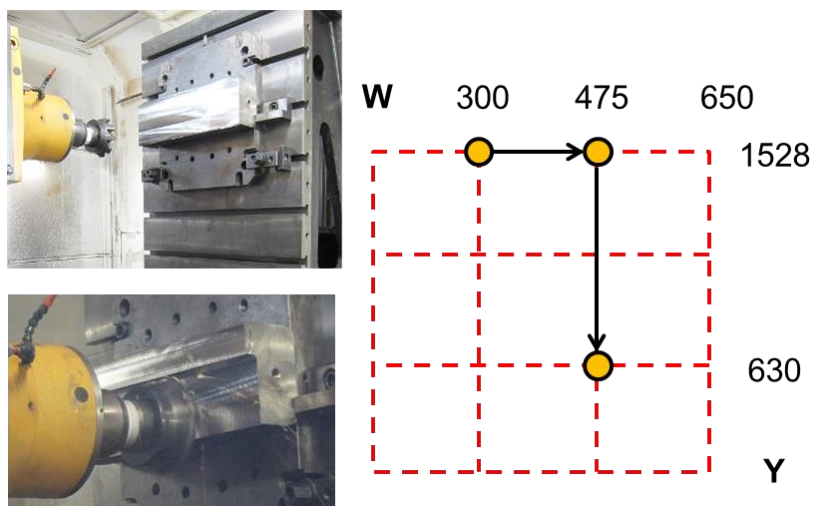


Obr. 4.24 Příklad analýzy kmitání při obrábění

Na spodním řádku grafů na Obr. 4.24 jsou modrými číslicemi znázorněny násobky otáčkové frekvence a současně vypočtena mohutnost signálu rychlosti pro rychlé porovnání. Jak je z obrázku patrné, při stabilním obrábění je amplituda kmitů v časové oblasti nízká a ve frekvenční oblasti má dominantní frekvence kmitání celočíselný násobek otáčkové frekvence. Při vzniku nestability jsou již vibrace výrazné, včetně zvukového doprovodu. Také ve frekvenčním spektru můžeme pozorovat změnu, kdy dominantní frekvence již není celočíselným násobkem otáčkové.

4.4.2 Frézování do rohu s D160/Z9

Prvním testem bylo frézování do rohu s čelní frézou D160/Z9. Nástroj není k této operaci primárně určen, ale bylo zajímavé sledovat, jak si s úkolem poradí. Obrábění probíhalo postupně ve třech bodech (viz Obr. 4.25) vždy sousledně i nesousledně.



Obr. 4.25 Polohy při frézování do rohu s frézou D160/Z9

Záběrové a řezné podmínky:

- $v_c = 181$ m/min
- $f_z = 0,349$ mm
- $a_e = 110$ mm
- proměnlivé a_p

Tab. 1 Seznam jednotlivých měření a jejich parametrů pro frézování do rohu s D160/Z9

Měření	a_p [mm]	W [mm]	Y [mm]	Záběr	Č. přílohy
M02	2	300	1528	nesousl.	2
M03	3	300	1528	nesousl.	
M04	4	300	1528	nesousl.	
M05	4,5	300	1528	nesousl.	
M06	3	300	1528	sousledně	3
M07	4	300	1528	sousledně	
M08	4,5	300	1528	sousledně	
M09	1	475	1528	nesousl.	4
M10	2	475	1528	nesousl.	
M11	1	475	1528	sousledně	
M12	2	475	1528	sousledně	
M17	1	475	630	nesousl.	5
M18	2	475	630	nesousl.	
M19	3	475	630	nesousl.	
M20	2	475	630	sousledně	
M21	3	475	630	sousledně	



V Tab. 1 jsou uvedeny polohy jednotlivých měření, směr záběru a použitá hodnota a_p včetně příloh, kde lze jednotlivá měření konkrétně dohledat.

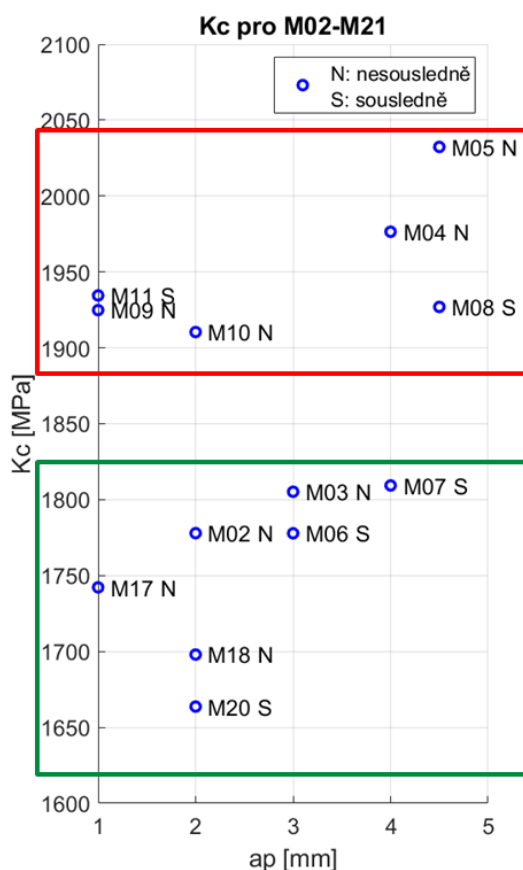
Vyhodnocení měrného řezného odporu:

Pro šířku záběru 110 mm vychází pro stabilní obrábění hodnota K_c nižší než pro nestabilní obrábění (viz Obr. 4.26).

K_c roste pro větší a_p . Vysvětlením je nejspíš velké tření boku VBD po zbytkovém materiálu v horní části frézy, (fréza by správně neměla frézovat do rohu).

Pro stabilní sousledné frézování vychází hodnota měrného řezného odporu zanedbatelně menší (cca 5 %), než pro nesousledné frézování.

Hodnota K_c v rozsahu 1660-1820 MPa pro stabilní obrábění odpovídá řeznému odporu VBD s velmi pozitivní geometrií (firma Walter ji označuje „positive octagonal“).



Obr. 4.26 Vyhodnocení měrného řezného odporu pro M02-M12 a M17-M21



Shrnutí dílčích výsledků:

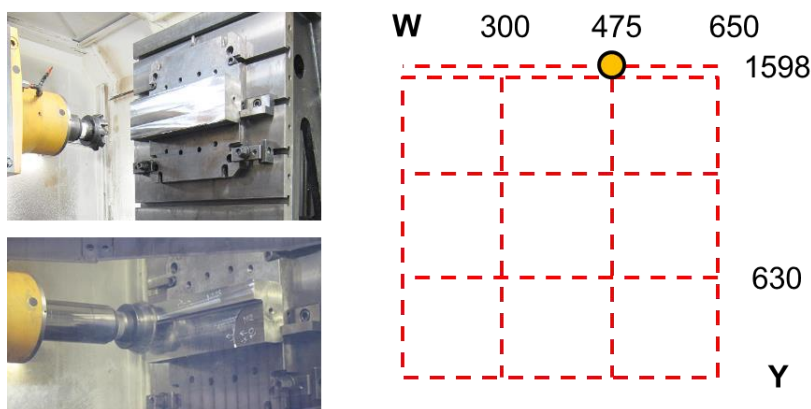
Po analýze provedených měření byla vytvořena souhrnná tabulka (viz Tab. 2) obsahující stěžejní informace pro další část práce, tedy zda se při daném měření obrábělo stabilně či nestabilně a výsledná hodnota naměřeného měrného řezného odporu K_c . Pokud se zvýšila amplituda vibrací oproti nominálnímu stavu při stabilním frézování, ale nebyla natolik výrazná, aby ovlivnila chod stroje, bylo toto měření vyhodnoceno jako mezní.

Tab. 2 Shrnutí dílčích výsledků při frézování do rohu s nástrojem D160/Z9

W [mm]	Y [mm]	a_p [mm]	Měření	Záběr	Stabilita	K_c [MPa]	Měření	Záběr	Stabilita	K_c [MPa]
300	1528	2	M02	nesousledně	stabilní	1778				
300	1528	3	M03	nesousledně	stabilní	1805	M06	sousledně	stabilní	1778
300	1528	4	M04	nesousledně	mezní	1876	M07	sousledně	mezní	1809
300	1528	4,5	M05	nesousledně	nestabilní	2032	M08	sousledně	nestabilní	1927
475	1528	1	M09	nesousledně	stabilní	1925	M11	sousledně	stabilní	1935
475	1528	2	M10	nesousledně	nestabilní	1910	M12	sousledně	nestabilní	N/A
475	630	1	M17	nesousledně	stabilní	1742				
475	630	2	M18	nesousledně	mezní	1698	M20	sousledně	stabilní	1664
475	630	3	M19	nesousledně	nestabilní	N/A	M21	sousledně	nestabilní	N/A

4.4.3 Čelní frézování s D160/Z9

Dalším testem v pořadí bylo použití stejného nástroje, tedy čelní frézy D160/Z9 pro operaci rovinného frézování s radiální šířkou záběru $a_e = 50$ mm a proměnlivým a_p . Řezná rychlost a posuv na zub byly totožné s předešlou operací. V tomto případě bylo měření prováděno pouze v jediné poloze, a to W475 Y1598 (viz Obr. 4.27). Při obrábění se horní kraj nástroje nacházel 20 mm nad horním okrajem obráběného dílce.



Obr. 4.27 Poloha při rovinném frézování s frézou D160/Z9



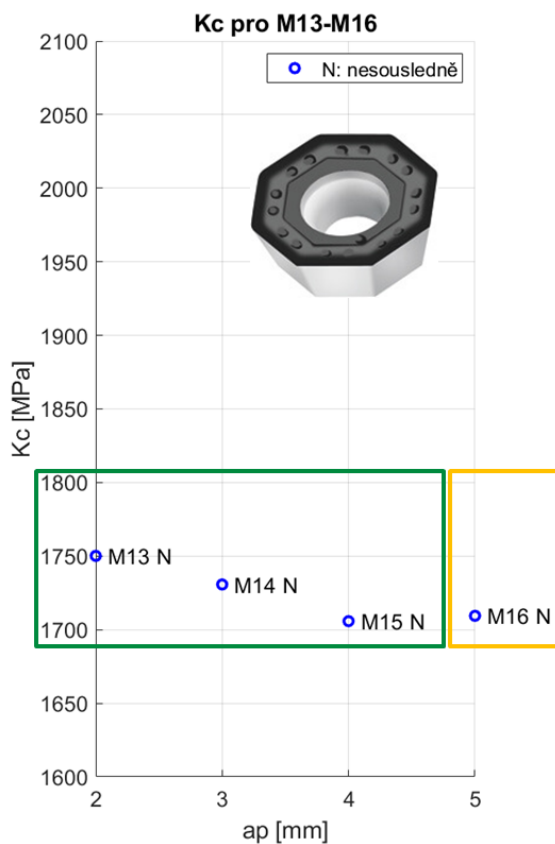
Jak je patrné z Tab. 3, pro tuto operaci byly provedeny pouze 4 měření, a to vždy s nesousledným záběrem nástroje. V tabulce jsou opět uvedeny čísla příloh, kde lze jednotlivá měření dohledat.

Tab. 3 Seznam jednotlivých měření a jejich parametrů pro rovinné frézování s D160/Z9

Měření	a_p [mm]	W [mm]	Y [mm]	Záběr	Přílohy
M13	2	475	1598	nesousl.	6
M14	3	475	1598	nesousl.	
M15	4	475	1598	nesousl.	
M16	5	475	1598	nesousl.	

Vyhodnocení měrného řezného odporu:

Hodnota K_c velmi mírně klesá pro větší a_p (viz Obr. 4.28). Relativní změna je do 3 % a lze ji zanedbat (= K_c stagnuje). Potvrzuje to, že pro měření M02-M12 a M17-M21 byl růst K_c pro větší hodnoty a_p způsoben narážením nástroje do neobrobeného materiálu (fréza je určena pro čelní frézování, nikoliv pro frézování do rohu).



Obr. 4.28 Vyhodnocení měrného řezného odporu pro M13-M16

Hodnota K_c v rozsahu 1715-1750 MPa odpovídá řeznému odporu VBD s velmi pozitivní geometrií.

Shrnutí dílčích výsledků:

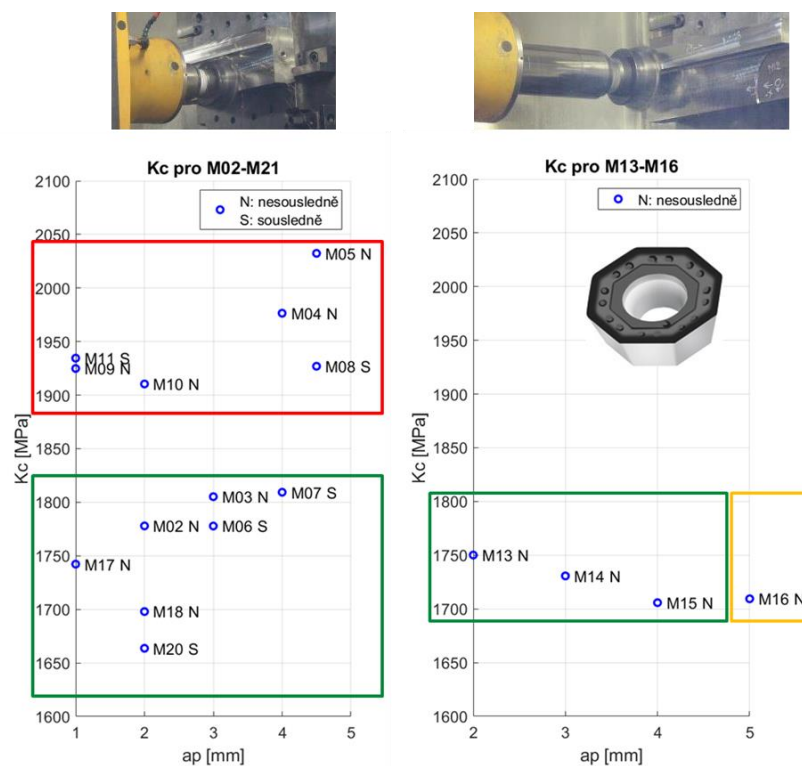
Jak je z Tab. 4 patrné, při této operaci si nástroj vedl poměrně dobře a až při hodnotě $a_p = 5$ mm se začali objevovat známky samobuzeného kmitání.

Tab. 4 Shrnutí dílčích výsledků při rovinném frézování s nástrojem D160/Z9

W [mm]	Y [mm]	a_p [mm]	Měření	Záběr	Stabilita	K_c [MPa]
475	1598	2	M13	nesousledně	stabilní	1750
475	1598	3	M14	nesousledně	stabilní	1731
475	1598	4	M15	nesousledně	stabilní	1706
475	1598	5	M16	nesousledně	mezní	1709

4.4.4 Porovnání změřených K_c pro obě operace s nástrojem D160/Z9

Jelikož se jednalo o dvě různé operace frézování s tentýž nástrojem, bylo provedeno porovnání experimentálně určených hodnot K_c (viz Obr. 4.29) pro identifikaci výsledné hodnoty, která byla později aplikována při tvorbě modelů stability.

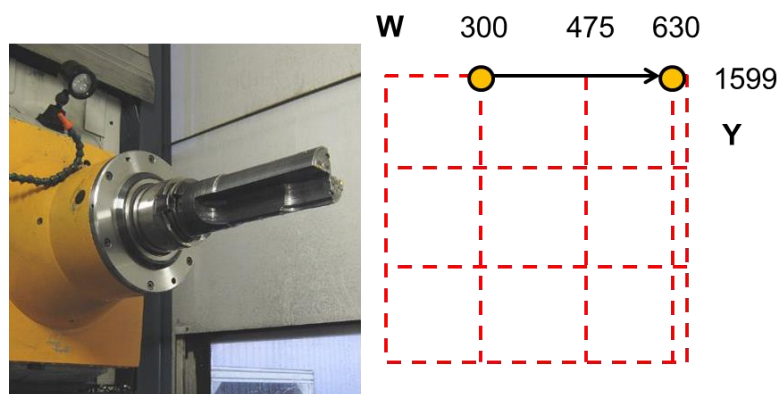


Obr. 4.29 Porovnání hodnot K_c pro obě operace s frézou D160/Z9

Pro frézování do rohu vycházela průměrná hodnota ze stabilních testů lehce vyšší než v případě čelního frézování. To bylo patrně dáno již dříve zmiňovaným třením boku nástroje o obrobek. Z tohoto důvodu byla pro další výpočty vzata střední hodnota z testů rovinného frézování, tedy 1730 MPa.

4.4.5 Vrtání s nástrojem D78/Z1

Pro tuto operaci bylo provedeno měření ve dvou polohách, jak je vidět na Obr. 4.30. Řezná rychlost v_c byla nastavena na hodnotu 100 m/min a proměnlivým parametrem v tomto případě byl posuv na otáčku f_o . Seznam jednotlivých měření včetně příslušných příloh je opět uveden v Tab. 5.



Obr. 4.30 Polohy při vrtání s nástrojem D78/Z1

Tab. 5 Seznam jednotlivých měření a jejich parametrů pro vrtání s nástrojem D78/Z1

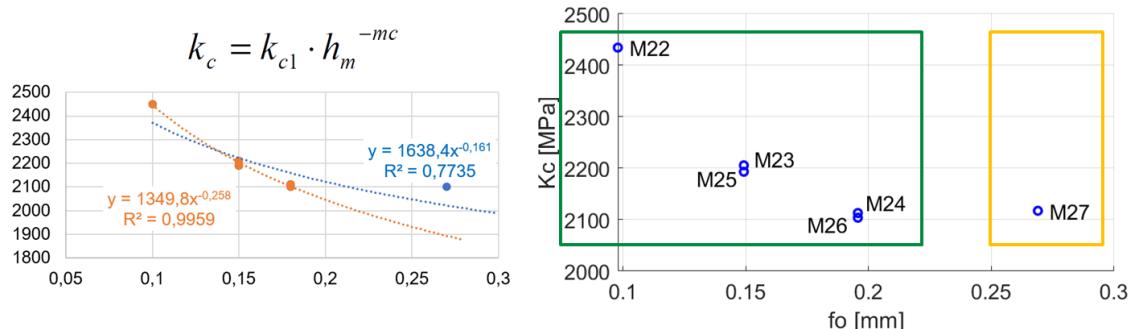
Měření	f_o [mm]	W [mm]	Y [mm]	Přílohy
M22	0,1	300	1599	7
M23	0,15	300	1599	
M24	0,2	300	1599	
M25	0,15	630	1599	8
M26	0,2	630	1599	
M27	0,27	630	1599	

Vyhodnocení měrného řezného odporu:

Pro vrtání hodnota K_c mírně klesá s rostoucím posuvem na otáčku f_o . To odpovídá Kienzleho zákonu – s větším f_o roste tloušťka třísky, a tedy klesá měrný řezný odpor (viz Obr. 4.31). Průměrná hodnota z jednotlivých měření sice odpovídá cca 2210 MPa, ale



jelikož je závislost na f_o značně exponenciální, bylo by pro další výpočty použito proložení náhradní funkcí.



Obr. 4.31 Vyhodnocení měrného řezného odporu pro M22-M27

Shrnutí dílčích výsledků:

Jak je z Tab. 6 dobře patrné, vrtací operace probíhali velice dobře i při vysokém vysunutí vřetene. Stroj je ve směru osy Z velice tuhý, a tudíž pro takovéto operace vhodný.

Tab. 6 Shrnutí dílčích výsledků při vrtání s nástrojem D78/Z1

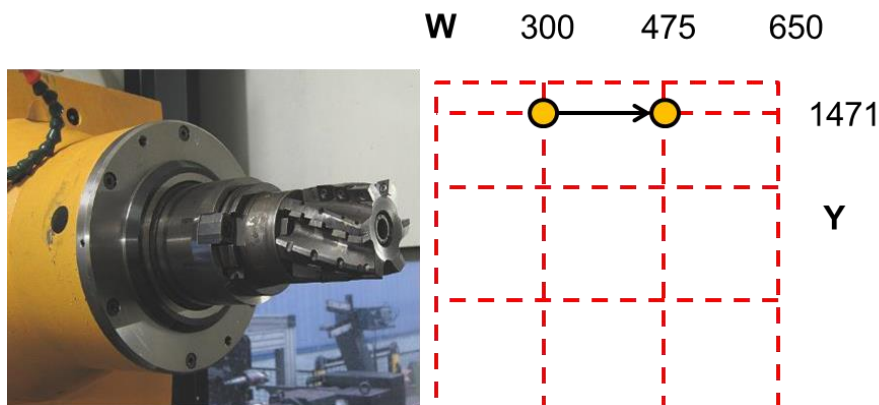
W [mm]	Y [mm]	f_o [mm]	Měření	Stabilita	K_c [MPa]
300	1599	0,1	M22	stabilní	2434
300	1599	0,15	M23	stabilní	2206
300	1599	0,2	M24	stabilní	2113
630	1599	0,15	M25	stabilní	2193
630	1599	0,2	M26	stabilní	2104
630	1599	0,27	M27	mezní	2117

4.4.6 Boční frézování s nástrojem D80/Z3

Frézování s jezkovou frézou D80/Z3 probíhalo ve dvou polohách W v jednotné výšce Y (viz Obr. 4.32). Oproti operacím s čelní frézou byla tentokrát konstantním parametrem axiální hloubka záběru a_p a proměnlivá byla hodnota radiální šířky záběru a_e . Seznam konkrétních parametrů pro jednotlivá měření lze najít v Tab. 7.

Záběrové a řezné podmínky:

- $v_c = 120$ m/min
- $f_z = 0,2$ mm
- $a_p = 40$ mm
- proměnlivé a_e



Obr. 4.32 Polohy při frézování s nástrojem D80/Z3

Tab. 7 Seznam jednotlivých měření a jejich parametrů pro boční frézování s nástrojem D80/Z3

Měření	a_e [mm]	W [mm]	Y [mm]	Záběr	Přílohy
M28	10	300	1471	nesousl.	9
M29	20	300	1471	nesousl.	
M30	3	475	1471	nesousl.	
M31	5	475	1471	nesousl.	

Všechna měření probíhala s nesousledným záběrem. Po dokončení posledního testu M31 bohužel došlo k destrukci frézy, a tím byly zkoušky obráběním ukončeny.

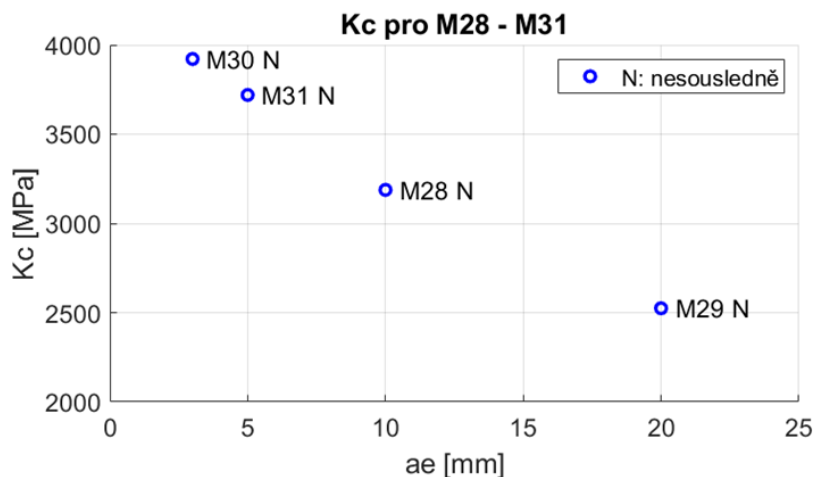
Vyhodnocení měrného řezného odporu:

Hodnota K_c klesá s rostoucím a_e . To odpovídá Kienzleho zákonu – s větším a_e roste hodnota střední tloušťky třísky a K_c klesá.

Pro boční frézování vychází poměrně vysoká hodnota $K_c = 3610 \pm 309$ MPa. Velikost řezného odporu K_c odpovídá tzv. „pozitivní geometrii VBD“, která má malý úhel čela – firma Walter tyto destičky označuje jako „Positive rhombic“ a „Positive square“.



K_c vychází silně závislé na hodnotě a_e , viz výše. Pro provedení dalších výpočtů v následujících kapitolách bude využita hodnota K_c v závislosti na a_e získaná interpolací z experimentálně získaných dat.



Obr. 4.33 Vyhodnocení měrného řezného odporu pro M28-M31

Shrnutí dílčích výsledků:

Výsledky ze zkoušek obráběním (viz Tab. 8) u tohoto nástroje jsou pro následnou aplikaci modelu poměrně strohé, protože v důsledku destrukce frézy nebylo možno naměřit více dat s parametrem a_e v rozmezí 10-20 mm. Oblast stability je v tomto případě dosti nejistá.

Tab. 8 Shrnutí dílčích výsledků při bočním frézování s nástrojem D80/Z3

W [mm]	Y [mm]	a_e [mm]	Měření	Záběr	Stabilita	K_c [MPa]
300	1471	10	M28	nesousledně	stabilní	3188
300	1471	20	M29	nesousledně	nestabilní	2524
475	1471	3	M30	nesousledně	stabilní	3921
475	1471	5	M31	nesousledně	stabilní	3720

4.4.7 Vyhodnocení zkoušky výkonnosti

V této kapitole jsou souhrnně uvedeny výsledky výkonových zkoušek pro všechny 4 operace. Cílem je zhodnotit dynamické chování stroje s ohledem na schopnost přenést instalovaný výkon vřetena do řezu.

Pro jednotlivé polohy v pracovním prostoru stroje je vytvořena tabulka simulující diagram stability. Součástí vyhodnocení je i RMS hodnota výkonu odečtená z řídicího



systemu stroje. Při vzniku nestabilního kmitání je zde zanesena také hodnota frekvence dominantní amplitudy.

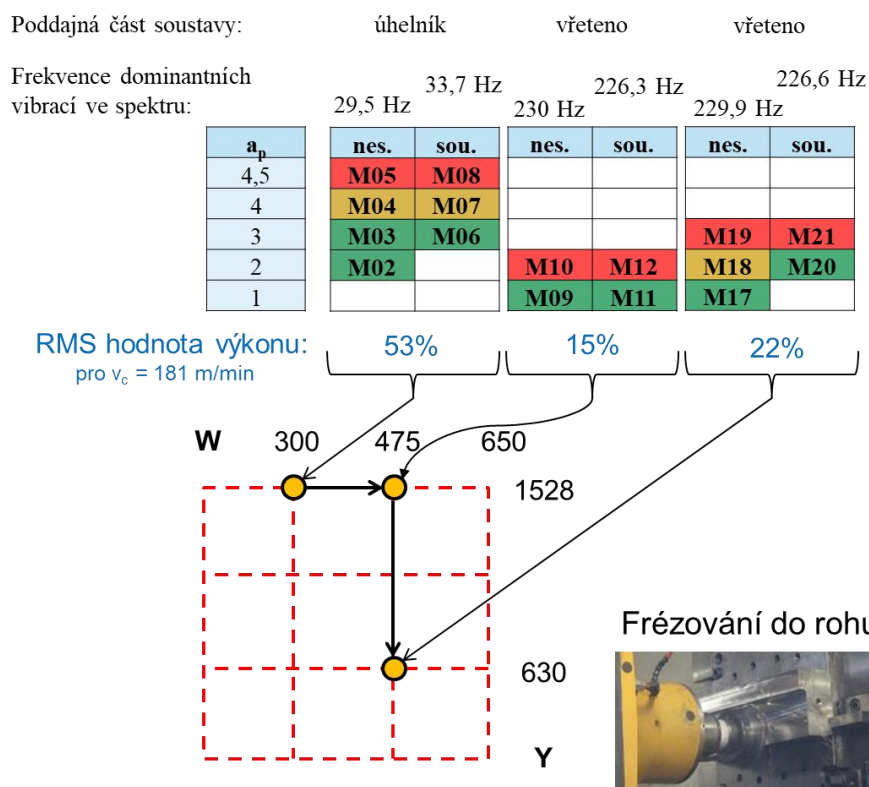
Frézování do rohu čelní frézou D160/Z9:

Na Obr. 4.34 je znázorněno určení stability pro jednotlivá měření pomocí barev:

- Zelená – stabilní
- Žlutá – mezní
- Červená – nestabilní

Využití výkonu při frézování do rohu s frézou D160/Z9 je na úrovni 15-53 %, což je akceptovatelné. Je nutno vzít v úvahu, že vřeteník je v horní poloze a vřeteno je částečně vysunutě a podepřené opěrou, která však nemá tak velkou tuhost, jako např. uložení do předeprnutého valivého ložiska.

Podle dominantní frekvence v naměřeném signálu při vzniku nestabilního kmitání se ukazuje jako nejslabší část systému upínací úhelník při vysunutí W300. Při vyšším výsuvu vřetene ale dochází již k rozkmitání nástroje. Je zde také patrné, že frekvence, na které se stroj rozkmitá se mírně liší pro sousledný a nesousledný záběr.



Obr. 4.34 Výsledky výkonové zkoušky pro frézování do rohu s nástrojem D160/Z9

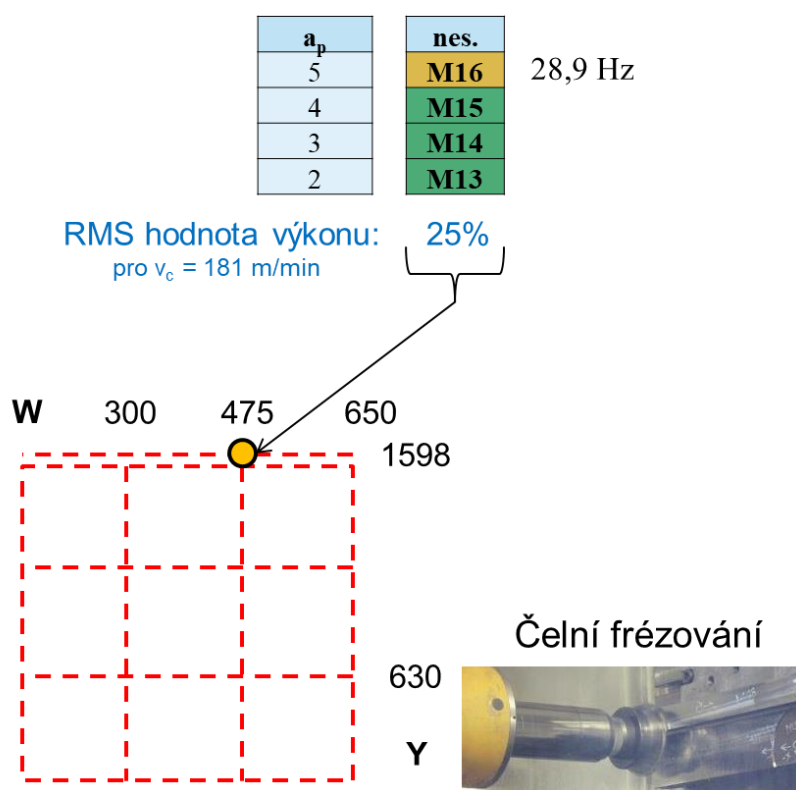


Rovinné frézování s čelní frézou D160/Z9:

Na Obr. 4.35 jsou uvedeny výsledky pro rovinné frézování. Využití výkonu při frézování frézou D160/Z9 je na úrovni 25 %, což lze považovat za dobrý výsledek s ohledem na to, že se jedná o vysunutě vřeteno (W475) a vřeteník je v horní poloze. Odebíraný výkon by se mohl dále zvýšit navýšením řezné rychlosti – tento nástroj by to bez problémů zvládl.

Dominantní poddajností systému v této konfiguraci je úhelník. Možnosti stroje jsou však již také na hranici – poddajnost na nástroji i na obrobku je v této poloze podobná.

Je nutno také uvést, že pro tyto operace čelního frézování se obvykle nepoužívají tak velké hloubky řezu.



Obr. 4.35 Výsledky výkonové zkoušky pro čelní frézování s nástrojem D160/Z9

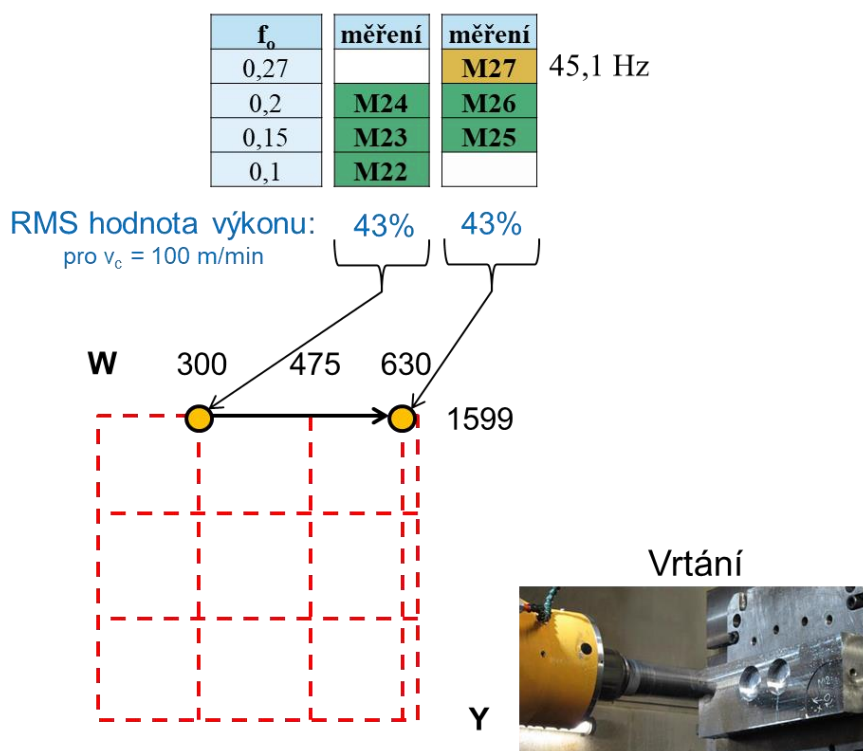
Vrtání s nástrojem D78/Z1:

Jak je vidět na Obr. 4.36, v obou případech, tedy při zasunutém i vysunutém vřeteni v horní poloze je RMS hodnota výkonu na úrovni cca 43 %, což lze považovat za výborné. Ukazuje to také, že výkonnostní mapa v celém pracovním prostoru stroje by



byla v zásadě jednoduše s jedinou úrovní využitelného výkonu pro dané řezné a záběrové podmínky.

Jak již bylo řečeno, stroj je ve směru osy Z velice tuhý, takže nejpoddajnější článek systému je patrně úhelník. Frekvence kmitání se sice liší od změřených dyn. poddajností, ale ty byly měřeny na novém obrobku. Po dvaceti testech frézování a rozvrtání obrobku se jeho dominantní frekvence mohla v důsledku snížení hmotnosti změnit.

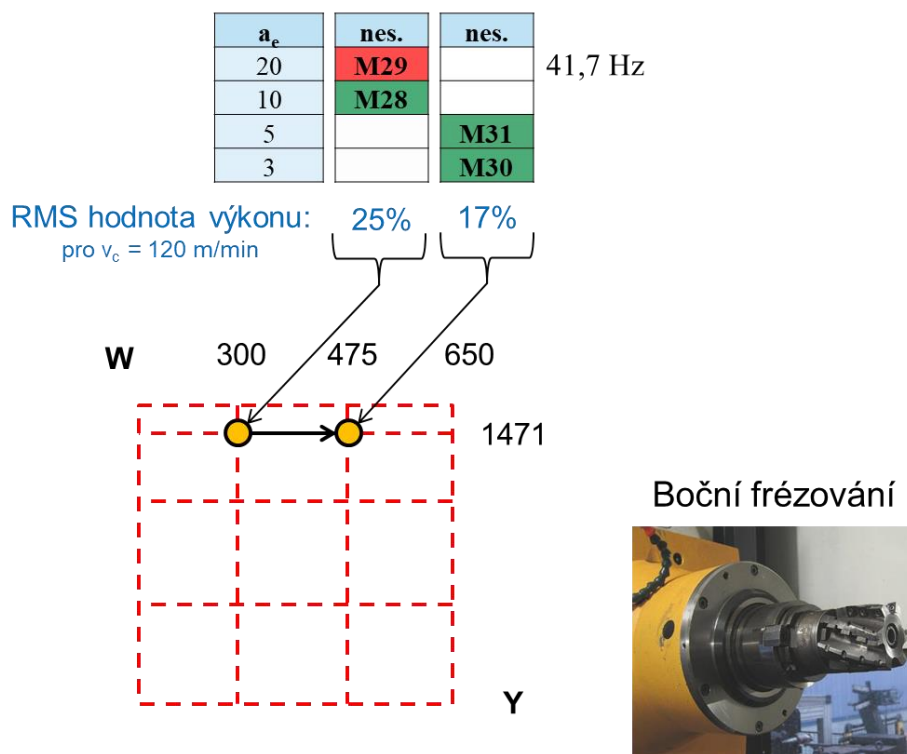


Obr. 4.36 Výsledky výkonové zkoušky pro vrtání s nástrojem D78/Z1

Boční frézování s ježkovou frézou D80/Z3:

Využití výkonu při frézování bokem ježkovou frézou D80/Z3 je na úrovni cca 25 % (viz Obr. 4.37), což lze považovat za dostačující. Podobně jako u čelního frézování, i zde je úhelník dominantní poddajností systému v této konfiguraci. Možnosti stroje jsou však již také na hranici.

Využitý výkon by patrně vzrostl pro vyšší hodnoty a_e v rozmezí 10-20 mm. V důsledku destrukce frézy již nebylo možno další testy provést a tuto myšlenku ověřit.



Obr. 4.37 Výsledky výkonové zkoušky pro boční frézování s ježkovou frézou D80/Z3

4.5 Kritické závěry z testů stroje WHT110C

Vysunuté vřeteno je hlavním zdrojem poddajnosti, ale to je přirozené.

Změna dynamické poddajnosti na nástroji mezi polohami Y nahoře-dole je relativně malá. To ukazuje na tuhou a dobře navrženou konstrukci stojanu.

Při obrábění se zasunutým vřetenem a ve vyšší poloze Y se ukazuje jako nejslabší článek stroje upínací úhelník. Stroj obvykle nemá v tomto místě výraznější rezervu tuhosti, nicméně je to ukázka toho, že používání běžných upínacích prvků může omezovat možnosti dobře navrženého stroje.

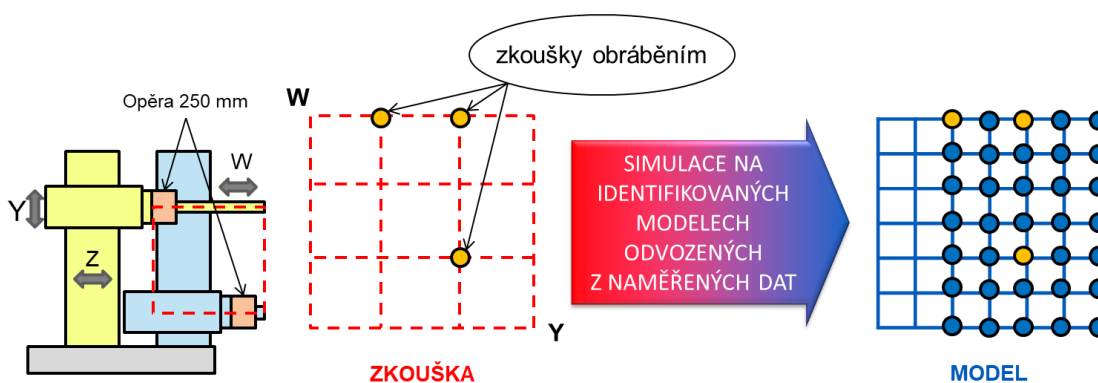
Celkově dosažené výsledky zkoušek výkonnosti stroje jsou dobré – s definovanými nástroji a řeznými operacemi je stroj schopen produktivního obrábění. Nástroje a operace byly zvoleny jako typové pro určitý druh záběru při obrábění.

Pro všechny nástroje byla zvolena poměrně konzervativně řezná rychlost – na spodním okraji aplikačního rozsahu. Důvodem byly bezpečnostní obavy z chování stroje, který

předtím nebyl takto testován. U všech nástrojů by bylo možné zvýšit řeznou rychlost, čímž by vzrostl i objem výkonu spotřebovaný na vřetení (viz Obr. 4.46).

4.6 Náhradní model poddajnosti stroje

Jelikož jsou zkoušky výkonnosti velice časově náročné, bylo provedeno měření pouze v řídké síti tří disktrétních bodů (v případě frézování do rohu s nástrojem D160/Z9). Cílem tohoto snažení bylo otestovat, zda nelze ušetřit v budoucnu čas tím, že takovéto kratší měření se doplní změřením FRF v celém pracovním prostoru stroje a následně se použije pro simulaci obráběcího procesu v libovolném bodě pracovního prostoru stroje (viz Obr. 4.38).



Obr. 4.38 Motivační charakter práce

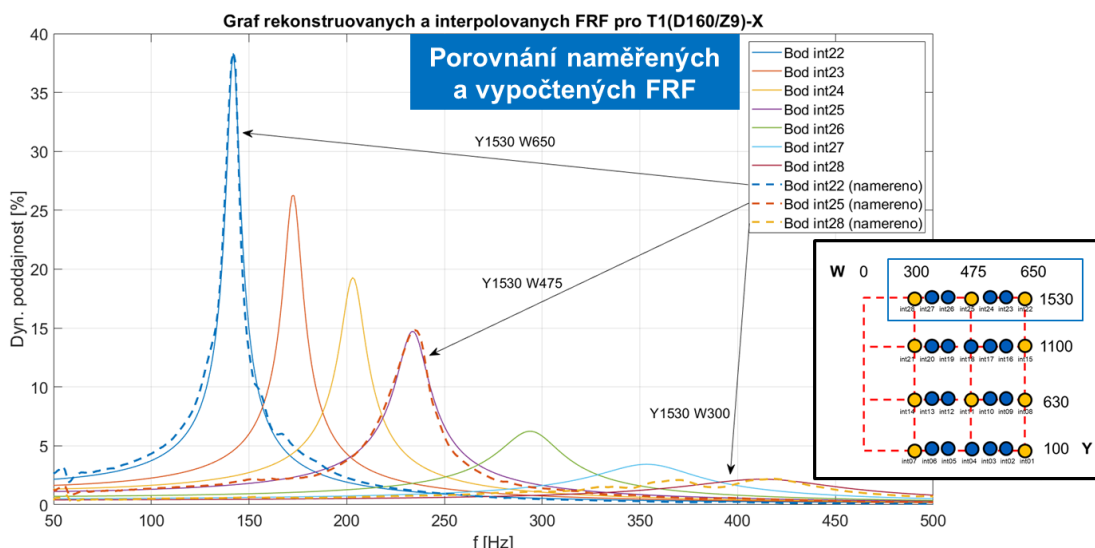
Samotné měření dynamické poddajnosti bylo provedeno v sice hustší, přesto ale stále řídké síti bodů. Z tohoto důvodu byly jednotlivé naměřené průběhy FRF analyzovány a popsány pomocí modálních parametrů, dle postupu uvedeného v kapitole 3.2.6.

Jelikož se v průbězích FRF vyskytoval vždy jeden dominantní mód poddajnosti, stačilo modální parametry vždy určit pouze z něj. Následkem čeho vznikl soubor modálních parametrů pro jednotlivé nástroje a směry. Tyto jednotlivé modální parametry byly následně interpolovány na celý pracovní prostor stroje, aby se z nich následně dala rekonstruovat FRF v libovolném bodě.

Na Obr. 4.39 lze pozorovat výsledek této rekonstrukce z interpolovaných modálních parametrů získaných z naměřených FRF. Jak je vidět, průběh absolutních hodnot dyn. poddajností získaných z identifikovaných modálních parametrů uspokojivě odpovídá přímo naměřeným průběhům. Čárkované naměřené průběhy se amplitudově i frekvenčně



s rekonstruovanými FRF shodují. V grafu je pro názornost ukázán průběh pro veškeré hodnoty výsuvu W ve výšce $Y1530$. Na pláncu vpravo jsou oranžově zobrazeny body, kde probíhalo měření a modře interpolované body. Síť lze dle potřeby dále zahustit.



Obr. 4.39 Graf rekonstruovaných a interpolovaných FRF

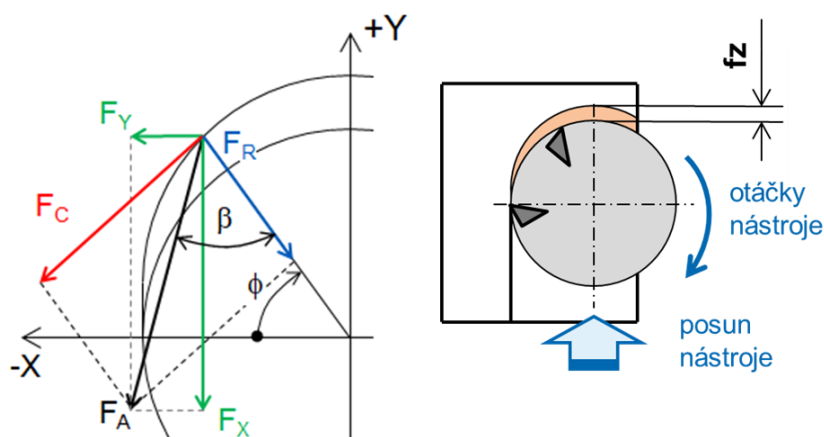
Takto interpolačně vzniklá síť FRF byla vytvořena pro každý nástroj a směr, což byl předpoklad pro využití následného modelu stability v celém pracovním prostoru, protože FRF je jeden ze vstupních parametrů.

4.7 Simulační model stability obrábění pro naměřená data

Abychom mohli vytvořit kvalitní a dostatečně podrobnou mapu meze stability v celém pracovním prostoru stroje, bylo by potřeba velké množství měření. Pomocí modelu, který operuje s několika málo daty získaných z měření, lze tento proces zkrátit, a přesto dosáhnout obdobného výsledku.

Pro provedení výpočtu limitní axiální hloubky třísky a_{plim} dle rovnice (3.21) potřebujeme znát několik vstupních parametrů. Zaprvé to je měrný řezný odpor do aktivní složky síly K_s (viz Obr. 4.40). Ten můžeme vypočítat dle rovnice (4.2), kde K_c je identifikovaný měrný řezný odpor ze zkoušek obráběním a β je úhel do aktivní složky síly. Úhel β můžeme brát jako 63° , uvažujeme-li poměr mezi tečnou a radiální složkou síly 2:1.

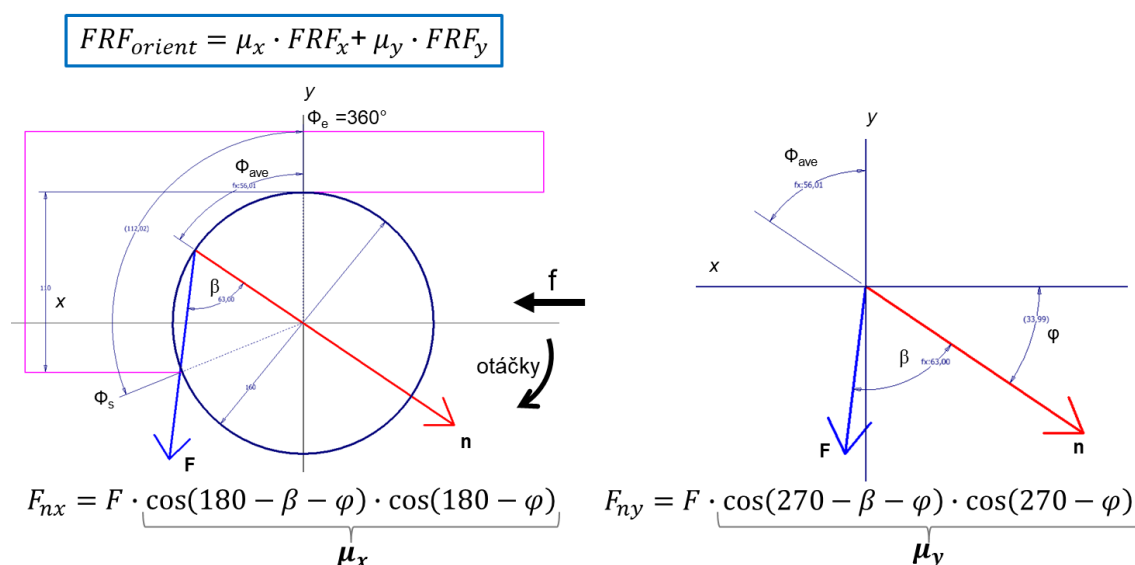
$$K_s = \frac{K_c}{\sin \beta} \quad (4.2)$$



Obr. 4.40 Schéma rozložení sil při průchodu nástroje materiálem [26]

Dalším parametrem je počet zubů v záběru N_t , který je závislý na celkovém počtu zubů frézy a vstupním a výstupním úhlem záběru, kde Φ_s je úhel vstupu zubu do řezu a Φ_e úhel výstupu zubu z řezu. Pro jedny záběrové podmínky vypočtenou hodnotu N_t dle rovnice (3.29) uvažujeme jako konstantní.

V neposlední řadě vstupuje do výpočtu dle rovnice (3.21) orientovaná dynamická poddajnost FRF_{orient} . Ta závisí na směrové poddajnosti změřené na nástroji a na záběrových podmínkách. Tyto záběrové podmínky následně určují orientační faktory μ_x a μ_y , které po vynásobení příslušných FRF dle rovnice (3.24) udávají výslednou FRF_{orient} .



Obr. 4.41 Určování orientačních faktorů pro sousledné frézování do rohu s frézou D160/Z9



Na Obr. 4.41 je vidět příklad jednoho z nákresů záběrových podmínek odpovídající souslednému frézování do rohu s čelní frézou D160/Z9 při hodnotě $a_e = 110$ mm. Výpočet probíhá dle postupu popsaného v kapitole 3.3.3. Všechny nákresy určování směrových koeficientů v závislosti na záběrových podmínkách lze najít v přílohách č. 10-16.

4.7.1 Porovnání výsledků z modelu s výsledky z praktických zkoušek

Na základě těchto výpočtových modelů stability byla vypočítána simulovaná mezní tříška v bodech, kde probíhaly zkoušky obráběním a provedeno jejich porovnání pro zhodnocení kvality modelu. Výsledky třech frézovacích operací jsou znázorněny v tabulkách na Obr. 4.42, kde zeleně jsou zvýrazněny limitní hodnoty shodující se s výsledky ze zkoušek obráběním.

Fréza D160/Z9 frézování do rohu:

Y	W	Způsob frézování	aplim z měření	aplim ze simulace [mm]	hodnota Kc v simulaci [MPa]
1530	300	nes.	3 (4)*	5,1	1730
1530	475	nes.	1	0,4	1730
630	475	nes.	1 (2)*	0,7	1730
1530	300	sou.	3 (4)*	3,4	1730
1530	475	sou.	1	1,2	1730
630	475	sou.	2	2,0	1730

čelní frézování:

Y	W	Způsob frézování	aplim z měření	aplim ze simulace [mm]	hodnota Kc v simulaci [MPa]
1530	475	nes.	4 (5)*	1,1	1730

pozn.:
obrábělo
se v
Y1598

Fréza D80/Z3 frézování bokem (ap=40):

Y	W	Způsob frézování	výsledek z měření	aplim ze simulace [mm]	hodnota Kc v simulaci [MPa]	ae [mm]
1530	300	nes.	stabilní	38,9	3188	10
1530	300	nes.	nestabilní	31,4	2524	20
1530	475	nes.	stabilní	11,4	3921	3
1530	475	nes.	stabilní**	9,4	3720	5

pozn.:
obrábělo
se v
Y1471

* v závorkách jsou uvedeny mezní limitní a_p z měření, jinak jsou uváděny stabilní limitní hodnoty a_p

** následně nastala destrukce frézy

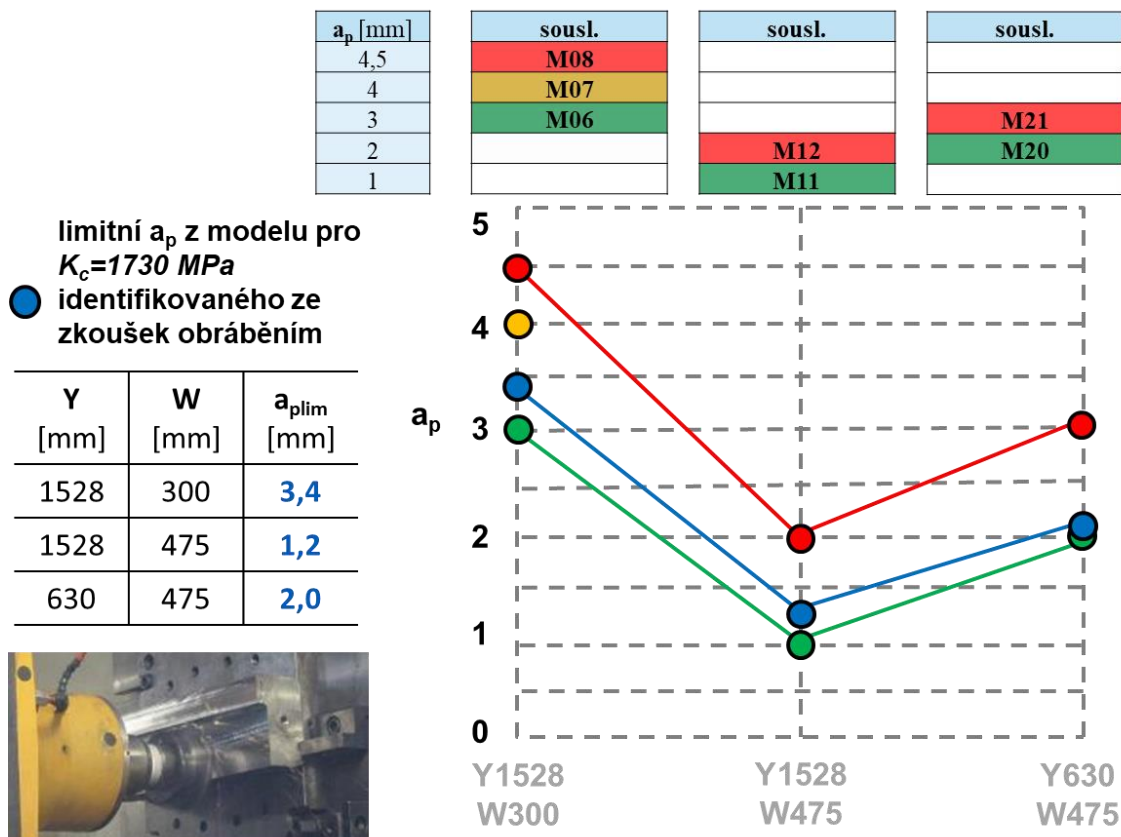
Obr. 4.42 Výsledky simulačních modelů limitní hodnoty a_p

Jak je patrné, model dobře sedí pro sousledné frézování do rohu s frézou D160/Z9 (grafické znázornění viz Obr. 4.43). Pro nesousledné frézování nejsou výsledky v dobrém souladu s reálnými testy. Nicméně vezme-li v potaz výsledky z praktických zkoušek, kde limitní hodnoty pro oba směry záběru byly velice podobné, lze předpokládat, že výsledky



z funkčního modelu pro sousledné frézování půjde s velkou pravděpodobností aplikovat také pro frézování nesousledné.

Pro čelní frézování a pro ježkovou frézu se model ukazuje také jako nespolehlivý. Pro bližší specifikování, co problém způsobuje by bylo zapotřebí více vstupních dat ze zkoušek obráběním.



Obr. 4.43 Grafické znázornění výsledků modelu meze stability pro sousledné frézování do rohu

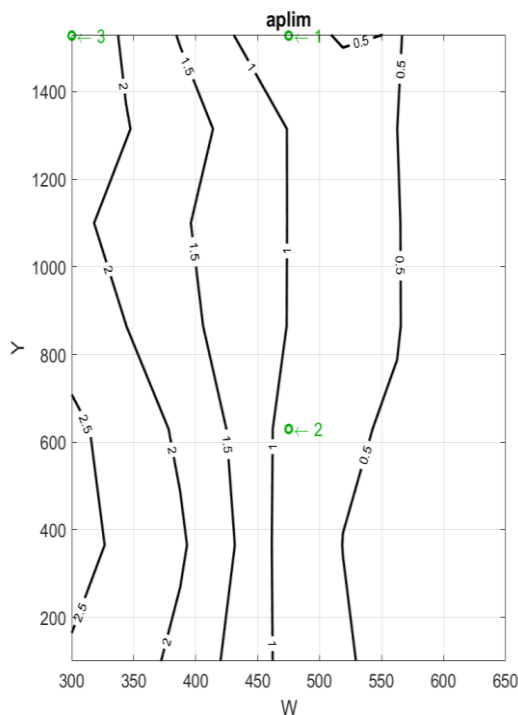
4.8 Simulace meze stability a výkonnostní mapy v celém pracovním prostoru stroje

Na základě vytvořeného simulačního modelu založeného na reálných datech z frézování a husté sítě interpolovaných FRF vznikla mapa mezní třísky pro nástroj D160/Z9 pro operaci sousledného frézování do rohu (viz Obr. 4.44).

Mapa limitní axiální hloubky třísky a_{plim} nevychází po výpočtu z modálních parametrů dle očekávání. Izočáry mezní hodnoty nemají monotónní charakter průběhu



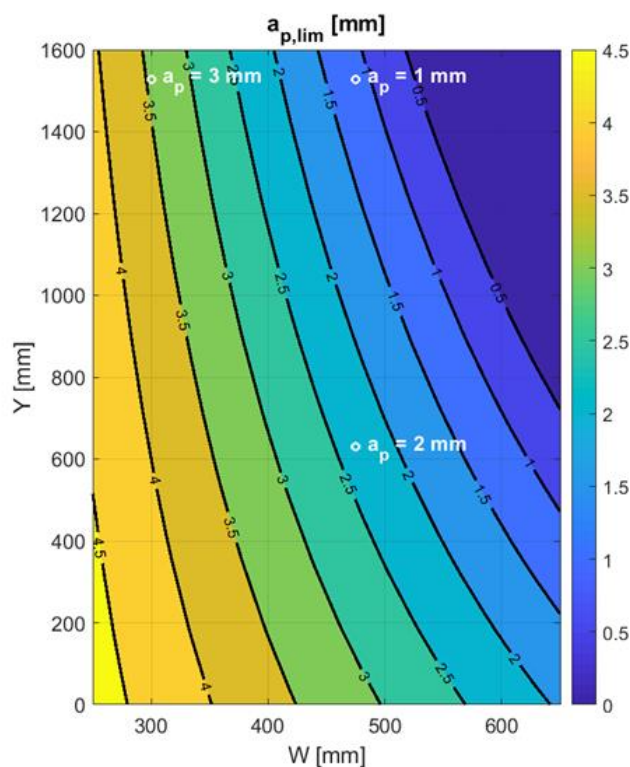
a neodpovídají výsledkům z testů obráběním označenými zelenou značkou v grafu s hodnotou poslední stabilní hodnoty a_p .



Obr. 4.44 Mapa mezní třísky vypočtená na základě identifikovaných modálních parametrů

Je to důsledek dvou skutečností. Zaprvé nemonotónního průběhu naměřených poddajností (především se změnou polohy v ose Y v některých bodech pracovního prostoru se zasunutým vřetenem). Zadruhé metody identifikace, která sice dobře určí náhradní modální parametry pro výpočet absolutní hodnoty dynamické poddajnosti, ale u reálné složky dochází k odchýlkám od původních naměřených dat až o desítky procent (max. 25-30 %). A právě reálná složka FRF vstupuje do výpočtového modelu mezní třísky.

Z tohoto důvodu se tento přímý přepočít ukazuje jako nevhodný. Proto byla následující mapa (viz Obr. 4.45) získána interpolací z vypočtených mezních třísek s využitím naměřených FRF, která byla následně vyrovnána podle výsledků reálného obrábění, s požadavkem monotónnosti.

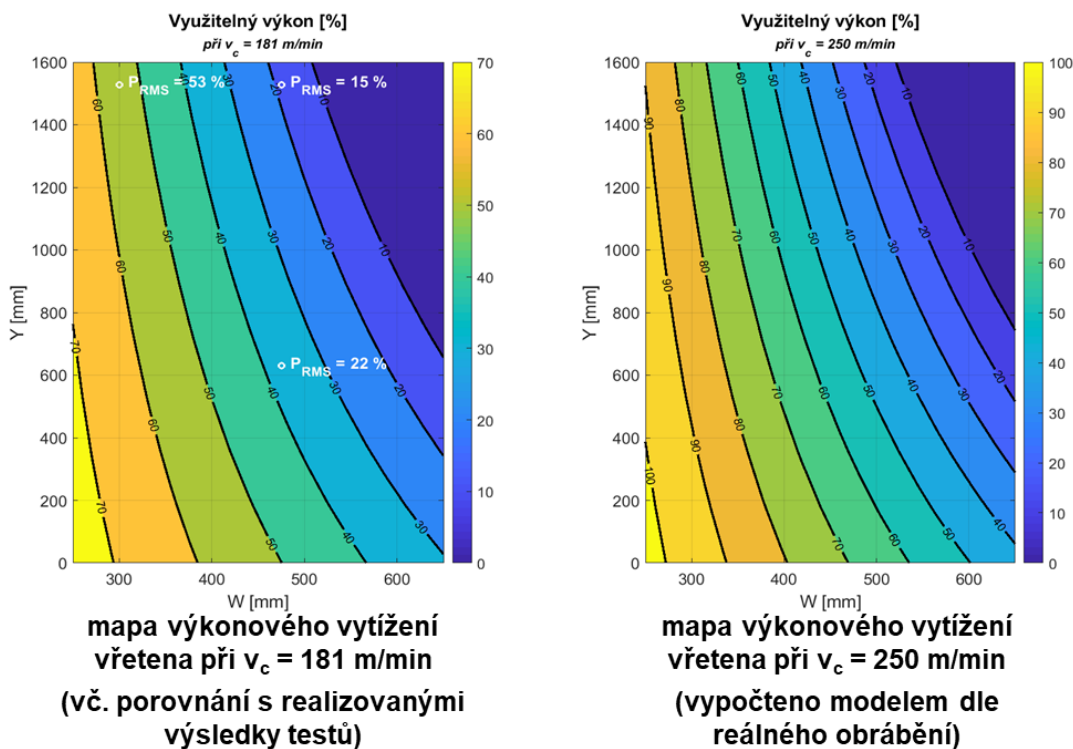


Obr. 4.45 Mapa mezní třísky pro sousledné frézování do rohu s čelní frézou D160/Z9

Mapa limitní hodnoty a_p pro sousledné frézování do rohu nástrojem D160/Z9 a vstupními parametry identickými s měřením byla vyrovnána dle naměřených skutečností s monotónním průběhem s využitím změřených FRF. Následně byla rozšířena do celého pracovního prostoru stroje.

Hodnota $a_{p_{lim}}$ je stěžejním vstupním parametrem do rovnice (4.3), která slouží k výpočtu odebíraného výkonu řezným procesem. Vydělením instalovaným výkonem získáme mapu využitelného výkonu v procentech (viz levá mapa na Obr. 4.46).

$$P_{už} = v_c \cdot \sum F_{c_i} = a_{p_{lim}} \cdot K_s \cdot v_c \cdot \sum h_i = f_z \cdot a_{p_{lim}} \cdot K_s \cdot v_c \cdot \sum \sin \phi_i \quad (4.3)$$



Obr. 4.46 Mapy využitelného výkonu pro sousledné frézování do rohu s čelní frézou D160/Z9

Na základě predikce, kdy se očekává, že nástroj by měl bez problémů zvládnout frézovat s řeznou rychlostí $v_c = 250$ m/min, byla vyhotovena další mapa (viz Obr. 4.46 vpravo), která dokazuje, že stroj je schopen naplno využít instalovaný výkon na vřetení.

Tento typ map mezních parametrů by se mohl dále využít v řídicím systému stroje jako pomůcka obsluhy pro snazší volbu řezných a záběrových podmínek.



5 Závěrečné shrnutí

Byla provedena rešerše metod měření a charakterizace dynamických vlastností obráběcích strojů, včetně popisu postupu výkonové zkoušky na frézovacím stroji.

Zkouška výkonového obrábění byla provedena na stroji WHT110C pro vybrané nástroje a polohy stroje. Samotným testům obráběním předcházelo proměření dynamické poddajnosti (FRF) vřetena, nástrojů a obrobku v definované síti bodů v pracovním prostoru.

Cílem bylo použít „obvyklé nástroje a záběrové podmínky“ a udělat zkoušku maximálně podobnou standardním zkouškám prováděným v TOS Varnsdorf.

Proběhlo zkušební obrábění v několika vybraných polohách stroje. Při tomto obrábění byly identifikovány limity stabilních řezných podmínek a byl identifikován měrný řezný odpor K_c konkrétních nástrojů pro konkrétní řezné podmínky.

Z výsledků měření FRF a identifikovaného reálného K_c pro jednotlivé nástroje byla dopočtena pro nástroj D160/Z9 mapa limitní třísky a mapa výkonnosti obrábění. S predikcí možné vyšší řezné rychlosti byla vyhotovena mapa využitelného výkonu potvrzující schopnost stroje naplno využít potenciál instalovaného výkonu.

Celkově dosažené výsledky zkoušek výkonnosti stroje jsou dobré – s definovanými nástroji a řeznými operacemi je stroj schopen produktivního obrábění. Vyšší hodnoty výkonu by bylo možno z vřetena odebrat zvýšením řezné rychlosti.

Poddajnost je citlivá zejména na výsuv vřetena v ose W. Poloha vřeteníku Y nemá prakticky žádný vliv. To ukazuje na dobře navrženou konstrukci stroje s tuhostí adekvátní výkonu vřetena. Stroj je zejména tuhý ve směru osy Z. Je tak vhodný na operace vrtání, a to i při maximálním výsuvu vřetena.

Při obrábění se zasunutým vřetenem v horní poloze se ukazuje jako nejslabší článek systému upínací úhelník. Používání běžných upínacích prvků může omezovat možnosti stroje.

Mapy mezních třísek a využitelného výkonu lze použít jako návod pro obsluhu pro volbu adekvátních řezných a záběrových podmínek pro daný nástroj tak, aby se předešlo vzniku samobuzeného kmitání.



Seznamy

Seznam použité literatury

- [1] BRECHER, Christian, ŘASA, Jaroslav, ed. *Statika a dynamika obráběcích strojů* [online]. 18.4.2017 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/statika-a-dynamika-obrabecich-stroju>
- [2] DØSSING, Ole. *Structural Testing I: Mechanical Mobility Measurements* [PDF]. Brüel & Kjær, 1998 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/vibration/structural-testing-part-one>
- [3] *Co to je modální analýza* [online]. Ekosoftware, 2018 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/co-to-je-modalni-analyza>
- [4] JANOTA, Miroslav. *P01: Dynamika I: funkce frekvenčního přenosu* [PDF]. 2020 [cit. 2021-2-20]. Výukové podklady z předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů II. ČVUT v Praze.
- [5] KOLÁŘ, Petr. *Měření dynamické poddajnosti. Samobuzené kmitání*. [PDF]. [cit. 2021-2-20]. Výukové podklady z předmětu Modelování a simulace výrobních strojů. ČVUT v Praze.
- [6] JANOTA, Miroslav. *P05: Stabilita obrábění* [PDF]. 2019 [cit. 2021-2-20]. Výukové podklady z předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů II. ČVUT v Praze.
- [7] *Measuring Vibration* [PDF]. Brüel & Kjaer, 1982 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/vibration/measuring-vibration>
- [8] *Měření vlastních frekvencí* [online]. Ekosoftware, 2016 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/mereni-vlastnich-frekvenci>
- [9] STEWART, Robert a Michael HONS. Frequency response of a 1000 Hz resonance. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-7-5]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Frequency-response-of-a-1000-Hz-resonance-001-damping-ratio-accelerometer-to-ground_fig5_265072959



- [10] NESELI, Suleyman. Experimental setup for impact hammer test. *ResearchGate* [online]. Feb 2014 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Experimental-setup-for-impact-hammer-test_fig2_263609043
- [11] *Modální analýza vs. PTK* [online]. Ekosoftware, 2017 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/modalni-analyza-vs-ptk>
- [12] JANOTA, Miroslav. *P04: Dynamika II: tvary kmitání a rozběhové testy* [PDF]. 2020 [cit. 2021-2-20]. Výukové podklady z předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů II. ČVUT v Praze.
- [13] DØSSING, Ole. *Structural Testing II: Modal Analysis and Simulation* [PDF]. Brüel & Kjær, 1998 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/vibration/structural-testing-part-two>
- [14] *Koherence* [online]. Ekosoftware, 2016 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/koherence>
- [15] JANOTA, Miroslav a Petr CHVOJKA. *P02: Zpracování signálu I (FFT)* [PDF]. 2020 [cit. 2021-2-20]. Výukové podklady z předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů II. ČVUT v Praze.
- [16] *The Picket Fence Effect* [online]. Azima DLI, 2009 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <http://www.azimadli.com/vibman/thepicketfenceeffect.htm>
- [17] AVITABILE, Peter a Marco PERES. *Excitation Techniques Do's and Don'ts* [online]. Jacksonville, Florida: Structural Dynamics & Acoustic Systems Lab, 2012 [cit. 2021-7-5]. Dostupné z: https://www.modalshop.com/filelibrary/Excitation_Techniques_IMAC_30_by_Pete_Avitable.pdf
- [18] *Rázové kladívko* [online]. Ekosoftware, 2017 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/razove-kladivko>
- [19] *Behavior of Accelerometers...* [online]. [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.modalshop.com/calibration.asp?ID=200>
- [20] *Měření vibrací ve třech osách* [online]. Ekosoftware, 2017 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/mereni-vibraci-ve-trech-osach>



- [21] *Více-kanálová měření vibrací* [online]. Ekosoftware, 2017 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/vice-kanalova-mereni-vibraci>
- [22] *MetalMAX: TXF Users Manual 2011* [PDF]. BlueSwarf, 2011 [cit. 2021-2-20].
- [23] SCHMITZ, Tony L. a K. Scott SMITH. *Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity*. Springer, 2009. ISBN 978-0-387-09645-2.
- [24] *MEASUREMENT: DIAGNOSIS OF CHATTER MARKS* [online]. planlauf [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.planlauf.com/en/measurement/diagnosis-of-chatter-marks/>
- [25] SCHMITZ, Tony L. *Machining Dynamics. YouTube: Modern Machine Shop* [online]. 20. 3. 2012 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=xe8hfIANLMo>
- [26] KOLÁŘ, Petr. *Zatížení obráběcího stroje řeznými silami*. [PDF]. [cit. 2021-2-20]. Výukové podklady z předmětu Modelování a simulace výrobních strojů. ČVUT v Praze.
- [27] YUE, Jianping. *Creating a Stability Lobe Diagram* [online]. Newark, New Jersey, 2006 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: https://ijme.us/cd_06/PDF/IT%20301-050.pdf. Essex County College.
- [28] *Machining operations (Part 4: Vibration and Chatter in machine tools)*. *YouTube: Infinity MFG* [online]. 27. 3. 2020 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=gUPuzReDieE>
- [29] MUNOA et al. *Chatter suppression techniques in metal cutting* [online]. CIRP Annals, Volume 65, Issue 2. 2016, Pages 785-808 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <http://www.vibration.fr/images/stories/Documents/reviewArticles.pdf>
- [30] ABBAS, A.E. a Tony L. SCHMITZ. *Stable and unstable milling conditions are summarised in a stability lobe diagram*. *ResearchGate* [online]. 2009 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Stable-and-unstable-milling-conditions-are-summarised-in-a-stability-lobe-diagram_fig10_228368950
- [31] *MetalMAX: The Complete Package for Machine-Tool Dynamic Characterization* [online]. BlueSwarf, 2010 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: http://www.blueswarf.com/uploads/3/8/5/6/38566/030-datasheet_metalmax.pdf



- [32] *CUTPRO SIMULATION SOFTWARE* [online]. MAL [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.malinc.com/products/cutpro/>
- [33] KOLÁŘ, Petr. *Zdokonalená metodika návrhu nosných struktur obráběcích strojů*. Praha, 2018. Habilitační práce. ČVUT v Praze.
- [34] POLÁČEK, M. a J. TLUSTÝ. *Zpráva o výzkumu: číslo zprávy 1894. Závěrečná zpráva*. Praha - Libeň: Výzkumný ústav obráběcích strojů a obrábění, 1968.
- [35] *WHT 110 C* [online]. TOS Varnsdorf [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/cz/produkty/horizontalni-obrabeci-centra/wht-110-c/>
- [36] JANOTA, KOLÁŘ a SULITKA. Operational Method For Identification of Specific Cutting Force During Milling. *MM Science Journal* [online]. November 2019 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/november-2019/articles/operational-method-for-identification-of-specific-cutting-force-during-milling>

Seznam použitého softwaru

MS Office

Matlab R2018b

Autodesk Inventor 2020

Seznam obrázků

Obr. 3.1 Vlastní tvary kmitů [3]	12
Obr. 3.2 Harmonický signál [4]	14
Obr. 3.3 Složený signál v časové oblasti [4].....	15
Obr. 3.4 Frekvenční spektrum složeného signálu [4]	15
Obr. 3.5 Příklad změny fáze o 180° na vlastní frekvenci v Bode diagramu [9].....	16
Obr. 3.6 Schéma procesu měření FRF [10]	18
Obr. 3.7 Vizualizace FRF akceleraace (nahore) a dyn. poddajnosti (dole) [5]	19
Obr. 3.8 Vliv koherence na kvalitu vyhodnocovaného přenosu [2]	21
Obr. 3.9 Vzorkování analogového signálu [15].....	22



Obr. 3.10 Kvantování signálu [15]	22
Obr. 3.11 Efekt plaňkového plotu [16]	23
Obr. 3.12 Použití časového okna [17]	23
Obr. 3.13 Užitečný frekvenční rozsah v závislosti na délce úderu [2]	24
Obr. 3.14 Různé velikosti rázových kladiv [18]	25
Obr. 3.15 Vliv způsobu montáže akcelerometru na jeho vlastní frekvenci [19]	27
Obr. 3.16 Zapojení měřicí aparatury pro cvičné měření FRF	28
Obr. 3.17 Reálná a imaginární složka FRF [23]	30
Obr. 3.18 Stopy na obrobku po nestabilním obrábění [24]	32
Obr. 3.19 Vznik nestabilního obrábění při soustružení [5]	33
Obr. 3.20 Diagram stability (SLD) [30]	34
Obr. 3.21 Výpočet orientované FRF s využitím 50 % průměru frézy [23]	35
Obr. 3.22 Vykreslení FRF a diagramu stability v prostředí MetalMAX TXF [22]	37
Obr. 3.23 Predikce vlastních tvarů kmitů v prostředí CUTPRO [32]	38
Obr. 3.24 Postup výkonové zkoušky obráběním	39
Obr. 3.25 Uspořádání frézovacího stroje a síť měřících bodů v pracovním prostoru	40
Obr. 4.1 Schéma postupu vlastní části diplomové práce	42
Obr. 4.2 Horizontální frézovací centrum WHT110C [35]	43
Obr. 4.3 Čelní fréza D160/Z9	44
Obr. 4.4 Vrták D78/Z1	45
Obr. 4.5 Ježková fréza D80/Z3	45
Obr. 4.6 Bloky obráběného materiálu upnuté na úhelníku	46
Obr. 4.7 Měření dynamické poddajnosti: použitá aparatura	47
Obr. 4.8 Schéma sítě poloh a jejich značení pro měření FRF	47
Obr. 4.9 Schéma sítě poloh pro měření FRF s frézou D160/Z9	48
Obr. 4.10 Schéma sítě poloh pro měření FRF s vrtákem D78/Z1	49
Obr. 4.11 Výsledky měření FRF s frézou D160/Z9	50
Obr. 4.12 Výsledky měření FRF s frézou D80/Z3	51
Obr. 4.13 Výsledky měření FRF s vrtákem D78/Z1	51
Obr. 4.14 Výsledky měření FRF samotného vřetene	52
Obr. 4.15 Porovnání vlivu hmotnosti nástrojů na dyn. poddajnost	53
Obr. 4.16 Schéma sítě poloh pro měření FRF na obrobku	53
Obr. 4.17 Výsledky měření FRF na obrobku	54
Obr. 4.18 Porovnání dyn. poddajnosti na nástroji a obrobku	55



Obr. 4.19 Stručný přehled provedených obráběcích operací.....	56
Obr. 4.20 Umístění akcelerometru pod vřeteníkem při zkouškách obráběním	56
Obr. 4.21 Výkonové zkoušky obráběním: použitá aparatura	57
Obr. 4.22 Interpretace naměřených dat výkonu.....	58
Obr. 4.23 Interpretace frekvenčního spektra z naměřených dat výkonu	58
Obr. 4.24 Příklad analýzy kmitání při obrábění.....	59
Obr. 4.25 Polohy při frézování do rohu s frézou D160/Z9.....	60
Obr. 4.26 Vyhodnocení měrného řezného odporu pro M02-M12 a M17-M21.....	61
Obr. 4.27 Poloha při rovinném frézování s frézou D160/Z9	62
Obr. 4.28 Vyhodnocení měrného řezného odporu pro M13-M16.....	63
Obr. 4.29 Porovnání hodnot K_c pro obě operace s frézou D160/Z9.....	64
Obr. 4.30 Polohy při vrtání s nástrojem D78/Z1	65
Obr. 4.31 Vyhodnocení měrného řezného odporu pro M22-M27	66
Obr. 4.32 Polohy při frézování s nástrojem D80/Z3.....	67
Obr. 4.33 Vyhodnocení měrného řezného odporu pro M28-M31	68
Obr. 4.34 Výsledky výkonové zkoušky pro frézování do rohu s nástrojem D160/Z9 ...	69
Obr. 4.35 Výsledky výkonové zkoušky pro čelní frézování s nástrojem D160/Z9.....	70
Obr. 4.36 Výsledky výkonové zkoušky pro vrtání s nástrojem D78/Z1	71
Obr. 4.37 Výsledky výkonové zkoušky pro boční frézování s ježkovou frézou D80/Z3	72
Obr. 4.38 Motivační charakter práce	73
Obr. 4.39 Graf rekonstruovaných a interpolovaných FRF	74
Obr. 4.40 Schéma rozložení sil při průchodu nástroje materiálem [26].....	75
Obr. 4.41 Určování orientačních faktorů pro sousledné frézování do rohu s frézou D160/Z9.....	75
Obr. 4.42 Výsledky simulačních modelů limitní hodnoty a_p	76
Obr. 4.43 Grafické znázornění výsledků modelu meze stability pro sousledné frézování do rohu	77
Obr. 4.44 Mapa mezní třísky vypočtená na základě identifikovaných modálních parametrů	78
Obr. 4.45 Mapa mezní třísky pro sousledné frézování do rohu s čelní frézou D160/Z9	79
Obr. 4.46 Mapy využitelného výkonu pro sousledné frézování do rohu s čelní frézou D160/Z9.....	80



Seznam tabulek

Tab. 1 Seznam jednotlivých měření a jejich parametrů pro frézování do rohu s D160/Z9	60
Tab. 2 Shrnutí dílčích výsledků při frézování do rohu s nástrojem D160/Z9	62
Tab. 3 Seznam jednotlivých měření a jejich parametrů pro rovinné frézování s D160/Z9	63
Tab. 4 Shrnutí dílčích výsledků při rovinném frézování s nástrojem D160/Z9	64
Tab. 5 Seznam jednotlivých měření a jejich parametrů pro vrtání s nástrojem D78/Z1	65
Tab. 6 Shrnutí dílčích výsledků při vrtání s nástrojem D78/Z1	66
Tab. 7 Seznam jednotlivých měření a jejich parametrů pro boční frézování s nástrojem D80/Z3	67
Tab. 8 Shrnutí dílčích výsledků při bočním frézování s nástrojem D80/Z3	68

Seznam příloh

Příloha č.1 – Výkonová a momentová charakteristika vřetena

Příloha č.2 – Měření M02-M05: W300, Y1528, nesousl. frézování, různé a_p

Příloha č.3 – Měření M06-M08: W300, Y1528, sousledné frézování, různé a_p

Příloha č.4 – Měření M09-M12: W475, Y1528, nesousl. i sousledné frézování, různé a_p

Příloha č.5 – Měření M17-M21: W475, Y630, nesousl. i sousledné frézování, různé a_p

Příloha č.6 – Měření M13-M16: W475, Y1598, nesousl. frézování, různé a_p

Příloha č.7 – Měření M22-M24: W300, Y1599, vrtání, různé f_o

Příloha č.8 – Měření M25-M27: W630, Y1599, vrtání, různé f_o

Příloha č.9 – Měření M28-M31: W300 a W475, Y1471, nesousledné frézování, různé a_e

Příloha č.10 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek:
fréza D160/Z9, frézování do rohu nesousledně, $a_e = 110$ mm

Příloha č.11 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek:
fréza D160/Z9, frézování do rohu sousledně, $a_e = 110$ mm



Příloha č.12 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek: fréza D160/Z9, čelní frézování nesousledně, horní hraj nástroje 20 mm horním okrajem dílce, $a_e = 50$ mm

Příloha č.13 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek: fréza D80/Z3, frézování do rohu nesousledně, $a_p = 40$ mm, $a_e = 10$ mm

Příloha č.14 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek: fréza D80/Z3, frézování do rohu nesousledně, $a_p = 40$ mm, $a_e = 20$ mm

Příloha č.15 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek: fréza D80/Z3, frézování do rohu nesousledně, $a_p = 40$ mm, $a_e = 3$ mm

Příloha č.16 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek: fréza D80/Z3, frézování do rohu nesousledně, $a_p = 40$ mm, $a_e = 5$ mm

Elektronické přílohy (CD)

Textová část:

- DP_1796.pdf

Matlab scripty:

- FRFmodal_all_v2.m
- FRFmodal_interpolation_v2.m
- FRFmodal_rekonstrukceFRF.m
- FRFmodal_single_v2.m
- LoadData01mill160_v03.m
- LoadData02drill78_v03.m
- LoadData03mill80_v03.m
- Mapa_stability_D160_v2.m
- Model_stability_D160.m
- Model_stability_D80.m
- PlotVibr_uprav1.m
- PlotVibr_uprav2.m
- ZobrFRF_D160.m
- ZobrFRF_D80.m



- ZobrFRF_obrobek.m
- ZobrFRF_obrobek1.m
- ZobrFRF_vlivHmotnostiNastroje.m
- ZobrFRF_vreteno.m
- ZobrFRF_vrtak.m

Datové soubory:

- 2021-02-02-FRFs-DaMn.mat
- 2021-02-02-VibPr-DaMn.mat
- 2021-02-03-FRFs-DaMn.mat
- 2021-02-03-VibPr-DaMn.mat
- interpolModalParameters.mat
- modalParameters.mat
- M01.txt
- M02.txt
- M03.txt
- M04.txt
- M05.txt
- M06.txt
- M07.txt
- M08.txt
- M09.txt
- M10.txt
- M11.txt
- M12.txt
- M13.txt
- M14.txt
- M15.txt
- M16.txt
- M17.txt
- M18.txt
- M19.txt
- M20.txt
- M21.txt
- M22.txt
- M23.txt
- M24.txt
- M25.txt
- M26.txt
- M27.txt
- M28.txt
- M29.txt
- M30.txt
- M31.txt

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení

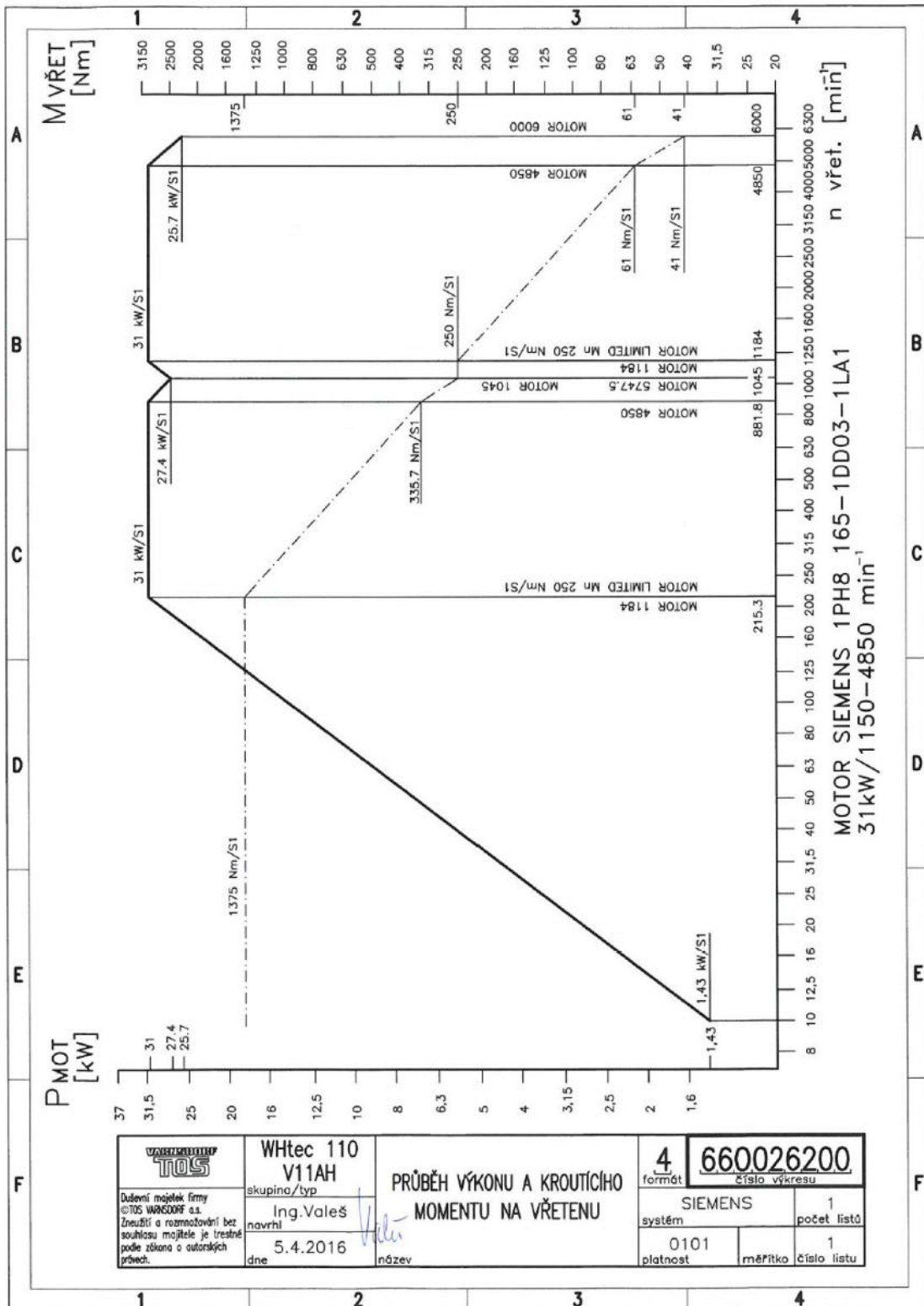


Přílohy

**Analýza dynamické poddajnosti frézovacího stroje
a zkouška využití výkonu**



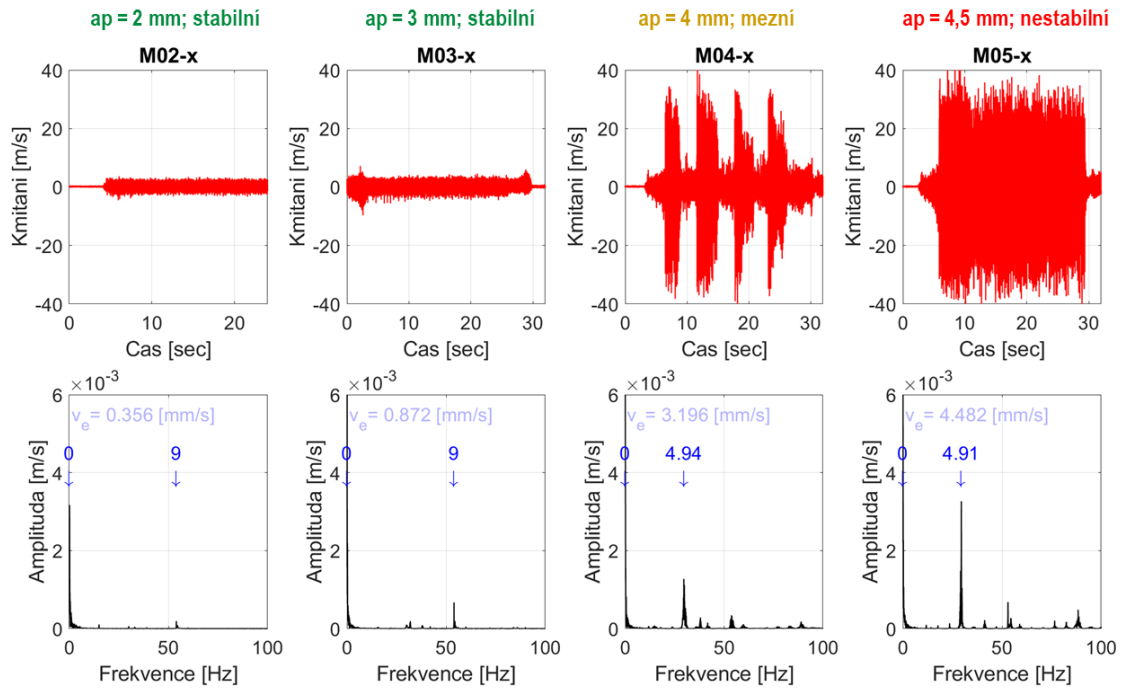
Příloha č.1 – Výkonová a momentová charakteristika vřetena



<p>Dokladní majetek firmy s.r.l. TOS WARSZAWA s.a. Žneuzítí a rozmnožování bez souhlasu majitele je trestné podle zákona o autorských právech.</p>	WHtec 110 V11AH skupina/typ	PRŮBĚH VÝKONU A KROUTIČÍHO MOMENTU NA VŘETENU	4 formát	660026200 číslo výkresu
	Ing.Valeš navrhl dne 5.4.2016		SIEMENS systém 0101 platnost	1 počet listů 1 číslo listu



Příloha č.2 – Měření M02-M05: W300, Y1528, nesousl. frézování, různé a_p



M02
 $a_p = 2$ mm; stabilní



M03
 $a_p = 3$ mm; stabilní

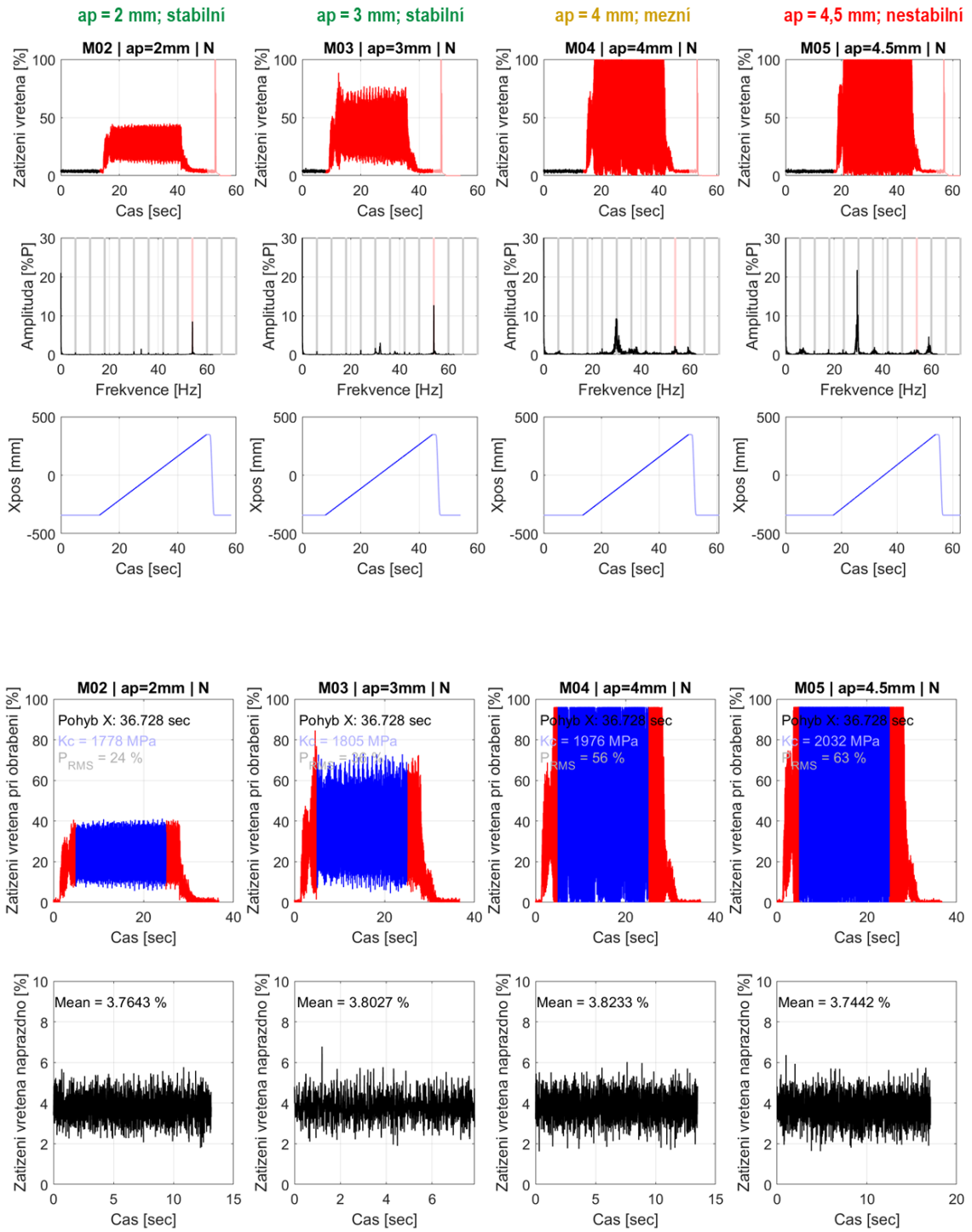


M04
 $a_p = 4$ mm; mezní



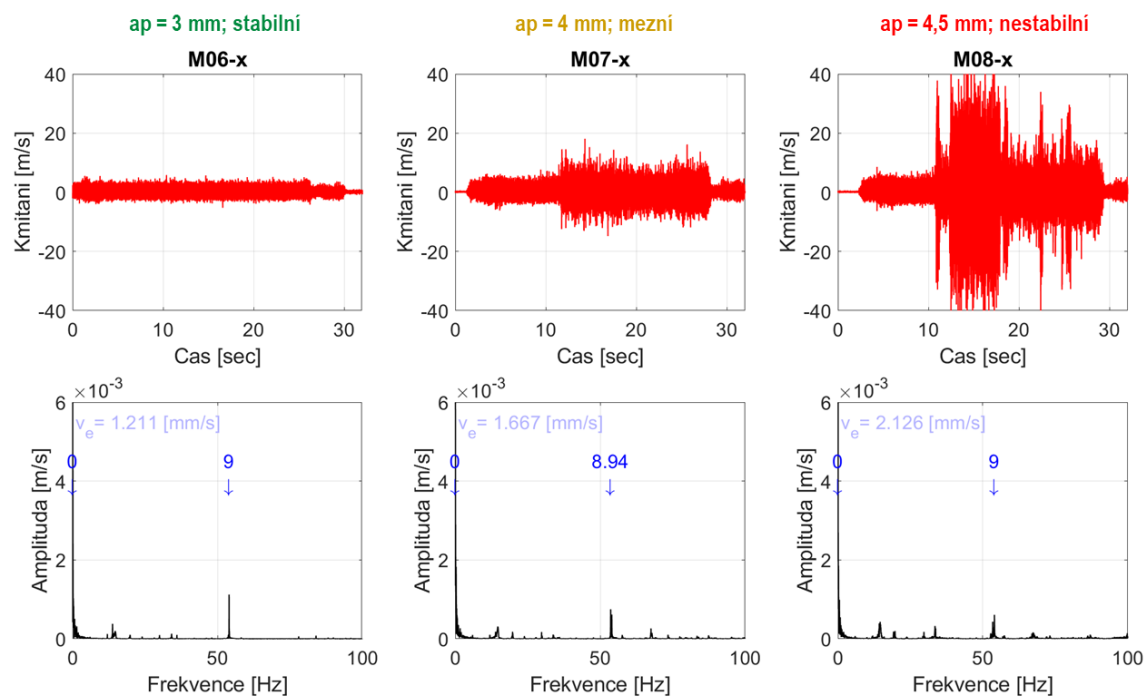
M05
 $a_p = 4,5$ mm; nestabilní







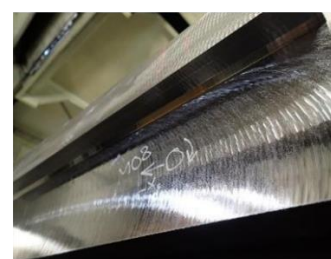
Příloha č.3 – Měření M06-M08: W300, Y1528, sousledné frézování, různé a_p

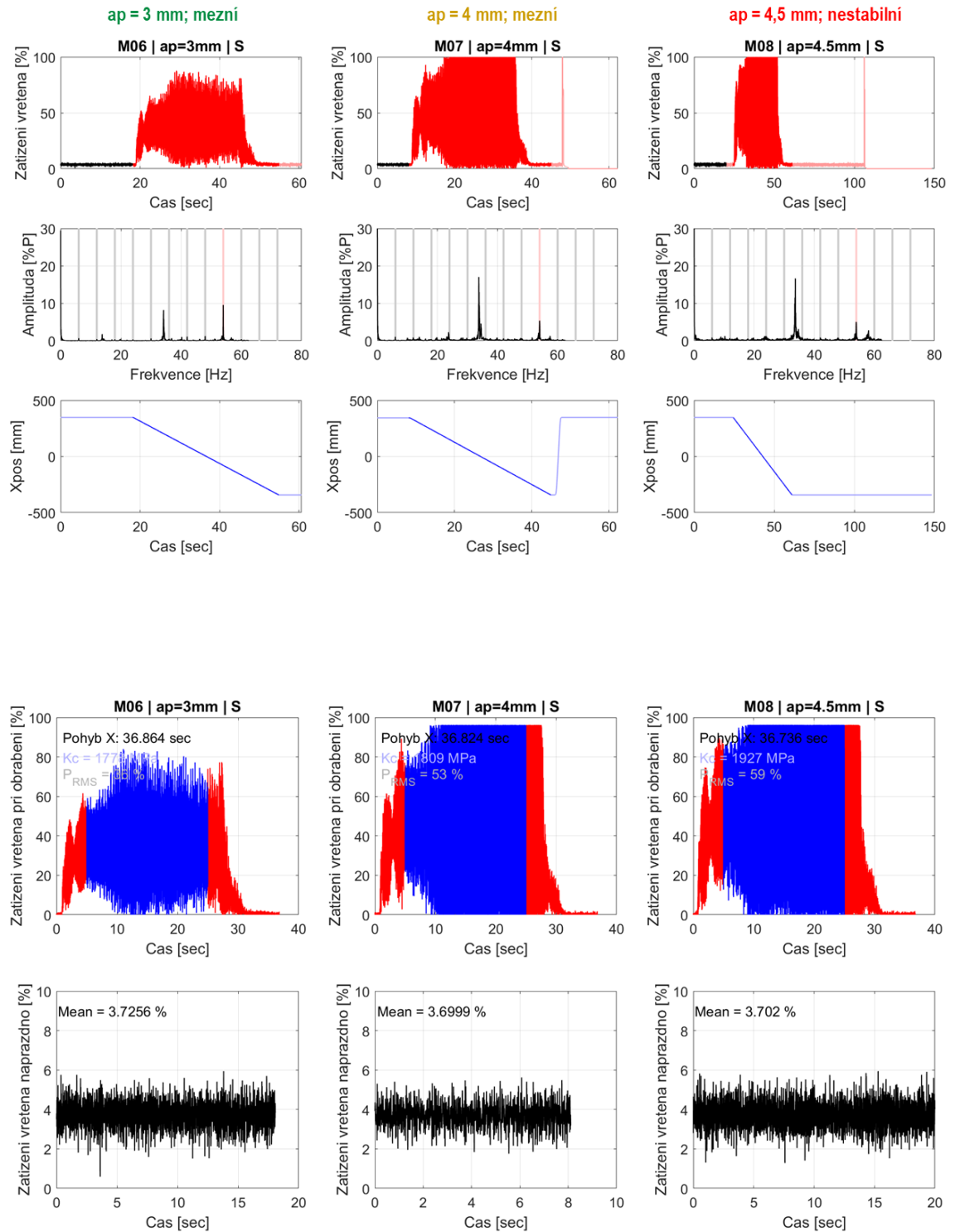


M06
 $a_p = 3$ mm; mezní

M07
 $a_p = 4$ mm; mezní

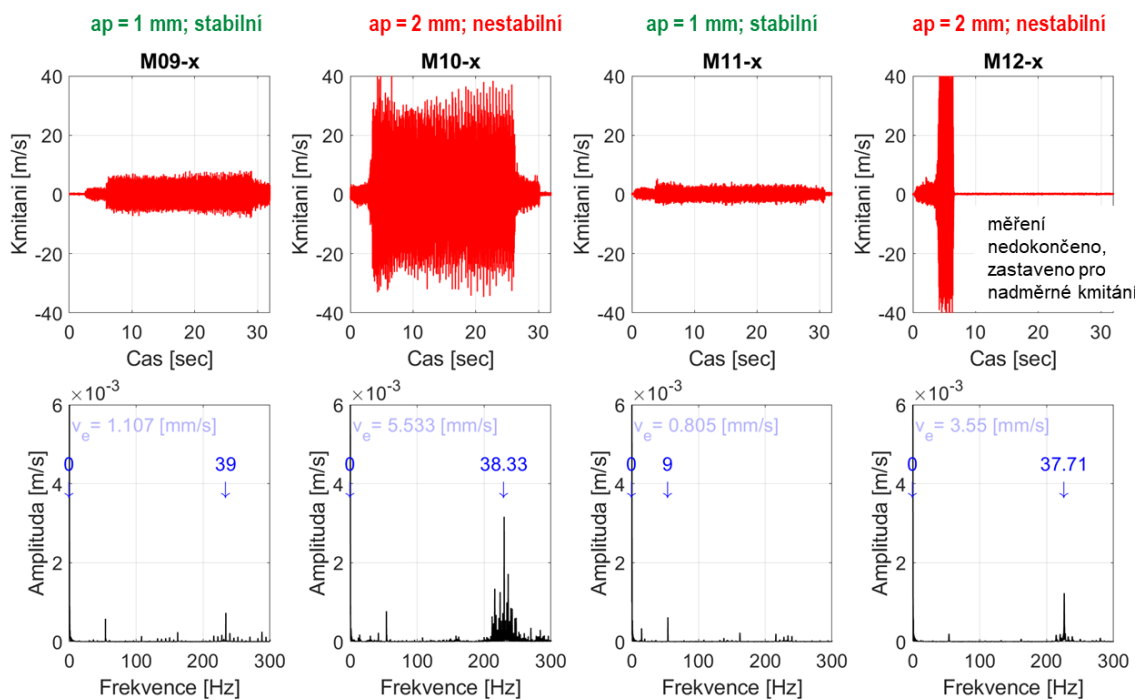
M08
 $a_p = 4,5$ mm; nestabilní







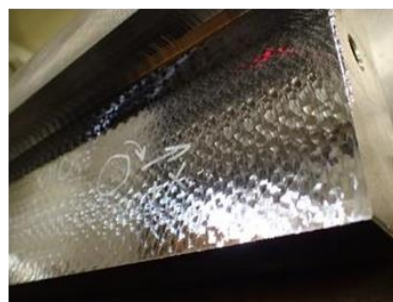
Příloha č.4 – Měření M09-M12: W475, Y1528, nesousl. i sousledné frézování, různé a_p



M09
 $a_p = 1$ mm; stabilní



M10
 $a_p = 2$ mm; nestabilní

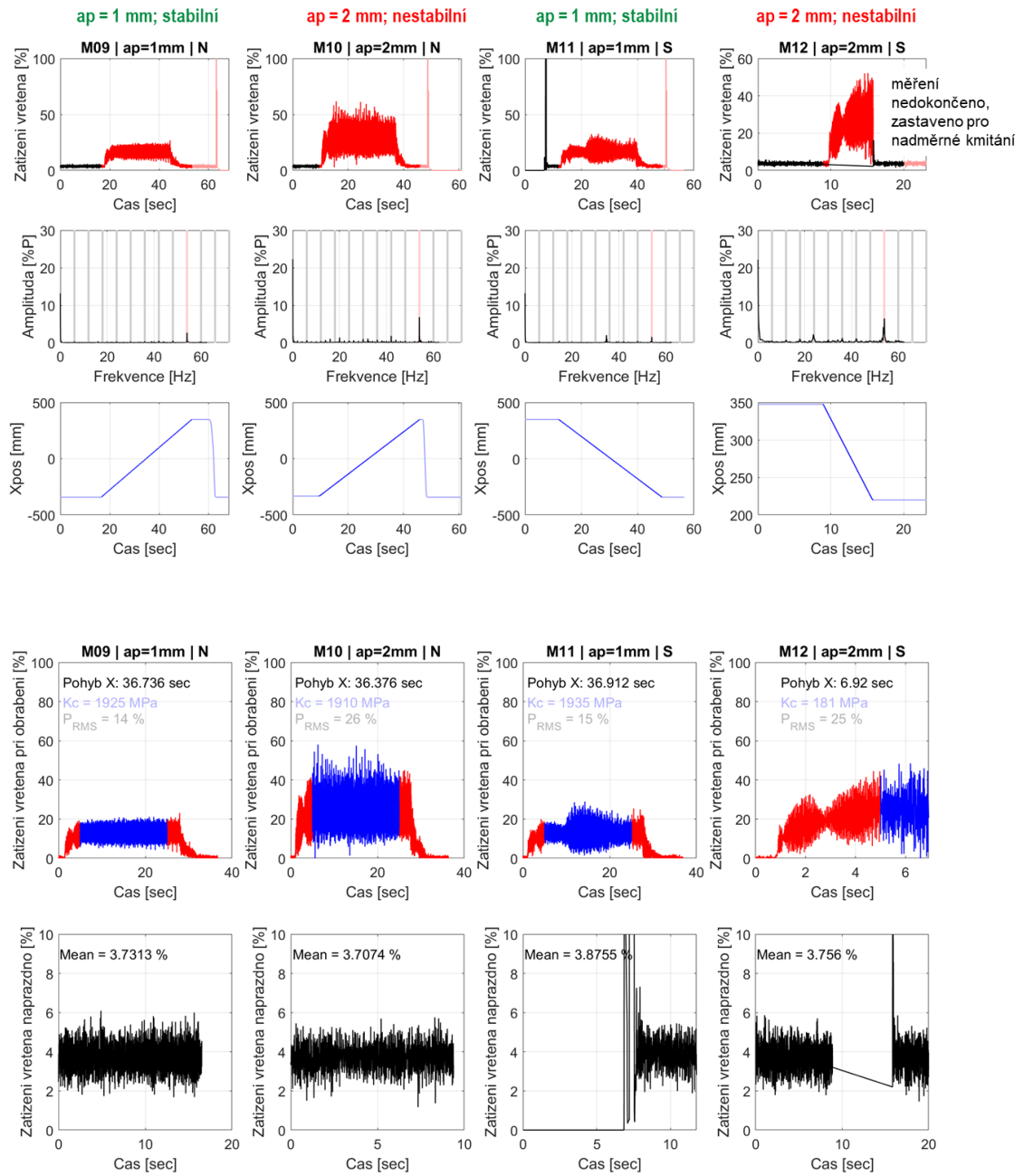


M11
 $a_p = 1$ mm; stabilní



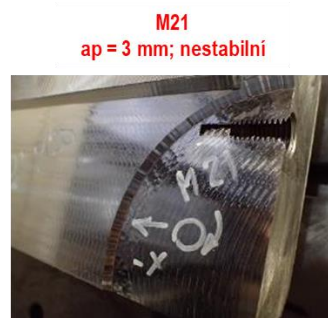
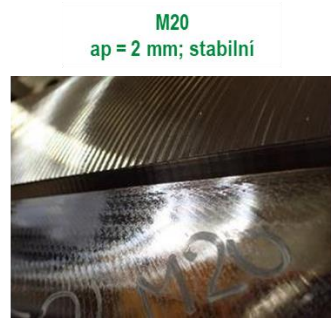
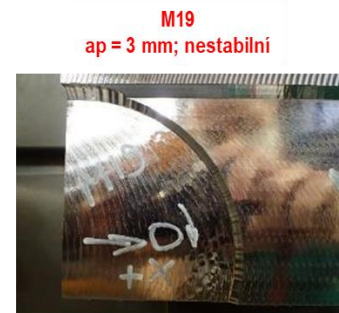
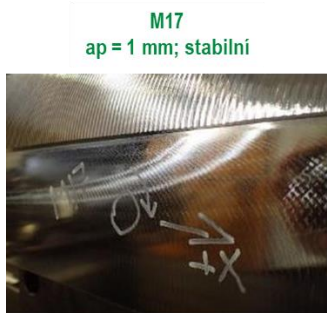
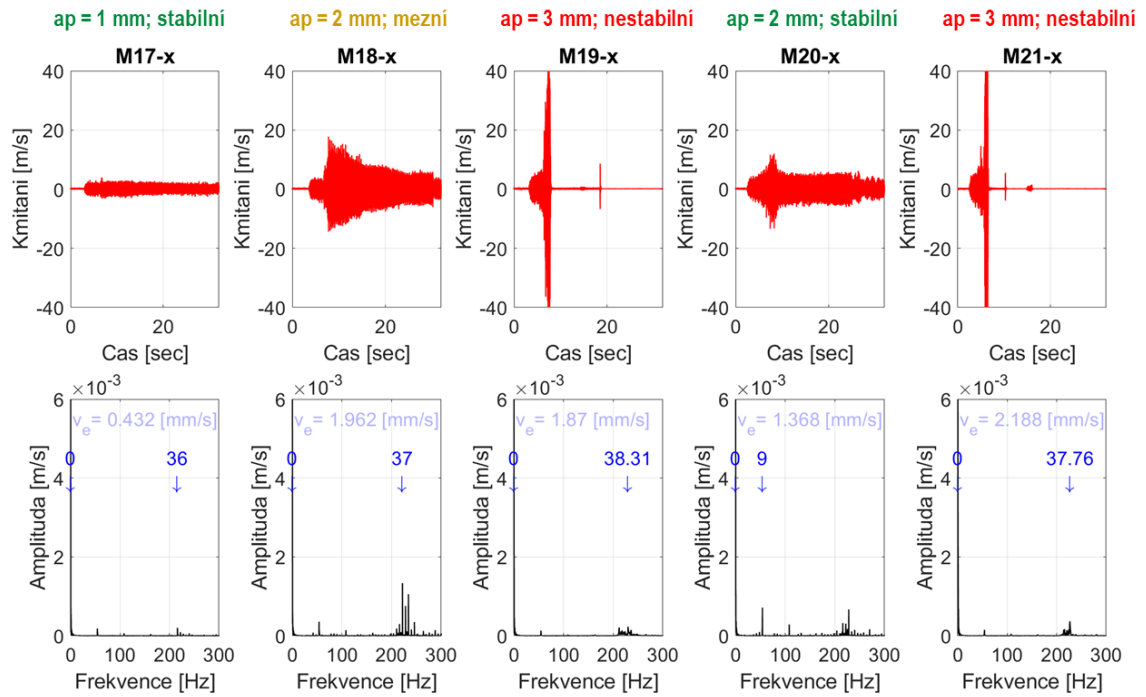
M12
 $a_p = 2$ mm; nestabilní

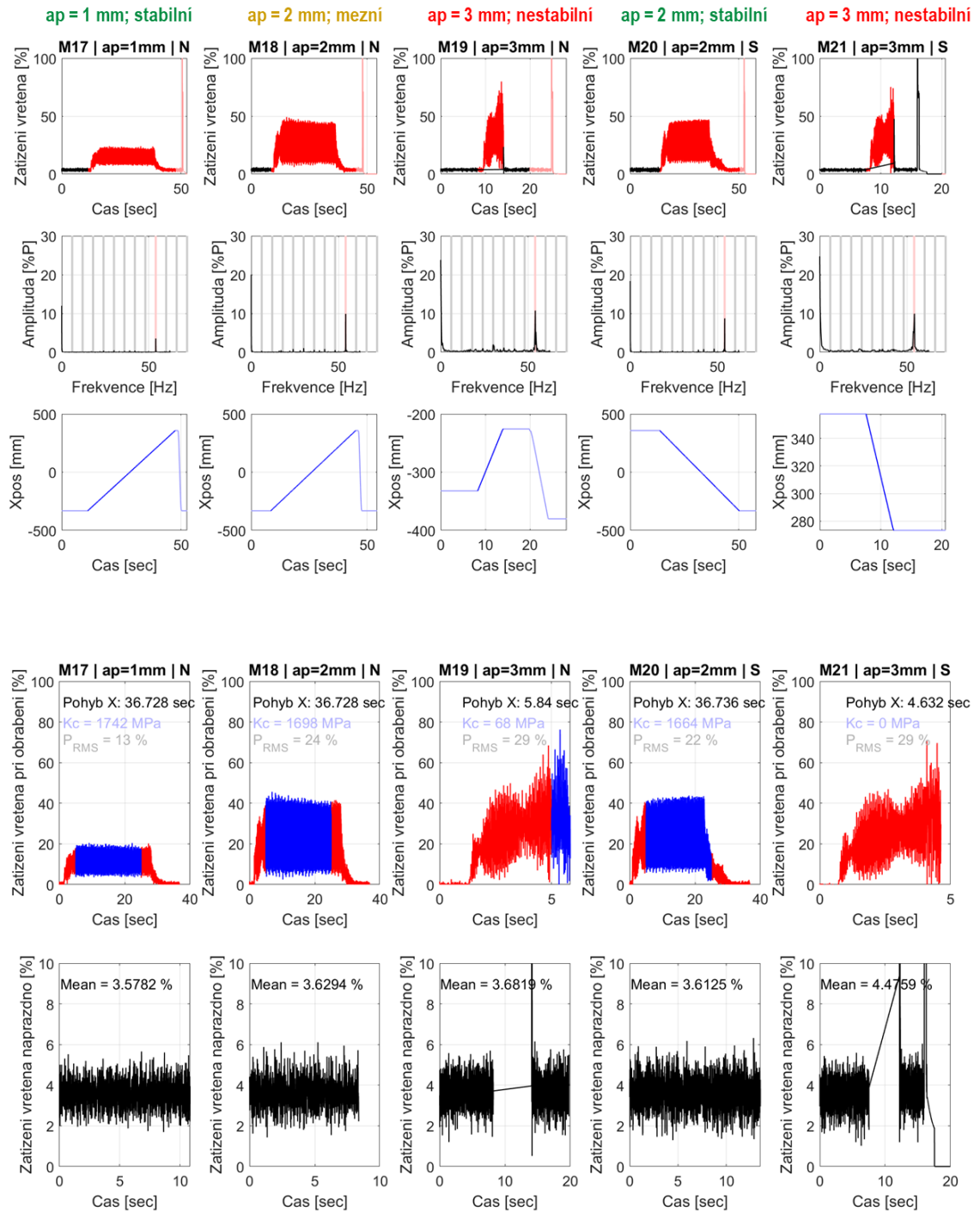






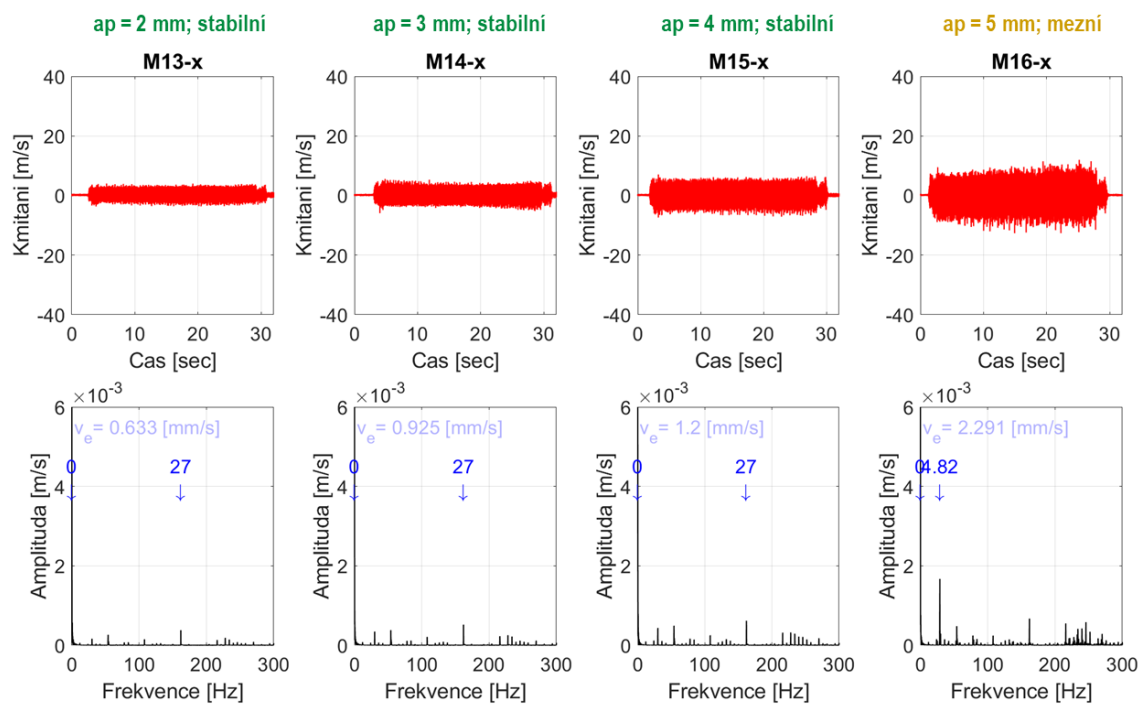
Příloha č.5 – Měření M17-M21: W475, Y630, nesousl. i sousledné frézování, různé a_p







Příloha č.6 – Měření M13-M16: W475, Y1598, nesousl. frézování, různé a_p



M13
 $a_p = 2 \text{ mm}$; stabilní



M14
 $a_p = 3 \text{ mm}$; stabilní

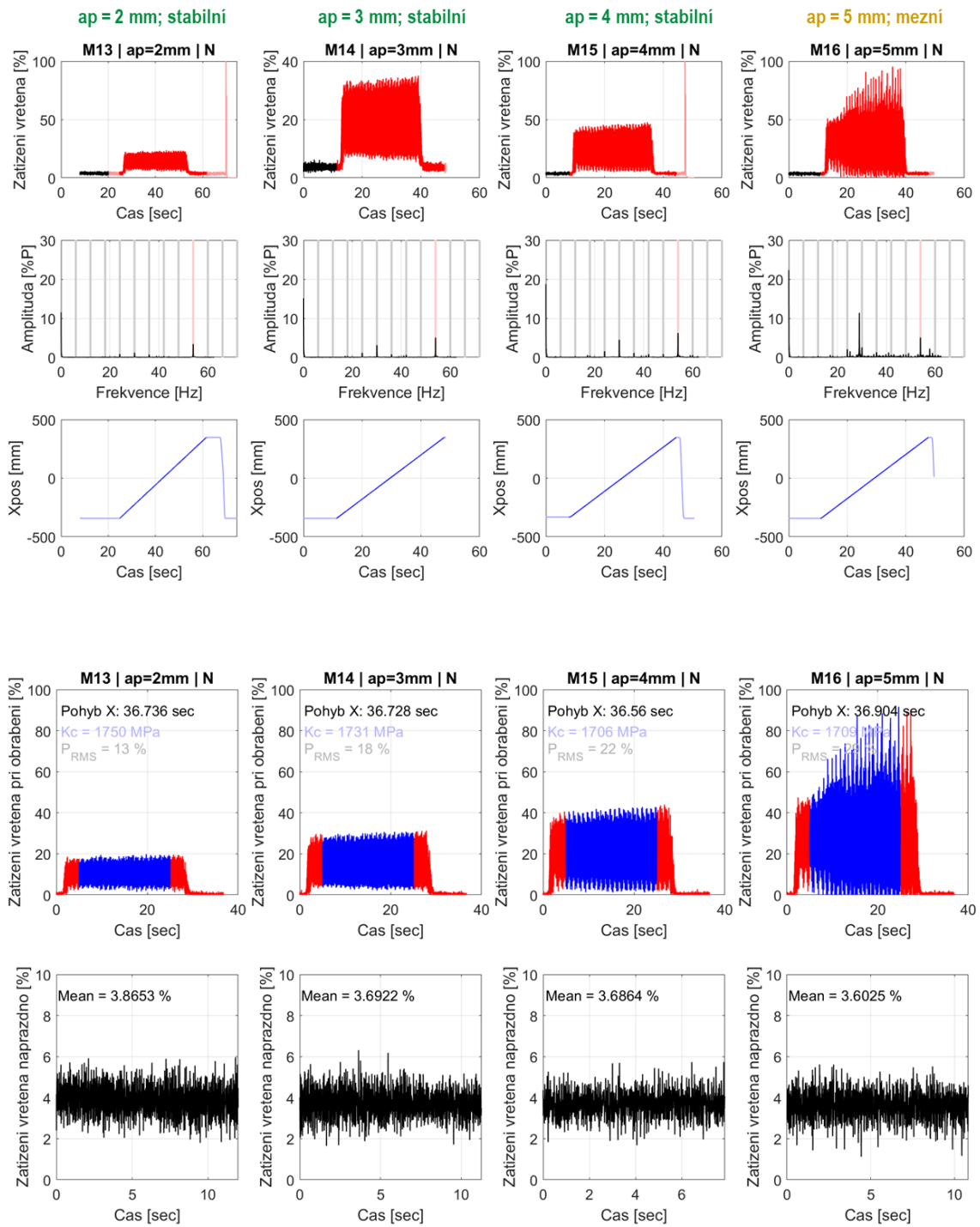
obrázek není
 k dispozici

M15
 $a_p = 4 \text{ mm}$; stabilní



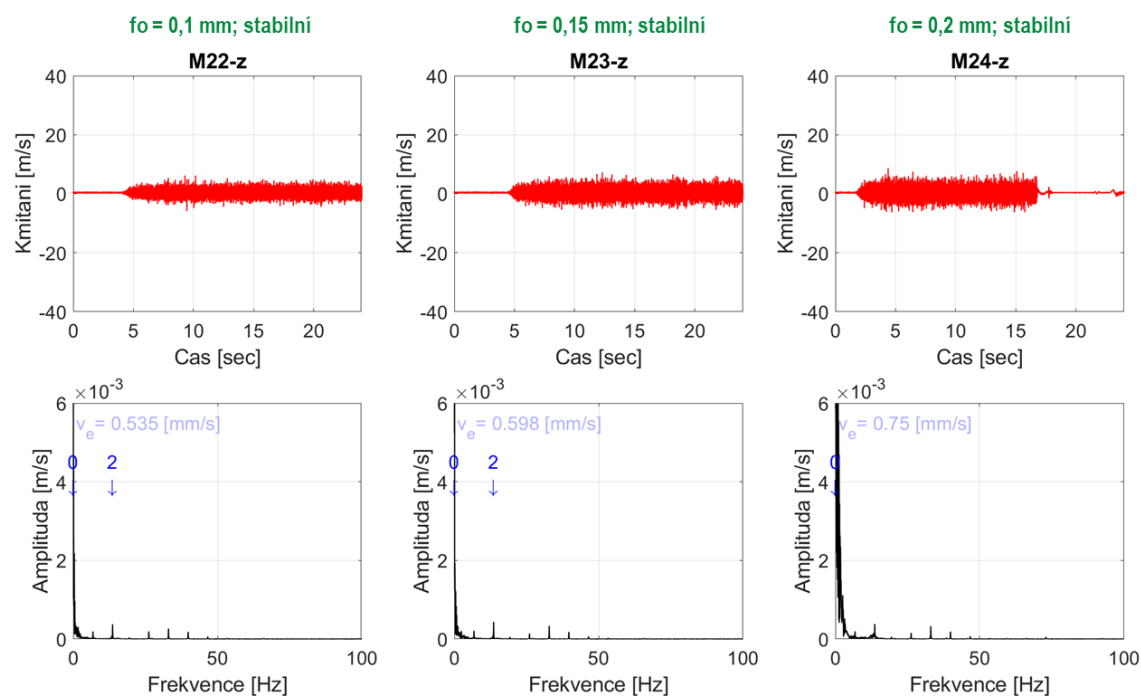
M16
 $a_p = 5 \text{ mm}$; mezní







Příloha č.7 – Měření M22-M24: W300, Y1599, vrtání, různé f_0

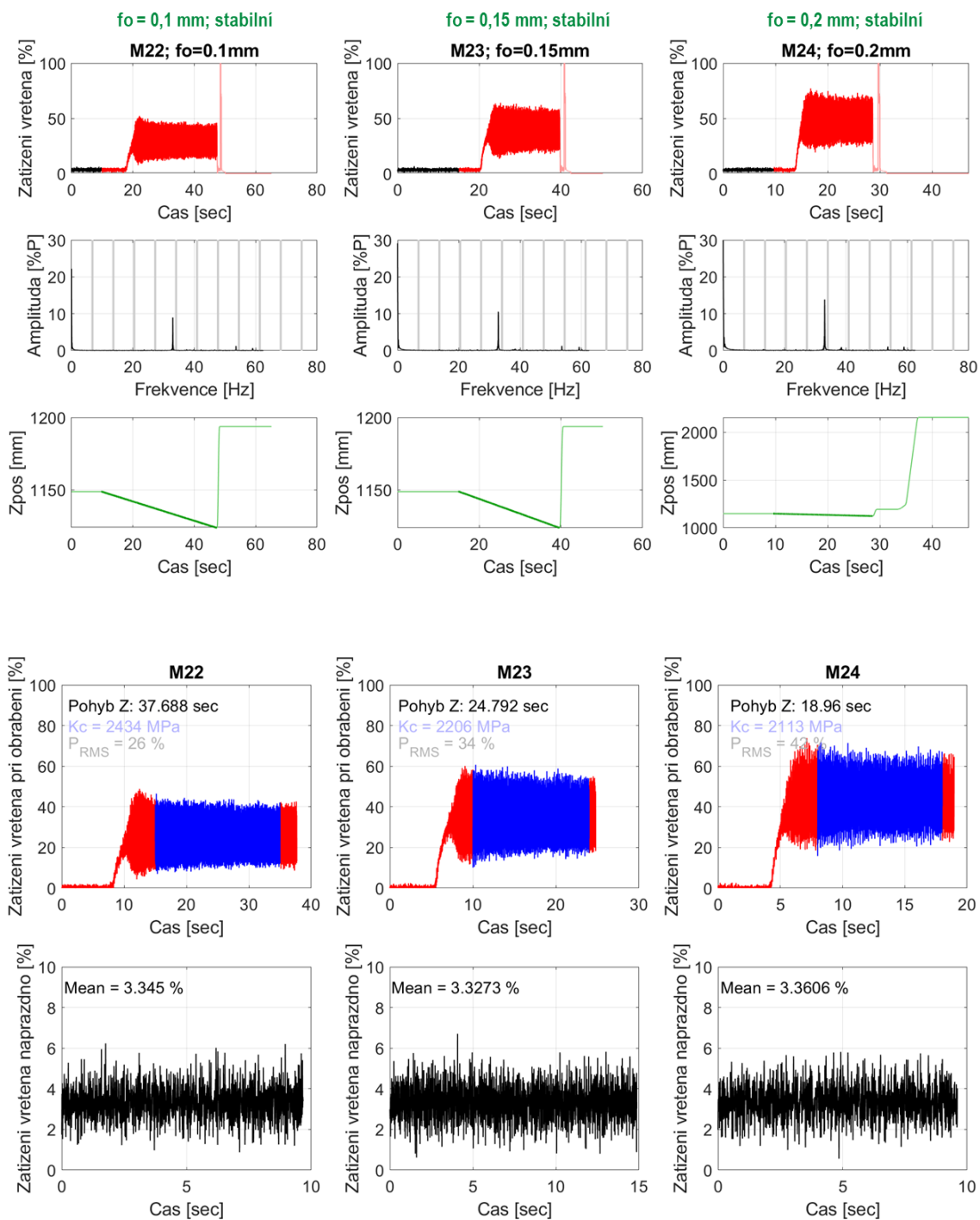


M22
fo = 0,1 mm; stabilní

M23
fo = 0,15 mm; stabilní

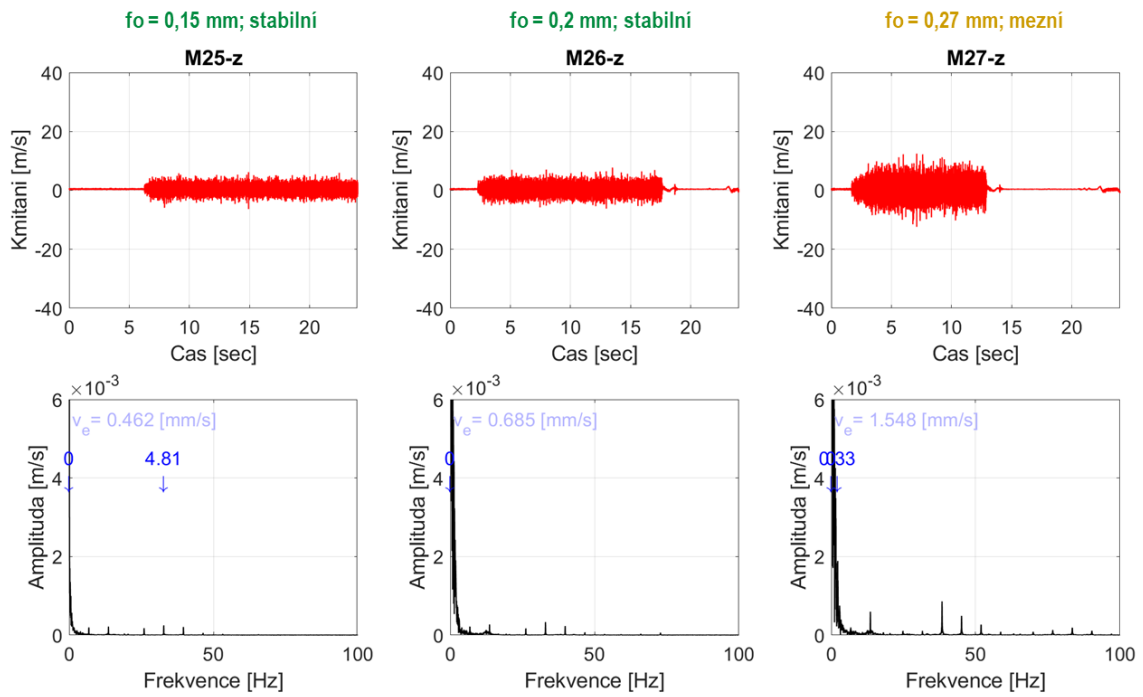
M24
fo = 0,2 mm; stabilní







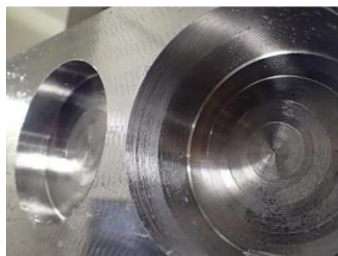
Příloha č.8 – Měření M25-M27: W630, Y1599, vrtání, různé f_0

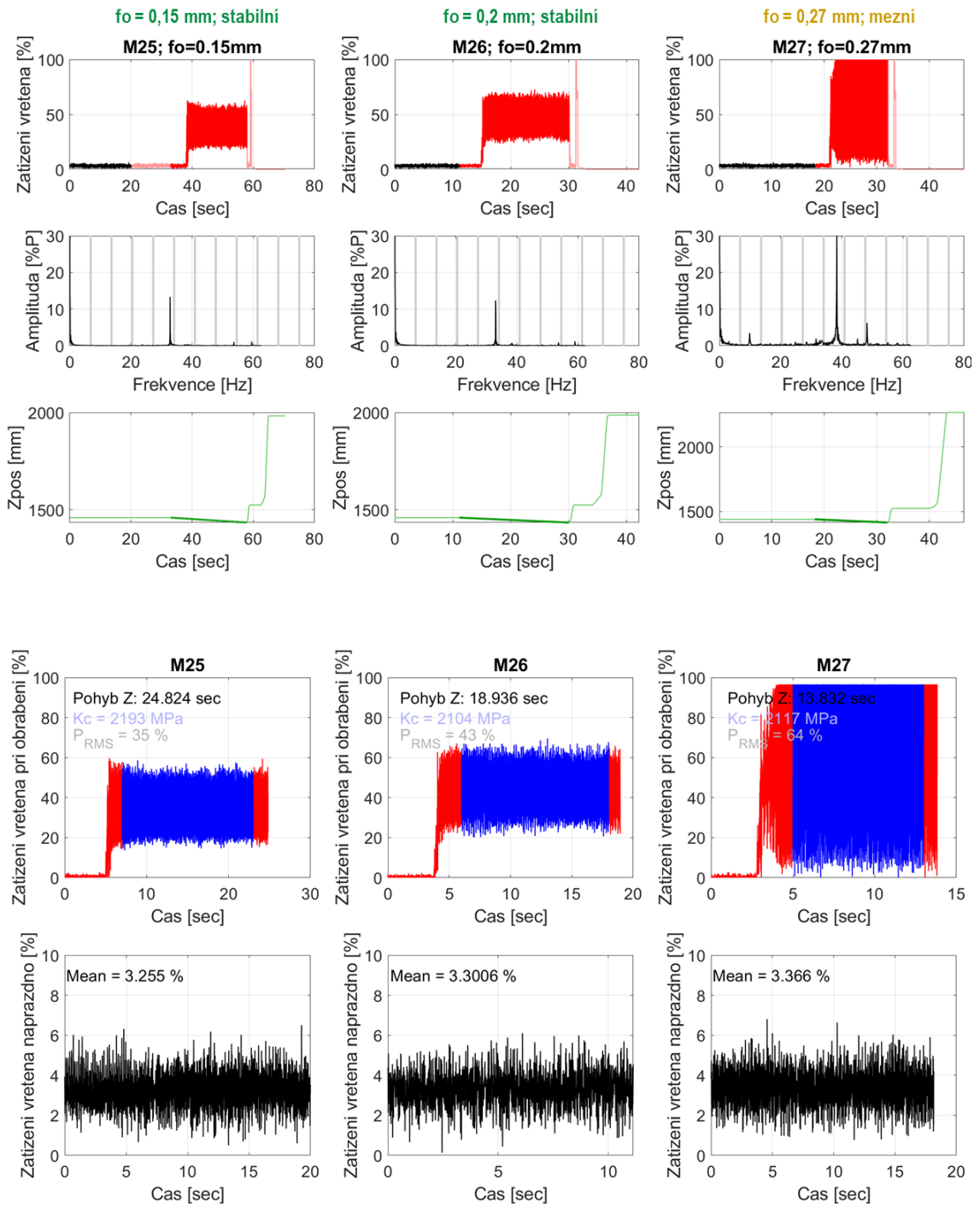


M25
 $f_0 = 0,15$ mm; stabilní

M26
 $f_0 = 0,2$ mm; stabilní

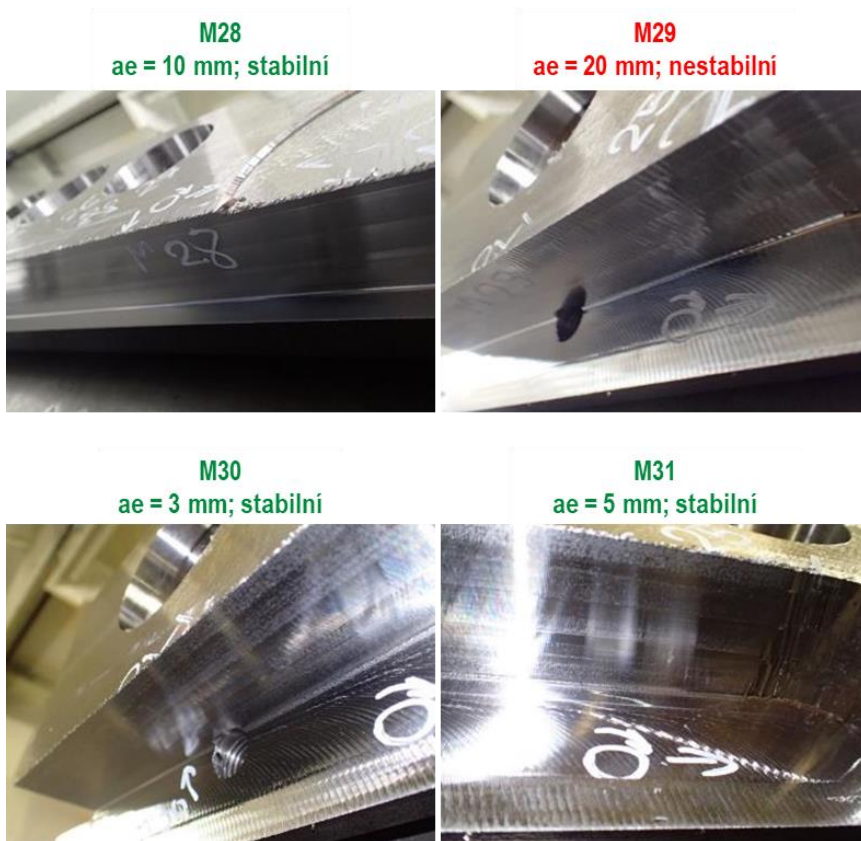
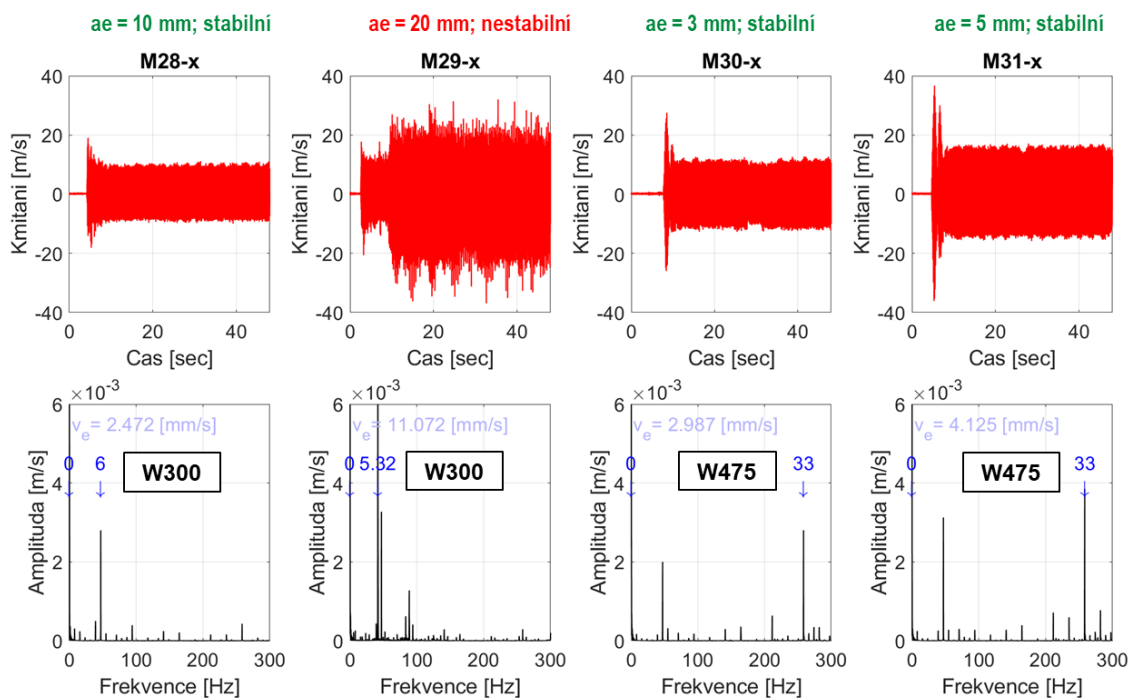
M27
 $f_0 = 0,27$ mm; mezní

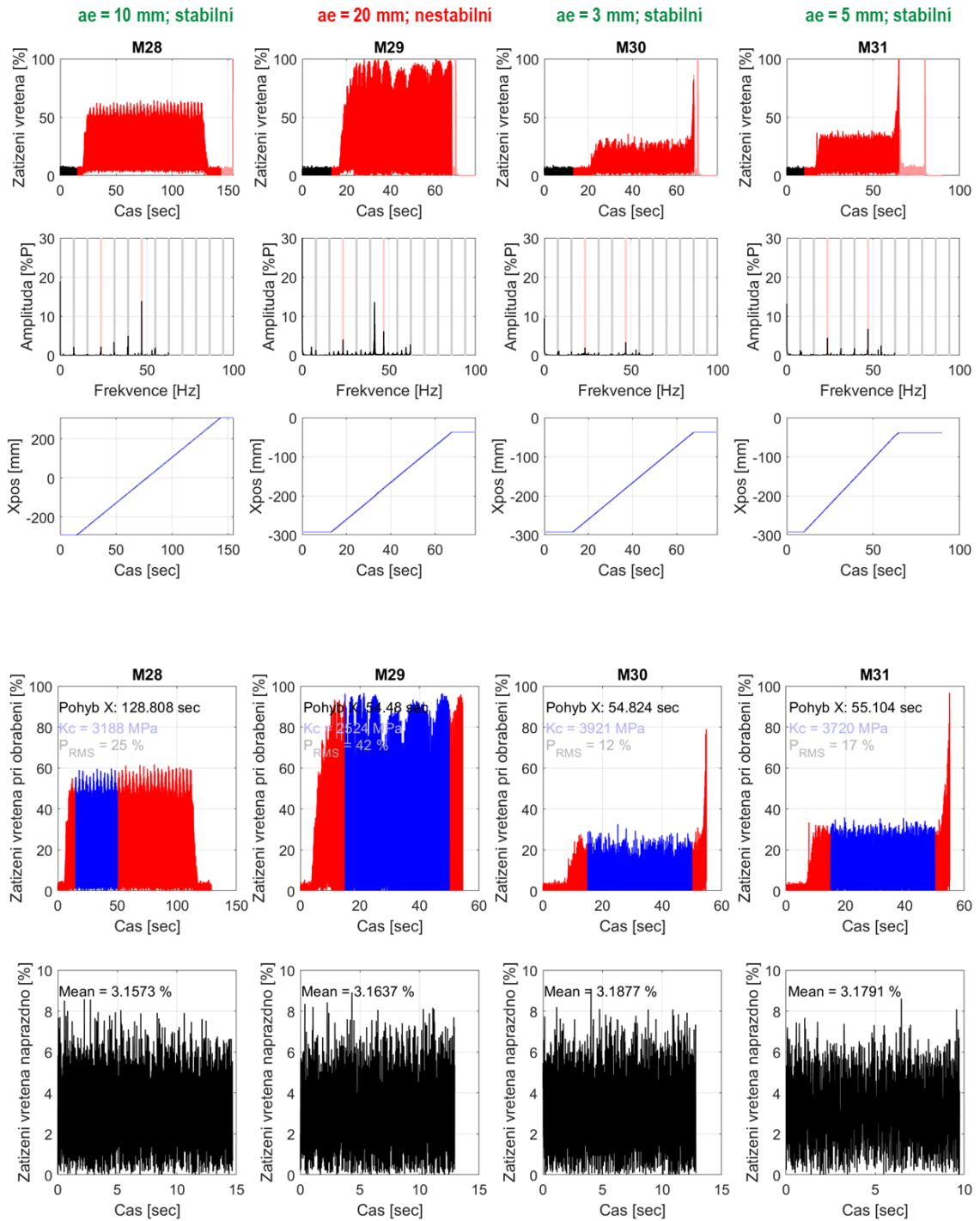






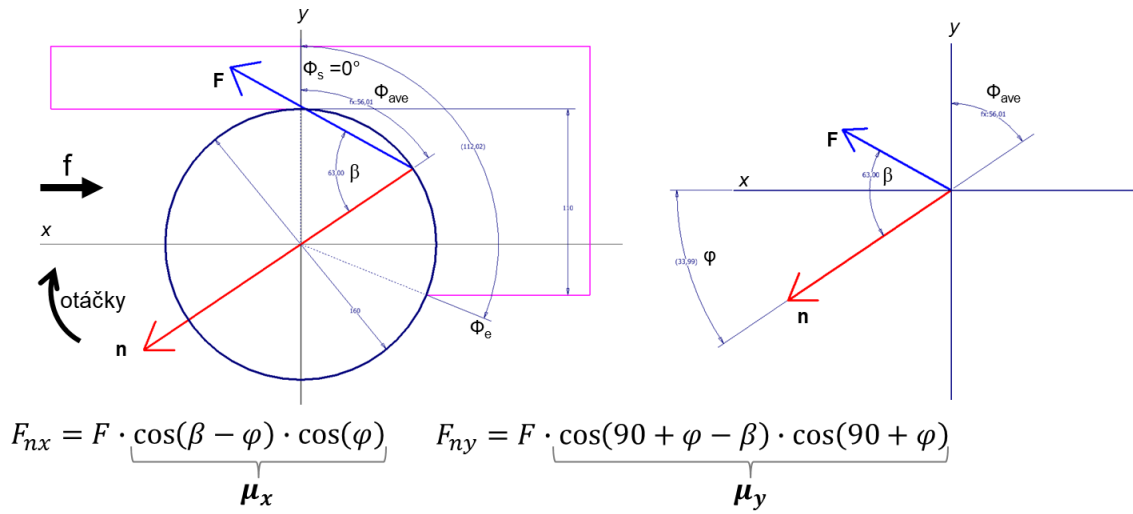
Příloha č.9 – Měření M28-M31: W300 a W475, Y1471, nesousledné frézování, různé a_e



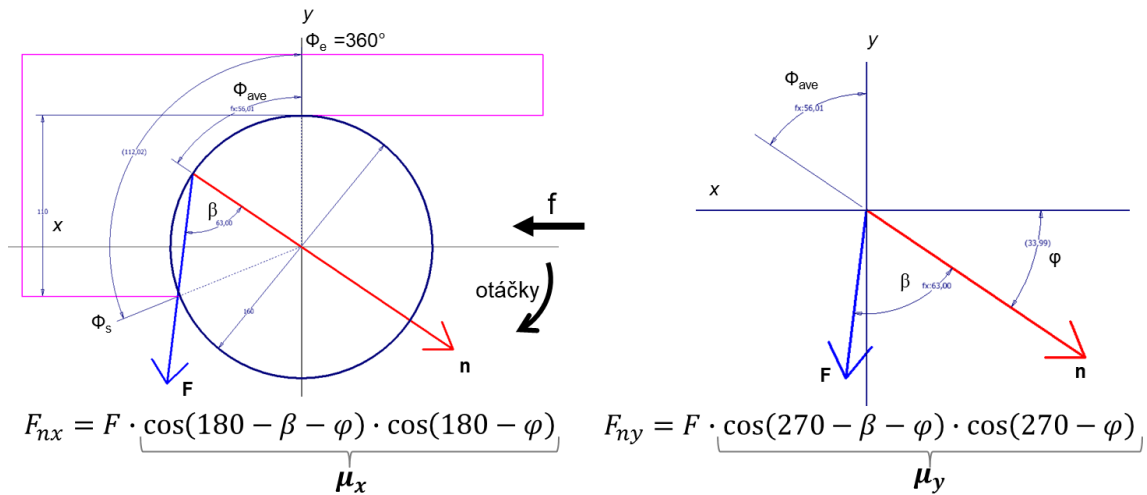




Příloha č.10 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek:
 fréza D160/Z9, frézování do rohu nesousledně, $a_e = 110$ mm

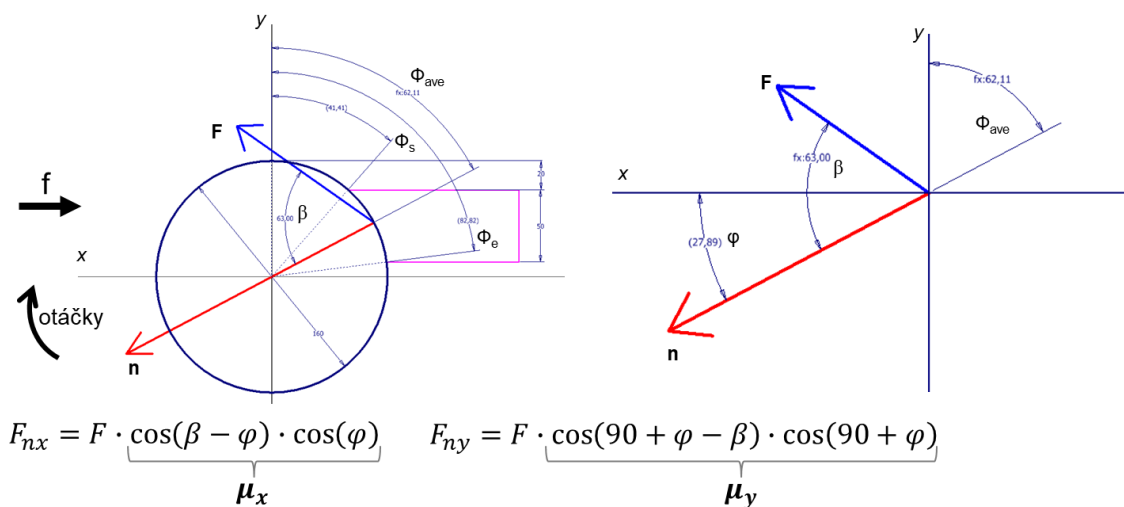


Příloha č.11 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek:
 fréza D160/Z9, frézování do rohu sousledně, $a_e = 110$ mm

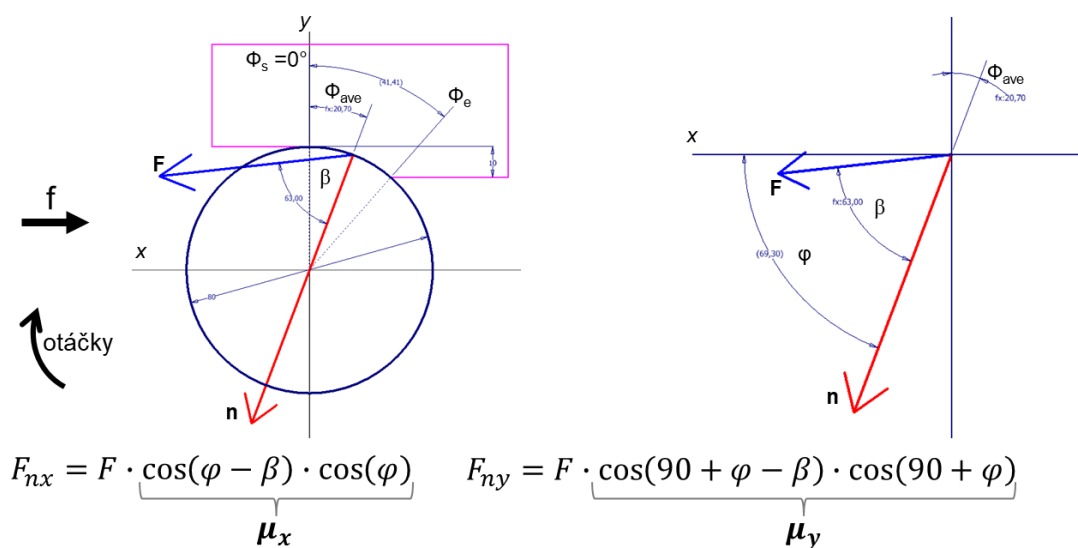




Příloha č.12 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek: fréza D160/Z9, čelní frézování nesousledně, horní hraj nástroje 20 mm horním okrajem dílce, $a_e = 50$ mm

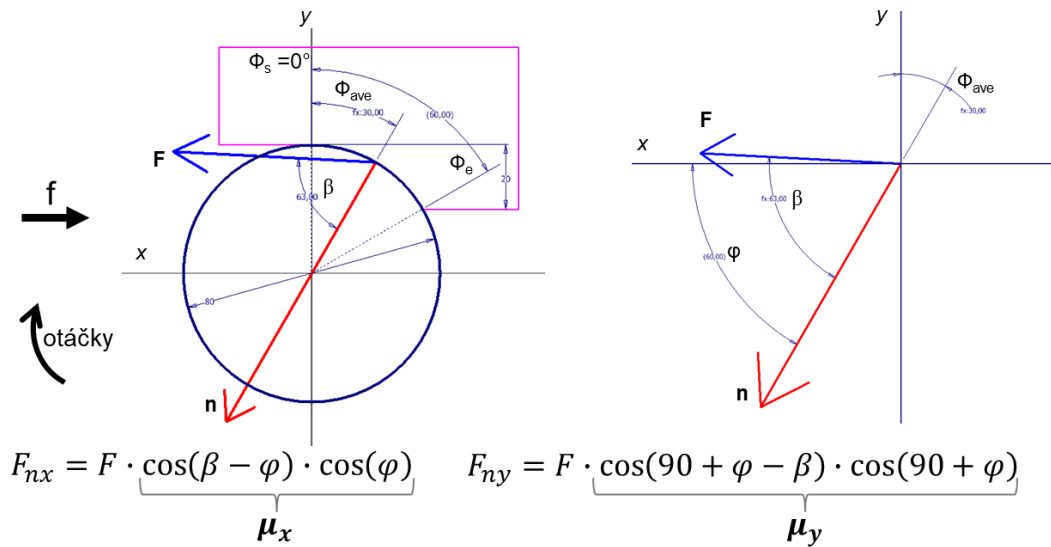


Příloha č.13 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek: fréza D80/Z3, frézování do rohu nesousledně, $a_p = 40$ mm, $a_e = 10$ mm

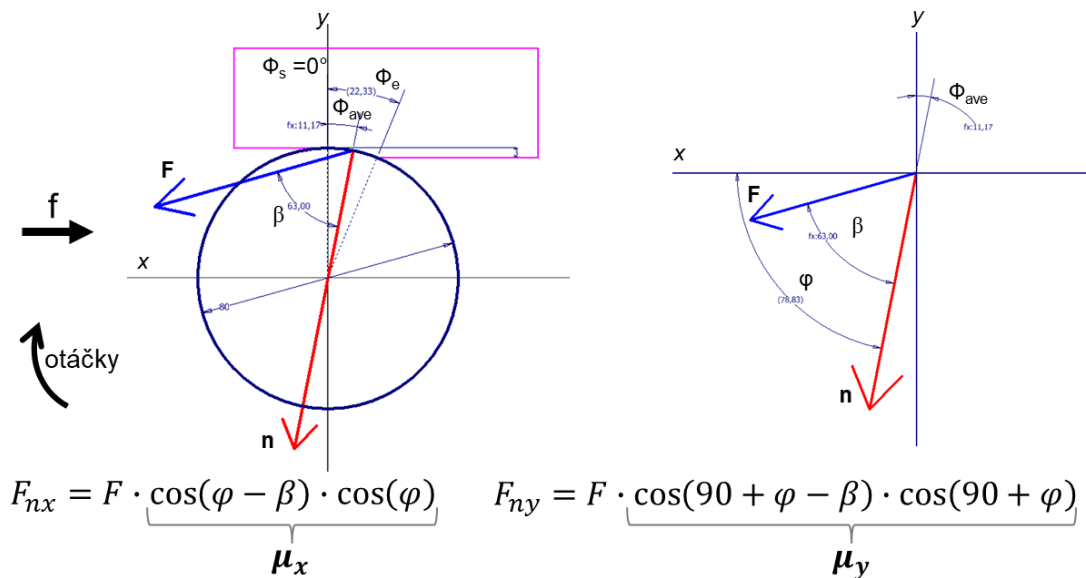




Příloha č.14 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek: fréza D80/Z3, frézování do rohu nesousledně, $a_p = 40$ mm, $a_e = 20$ mm



Příloha č.15 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek: fréza D80/Z3, frézování do rohu nesousledně, $a_p = 40$ mm, $a_e = 3$ mm





Příloha č.16 – Schéma určování směrových koeficientů na základě záběrových podmínek:
 fréza D80/Z3, frézování do rohu nesousledně, $a_p = 40$ mm, $a_e = 5$ mm

