

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie  
obrábění

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Ověření vlivu příčného vyklonění při vlečení na stabilitu řezného procesu

Autorka: **Bc. Petra Frková**

Vedoucí práce: **Ing. Jiří Vyšata Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala všem, kteří se na mé práci podíleli. V první řadě bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Vyšatovi Ph.D. za vedení práce, veškeré odborné rady a připomínky poskytnuté v průběhu tvorby práce, za zajištění prostředků potřebných k provedení experimentu a pomoc poskytnutou v průběhu experimentu. Dále bych ráda poděkovala Jiřímu Tenkovi za pomoc s realizací experimentu, a Ing. Miroslavovi Gombárovi Ph.D. za statistické vyhodnocení získaných výsledků. Děkuji taky ostatním lidem na katedře za jejich cenné rady a připomínky. V neposlední řadě bych také ráda poděkovala svému příteli, rodině a kamarádům za velkou trpělivost a podporu.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Frková	<b>Jméno</b> Petra		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Vyšata Ph.D.	<b>Jméno</b> Jiří		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Ověření vlivu příčného vyklonění při vlečení na stabilitu řezného procesu			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	83	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	53	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	30
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Cílem této práce je nalezení a popsání závislosti mezi příčným vykloněním vlečené kulové frézy a stabilitou řezu. Pomocí experimentu je zkoumána hypotéza, že určité příčné vyklonění vlečené frézy by mohlo vést k lepší stabilitě řezu a zlepšení řezných podmínek. Experiment spočívá v obrábění rovných drážek při různých úhlech příčného vyklonění a různých řezných podmínkách. Hodnotícími odezvami jsou řezné síly drsnost povrchu a zvuková analýza.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	<p>Vlečení nástroje, kulová fréza, příčné vyklonění nástroje, experiment, řezné síly, akustická emise, drsnost povrchu, stabilita řezu.</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Frková	Name Petra	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2303T004 „Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Vyšata Ph.D.	Name Jiří	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Verification of the effect of tool inclination during tool towing on cutting process stability		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	83	<b>TEXT PART</b>	53	<b>GRAPHICAL PART</b>	30
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>The aim of this work is to find and describe a relationship between transverse inclination during tool towing and cutting process stability. With experiment is tested the hypothesis that in certain specific transverse inclinations towed tool could have a better stability and cutting parameters. A principle of the experiment is machining equal grooves with different angles of transverse inclination and different cutting conditions. The cutting tool is a ball end mill. Evaluation factors are cutting forces, surface roughness and audio analysis.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>Tool towing, ball end mill, transverse inclination, experiment, cutting forces, sound emission analysis, surface roughness</p>

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	3
1 Úvod .....	5
2 Teoretická východiska.....	6
2.1 Obrábění kulovou frézou .....	6
2.2 Řezné síly .....	9
2.3 Stabilita řezu .....	11
2.3.1 Vlivy na stabilitu řezání .....	11
2.4 Zhodnocení předchozího experimentu .....	13
2.4.1 Průběh experimentu.....	13
2.4.2 Vstupní předpoklady experimentu .....	16
2.4.3 Výsledky experimentu.....	16
2.5 Akustická analýza.....	22
2.5.1 Princip metody .....	22
2.5.2 Získané poznatky.....	23
3 Plánování experimentu .....	27
3.1 Cíl experimentu .....	27
3.2 Vstupní parametry .....	28
3.2.1 Otáčky a posuv na zub .....	29
3.2.2 Úhel příčného vyklonění .....	30
3.3 Měřené veličiny .....	31
3.3.1 Vibrace .....	31
3.3.2 Řezné síly .....	31
3.3.3 Drsnost povrchu .....	31
3.3.4 Zvuková analýza .....	31
3.4 Rozdělení polotovaru na pole .....	32
3.5 Znáhodnění experimentu .....	33
3.6 NC Program .....	34
3.7 Použité stroje a zařízení .....	35
3.7.1 stroj.....	35
3.7.2 Nástroj .....	37
3.7.3 Materiál obrobku .....	37
3.7.4 dynamometr.....	38
3.7.5 mikrofón .....	39
3.7.6 drsnoměr.....	40

3.7.7	software .....	40
4	Experiment .....	41
4.1	Příprava experimentu.....	41
4.2	Průběh experimentu .....	43
5	Zpracování naměřených dat .....	44
5.1	Řezné síly .....	45
5.1.1	Odečítání hodnot .....	45
5.1.2	Radiální složka řezných sil.....	48
5.1.3	Tangenciální složka řezných sil .....	49
5.1.4	Axiální složka řezných sil .....	50
5.2	Drsnost povrchu.....	51
5.3	Zvuková analýza.....	52
6	Vyhodnocování naměřených dat .....	56
6.1	Řezné síly .....	56
6.1.1	Radiální složka řezných sil.....	57
6.1.2	Tangenciální složka řezných sil .....	59
6.1.3	Axiální složka řezných sil .....	60
6.1.4	Statistické vyhodnocení složek řezných sil .....	62
6.2	Drsnost povrchu.....	69
6.3	Zvuková analýza.....	72
6.4	Shrnutí výsledků .....	74
7	Technicko – ekonomické zhodnocení experimentu .....	75
8	Závěr.....	76
	Seznam použité literatury .....	79
	Seznam příloh na DVD .....	80
	Seznam obrázků .....	81
	Seznam grafů.....	82
	Seznam tabulek .....	83

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Popis
Soustava S – N – O – P	Soustava stroj – nástroj – obrobek - přípravek
GPL	General Public License
VBD	Výměnná břitová destička
CNC	Computer numerical control
NC	Numerical control
SK	Slinuté karbidy
DVD	Digital Versatile Disc

Symbole a značky	Jednotky	Popis
$d_{eff}$	mm	Efektivní průměr
$v_{ceff}$	m/min	Efektivní řezná rychlost
$n$	ot/min	Otáčky
$f_z$	mm/zub	Posuv na zub
$\beta_f$	°	Podélný úhel vyklonění
$\beta_n$	°	Příčný úhel vyklonění
$a_p$	mm	Hloubka řezu
$a_e$	mm	Šířka záběru
$R$	mm	Poloměr frézy
$F_{abs}$	N	Absolutní složka řezné síly
$F_x, F_y, F_z$	N	Jednotlivé složky řezné síly
$A_{abs}$	N	Absolutní amplituda řezných sil
$A_x, A_y, A_z$	N	Jednotlivé složky amplitudy řezných sil
$D$	mm	Průměr frézy
$\chi$	°	Úhel nastavení hlavního ostří
$\delta$	°	Úhel řezu
$F_{tan}$	N	Tangenciální složka řezné síly
$F_{rad}$	N	Radiální složka řezné síly
$F_{ax}$	N	Axiální složka řezné síly
$b$	mm	šířka odřezávané vrstvy
$h$	mm	tloušťkou řezu
$R_a$	$\mu\text{m}$	Střední aritmetická hodnota drsnosti povrchu



$R_{max}$	$\mu\text{m}$	maximální výška nerovností drsností povrchů
$R_t$	$\mu\text{m}$	celková výška profilu drsností povrchů
$R_z$	$\mu\text{m}$	výška nerovností profilu z deseti bodů
$L$	mm	Délka vyložení
$L_m$	mm	Délka ramene působení $M_k$
$M_o$	Nm	Ohybový moment
$M_k$	Nm	Krouticí moment
$t_s$	min	Strojní čas
$L_o$	mm	Délka obrábění
$z$	-	Počet zubů

## 1 Úvod

V dnešní době je ve strojírenství kladen stále větší důraz na efektivnost výroby. Také čím dál tím více rostou požadavky na geometrickou a rozměrovou přesnost výrobků i integritu povrchu při zachování, nebo snížení ceny výrobků. Díky moderní technice lze hledat nové technologie, které mohou zefektivnit výrobu složitých součástí a umožnit menší spotřebou materiálu, i času, při současném zlepšování jakosti výrobků. Zásluhou toho je možné výrobu zlevnit, což se projeví nižší cenou výrobků a zároveň vyšším ziskem pro výrobce.

Nalezení nové metody, nebo vylepšení stávajících metod obrábění zpravidla může vést k usnadnění výroby některých součástí. Při zlepšení dokončování tvarových ploch se prospěšnost promítne mimo jiné z hlediska ekonomického, protože by mohly být zrychleny, nebo i vypuštěny některé ekonomicky náročné operace, například ruční broušení, či vyjiskřování.

Pro dokončování tvarově složitých ploch se velmi často používají toroidní a kulové frézy, které díky kruhovému tvaru řezné části nástroje vytvářejí méně stupňovitý povrch (viz například Obr. 1). Kulové frézy se používají převážně pro dokončování tvarových ploch se špatnou přístupností, zejména vnitřních koutů. Aby bylo možné tyto plochy obrobit, používá se zpravidla tenký nástroj s velkým vyložení, což jej předurčuje ke sklonu k vibracím.



**Obr. 1 - Obrábění kulovou frézou [1]**

Další nevýhoda kulového nástroje je, že pokud je fréza při obrábění kolmo na obráběnou plochu, do řezu se dostává kritický bod nástroje, ve kterém je nulová řezná rychlost. Materiál je tedy v tomto bodě pouze tvářen, nikoliv obráběn. Aby se tomuto negativnímu jevu zabránilo, používá se vyklonění frézy podélně vůči směru obrábění tak, aby se kritický bod nástroje dostal mimo oblast řezu. Moderní CNC stroje umožňují ale i vyklonění ve směru příčném.

Při podélném vyklonění frézy působí na nástroj síly, které se snaží frézu odvalit do příčného směru, což může vést ke ztrátě stability řezného procesu vlivem malé tuhosti nástroje v radiálním směru. Pokud bude vlečená fréza vykloněna o správný úhel také v příčném směru

směru, směr, do kterého se snaží fréza odvalit, by mohl být velmi podobný směru posuvu, což by mohlo vést ke zlepšení řezného procesu. Při tomto vyklonění by se záběrové podmínky měly podobat souslednému frézování, což by také mohlo vést ke zklidnění řezu. Kombinace obou vyklonění by tedy mohla vést ke zvýšení stability řezného procesu.

Touto hypotézou se ve své diplomové práci zabýval již Bc. Ondřej Jukl. Výsledky této práce ale byly málo přesvědčivé, jak je popsáno níže, a tak je vhodné výzkum zopakovat a použít při něm jiné metody, které by snad mohly vést k přesvědčivějším výsledkům, které hypotézu buď potvrdí, nebo vyvrátí.

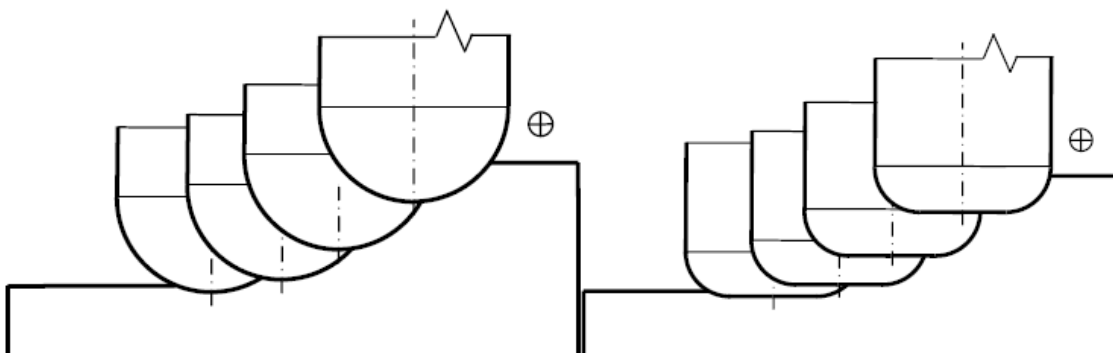
Cílem této práce je ověřit vliv příčného vyklonění vlečené kulové frézy na stabilitu řezu. Toto ověření bude provedeno pomocí experimentu, při kterém se bude obrábět poměrně velké množství rovných drážek za proměnných řezných podmínek a za proměnného příčného vyklonění vlečené kulové frézy. Hodnotícími veličinami by měly být řezné síly a drsnost povrchu. Také bude provedena zvuková analýza dle metodiky, kterou navrhl v roce 2012 Bc. Jan Lerch.

## 2 Teoretická východiska

Před začátkem experimentu je vhodné si popsat poznatky, které již byly v problematice obrábění kulovou frézou získány, aby se z nich mohlo vycházet při plánování budoucího experimentu. V následujících odstavcích je také popsán a zhodnocen experiment, který byl na toto téma již proveden Bc. Ondřejem Juklem. Dále je zde popsána zvuková analýza podle diplomové práce Bc. Jana Lercha. V této kapitole se také nachází základní poznatky o stabilitě řezu.

### 2.1 Obrábění kulovou frézou

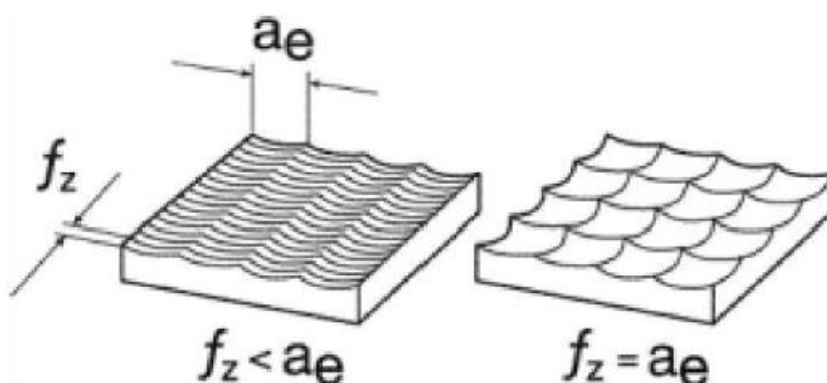
Význam kulových fréz vzrostl především s nástupem CNC strojů a s tvorbou programů pomocí CAM systémů. Zaoblený břit nástroje zanechává mnohem menší nerovnosti než klasická válcová fréza, jak je možné vidět na následujícím obrázku (Obr. 2). Tohoto jevu se používá u kulových a toroidních fréz pro dokončování tvarově složitých ploch. Výhodou toroidní frézy je, že díky rovnému čelu je možné použít vyšší hodnoty bočního přísuvu. Tímto nástrojem ale není možné obrábět například vyduté plochy o malém průměru, nebo vnitřní kouty tvarově složitých součástí. Proto se na tyto aplikace většinou používá kulová fréza.



Obr. 2 - Obrábění tvarové plochy kulovou frézou a stopkovou frézou s rádiusem v rohu [2]

Kulová fréza není příliš produktivní nástroj, protože vzhledem k požadované drsnosti plochy může mít kvůli svému specifickému tvaru velmi malou šířku záběru. Jak lze vidět na obrázku (Obr. 3), posuv na zub může být roven šířce záběru, aniž by byla zhoršena drsnost obráběného

materiálu. Hodnoty teoretické podélné drsnosti lze vypočítat dle vzorce (1) [2]. Teoretickou příčnou drsnost je možné získat ze vztahu (2) [2] a pokud bude posuv na zub roven šířce záběru, měla by být také shodné drsnosti v podélném a příčném směru.

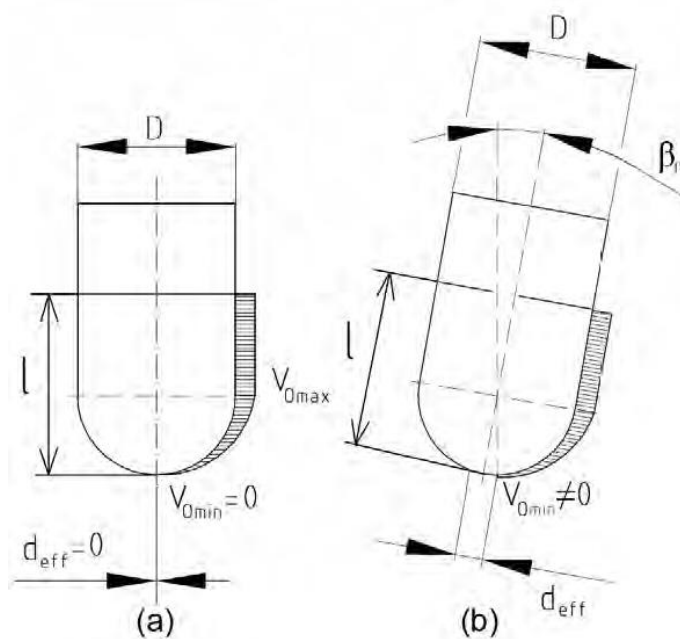


Obr. 3 - Vliv řezných podmínek na drsnost povrchu při obrábění kulovou frézou [2]

$$R_z \approx \frac{f_z^2}{8 \cdot R} \quad (1)$$

$$R_z \approx \frac{a_e^2}{8 \cdot R} \quad (2)$$

Hlavní nevýhodou obrábění kulovou frézou je ale její proměnná obvodová rychlost v délce nástroje, která s klesajícím průměrem také klesá, a v kritickém bodě nástroje je nulová. Důsledkem tohoto jevu je, že dostane-li se kritický bod nástroje do záběru, dochází zde pouze k přechování materiálu, nikoliv k řezání. Tento jev má za následek nárůst axiální řezné síly, zvýšení teploty řezání, snížení trvanlivosti nástroje, a zhoršení obráběného povrchu. Ke zlepšení záběrových podmínek se zpravidla používá vyklonění frézy, nebo obrobku, aby osa nástroje nebyla kolmá na obráběnou plochu. Změny průběhu rychlostí lze vidět na následujícím obrázku (Obr. 4). Při vyklonění frézy nabývá v nejnižším bodě dotyku frézy s obrobkem fréza nenulovou rychlost, což eliminuje výše popsané negativní vlivy.



Obr. 4 - Gradient obvodové rychlosti a) nevykloněného, b) vykloněného nástroje [3]

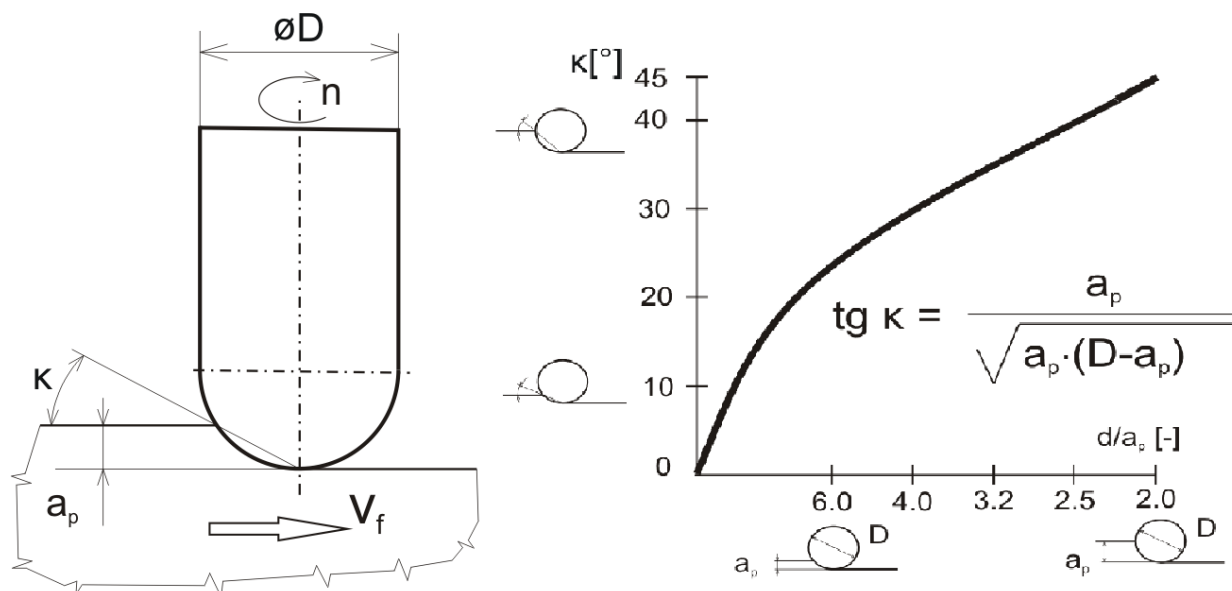
Pokud není kulová fréza vykloněna, je efektivní řezný průměr závislý pouze na hloubce řezu a poloměru řezného nástroje. Vzhledem k tomu, že obrábění kulovou frézou je většinou dokončovací (nebo předdokončovací) operace, bývá hloubka řezu velmi malá a tak i efektivní průměr je značně malý. Velikost tohoto průměru je dána vztahem (3) [3]:

$$d_{eff} = 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (D - a_p)} \quad (3)$$

Po dosazení tohoto vzorce do vztahu pro výpočet řezné rychlosti se získá vztah (4) [3] pro skutečnou řeznou rychlost:

$$v_{ceff} = \frac{\pi \cdot d_{eff} \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot \left(2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (D - a_p)}\right) \cdot n}{1000} \quad (4)$$

Další specifikum kulové frézy je její proměnný úhel nastavení hlavního ostří v závislosti na poměru průměru nástroje ku hloubce řezu. Tento úhel roste se zvětšující se hloubkou řezu (zmenšuje se  $D/a_p$ ), jak je vidět na následujícím obrázku (Obr. 5).



**Obr. 5 - Závislost úhlu nastavení hlavního ostří na poměru průměru nástroje a hloubky řezu [3]**

Vykloněním frézy o úhel  $\beta_f$  se zvětší efektivní průměr frézy a tím i na něm závislé řezné rychlosti. Výpočty těchto hodnot jsou dány vztahy (5) a (6) [3]

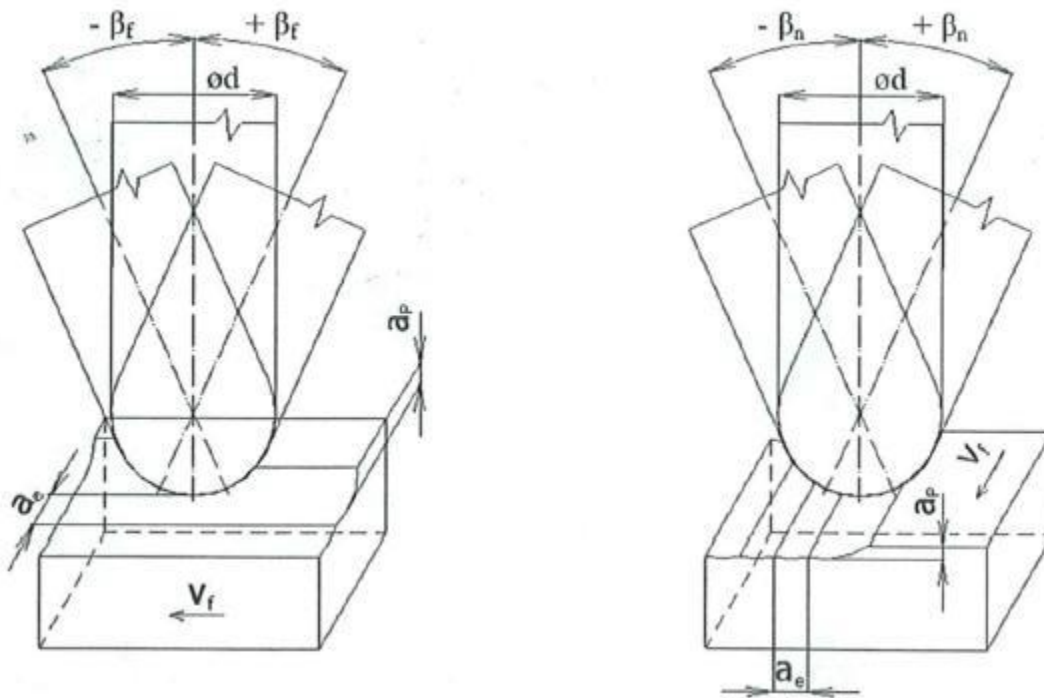
$$d_{eff} = D \cdot \sin \left[ \arccos \left( \frac{D - 2 \cdot a_p}{D} \right) \pm \beta_f \right] \quad (5)$$

$$v_{ceff} = \frac{\pi \cdot d_{eff} \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot \left\{ D \cdot \sin \left[ \arccos \left( \frac{D - 2 \cdot a_p}{D} \right) \pm \beta_f \right] \right\} \cdot n}{1000} \quad (6)$$

Při dvojnásobném vyklonění frézy je nutné přepočítat úhel vyklonění  $\beta_f$  na skutečný úhel vyklonění. V práci byl tento úhel přepočítáván pomocí modelovacího softwaru Inventor.

Úhel podélného vyklonění může nabývat kladné i záporné hodnoty a je závislý na směru výklonu vůči směru obrábění. Kladné hodnoty  $\beta_f$  se používají při vyklonění frézy po směru

pohybu. Takto vykloněný nástroj se označuje jako nástroj vlečený, nebo také tažený. Záporné hodnoty nabývá  $\beta_f$  při výklonu frézy proti směru obrábění a tento nástroj je poté nazýván tlačný. Záporné hodnoty úhlu  $\beta_f$  se v praxi zpravidla nepoužívají. Orientaci těchto úhlů vůči směru posuvu obrobku je možné vidět na obrázku (Obr. 6) vlevo. Vpravo je vyobrazena orientace úhlů zkoumaného příčného vyklonění. Směr posuvu obrobku je na obou obrázcích označen vektorem  $V_f$ .



Obr. 6 - Vyklonění nástroje v podélném a příčném směru [4]

Důsledky výklonu frézy jsou vesměs pozitivní, jak dokázaly předchozí studie. Při obrábění vlečeným nástrojem byly zjištěny následující skutečnosti [5]:

- podstatné zlepšení drsnosti povrchu v příčném i podélném směru (ověřeno experimenty);
- snížení času obrábění z důvodů možnosti použití většího posuvu na zub a větší šířky řezu (kroku frézy);
- zvýšení trvanlivosti nástroje;
- zvýšení přesnosti obrábění;
- zajištění konstantního průřezu třísky a neměnné řezné podmínky (s využitím pětiosého obrábění).

## 2.2 Řezné síly

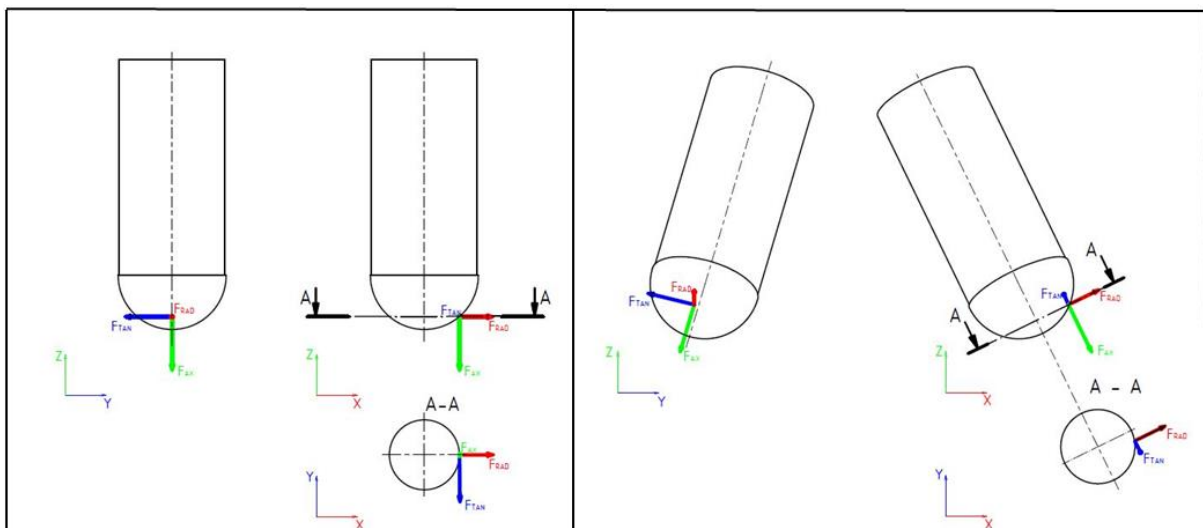
Řezné síly mají velkou vypovídající schopnost o procesu obrábění. Pokud jsou nepřiměřeně velké, svědčí to o tom, že něco v řezném procesu není v pořádku. Příčinou velkých řezných sil mohou být například špatné záběrové podmínky, opotřebený nástroj, špatná obrobiteľnost materiálu, nebo nevhodně zvolené řezné podmínky. Pokud nejsou řezné síly dostatečně utlumeny soustavou S – N – O – P, mohou vést k destabilizaci obrábění. Průběh velikostí řezných sil za různých řezných podmínek má velkou vypovídající schopnost o průběhu

řezného procesu. Této závislosti bude využito v plánovaném experimentu, kdy průběh řezných sil bude jeden z hlavních hodnotících parametrů výsledků pokusu.

Řezná síla je potřeba k vyvolání napětového stavu v materiálu obrobku, aby se odřízl jako tříška. Směr a velikost této síly je v rovnováze s řezným odporem kladeným břitou proti vnikání do obrobku. Znalost průběhu řezných sil je velmi důležitá k pochopení i možné optimalizaci řezného procesu. Příliš velké řezné síly mohou mít za následek například rozechvění soustavy S – N – O – P, destrukci řezného nástroje, přetížení stroje, i zhoršení přesnosti obráběné plochy vlivem odklonění nástroje. Velmi důležitý je také směr této síly, protože nástroj i obrobek mají v různých směrech rozdílnou tuhost, proto se velmi často s řeznou silou nepracuje jako s celkem, ale hodnotí se její složky ve zvoleném souřadném systému. [6] [3]

O účincích řezných sil píše Bc. Dvořáček ve své diplomové práci toto: *Účinek řezných sil na stopkovou frézu může značně ovlivnit výsledek obrábění. Radiální, axiální a tangenciální složky řezné síly mají sklony k odlačování nástroje. S ohledem na uvažovaný způsob obrábění je nutné ověřit, jaké výhody, nebo nevýhody poskytuje sousledné a nesousledné frézování a jaký úhel sklonu ostří nebo šroubovice povede k lepšímu výsledku. Při frézování může směr i velikost složek řezných sil značně kolísat v závislosti na různých faktorech, které ovlivňují proces obrábění. Mezi tyto faktory patří například postup způsobu frézování, poloha nástroje, materiál obrobku, geometrie břitu, velikost a typ opotřebení břitu nástroje a řezné podmínky. Síly vyskytující se v průběhu obrábění jsou většinou síly, které vznikají na břitu nástroje při odebrání materiálu obrobku. Řezné síly je možné teoreticky vypočítat nebo změřit snímačem silového zatížení (dynamometrem). Tyto síly se sestávají zejména ze sil vznikajících při odřezávání třísky a sil přetvářejících třísku.* [3]

Rozklad sil, působících při obrábění na nevykloněnou a vykloněnou kulovou frézu, lze vidět na následujícím obrázku (Obr. 7).



**Obr. 7 - Řezné síly na nevykloněné (vlevo) a vykloněné (vpravo) kulové fréze**

Jak lze vidět na obrázku, průběh sil se u vykloněného a nevykloněného nástroje značně liší. Zatímco u nevykloněného nástroje jsou směry jednotlivých složek sil totožné se souřadnicovým systémem stroje, u vyklonění se tato totožnost ztrácí. Vzhledem k tomu, že při experimentu bude použito dvojnásobné vyklonění nástroje, byl by přepočítání jednotlivých složek sil ze souřadnicového systému stroje obtížný (nikoliv však nemožný). Při plánovaném experimentu je vhodnější hodnotit jednotlivé složky sil samostatně, protože kulová fréza,

jakožto tenký dlouhý nástroj, má ve směru radiálním mnohem menší tuhost, než ve směru axiálním. Proto je vhodné pro měření sil použít dynamometr upnutý na nástroji.

## 2.3 Stabilita řezu

Při obrábění vždy vznikají dynamické jevy, které mohou vést ke chvění a tím vzniklé nestabilitě řezného procesu. Chvění vzniká, pokud dynamické jevy nejsou eliminovány tlumením soustavy S – N – O – P, nebo pokud se frekvence dynamických jevů blíží vlastní frekvenci některého členu soustavy. Chvění může vznikat například kvůli zvlnění povrchu obráběné plochy, proměnlivou tuhostí upnutí nástroje v různých směrech, vlivem periodické tvorby nárůstku a jeho odtrhávání, postupným usmykáním jednotlivých článků třísky, nebo změnami součinitele tření na čele způsobené proměnlivou relativní rychlostí pohybu třísky po čele nástroje. [6]

Kmitání je negativní jev, který je nutné během obrábění eliminovat. Jeho negativní účinky na řezný proces jsou [6]:

- Snížení výkonu obrábění (hospodárného úběru) vlivem snížení řezných podmínek (pro obnovení stability procesu),
- zhoršení tvarové přesnosti a drsnosti povrchu obrobku,
- zvýšení intenzity otupování bříty a nebezpečí jeho havárie,
- zvýšení namáhání soustavy S – N – O – P,
- zhoršení pracovního prostředí (hluk).

Tyto negativní vlivy vznikají důsledkem [6]:

- Změny polohy bříty vůči obrobku,
- změny řezné rychlosti (relativní rychlosti bříty vůči obrobku),
- změny řezných úhlů,
- vzniku dynamických sil (až desetinásobek statických řezných sil).

Kmitání může být buď vynucené, nebo samobuzené. Vynucené kmitání vzniká vybuzením periodicky působící budící silou, která buď souvisí s řezným procesem (například periodicky proměnlivé záběrové podmínky při frézování), nebo nikoliv (například chvění od jiného stroje přenesené podlahou). Frekvence takto vybuzeného kmitání je shodná s frekvencí budící síly. [6]

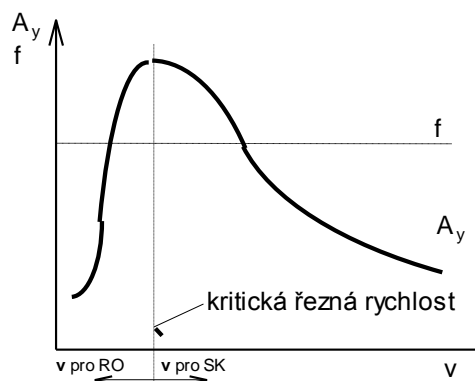
Samobuzené chvění nepotřebuje ke svému vzniku, ani k existenci, vnější působení síly. Z klidového stavu je soustava vybuzena náhodným silovým impulsem a chvění je udržováno pouze z energie dodávané na řezný proces. Frekvence samobuzeného kmitání se rovná vlastní frekvenci řídicího členu v sestavě S – N – O – P. [6]

### 2.3.1 Vlivy na stabilitu řezání

Intenzita vlivu faktorů závisí na tuhosti systému, tlumení systému, vlastních frekvencích členů systému a na orientaci kmitání. Stabilitu lze zlepšit zvýšením tuhosti systému S – N – O – P. Na tuhost této soustavy má vliv například délka vyložení nástroje, způsob upnutí obrobku, konstrukce stroje, použité obráběcí i obráběné materiály a mnoho dalších vlivů. Některé z nich jsou popsány v následujících odstavcích. [6]

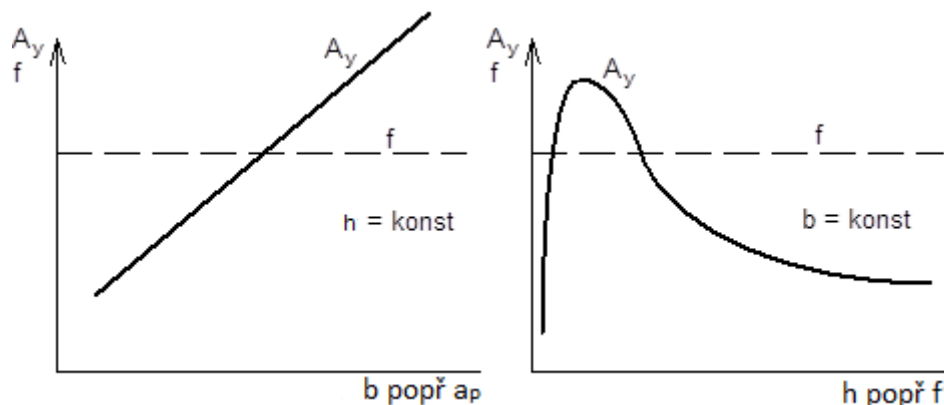


Vliv **řezné rychlosti** na stabilitu řezu je nepravidelný, protože s rostoucí řeznou rychlostí se zvětšuje deformační rychlost v oblasti kořene třísky, čímž klesá plasticita kovu a roste teplota v této oblasti. S rostoucí teplotou roste také plasticita kovu, díky čemuž klesá deformační rychlost. V určité oblasti řezných rychlostí také může vznikat nárůstek, který velmi negativně ovlivňuje stabilitu řezu. Závislost amplitudy kmitání soustavy na řezné rychlosti lze vidět na grafu (Graf 1). Do určité hodnoty  $v_{krit}$  amplituda kmitání roste, poté klesá. [6]



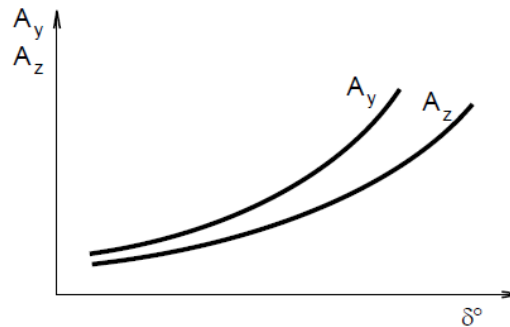
Graf 1 - Vliv řezné rychlosti na amplitudu kmitání [6]

**Hloubka řezu  $a_p$**  (popřípadě šířka odřezávané vrstvy  $b$ ) má s posuvem  $f$  (popřípadě s tloušťkou řezu  $h$ ) na stabilitu také velký vliv. Poměr  $b/h$  ovlivňuje směr působení řezné síly. S rostoucí šířkou odřezávané vrstvy a s klesající hloubkou řezu se zvyšuje amplituda kmitání  $A_y$  ve směru osy  $y$  (viz Graf 2).



Graf 2 - Vliv hloubky řezu a posuvu amplitudu kmitání [6]

Dalším faktorem ovlivňujícím stabilitu řezu je bezpochyby **geometrie břitu**. Se zvyšujícím se úhlem nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  klesá šířka odřezávané vrstvy  $b$  a zvětšuje se tloušťka této vrstvy  $h$ , díky čemuž se řez stabilizuje. S rostoucím úhlem hřbetu  $\alpha$  se snižuje tření na hřbetě, což zpravidla vede také k větší stabilitě řezu. Pokud se zvětšuje úhel řezu  $\delta$  (popřípadě úhel čela  $\gamma$ ), roste také plastická deformace v oblasti  $OMNO'$ , což vede k možné tvorbě nárůstků, čímž se zmenšuje stabilita řezu a roste amplituda kmitání jak ve směru osy  $y$ , tak i ve směru osy  $z$ , jak lze vidět na (Graf 3).



Graf 3 - Vliv úhlu řezu na amplitudu kmitání [6]

Velký vliv má také **strategie frézování**. Například při vysoko-posuvovém obrábění působí největší síla v axiálním směru, ve kterém bývá tuhost většinou dostačující, naopak u frézování bokem frézy může dojít k vyhnutí frézy. Velký rozdíl je také mezi sousledným a nesousledným frézováním. Obrábění kulovou frézou patří do čelního obrábění, u kterého dochází ke kombinaci obou zmíněných způsobů. Tříska se s vnikáním břitu do materiálu nejprve zvětšuje (nesousledné frézování) a poté opět zmenšuje (sousledné frézování).

## 2.4 Zhodnocení předchozího experimentu

Plánovaný experiment přímo navazuje na experiment provedený roku 2011 Bc. Ondřejem Juklem. Výsledky experimentu ukázaly, že jistá závislost mezi příčným vykloněním kulové frézy a stabilitou řezu existuje. Přesvědčivost výsledků ale nebyla příliš velká. Možnými důvody, proč tomu tak bylo, mohly být:

- malý počet drah,
- měření sil v souřadném systému obrobku, nikoliv nástroje,
- vyhodnocování sil jako výsledné síly, nikoliv jednotlivých složek,
- absence zvukové analýzy.

Aby se v plánovaném experimentu neopakovaly faktory vedoucí k nepřesvědčivosti výsledků, je vhodné si průběh tohoto pokusu popsat a zanalyzovat, které rozhodnutí by bylo vhodné učinit jinak, aby statistická významnost experimentu byla vyšší.

### 2.4.1 Průběh experimentu

V předchozí práci byla zkoumána hypotéza, že určité příčné vyklonění vlečené kulové frézy by mohlo vést k větší stabilitě řezu a zlepšení řezných podmínek. Vlečená fréza má totiž při obrábění tendenci odvalovat se do strany. Pokud by fréza byla vykloněna do tohoto směru, směr, do kterého se snaží odvalit, by mohl být velmi podobný směru posuvu, čímž by mohl být zlepšen řezný proces. Při tomto vyklonění se záběrové podmínky budou podobat souslednému frézování, což by také mohlo vést ke zklidnění řezu.

K ověření této hypotézy byl proveden experiment, v němž byly pomocí kulové frézy obráběny rovné drážky za proměnných řezných podmínek a za různých úhlů příčného vyklonění vlečené frézy. Úhel vyklonění ve směru posuvu byl  $15^\circ$  a byl konstantní po celou dobu pokusu. Ve směru kolmém na posuv byl zkoumán úhel v intervalu  $\langle -80^\circ; +80^\circ \rangle$  s krokem  $10^\circ$ . Proměnná byla také hloubka řezu a veličiny na ní přímo závislé, tedy efektivní průměr  $d_{\text{eff}}$  a efektivní řezná rychlost  $v_{\text{ceff}}$ . Zbylé řezné podmínky byly dočasně konstantní. Konkrétní hodnoty těchto veličin lze vidět v tabulce (Tab. 1).

	Pole 1	Pole 2	Pole 3	Pole 4
n [ot/min]	4000			
$f_z$ [mm/zub]	0,25			
$\beta_f$ [°]	15			
$a_p$ [mm]	0,2		0,3	
$d_{eff}$ [mm]	4,38		4,85	
$v_{eff}$ [m/min]	55,04		60,95	

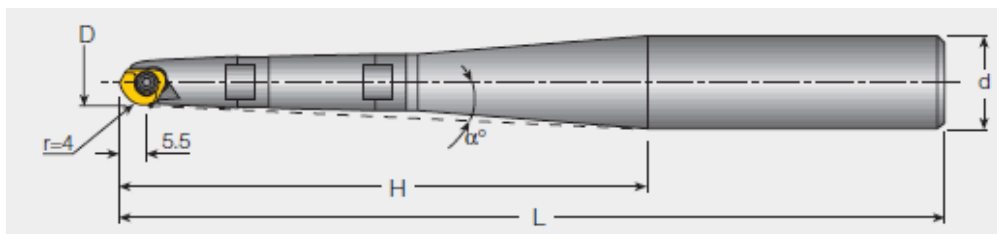
**Tab. 1 - Řezné podmínky v předchozím experimentu [4]**

Měřenými veličinami byly řezné síly a drsnost obrobku. Řezné síly byly měřeny dynamometrem Kistler Type 9255A umístěným na obrobku. Drsnost povrchu byla vyhodnocena pomocí drsnoměru MAHR MarSurf M300 se snímačem drsnosti typu PHT 6 350. a s měřicí rozsahem 350 $\mu$ m. U vybraných drah byly pořízeny snímky obrobek plochy digitálním mikroskopem Digitus DA-70351. [4]

Také se uvažovalo o měření vibrací stroje a zvukové analýze, Jak sám autor v textu zmiňuje, vypuštění zvukové analýzy se nakonec ukázalo jako nepřiliš moudré. Změna stability řezu byla totiž velmi dobře slyšitelná pouhým sluchem, a tak by byly zaznamenané akustické projevy velmi užitečné. Důvod nepoužití měření zvukových projevů byl pravděpodobně absence, nebo neznalost, efektivní metodiky měření a vyhodnocování zvukových projevů. Nicméně experiment provedený Bc. Juklem byl podmětem pro vytvoření vhodné metody. Tématem se v roce 2012 zabýval Bc. Jan Lerch, který ve své diplomové práci navrhl metodu vyhodnocování zvukového záznamu obrábění. Hlavní přínos této práce je takový, že se zde u zvuku nehodnotí hluchost, ale provádí se spektrální analýza naměřeného zvuku. Tato metoda je popsána v kapitole 2.5, a plánovaný experiment bude vyhodnocován mimo jiné touto metodou.

Měření bylo provedeno na pětiokém frézovacím centru Hermle U 1130 ve firmě Pilsen Tools s.r.o. Obráběným materiálem byla ocel vhodná pro cementování ČSN 14 220. Obráběcím nástrojem byla kulová fréza s VBD ze SK od firmy ISCAR ČR, s.r.o., jejíž tvar a rozměry lze vidět na následujících obrázcích. Tento nástroj byl upnut do upínacího pouzdra s kleštinou.

- Typ držáku: CM D08-B-C12

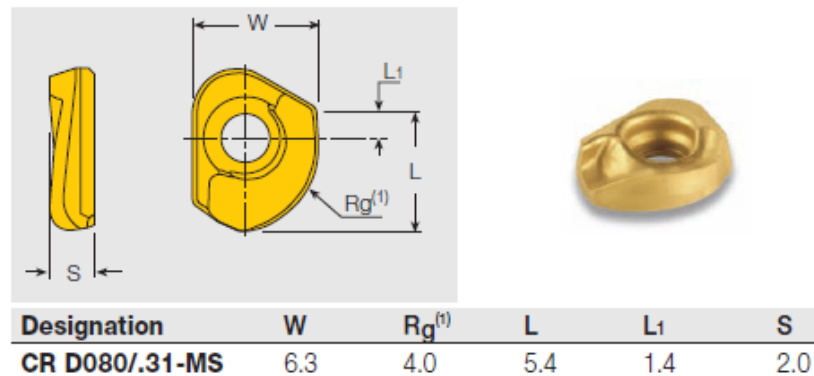


**Obr. 8 - Schéma nástrojového držáku CM D08-B-C12 [4]**

D [mm]	H [mm]	L [mm]	$\alpha$ [°]	Typ destiček
8	45	120	3	CR D080

**Tab. 2 - Technické parametry nástrojového držáku [4]**

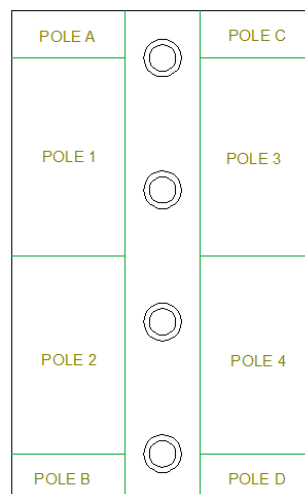
- Označení VBD: CR D080/.31-MS



Obr. 9 - Technické parametry VBD [4]

Aby byly výsledky plánovaného experimentu porovnatelné s výsledky již získanými, je potřeba tyto faktory experimentu zachovat, nebo co nejvíce přiblížit. Proto je v plánu v plánovaném experimentu použit stejný typ materiálu, nástroje, VBD, i upnutí. Zmiňovaný stroj již ale není k dispozici a nebylo by možné na něj upnout nástrojový dynamometr, a tak bude nahrazen strojem podobným.

Polotovaru byl pro potřeby experimentu rozdělen na čtyři hlavní a čtyři pomocné pole, jak lze vidět na obrázku (Obr. 10). V každém hlavním poli bylo obrobena sedmáct drah s různými úhly příčného vyklonění. V polích 1 a 2 byly jiné řezné podmínky, než v polích 3 a 4. Jejich konkrétní hodnoty lze vidět v tabulce (Tab. 1) výše. Pomocná pole sloužila ke kalibraci dynamometru a pro zkušební dráhy k nastavení vhodného vyložení nástroje. Horní plocha polotovaru byla před samotným experimentem obrobena na drsnost Ra 1,6 a byly do ní vyvrtány průchozí díry pro upnutí polotovaru na dynamometr.



Obr. 10 - Rozdělení plochy obrobku [3]

Rozdělení obrobku na plochy je velice dobrý nápad, který bude použitý i v plánovaném experimentu. Tvar a umístění polí bude ale odlišný. Důvodem je větší počet polí, který je způsobený více rozmanitými řeznými podmínkami, a absence děr pro upnutí na dynamometr, protože bude použitý dynamometr nástrojový.

K zamezení zkreslení výsledků náhodnými veličinami bylo pořadí obráběných drah znáhodněno. Znáhodnění drah autor provedl pomocí funkce „Náhodné číslo“ v tabulkovém procesoru Excel. Znáhodnění je vhodné provést i v plánovaném experimentu.

### 2.4.2 Vstupní předpoklady experimentu

Svou práci pan Bc. Jukl provedl za platnosti technických předpokladů, jejichž znění je následující. [4]

- pro experiment bude uvažován obráběný materiál jako homogenní s přibližně stejnou drsností povrchu  $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ ;
- dostačující tuhost upnutí obrobku;
- vyložení nástroje na hranici stability řezného procesu;
- řezné podmínky stanoveny v rozsahu doporučovaném od výrobce nástroje;
- každý průchod nástroje obrobkem realizován do plného materiálu;
- vzorkovací frekvence dynamometru nastavena na 10 000 Hz;
- obrábění bez použití procesní kapaliny;
- výměna břitové destičky po obrobení každého pole obrobku;
- poměr L:D = 1:3 (upnutí v kleštině);
- tuhost nástroje – nízká a zároveň tuhost upínacího elementu - řádově vyšší a tak nepodstatná pro celkovou tuhost.

Aby byly výsledky obou experimentů porovnatelné, měly by být dodrženy všechny uvedené technické předpoklady.

### 2.4.3 Výsledky experimentu

Hodnotícími parametry experimentu byly hodnoty naměřených drsností a řezných sil.

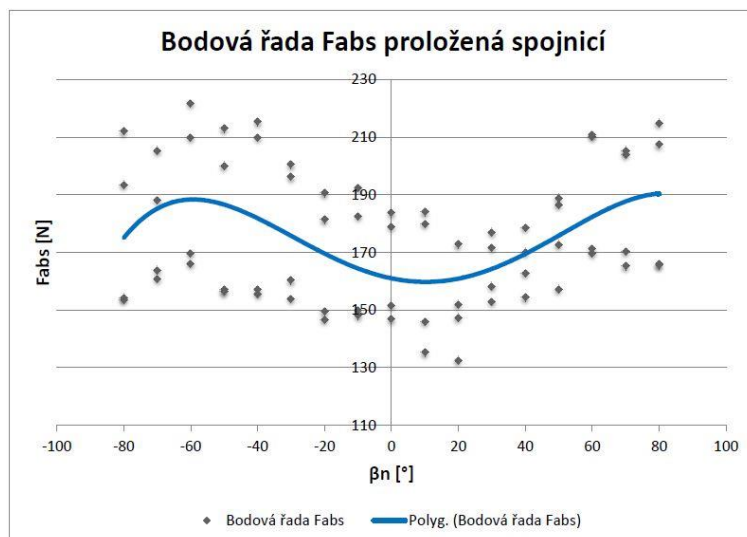
U řezných sil autor nehodnotil jednotlivé složky sil, ale vypočítal dle vzorce (7) absolutní složku řezné síly.

$$F_{abs} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (7)$$

Hlavní nevýhoda tohoto výpočtu je, že autor neodděluje radiální složku řezné síly od axiální. U štíhlých nástrojů, jako je například kulová fréza, vznikají problémy především vlivem radiální složky řezné síly. Pokud je ale počítáno s řeznou silou, jako s celkem, nelze tyto faktory objektivně vyhodnotit. Výpočet autor použil pravděpodobně proto, že pro hodnocení jednotlivých složek sil by vzhledem k dvojnásobnému vyklonění nástroje musel být použit poměrně složitý výpočet.

V plánovaném experimentu bude použit rotační dynamometr, který měří řezné síly v souřadném systému nástroje, a tak by vyhodnocení jednotlivých složek nemělo být tak obtížné. Tento způsob vyhodnocení by měl mít větší vypovídající hodnotu, než způsob, který použil Bc. Ondřej Jukl.

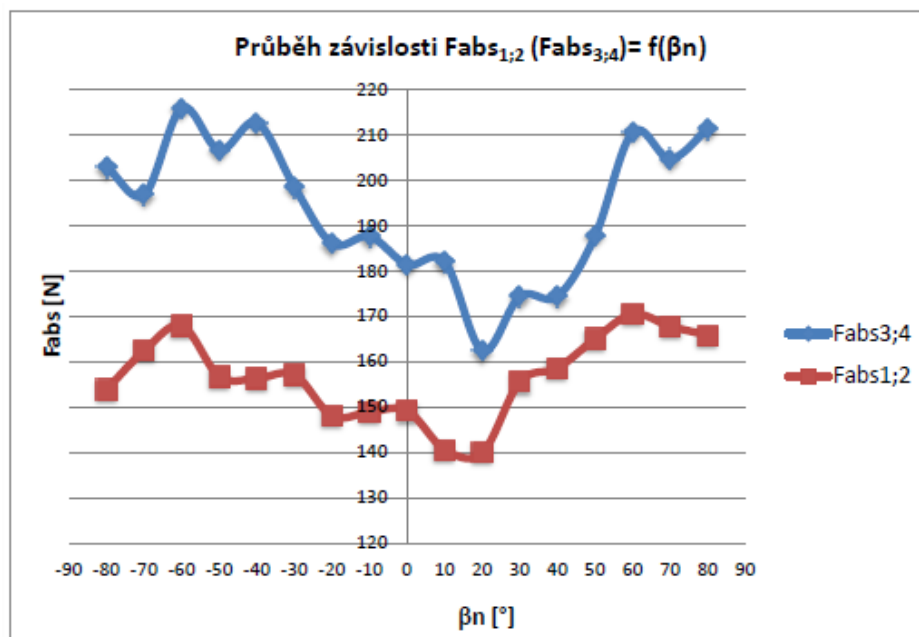
Závislosti vypočítaných sil v jednotlivých polích byly vykresleny do grafů. Největší vypovídající hodnotu má graf, ve kterém jsou síly vyznačeny jako bodové pole se spojnicí trendů (viz Graf 4), ukazující celkový získaný trend závislosti zatížení nástroje na příčném vyklonění kulové frézy, a graf porovnávající hloubky řezu.



Graf 4 - Proložená spojnice trendu bodovým polem silového zatížení [1]

Z grafu je patrné, že určitá závislost mezi silovým zatížením a úhlem vyklonění  $\beta_n$  existuje. Také se potvrdila hypotéza, že nejlepší výsledky jsou u naklonění frézy do oblasti sousledného frézování. Jako nejlepší úhel vyklonění se ukázal úhel  $\beta_n = 10^\circ$  až  $20^\circ$ . Do této hodnoty velikost řezných sil klesala, poté opět stoupala. Zvlnění průběhu sil v záporných hodnotách  $\beta_n$ , je dle autora pravděpodobně projev nahodilých vlivů. Od hodnoty  $\beta_n = 0^\circ$  směrem do záporných hodnot lze průběh silového zatížení považovat za rostoucí, což může být způsobeno nepříznivými podmínkami záběru zubu frézy, jak uvádí autor. Při vyklonění frézy do záporných hodnot se záběrové podmínky přibližují nesouslednému frézování.

Pro porovnání vlivu hloubky řezu autor z hodnot  $F_{abs1}$  a  $F_{abs2}$  vypočítal průměrnou hodnotu  $F_{abs1;2}$ . Stejným způsobem byla určena i hodnota  $F_{abs3;4}$ . Grafické porovnání těchto sil lze vidět na grafu (Graf 5).



Graf 5 - Porovnání velikosti zatížení kulové frézy [4]

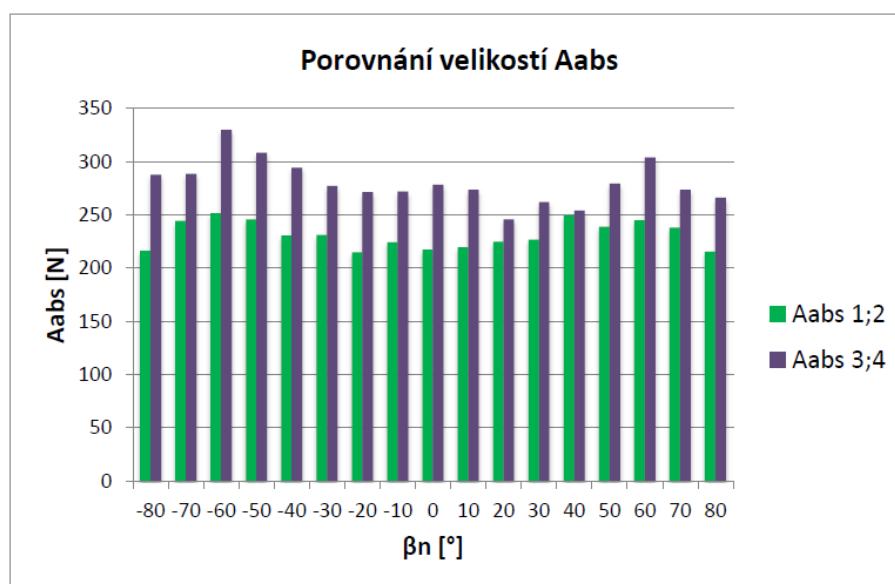
Menší hloubka řezu má logicky za následek menší řezné síly. V intervalu  $\beta_n = -80^\circ$  až  $-30^\circ$  lze v grafu vidět větší rozdíl mezi složkami absolutních sil. Podobný efekt lze vidět i v intervalu

$\beta_n = +60^\circ$  až  $+80^\circ$ . Nárůst zatížení v těchto intervalech činí přibližně 25% a podle autora práce je způsobeno diferencemi v záběrových podmínkách. Nejmenší nárůst sil je v oblasti úhlů  $\beta_n = +20^\circ$  až  $+50^\circ$ , což potvrzuje hypotézu, že zvýšení hloubky řezu v oblasti záběru více se přibližující souslednému frézování, se dosáhne zklidnění řezného procesu a tím menšího nárůstu řezné síly.

Pro ověření výsledků získaných z velikostí řezných sil byly ještě zaznamenávány amplitudy těchto sil. U amplitud také nebyly hodnoceny jejich jednotlivé složky, ale autor je vyhodnocoval pomocí vzorce (8):

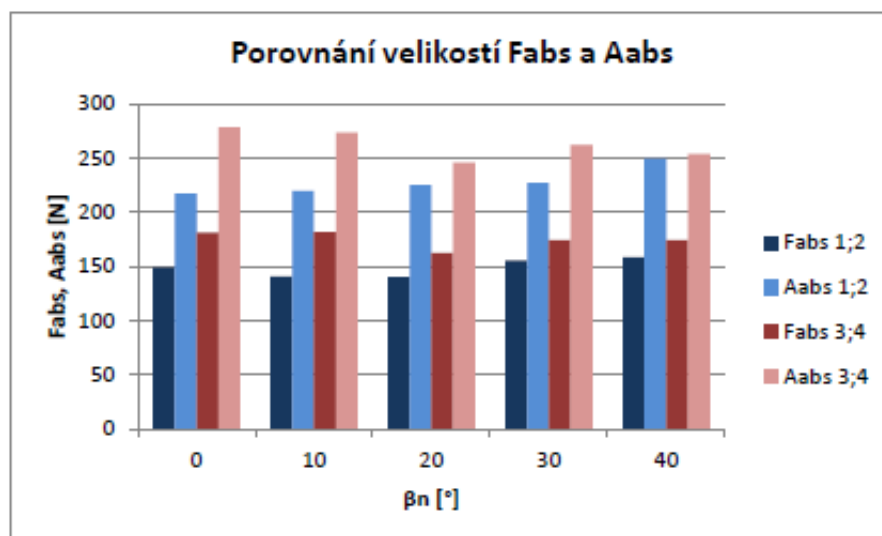
$$A_{abs} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (8)$$

Získané výsledky byly následně graficky zpracovány. Na grafu (Graf 6) lze vidět potvrzení hypotézy o zklidnění řezného procesu v oblasti hodnot  $\beta_n = +20^\circ$  až  $+40^\circ$ .



Graf 6 - Porovnání velikostí amplitud řezných sil [4]

Pro snadnější porovnání  $F_{abs}$  a  $A_{abs}$  v kladných hodnotách příčného vyklonění vykreslil autor následující graf (Graf 7).

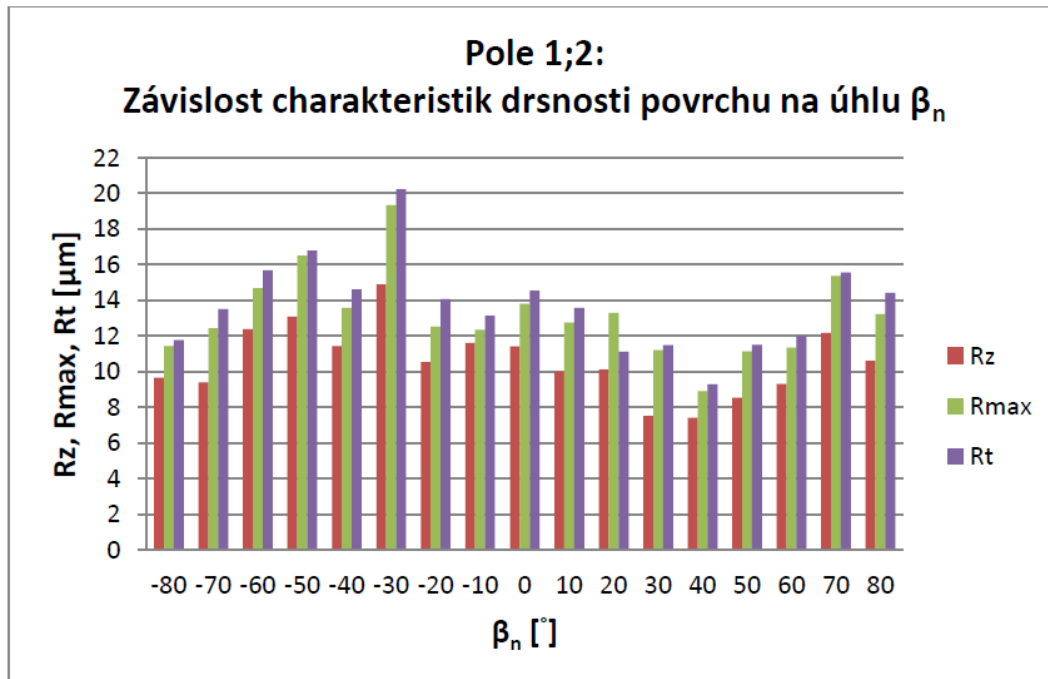


Graf 7 - Srovnání hodnot  $F_{abs}$  a  $A_{abs}$  v intervalu  $\beta_n = 0^\circ$  až  $+40^\circ$  [4]

Drsnost byla měřena ve všech drahách dvakrát a jako výsledná hodnota se použil aritmetický průměr z těchto dvou náměrů. Zaznamenávaly se tyto charakteristiky povrchu: [4]

- Střední aritmetická hodnota  $R_a$ ,
- výška nerovnosti  $R_z$ ,
- maximální výška nerovností  $R_{max}$ ,
- celková výška profilu  $R_t$ .

Hodnoty drsnosti se zaznamenávaly do tabulky a následně z nich byly vytvořeny grafy.

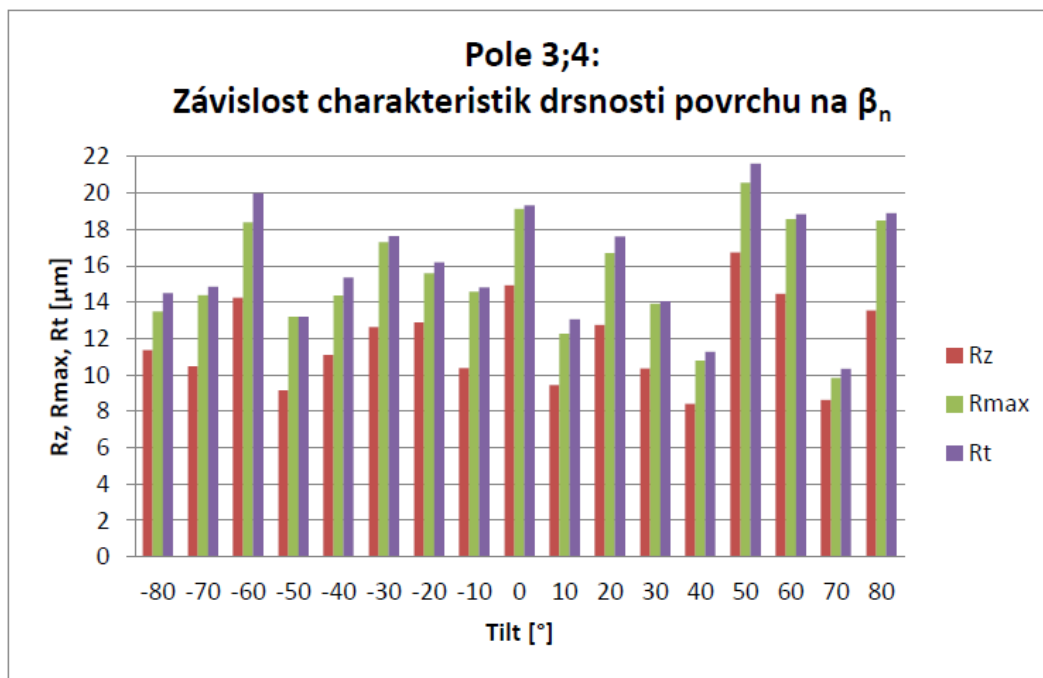


Graf 8 - Závislost charakteristik drsnosti na úhlu  $\beta_n$ , při obrábění v poli 1 a 2 [4]

Jak lze vidět v grafu (Graf 8), důsledkem uklidnění řezu v kladných hodnotách úhlu vyklonění  $\beta_n$ , bylo také zlepšení drsnosti obrobeného povrchu. Od hodnoty  $\beta_n = 0^\circ$  drsnost obrobené plochy klesala až do úhlu vyklonění  $\beta_n = 40^\circ$ . Od této hodnoty se velikost drsnosti zvětšovala. Při obrábění se záporným úhlem vyklonění vykazovaly hodnoty drsnosti jisté výkyvy, což mohlo být dle názoru autora způsobeno buď chybou měření, nebo neprokázáním vlivu příčného vyklonění na tyto parametry drsnosti.

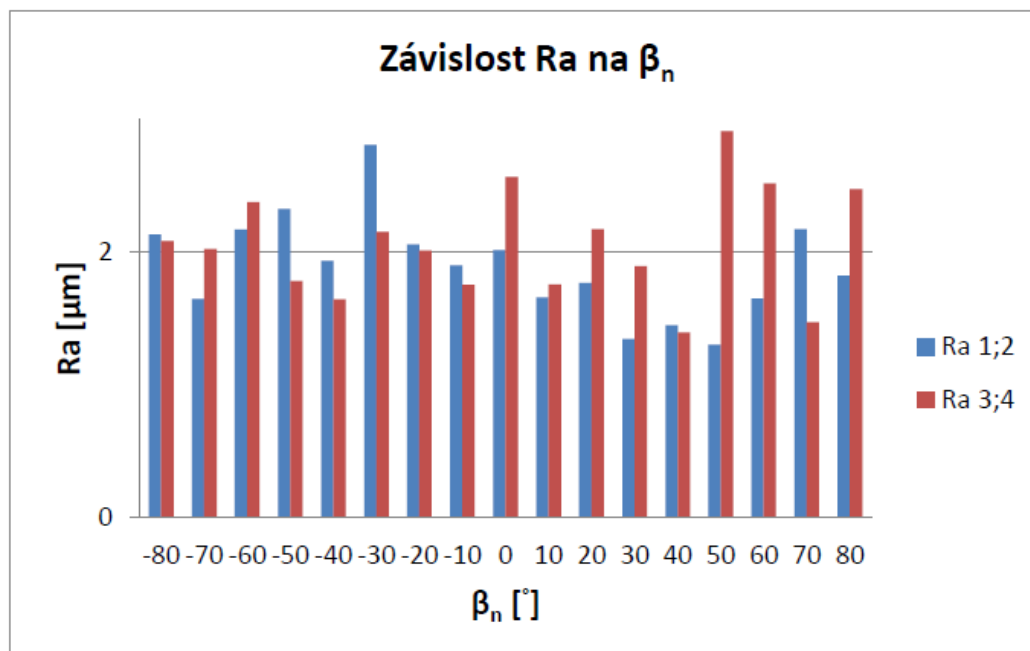
Při zvýšení hloubky řezu již nebyl vliv úhlu příčného vyklonění na drsnost obrobeného povrchu tak prokazatelný, jak lze vidět v grafu (Graf 9). Dle slov autora má větší hloubka řezu pravděpodobně rušivý vliv na výsledování nějaké závislosti.





Graf 9 - Závislost charakteristik drsnosti na úhlu  $\beta_n$ , při obrábění v poli 3 a 4 [4]

Závislost parametru  $R_a$  na  $\beta_n$  vyhodnocuje autor v samostatném grafu (Graf 10). I zde lze vidět jisté zlepšení drsnosti při uklidnění řezu v kladných hodnotách vyklonění, zvláště v polích 1 a 2. Nejlepší hodnoty drsnosti vykazuje dráha obrobená s příčným vykloněním frézy  $\beta_n = 40^\circ$ . Konkrétní hodnoty naměřené v této dráze lze vidět v tabulce (Tab. 3). Z naměřených hodnot byl vyvozen závěr, že k určitému zlepšení jakosti povrchu se dosáhne příčným vykloněním frézy v intervalu  $\beta_n = -20^\circ$  až  $+40^\circ$ .



Graf 10 - Závislost  $R_a$  na úhlu  $\beta_n$  [4]

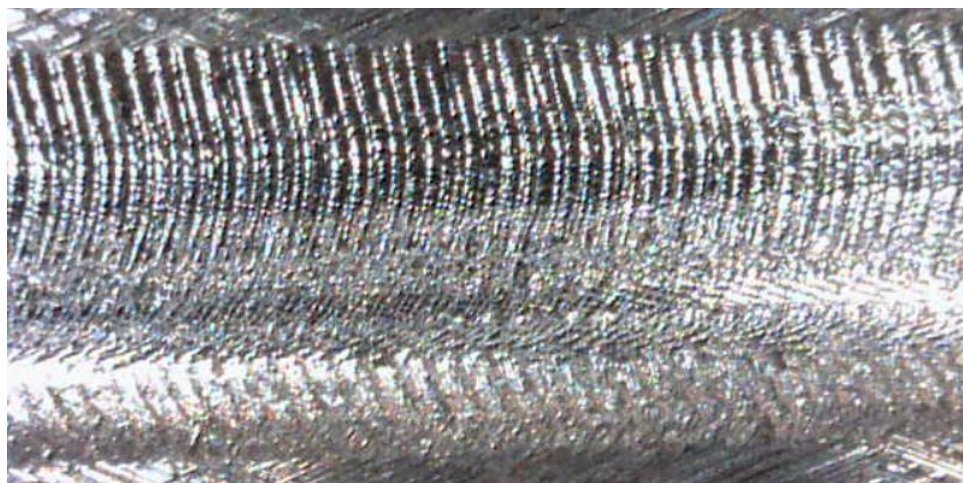
	Pole 1;2	Pole 3;4
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,45	1,39
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	7,40	8,40
Rmax [ $\mu\text{m}$ ]	8,90	10,78
Rt [ $\mu\text{m}$ ]	9,28	11,28

Tab. 3 - Průměrné hodnoty drsností při  $\beta_n = 40^\circ$  [4]

Po měření drsnosti byly pořízeny výše zmiňovaným mikroskopem snímky několika vybraných drah. V tomto případě mají tyto snímky i větší vypovídající hodnotu, než číselné údaje o drsnosti. Při úhlu vyklonění  $\beta_n = +40^\circ$  je jakost povrchu největší, dráhy nástroje zde nejsou téměř vidět. Naopak při úhlu vyklopení  $\beta_n = -60^\circ$ , lze jednotlivé dráhy zřetelně rozpoznat. Vzniklý výrazný reliéf je způsoben vibracemi nástroje.



Obr. 11 - Drsnost obrobené dráhy: Pole 1,  $\beta_n = +40^\circ$



Obr. 12 - Drsnost obrobené dráhy: Pole 1,  $\beta_n = -60^\circ$



Obr. 13 - Drsnost obrobené dráhy: Pole 1,  $\beta_n = +20^\circ$

## 2.5 Akustická analýza

Součástí plánovaného experimentu by také měla být zvuková analýza. Jak je již zmiňováno výše, z předchozího experimentu byla analýza zvuku vypuštěna, protože v době provádění experimentu nebyla autorovi známa metoda, kterou by bylo možné efektivně a bez větších problémů akustické projevy zaznamenat a vyhodnotit. Při proběhlém experimentu bylo velmi výrazně slyšet uklidnění řezu při kladných úhlech příčného vyklonění frézy, což se stalo podmětem pro vytvoření metody zaznamenávání a vyhodnocování zvukových projevů. O rok později se touto problematikou zabýval Bc. Jan Lerch ve své diplomové práci. Metoda, kterou navrhl, bude použita při vyhodnocování plánovaného experimentu. V následujících kapitolách je proto stručně popsáno na jakém principu je metoda založena a jakým způsobem by měly být vzorky zvukových projevů získány a vyhodnoceny.

### 2.5.1 Princip metody

Autor ve své práci hledal metodu, kterou by bylo možné poměrně snadno a rychle získávat a vyhodnocovat vzorky akustických projevů při obrábění. Princip nalezené metody je takový, že se nehodnotí hlučnost zvukových vzorků, ale jejich frekvenční charakteristika<sup>1</sup>, která je získána pomocí **Fourierovi transformace**. O ní se se ve zdroji [7] píše toto: „*Fourierova transformace je vyjádření časově závislého signálu pomocí harmonických signálů (sin, cos), obecně tedy funkce komplexní exponenciály. Fourierova transformace slouží pro převod signálu z časové oblasti do oblasti frekvenční. Signál může být ve spojitém či diskrétním čase.*“ Nevýhodou frekvenční analýzy je, že neudává žádnou informaci o jednotlivých frekvencích. Pro zpracování diskrétního signálu se používá takzvaná diskrétní Fourierovu transformaci, jejíž velká nevýhoda je její časová náročnost. Proto byla pro vyhodnocování použita krátkodobá Fourierova transformace (FFT), která dává informaci i o intervalech času, ve kterém se určité pásmo frekvencí vyskytuje. Při delších časových intervalech lze získat přesnější informace o frekvenčních složkách, ale horší informace o jejich časovém umístění a naopak. Proto je nutné si nejprve rozmyslet, které výstupy jsou požadovány a podle toho volit délku zkoumaných intervalů. [8]

---

<sup>1</sup> Frekvenční charakteristika je křivka, která popisuje míru jednotlivých frekvencí ve zvukovém signálu [8]

### 2.5.2 Získané poznatky

Pro měření a vyhodnocování vzorků doporučuje autor program „Audacity“ který je dostupný ve volné licenci GPL. Tento program je jednoduchý na obsluhu a obsahuje mnoho nástrojů, které se dají použít při zpracování vzorků akustických projevů.

Při studii byly zkoumány následující skutečnosti: [8]

1. Jak připravit přístroje před vlastním nahráváním a jaké nastavit parametry nahrávání přístrojů pro záznam zvuku.
2. Kam umístit nahrávací zařízení pro záznam zvuku, při získávání akustických projevů procesu obrábění.
3. Jak postupovat při vlastním měření vzorků.
4. Jak odečítat ruchy pozadí od zvuku obrábění.
5. Jak upravovat zvukové vzorky před vlastním vyhodnocováním.
6. Jak provádět analýzu vzorku procesu obrábění.
7. Jak vyhodnocovat získané poznatky z frekvenční charakteristiky.

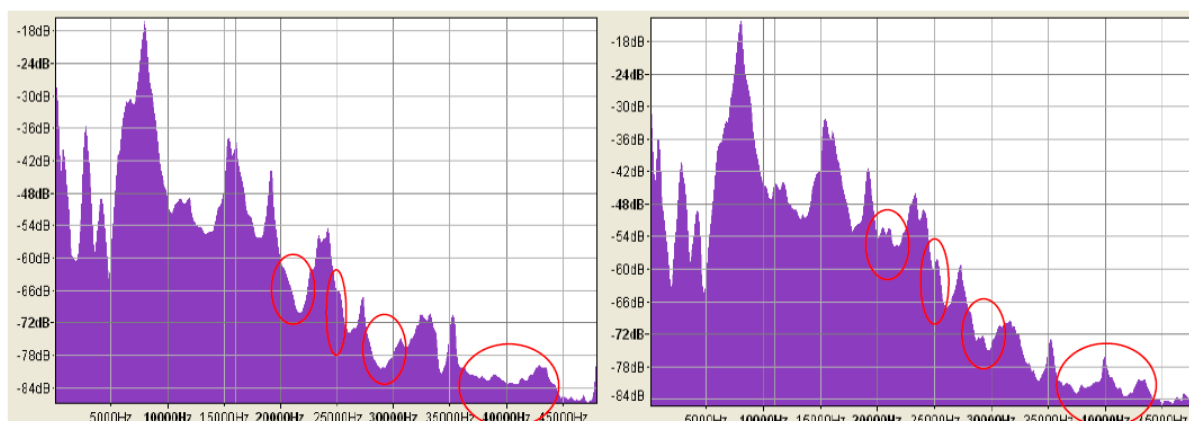
**add 1)** Aby byly výsledky použitelné, je nejprve nutné správně nastavit parametry nahrávání. Během získávání vzorků bylo zjištěno, že vhodnými parametry jsou: [8]

- vzorkovací kmitočet (frekvence): 96 kHz
- hloubka: 24 bitů.

Toto nastavení odpovídá rozlišovací schopnosti 144 dB, což znamená, že přístroj je schopný v jednom okamžiku rozeznat tóny, které se vzájemně liší o 144 dB. Požadování vyšší kvality zvuku by dle slov autora vedlo k prodražení měření (dražší měřicí technika) a k vyšším požadavkům na místo na disku, přičemž vypovídající hodnotu vzorku by to výrazně nezvýšilo. [8]

Při nastavování měřicího zařízení je také potřeba správně nastavit velikost předzesílení tak, aby záznam zvuku byl dostatečně zřetelný a zároveň nebyl přebuzený (překročení maximální povolené hodnoty záznamu). Pokud by byla tato hodnota překročena, měření by nebylo možné použít a bylo by nutné jej opakovat, pokud by to bylo možné. Proto je dle slov autora lepší získat méně zřetelnou charakteristiku a v případě potřeby ji zesílit pomocí nástrojů vyhodnocovacího softwaru. Správnou hodnotu předzesílení je vhodné nastavit při zkušebních přejezdech frézy. [8]

**add 2)** Autor zjistil, že průběhy frekvenčních charakteristik záznamu ze zařízení s různou vzdáleností od místa mají stejný průběh, ale liší se svojí intenzitou. Malou intenzitu frekvencí lze kompenzovat umělým zesílením vzorku. Přesto autor studie doporučuje umístit nahrávací zařízení co nejbližší k místu řezu, aby se eliminoval ruch okolí, který byl při měření dále od místa řezu značně patrný. Porovnání vzorků pořízených při jednom měření v různých vzdálenostech od místa řezu je možné vidět na obrázku (Obr. 14). [8]

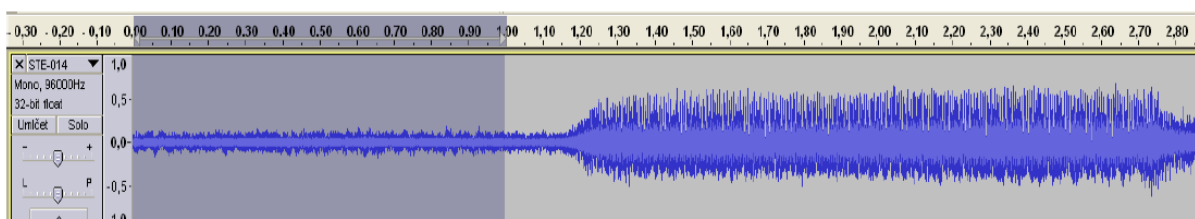


Obr. 14 - Porovnání frekvenčních charakteristik s různou vzdáleností od místa řezu [8]

Na obrázku jsou zakroužkována místa, kde se frekvenční charakteristiky liší vlivem parazitních zvuků. Z toho plyne, že umístění mikrofonů v blízkosti řezu by mohlo eliminovat potřebu odečítat od vzorků ruchy okolí. [8]

Mikrofon musí být také umístěn tak, aby nemohl omezovat obráběcí proces a zároveň nebyl poškozen, například vlivem řezné kapaliny, nebo odcházejících třísek. Pro kvalitní záznam je nutné, aby se mezi místem obrábění a nahrávacím zařízením nevyskytoval žádný objekt zabraňující volnému šíření zvuku. Pokud to konstrukce stroje dovoluje, je při frézování vhodným místem pro měřicí zařízení vřeten stroje. [8]

**add 3)** Měřicí zařízení je vhodné zapnout několik okamžiků před najetím nástroje do řezu. Důvodem této prodlevy je získání vzorku zvuků ruchů v pozadí. Pokud by tyto ruchy měly intenzitu podobně velkou, nebo dokonce větší, než je intenzita obrábění, bylo by nutné je od získaného vzorku odečíst, jak je popsáno dále. Na obrázku (Obr. 15) je možné vidět výrazný rozdíl mezi zvukem ruchů v okolí (označená část) a zvukem obrábění. [8]



Obr. 15 - Rozdíl mezi ruchem okolí (zvýrazněná část) a zvukem obrábění [8]

**add 4)** Odečtení ruchů pozadí sice může frekvenční charakteristika zpřehlednit, ale na druhou stranu může také vést k jejímu zkreslení. Rozhodnutí, zda ruch pozadí odečítat či nikoliv, záleží na mnoha faktorech, které se liší případ od případu. Prvním faktorem je, jaké jsou požadavky na výstup. Pokud je požadavkem zjistit, jestli je dané obrábění stabilní, či nikoliv, odečítání ruchů okolí většinou není potřeba. Je-li cílem zvukové analýzy popsat co nejvíce charakteristik obrábění, bude pravděpodobně nutné odečtení ruchů v pozadí provést. [8]

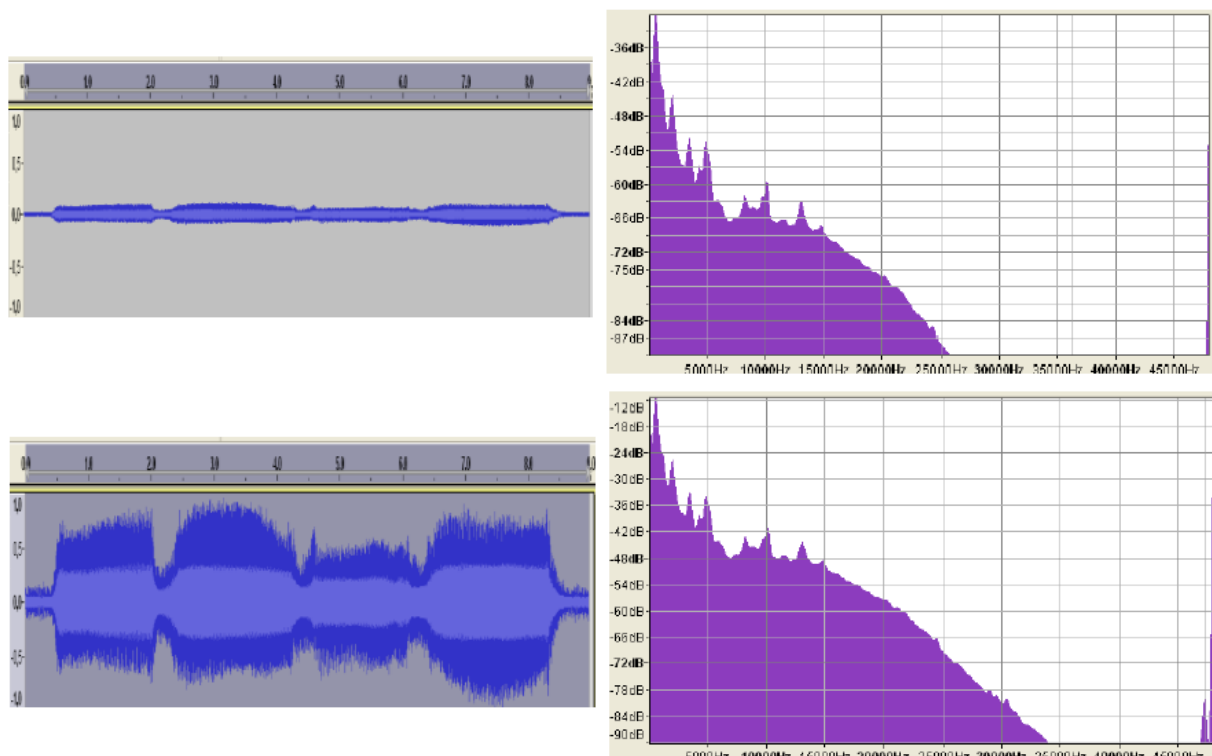
Pokud intenzita zvuku z obrábění mnohokrát převyšuje intenzitu ruchů, nepřineslo by jejich odečtení žádné velké změny ve frekvenční charakteristice. Je-li proces obrábění výrazně nestabilní, mohlo by odečtení ruchů vyhodnocování vzorků ztížit, protože by mohla být frekvenční charakteristika zkreslena. [8]

Při odečítání ruchů pozadí nelze použít jeden univerzální ruch pro celé obrábění, ale je potřeba analyzovat ruchy pro jednotlivé nástroje, či průměry obrobku. Každá situace má totiž jinou frekvenční charakteristiku, což je způsobeno jiným průměrem nástroje, rozdílnou délkou vyložení, a podobně. [8]

Z uvedených poznatků vyplývá, že když bude v plánovaném experimentu zkoumána hlavně stabilita řezu, není nutné při vyhodnocování záznamu odečítat ruchy okolí.

**add 5)** Před vlastním vyhodnocováním vzorků je někdy nutné odečíst ruchy pozadí, jak je popsáno výše. Ve zmiňovaném programu Audacity je odstranění ruchů pozadí možné provést nástrojem „Odstranění šumu“ pod záložkou „efekty“. [8]

Další možnou úpravou vzorku je jeho zesílení. Tento nástroj je vhodné použít, pokud má získaný vzorek malou intenzitu důsledkem například chybně nastaveného předzesílení, nebo velké vzdálenosti měření od místa řezu. Zesílení vzorku se většinou provádí pro lepší vyhodnocování vzorku. Zesílením se nemění charakteristika zvukového signálu, jen je hlasitější. Na obrázku (Obr. 16) lze vidět zvukový vzorek před zesílením (nahore) a po zesílení (dole). Zesílení lze ve zmiňovaném programu provést pomocí nástroje „zesílit“ pod záložkou „efekty“. [8]

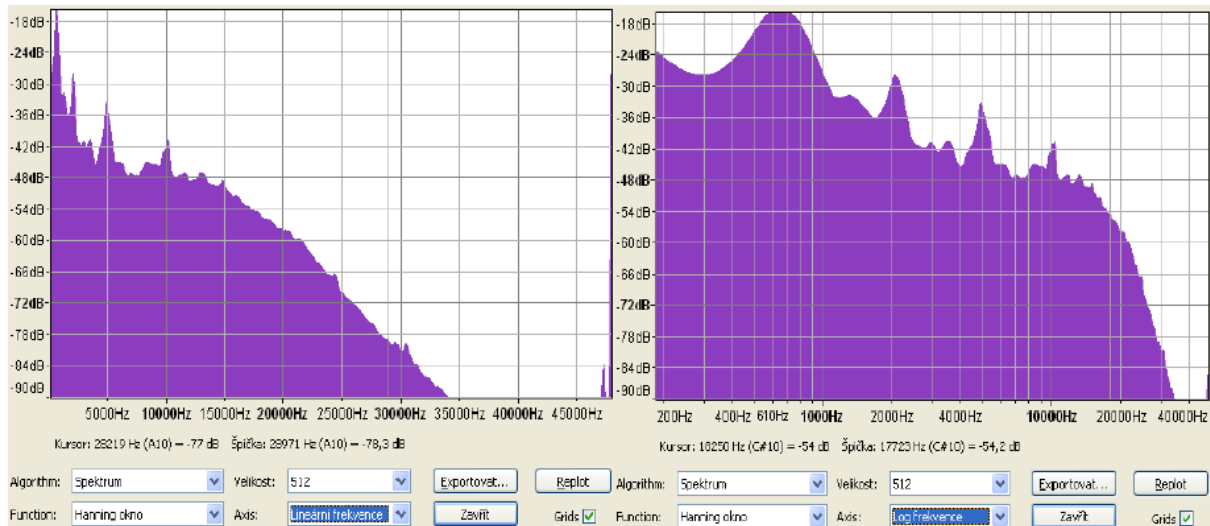


**Obr. 16 - Zvukový záznam před zesílením (nahore) a po zesílení (dole)**

**add 6)** Aby bylo možné mezi sebou jednotlivé vzorky akustických projevů porovnávat, je nutné mít v programu nastaveny jednotné podmínky. Pro práci s frekvenční charakteristikou existuje v programu Audacity několik nástrojů, z nichž nejdůležitější jsou: algoritmus, výběr hodnotícího okna (funkce), velikost rozlišení a souřadnice osy. [8]

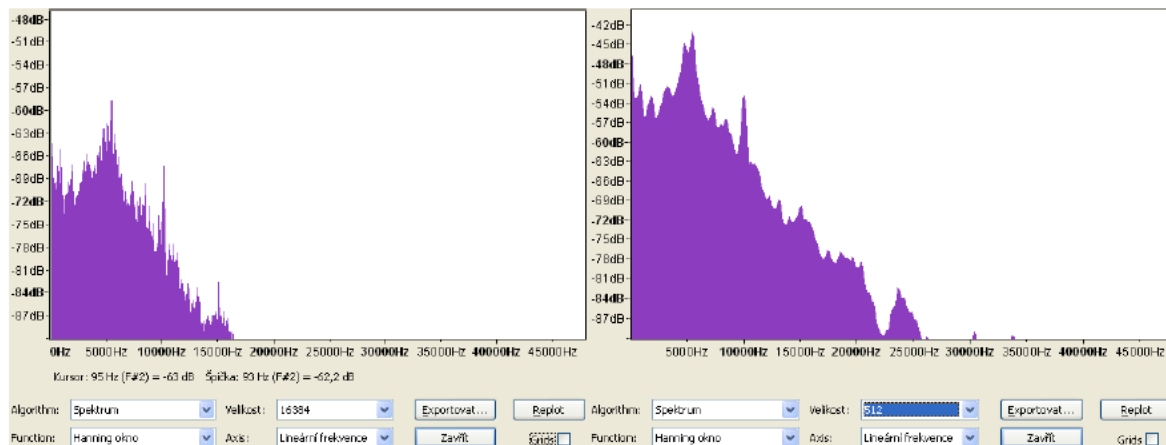
Výběr správného okna zabraňuje zkreslení frekvenční charakteristiky vlivem nepravých frekvencí (vedlejších laloků) Autor ve své práci doporučuje nastavení Hanningova okna, které umožňuje, že má spektrum dobrou ostrot, ale rovněž dobře potlačuje vedlejší frekvence. Hanningovo okno se vyznačuje úzkým hlavním lalokem a malými postranními laloky. [8]

Program umožňuje zobrazit frekvenční charakteristiku v lineárních, nebo logaritmických souřadnicích. Logaritmické zobrazení je vhodnější, pokud je objektem zkoumání průběh signálu v nízkých (hlubokých) frekvencích. Pro lepší čitelnost frekvenční charakteristiky je vhodnější použít souřadnic lineárních. Rozdíl mezi logaritmickým a lineárním zobrazením lze vidět na obrázku (Obr. 17). [8]



**Obr. 17 - Srovnání lineárních (vlevo) a logaritmických (vpravo) souřadnic [8]**

Nástroj velikost nastavuje nejmenší možný rozestup mezi frekvencemi, který je software schopen rozlišit. Při větších hodnotách je program více citlivý na jednotlivé záchvěvy frekvencí. Frekvenční charakteristika vykreslená s menší velikostí je zpravidla přehlednější, protože menší rozlišení odstraňuje nepatrné záchvěvy. Při nastavování této hodnoty je potřeba hledat kompromis mezi určitým zkrácením vlivem malého rozlišení a složitostí frekvenční charakteristiky způsobenou příliš velkým rozlišením. Na obrázku vlevo je zobrazení s rozlišením 16 384 a vpravo se nachází stejná frekvenční charakteristika s rozlišením 512. Z obrázku je patrné, že i při nižším rozlišení jsou frekvence, které svou intenzitou značně převyšují okolí, velmi zřetelné. [8]

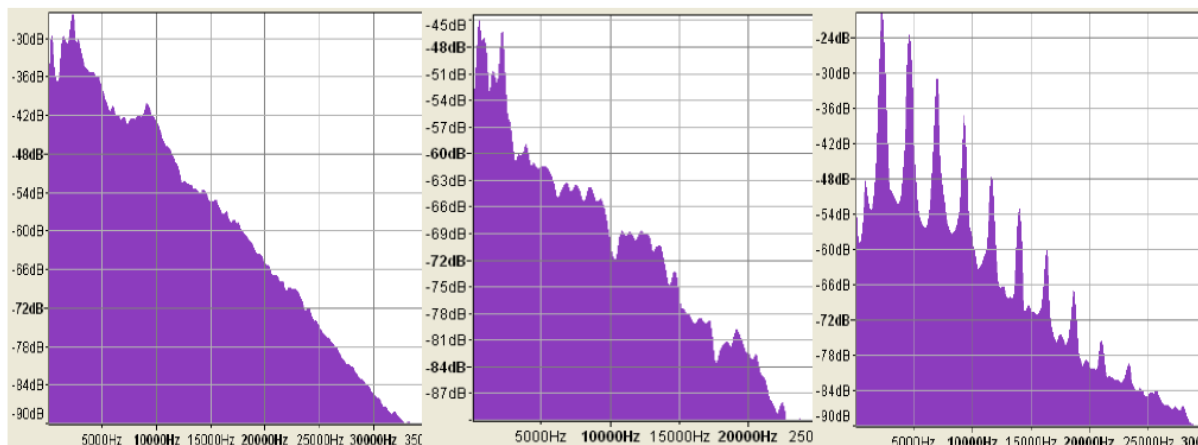


**Obr. 18 - Srovnání frekvenčních charakteristik s vysokou (vlevo) a nízkou velikostí rozlišení [8]**

Bc. Jan Lerch ve své práci doporučuje pro hodnocení vzorků akustické analýzy následující nastavení: [8]

- Algoritmus: Spektrum,
- funkce: Hanning okno,
- osa: Lineární kmitočty,
- velikost: 512.

**add 7)** Pro vyhodnocování vzorků nebyly použity žádné matematické, nebo statistické metody. Autor se ve své práci zaměřoval především na vyhodnocování zvukových projevů s ohledem na stabilitu řezu. Ve svých experimentech zjistil, že proces obrábění se nachází na mezi stability, pokud jedna, nebo více, frekvencí převyšuje své okolí o 8 až 10 dB. Pokud tento tón začne převyšovat své okolí o 18 dB, lze o řezném procesu říct, že ztratil stabilitu a stává se nestabilní. Frekvenční charakteristiky pro stabilní obrábění (vlevo), proces na mezi stability (uprostřed), a nestabilní obrábění (vpravo) je možné vidět na následujícím obrázku. [8]



**Obr. 19 - Frekvenční charakteristika pro obrábění stabilní (vlevo), na mezi stability (uprostřed) a nestabilní (vpravo)**

Závěry získané popsanou metodou by v praxi mohly mít široké uplatnění. Pomocí zvukové analýzy obrábění by v budoucnu bylo možné adaptivně řídit obráběcí proces. Podmínkou tohoto využití je naprogramování softwaru, který by byl schopen vzorky akustických projevů okamžitě hodnotit a výsledky předávat do řídicího systému stroje. Dalším možným využitím metody je při výzkumu, či optimalizaci, metod obrábění. Jak je uvedeno výše, pomocí této metody lze poměrně jednoduše hodnotit stabilitu řezného procesu, což bude využito i v následujícím experimentu.

### 3 Plánování experimentu

Před realizací experimentu je nejprve nutné jeho detailní naplánování. Musí být popsáno, co a jak bude provedeno, jaké budou vstupy do a výstupy z experimentu i jaké další vlivy mohou ovlivnit výsledky.

#### 3.1 Cíl experimentu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1, vyklonění nástroje ve směru obrábění zlepšuje řezné podmínky, čímž lze dané plochy obrobit rychleji a efektivněji. Nicméně při tomto obrábění má kulová fréza tendenci odvalit se do strany. Pokud by fréza byla ale vykloněná i ve směru příčném, tedy kolmém na směr obrábění, mohl by být směr, do kterého se snaží fréza odvalit velmi podobný směru obrábění, což by mohlo vést k lepší stabilitě řezu. Podle této hypotézy se předpokládá, že uklidnění řezu nastane v kladných hodnotách úhlů příčného vyklonění. Příčným vykloněním se také mění záběrové podmínky. Při záporných úhlech vyklonění  $\beta_n$  se obrábění blíží spíše k nesouslednému frézování, u kladných úhlů vyklonění  $\beta_n$  se podmínky přibližují ke frézování souslednému. Záběrové podmínky podobné souslednému frézování by také mohly vést ke zlepšení stability řezu. Kombinace obou vyklonění je strategie, která zatím není příliš prozkoumaná.



Cílem tohoto experimentu je v první řadě ověřit výše popsanou hypotézu. A poté najít a popsat závislost mezi úhlem příčného vyklonění vlečené kulové frézy a stabilitou řezu. Také je zde snaha o nalezení optimálního úhlu vyklonění. Podobným experimentem se ve své diplomové práci již zabýval Bc. Ondřej Jukl v roce 2011. O průběhu a výsledcích tohoto experimentu se lze dočíst v kapitole 2.4.

### 3.2 Vstupní parametry

Průběh obrábění ovlivňuje velké množství vlivů, z nichž některé jsou lehce ovlivnitelné, jiné nikoliv. Mezi lehce ovlivnitelné faktory patří například: řezná rychlost, hloubka a šířka řezu, tloušťka třísky, otáčky vřetene, řezné prostředí, úhel vyklonění v příčném i podélném směru, a podobně. Mezi hůře ovlivnitelné faktory lze například zařadit: míru otupení nástroje, teplotu okolí nebo stroje, složení a homogenita materiálu, tuhost stroje, a tak dále.

Pokud by během experimentu byly zahrnuty všechny ovlivňující vlivy, byl by experiment příliš nákladný jak z ekonomické, tak i z časové stránky. Výsledkem takového experimentu by bylo ohromné množství dat, které by svým objemem bylo značně nepřehledné a jejichž zpracování by bylo velmi náročné. Proto je nutné si stanovit, které faktory budou pro zjednodušení považovány za konstantní, které se budou v průběhu experimentu měnit a které budou zahrnuty do „vlivu času“. Jako „vliv času“ jsou označeny ty faktory, které nelze jednoduše popsat, nebo ovlivnit (část těchto faktorů je vyjmenována v předchozím odstavci). K zamezení ovlivnění výsledků experimentu těmito faktory je pořadí obrábění jednotlivých drážek časově znáhodněno.

Mezi proměnné by měly být zařazeny ty faktory, které mají přímý vliv na výsledek pokusu. Požadovaným výsledkem v tomto experimentu je ověření vlivu příčného vyklonění kulové frézy na stabilitu řezu. Stabilita řezu je také ovlivněna řeznými podmínkami, proto byly jako nezávisle proměnné zvoleny tyto veličiny:

- úhel příčného vyklonění  $\beta_n$ ,
- otáčky vřetene  $n$ ,
- posuv na zub  $f_z$ .

Otáčky vřetene i posuv na zub budou zkoumány ve třech úrovních. Úhel příčného vyklonění bude nabývat devatenácti hodnot. K zahrnutí všech kombinací těchto třech faktorů je potřeba obrobít počet drážek vypočtený z následující rovnice (9).

$$3 \cdot 3 \cdot 19 = 171 \quad (9)$$

Pro větší věrohodnost výsledků bude experiment jednou zopakován na druhé straně polotovaru. Celkový počet drážek pro takto navržený experiment je možné vyčíst z následující rovnice (10).

$$3 \cdot 3 \cdot 19 \cdot 2 = 342 \quad (10)$$

Vhodným proměnným faktorem by také mohla být hloubka řezu, která mimo jiné ovlivňuje i efektivní průměr frézy a tím i řeznou rychlost (viz kapitola 2.1). Vliv tohoto faktoru byl již ale z části prozkoumán v předchozím, výše zmiňovaném, experimentu a tak zde tato veličina bude brána jako konstantní. Úhel vyklonění v podélném směru bude v plánovaném experimentu konstantní a bude zde použita hodnota  $\beta_f = 15^\circ$ . Tato hodnota byla použita i v předchozím pokusu, a aby bylo možné výsledky mezi sebou porovnat, je vhodné ji zachovat.

Zkoumání vlivu hloubky řezu a různého úhlu podélného vyklonění nástroje zároveň s dalšími řeznými podmínkami je téma, kterému by bylo vhodné se v budoucnu ještě věnovat.

Aby výsledky pokusu byly porovnatelné s předchozím experimentem, je potřeba zachovat co nejvíce vstupních parametrů. Tyto parametry jsou vyjmenovány již v kapitole 2.4.2, ale pro přehlednost práce je vhodné je zde uvést znova. [4]

- pro experiment bude uvažován obráběný materiál jako homogenní s přibližně stejnou drsností povrchu  $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ ;
- dostatečující tuhost upnutí obrobku;
- vyložení nástroje na hranici stability řezného procesu;
- řezné podmínky stanoveny v rozsahu doporučeném od výrobce nástroje;
- každý průchod nástroje obrobkem realizován do plného materiálu;
- vzorkovací frekvence dynamometru nastavena na 10 000 Hz;
- obrábění bez použití procesní kapaliny;
- výměna břitové destičky po obrobení každého pole obrobku;
- tuhost nástroje – nízká a zároveň tuhost upínacího elementu - řádově vyšší a tak nepodstatná pro celkovou tuhost.

Délka vyložení by měla být taková, aby obrábění nevykloněným nástrojem bylo na mezi stability. V předchozím experimentu byla použita délka vyložení  $L = 92 \text{ mm}$  [4], která by měla být použita i v plánovaném experimentu. Vzorkovací frekvence dynamometru byla primárně nastavena na 10 000 Hz.

Jak je zmíněno níže, polotovar je rozdělen na 10 polí na každé straně, z čehož jedno pole bude sloužit k dolazení vstupních parametrů. Je tedy možné, že vzorkovací frekvence, či délka vyložení nakonec bude jiná, než je uvedeno výše. Výměna břitové destičky probíhala po obrobení jednoho pole, tudíž po ujetí 17 drah. Kvůli časovému znáhodnění plánovaného experimentu nelze měnit destičku po obrobení jednoho pole, ale bude měněna vždy při druhém zastavení stroje (viz kapitola 4.2), tedy po obrobení 18 drah.

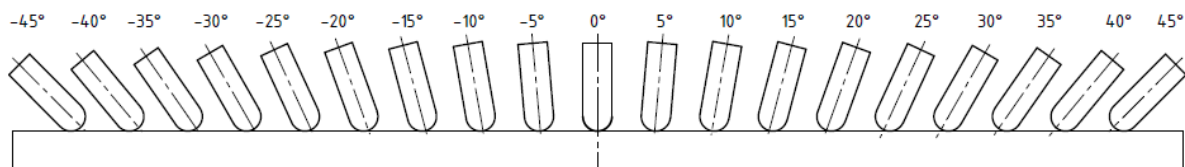
### 3.2.1 Otáčky a posuv na zub

Aby byl vliv příčného vyklonění na stabilitu řezu průkazný, je nutné jej zkoumat za vícero řezných podmínek. V plánovaném experimentu budou proměnné otáčky vřetene a posuv na zub, každý ve třech úrovních. Velikost parametrů je volena s ohledem na specifika nástroje a také, aby jedny řezné podmínky byly stejné, jako v předchozím experimentu. Podmínky, které byly použity v předchozím experimentu pro pole 1 a 2 zde budou použity v polích 8\_1 a 8\_2. Hodnoty řezné rychlosti je nutné dopočítat dle vzorce (6) uvedeného výše, pro jednotlivé hodnoty otáček nástroje. Konkrétní hodnoty řezných podmínek pro jednotlivá pole lze vidět v následující tabulce (Tab. 4).

Parametr	Pole 1	Pole 2	Pole 3	Pole 4	Pole 5	Pole 6	Pole 7	Pole 8	Pole 9
$f_z$ [mm/zub]	0,2	0,25	0,3	0,2	0,25	0,3	0,2	0,25	0,3
$n$ [ot/min]	3000	3000	3000	3500	3500	3500	4000	4000	4000
$v_{ceff}$ [m/min] pro $\beta_n = 0^\circ$	41,3	41,3	41,3	48,2	48,2	48,2	55,0	55,0	55,0
$\beta_f$ [°]	15								
$a_p$ [mm]	0,2								
$D_{eff}$ [mm] pro $\beta_n = 0^\circ$	4,38								

Tab. 4 - Řezné podmínky v plánovaném experimentu

### 3.2.2 Úhel příčného vyklonění



Obr. 20 - Úhly příčného vyklonění

Tato proměnná je nejdůležitější, neboť cílem této práce je vyzkoumat právě její vliv na stabilitu řezu. V předchozím experimentu, ze kterého tento experiment vychází, byly testovány úhly v intervalu od  $\beta_n = -80^\circ$  do  $\beta_n = +80^\circ$  s krokem  $10^\circ$ . Zjistilo se, že „zajímavé“ výsledky jsou především kolem  $\beta_n = +10^\circ$  a  $\beta_n = +20^\circ$ , a tak není nutné v plánovaném experimentu opakovat vyklonění na celém předešlém intervalu. Proto bylo zvoleno vyklonění v intervalu  $\beta_n \in \langle -45^\circ; +45^\circ \rangle$  ale s polovičním krokem, tedy po  $5^\circ$  (viz Obr. 20). Za konstantních řezných podmínek bude obrobena vždy devatenáct drah s různým úhlem příčného vyklonění.

S měnícím se úhlem příčného vyklonění se mění efektivní průměr frézy. S touto změnou také souvisí změna řezných rychlostí při konstantních otáčkách vřetene. Více o této problematice je napsáno v kapitole 2.1. V následující tabulce jsou vyobrazeny hodnoty efektivního průměru a hodnoty řezných rychlostí pro všechny tři úrovně otáček vřetene v závislosti na úhlech příčného vyklonění  $\beta_n$ .

$\beta_n$ [°]	0	±5	±10	±15	±20	±25	±30	±35	±40	±45
$d_{eff}$ [mm]	4,38	4,39	4,41	4,44	4,49	4,56	4,66	4,77	4,92	5,12
$v_{ceff1}$ [m/min]	41,3	41,4	41,6	41,8	42,3	43,0	43,9	45,0	46,4	48,3
$v_{ceff2}$ [m/min]	48,2	48,3	48,5	48,8	49,4	50,1	51,2	52,4	54,1	56,3
$v_{ceff3}$ [m/min]	55,0	55,2	55,4	55,8	56,4	57,3	58,6	59,9	61,8	64,3

Tab. 5 - vliv  $\beta_n$  na  $d_{eff}$  a  $v_{ceff}$

### 3.3 Měřené veličiny

Stejně jako do pokusu vstupuje velké množství ovlivňujících faktorů, lze za výstup považovat nepřehledné množství odezev. Při výběru toho, co bude na výstupu měřeno, je nutné dbát maximální opatrnosti. Nejprve je nutné si uvědomit, co je vlastně účelem experimentu a na jakých měřitelných veličinách bude možné požadovaný výsledek vypočítat. Dále je potřeba vědět, které veličiny je možné změřit s ohledem na dostupnost potřebného vybavení. Zde je účelem experimentu ověřit stabilitu řezu, která se projevuje mimo jiné změnou řezných sil, změnou zvuku při obrábění, vibracemi stroje, zhoršením přesnosti obrobenej plochy a to jak geometrické přesnosti, tak i jakosti povrchu. O jednotlivých možných výstupech je pojednáváno v následujících kapitolách. Také je zde popsáno, které odezvy budou hodnoceny, a které nikoliv.

#### 3.3.1 Vibrace

Hlavním projevem nestability obrábění je rozechvění soustavy S – N – O – P. Tento jev je nežádoucí, jak je popsáno v kapitole 2.3, a má zásadní vliv na přesnost obrábění i trvanlivost nástroje. Vibrace stroje lze měřit vibrometry. Tento přístroj ale bohužel nebyl k dispozici, a navíc by jeho použití bylo značně komplikované. K popsání stability řezu budou proto použity jiné, níže zmíněné, veličiny.

#### 3.3.2 Řezné síly

Velikost a směr řezných sil jsou přímo závislé na řezných a záběrových podmínkách. Když jejich velikost dosáhne určité hodnoty, může to vést k rozkmitání soustavy S – N – O – P a tím k nestabilitě celého řezného procesu. Rozkmitání soustavy se poté projeví změnou frekvence sil i zvětšením jejich velikostí.

V předchozím, výše zmiňovaném, experimentu byly síly měřeny v souřadnicovém systému obrobku a vyhodnocovány jako celek, nikoliv jako jednotlivé složky. Tyto rozhodnutí se nakonec ukázaly jako nepříliš praktické, protože kulová fréza, jakožto dlouhý tenký nástroj má rozdílnou tuhost v axiálním a radiálním směru. Proto budou síly měřeny pomocí nástrojového dynamometru, tedy v souřadnicovém systému nástroje a vyhodnocovány jejich jednotlivé složky.

#### 3.3.3 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu má veliký vliv na funkčnost součástí. Textura a drsnost povrchu jsou velmi dobrý ukazatelé zvolené strategie obrábění a kvality jejího provedení. Jiná textura povrchu vzniká například při frézování, než při obrážením. Drsnost povrchu bude v tomto konkrétním případě ovlivněna jak stabilitou řezu, tak i změnou záběrových podmínek zubů frézy.

Důsledkem rozechvění soustavy je nesourodé odebírání materiálu, které se projeví na kvalitě povrchu. Při nestabilním obrábění se prudce zhoršuje geometrická přesnost, zvláště vlnitost, i drsnost povrchu. Proto bude tento parametr hodnocen. Jedná se o jedinou veličinu, která v tomto experimentu bude měřena až po skončení obrábění. Výsledné hodnoty této veličiny by měly potvrdit hodnoty získané zvukovou analýzou a měřením řezných sil.

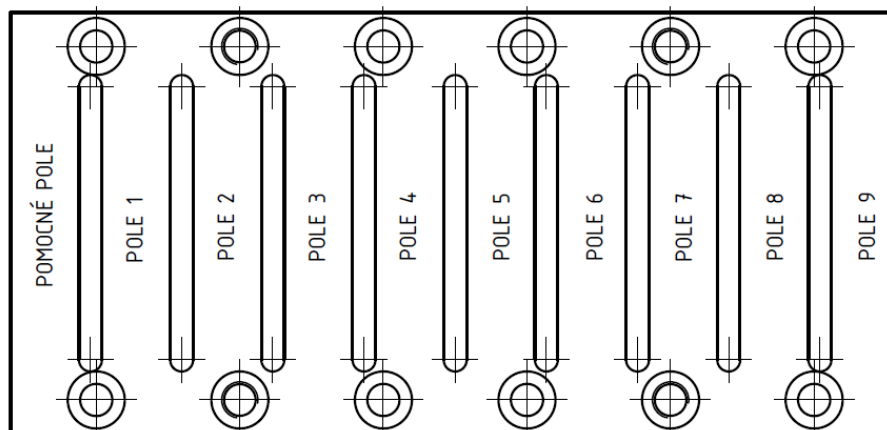
#### 3.3.4 Zvuková analýza

Změna stability řezu se projevuje také změnou frekvence zvuku. Zkušená obsluha stroje je tedy pouhým poslechem schopná zjistit, když v řezu přestanou působit optimální podmínky. U experimentu, který realizoval Bc. Ondřej Jukl, se o zvukové analýze také uvažovalo, ale nakonec se od ní upustilo. Důvodem bylo, že autorovi nebyla známá, nebo

dostupná metoda, kterou by bylo možné zvukové projevy bez větších problémů naměřit a zanalyzovat. Jak sám autor uvádí, uklidnění řezu bylo dobře slyšitelné pouhým sluchem, a tak by měření zvukových projevů mohlo být značně přínosné. V plánovaném pokusu bude použita zvuková analýza podle metody, kterou navrhl ve své diplomové práci Bc. Jan Lerch a která je popsána v kapitole 2.5.

### 3.4 Rozdělení polotovaru na pole

Pro přehlednost experimentu je polotovar rozdělen na jednotlivá, stejně velká pole. V každém poli budou konstantní řezné podmínky a jediná proměnná bude úhel příčného vyklonění frézy. Počet polí je takový, aby byly obsaženy všechny kombinace proměnných řezných podmínek. Obrábění bude probíhat ve třech úrovních posuvů a třech úrovních otáček vřetene. Aby se minimalizovala možnost vzniku chyby vlivem například špatného nastavení, bude experiment jednou zopakován na druhé straně polotovaru. Polotovar je rozdělen na devět polí na obou stranách polotovaru, celkem tedy osmnáct polí. Jednotlivá pole budou značena dvojicí čísel oddělených podtržítkem. První číslice bude značit polohu pole na polotovaru (viz Obr. 21), druhá pak stranu polotovaru. V každém poli bude obrobena devatenáct drážek, každá s jiným úhlem příčného vyklonění, jak je zmíněno výše. Celkem by mělo být provedeno a změřeno 342 drah. Jak lze vidět na následujícím obrázku (Obr. 21) na každé straně polotovaru se nachází ještě jedno, pomocné pole. Tato plocha slouží k praktické zkoušce nastavených parametrů před začátkem samotného experimentu.



Obr. 21 - Rozdělení polotovaru na pole

Pole jsou od sebe odděleny vyfrézovanou drážkou o hloubce 1 mm a šířce 10 mm Tyto drážky slouží k nájezdu a výjezdu kulové frézy, a aby ve všech polích byly zajištěny stejné záběrové podmínky. Délka polí je 30 mm, což by mělo být dostatečné, aby mohly být uskutečněny záznamy potřebných údajů. Po stranách polotovaru se nacházejí díry s kuželovým zahloubením, které slouží k uchycení polotovaru na stůl stroje. Pro snazší manipulaci s obrobkem, který váží přibližně 30 kg, jsou ve čtyřech dírách vyříznuty závit M16 pro našroubování ok.

Druhým možným rozdělením bylo, že by se vedle sebe nacházelo pět polí ve dvou řadách, přičemž by jedno pole sloužilo jako pomocné. Od tohoto rozdělení se nakonec upustilo kvůli složitější parametrizaci polohy drážky v NC programu.

Polotovar je vysoký 55 mm. Tato poměrně vysoká hodnota byla zvolena proto, aby nemohlo dojít ke zkreslení výsledků experimentu vlivem rozdílných tuhostí uprostřed a na okrajích polotovaru. Pokud by měl polotovar výrazně menší tloušťku, hrozilo by jeho rozechvění vlivem řezných sil při obrábění drážek blízko k okrajům polotovaru.

### 3.5 Znáhodnění experimentu

Jak je zmiňováno výše, na řezný proces působí velké množství faktorů, které jsou obtížně ovlivnitelné. Mezi tyto veličiny patří například teplota okolí, otupení nástroje, teplota stroje a podobně. Tyto faktory se souhrnně nazývají „vliv času“. Aby nebyly výsledky experimentu ovlivněny časem, je vhodné pořadí obrábění jednotlivých drážek znáhodnit, čímž se vliv času projeví pouze jako nahodilostní šum a na celkový výsledek experimentu má vliv podobný jako nepřesnosti měření.

Znáhodnění drážek může být časové, místní, nebo kombinace obou zmíněných. Místní znáhodnění znamená, že je znáhodněno umístění jednotlivých drážek na polotovaru. Toto znáhodnění by bylo vhodné provést, pokud by například vlivem malé výšky zkušebního tělesa byla rozdílná tuhost pro různé umístění drážky (obrábění uprostřed polotovaru by probíhalo s jinou tuhostí, než na jeho okrajích) Časové znáhodnění znamená, že je poloha drážek zachována, ale pořadí obrábění drážek je znáhodněné.

V plánovaném experimentu je použito časové znáhodnění, které je provedeno v tabulkovém procesoru Excel. V tomto procesoru byla vytvořena tabulka obsahující hodnoty všech parametrů (Q1 až Q5) pro jednotlivé drážky na jedné straně polotovaru. Poté bylo každé drážce přiřazeno náhodné číslo pomocí funkce tabulkového procesoru „NÁHČÍSLO“ a následně byly řádky seřazeny pomocí těchto náhodných čísel. Úryvek tabulky použité pro generování programu „UPNUTI-1“ je možné vidět na obrázku (Obr. 22). Kompletní tabulky znáhodnění jsou součástí příloh na přiloženém DVD.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Strana 1																
2	Náhodné číslo	Původní pořadí	Znáhodněné pořadí	Podélný výklon Q1	Hloubka řezu Q2	Posuv Q3	Řezná rychlost Q4	Příčný výklon Q5									
3																	
4	0,510143	64	1	1	1	1	2	-3	4	Q1=1	Q2=1	Q3=1	Q4=2	Q5=-3	CALL PGM	HLAVNI	
5	0,025435	8	2	1	1	1	1	-2	1	Q1=1	Q2=1	Q3=1	Q4=1	Q5=-2	CALL PGM	HLAVNI	
6	0,576838	152	3	1	1	2	3	9	8	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=3	Q5=9	CALL PGM	HLAVNI	
7	0,229863	143	4	1	1	2	3	0	8	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=3	Q5=0	CALL PGM	HLAVNI	
8	0,126847	18	5	1	1	1	1	8	1	Q1=1	Q2=1	Q3=1	Q4=1	Q5=8	CALL PGM	HLAVNI	
9	0,420211	44	6	1	1	3	1	-4	3	Q1=1	Q2=1	Q3=3	Q4=1	Q5=-4	CALL PGM	HLAVNI	
10	0,432815	50	7	1	1	3	1	2	3	Q1=1	Q2=1	Q3=3	Q4=1	Q5=2	CALL PGM	HLAVNI	
11	0,057836	90	8	1	1	2	2	4	5	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=2	Q5=4	CALL PGM	HLAVNI	
12	0,396115	56	9	1	1	3	1	8	3	Q1=1	Q2=1	Q3=3	Q4=1	Q5=8	CALL PGM	HLAVNI	MO
13	0,173986	88	10	1	1	2	2	2	5	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=2	Q5=2	CALL PGM	HLAVNI	
14	0,766824	75	11	1	1	1	2	8	4	Q1=1	Q2=1	Q3=1	Q4=2	Q5=8	CALL PGM	HLAVNI	
15	0,345039	112	12	1	1	3	2	7	6	Q1=1	Q2=1	Q3=3	Q4=2	Q5=7	CALL PGM	HLAVNI	
16	0,226784	78	13	1	1	2	2	-8	5	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=2	Q5=-8	CALL PGM	HLAVNI	
17	0,256204	93	14	1	1	2	2	7	5	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=2	Q5=7	CALL PGM	HLAVNI	
18	0,367962	158	15	1	1	3	3	-4	9	Q1=1	Q2=1	Q3=3	Q4=3	Q5=-4	CALL PGM	HLAVNI	
19	0,97826	135	16	1	1	2	3	-8	8	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=3	Q5=-8	CALL PGM	HLAVNI	
20	0,998267	26	17	1	1	2	1	-3	2	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=1	Q5=-3	CALL PGM	HLAVNI	
21	0,337059	85	18	1	1	2	2	-1	5	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=2	Q5=-1	CALL PGM	HLAVNI	MO
22	0,213149	71	19	1	1	1	2	4	4	Q1=1	Q2=1	Q3=1	Q4=2	Q5=4	CALL PGM	HLAVNI	
23	0,042232	33	20	1	1	2	1	4	2	Q1=1	Q2=1	Q3=2	Q4=1	Q5=4	CALL PGM	HLAVNI	

Obr. 22 - Ukázka tabulky znáhodnění

Nutno podotknout, že zobrazená náhodná čísla již neodpovídají pořadí znáhodnění drážek, protože tato čísla se generují znova při každé změně v tabulce. Proto byl při prvním seřazení tabulky podle sloupce A „Náhodné číslo“ vytvořen sloupec C „Znáhodněné pořadí“, do kterého bylo zaznamenáno pořadí znáhodněných řádků a nadále je vždy pracováno s tímto pevně daným pořadím. Ve sloupci B „Původní pořadí“ je zaznamenáno původní pořadí drážek. Těchto dvou pořadí je využíváno při vyhodnocování jednotlivých složek řezných sil i při vyhodnocování zvukové analýzy. Při vyhodnocování řezných sil byla tabulka zkopírována a doplněna o sloupce, do kterých byly zapisovány hodnoty jednotlivých

momentů, nebo sil. Při tomto zápisu byla tabulka seřazena podle sloupce C „Znáhodněné pořadí“ Pořadí řádků tedy odpovídalo pořadí obrábění drážek. Při dalším zpracování získaných výsledků byly řádky seřazeny podle sloupce B „Původní pořadí“ a výsledky tak byly seřazeny podle jednotlivých polí a úhlů příčného výklonu. Při vyhodnocování zvukové analýzy byla použita tabulka seřazená podle sloupce C „Znáhodněné pořadí“ pro identifikaci jednotlivých záznamů, jak je popsáno v kapitole 5.3.

Sloupce D až H obsahují jednotlivé úrovně faktorů a byly vyplněny jako klasická kombinační tabulka ještě před znáhodněním tabulky. Sloupec I „Pole“ obsahuje označení, ve kterém poli se konkrétní drážka nachází. Ve sloupcích K až O se nachází textová proměnná, která je generovaná jako textový řetězec pomocí hodnot ve sloupcích D až H. Sloupce P a Q obsahují další text potřebný pro správnou funkci programu.

Totéž bylo zopakováno pro druhou stranu polotovaru. Pořadí obrábění drážek na první straně polotovaru tedy neodpovídá pořadí obrábění drážek na straně druhé. Tyto tabulky znáhodnění jsou dále použité i při vyhodnocování, jak je uvedeno níže.

### 3.6 NC Program

Program byl vytvořen v programovacím jazyku HEIDENHAIN za pomoci vedoucího práce, z důvodu malých zkušeností s parametrickým programováním. Program se skládá z několika podprogramů.

Programy „UPNUTI-1“ a „UPNUTI-2“ jsou nejdelší, protože zadávají jednotlivé znáhodněné parametry pro všechny dráhy na dané straně obrobku, a poté vždy zavolají program „HLAVNI“ pomocí příkazu „CALL PGM HLAVNI“. Tyto programy tudíž volají hlavní program tolikrát, kolik dráh je na jedné straně polotovaru, tedy 171krát. Programy také zajišťují pozastavení obrábění vždy po vyfrézování devíti drážek pomocí příkazu „M0“. Tyto pauzy jsou využívány pro uložení záznamů řezných sil i zvukových analýz, a také pro výměnu břitové destičky, jak je popsáno níže. Aby se zamezilo chybě při vkládání jednotlivých parametrů, jsou data generována z vhodně naformátované tabulky, která je popsána v kapitole 3.5. Program „UPNUTI-1“ slouží pro obrobení první strany polotovaru. Pro zopakování experimentu na druhé straně polotovaru bude použitý program „UPNUTI-2“.

V tabulce znáhodnění jsou hodnoty parametrů Q zastoupeny pořadovým číslem 1, 2, 3, (nebo -9 až +9 pro hodnoty příčného vyklonění) Těchto čísel se využívá i v programu „HLAVNI“ pro výpočet polohy konkrétní drážky.

Program „HLAVNI“ zajišťuje provedení obrobení jednotlivých drážek. Tento program je vyvolán programy „UPNUTI-1“ a „UPNUTI-2“ pro každou drážku zvlášť. Vstupem do programu jsou pořadová čísla jednotlivých parametrů nastavující konkrétní řezné podmínky<sup>2</sup>. Následně pomocí dalších parametrů, které jsou napevno nastaveny v tomto programu, program vypočte polohu požadované drážky. Dále zavolá všechny programy „Q1“ až „Q5“, čímž se přiřadí konkrétní řezné podmínky těmto parametrům. Tyto řezné podmínky zadá vyvolanému nástroji a poté obrobí konkrétní drážku, načte se program „HLAVNI“ ukončí a čeká na další vyvolání.

Programy „Q1“, „Q2“, „Q3“, „Q4“ a „Q5“, jsou volány programem „HLAVNI“. Vstupy do těchto programů jsou pořadová čísla parametrů Q1 až Q5, které jsou do programu „HLAVNI“ načítány z programů „UPNUTI-1“, popřípadě „UPNUTI-2“. Úkolem programů „Q1“, ... „Q5“, je přiřazení konkrétních hodnot řezných podmínek parametrů Q1 až Q5,

---

<sup>2</sup> parametry Q1 až Q5 obsažená v programech „UPNUTI-i“

podle hodnot pořadových čísel, které jsou použity v nastavování řezných podmínek v programu „HLAVNI“.

Všechny programy jsou plně parametrizovány, aby mohly být po jednoduché úpravě použité při experimentech, které mohou navazovat na tuto práci. Výčet všech použitých parametrů je možné vidět v následující tabulce (Tab. 6).

Par.	Význam	Zadáváno	Par.	Význam	Zadáváno
Q1	Úhel podél. vyklonění	Programem „Q1“	Q11	Počet hodnot Q1	V prg. „HLAVNI“
Q2	Hloubka řezu	Programem „Q2“	Q12	Počet hodnot Q2	V prg. „HLAVNI“
Q3	Posuv na zub	Programem „Q3“	Q13	Počet hodnot Q3	V prg. „HLAVNI“
Q4	Otáčky vřetene	Programem „Q4“	Q14	Počet hodnot Q4	V prg. „HLAVNI“
Q5	Úhel příč. vyklonění	Programem „Q5“	Q15	Počet hodnot Q5	V prg. „HLAVNI“
Q6	Poloměr kul. nástroje	V prg. „HLAVNI“	Q21	X – souřadnice drážky	Auto. výpočet
Q7	Z – souřadnice přejezdové roviny	V prg. „HLAVNI“	Q22	Y – souřadnice drážky	Auto. výpočet
Q8	Délka frézované drážky	V prg. „HLAVNI“	Q23	Z – souřadnice drážky	Auto. výpočet
Q9	Šířka pole vč. nájezdové drážky	V prg. „HLAVNI“			
Q10	Rozteč drážek	V prg. „HLAVNI“			

Tab. 6 - Parametry programu

Pro potřeby plánovaného experimentu jsou všechny hodnoty zadány v příslušných programech, a tak by nemělo být potřeba programy před samotným obráběním editovat. Pokud by v následujících experimentech byly rozdílné například rozměry polotovaru, je nutné změněné parametry přepsat v příslušných programech.

### 3.7 Použité stroje a zařízení

Výsledky experimentu do jisté míry ovlivňuje vhodný výběr správného zařízení a strojů. V plánovaném experimentu je snaha přiblížit vstupní podmínky co nejvíce experimentu předchozímu. Z toho vyplývá, že i výběr zařízení je velmi ovlivněn předchozím experimentem tak, aby bylo pokud možno shodné, nebo podobné v obou experimentech. Přesto je nutné některé zařízení zvolit jiné, ať už z důvodu nedostupnosti původních zařízení, nebo kvůli určité odlišnosti experimentů. V následujících kapitolách jsou popsána jednotlivá zařízení s ohledem na předchozí experiment a také je zde vysvětleno, Z jakého důvodu jsou změny uskutečněny.

#### 3.7.1 stroj

Předchozí experiment byl proveden na pětiosém frézovacím centru Hermle U1130 ve firmě Pilsen Tools s.r.o. Tento stroj již není k dispozici a navíc by na něm nemohl být použitý dostupný rotační dynamometr. Proto bylo nutné najít jiný stroj, na kterém by bylo možné měření provést. Hlavními kritérii byly, aby na daném stroji bylo možné použít dostupný rotační dynamometr a aby byl upínací stůl dostatečně velký z hlediska použitého polotovaru. Dále bylo potřeba, aby stroj disponoval dostatečným výkonem a krouticím momentem.

Těmto kritériím nejlépe vyhovovalo pětiosé obráběcí centrum DMU 65 monoBLOCK® od firmy DMG MORI (viz Obr. 23) ve Vědeckotechnologickém parku v Plzni. Dostupný



dynamometr obsluha na tomto stroji používá celkem běžně a z tabulky technických parametrů vyplývá, že upínací stůl disponuje dostatečným prostorem pro upnutí požadovaného polotovaru. Tento stroj je běžně používán pro mnohem těžší obrábění, a tak není nutné podrobně propočítávat, zda je uvedený výkon a krouticí moment dostačující.



Obr. 23 - DMU 65 monoBLOCK® [9]

Kinematika na tomto stroji je zajišťována pomocí naklápěcího a otočného upínacího stolu. V ose C je možná rotace o 360° a rozsah výklonu v ose A je  $\pm 120^\circ$ , jak lze vidět na obrázku. (Obr. 24) Technické parametry stroje lze vyčíst z tabulky (Tab. 7).



Obr. 24 - kinematické schéma [9]

Parametr	Hodnota
Pracovní oblast X/Y/Z OSY [mm]	735/650/560
Max. rozměr obrobku [mm]	$\varnothing 840 \times 500$
Max. hmotnost obrobku [kg]	600/1000
otáčky vřetena [ot/min]	15 000
Točivý moment (S6 40%) [Nm]	111
Výkon [kW]	21

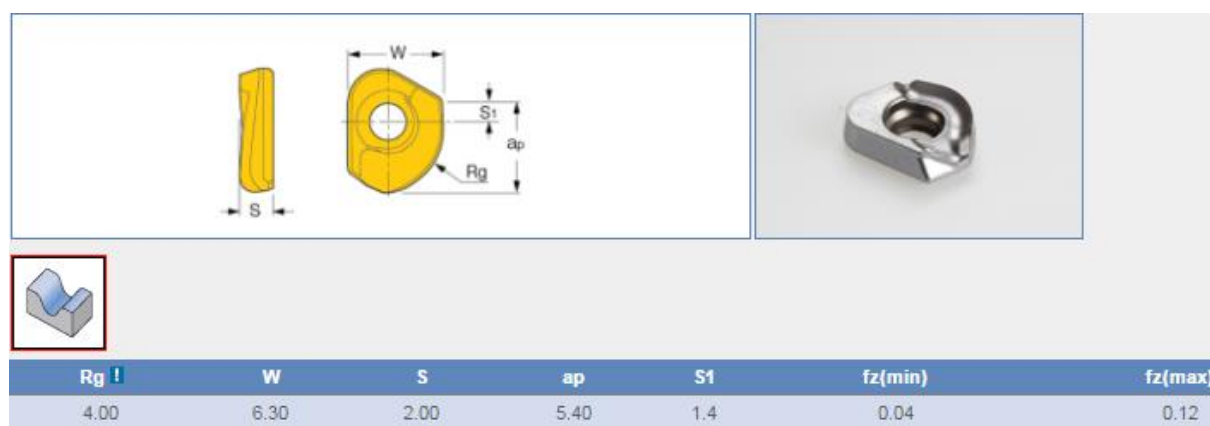
Tab. 7 - technické parametry stroje [9]

### 3.7.2 Nástroj

Nástroj použitý při předchozím experimentu již bohužel nebyl k dispozici. Pro stejný typ břitových destiček byla sice zakoupena nová fréza, ta ale byla pro potřeby experimentu příliš krátká. Z důvodu jistého nedorozumění byl tento problém zjištěn až jeden pracovní den před plánovaným experimentem, a tak i přes značnou komunikaci s firmou ISCAR nebylo možné původní typ frézy sehnat, mimo jiné proto, že zmiňovaná firma již tento typ nástroje nenabízí. Zakoupený kratší nástroj byl nakonec upraven v halových laboratořích a prodloužen vlepením do pouzdra. Dostupná fréza byla velmi pečlivě osoustružena na  $\varnothing 8$  mm po celé délce a následně vlepena do vyrobeného pouzdra s vnějším  $\varnothing 12$  mm. Pro spoj bylo použito lepidlo Loctite kov na kov. Rozměry vyrobené frézy je možné vidět na následujícím obrázku (Obr. 25). Použité VBD destičky lze vidět na obrázku (Obr. 26).



Obr. 25 - Obráběcí nástroj



Obr. 26 - Rozměry VBD [10]

### 3.7.3 Materiál obrobku

Materiál obrobku byl zvolen stejný, který byl použitý i v předchozím experimentu. Tímto materiálem je ušlechtilá konstrukční mangan-chromová ocel k cementování ČSN 14 220. Tato ocel je dobře tváritelná za tepla, i za studena po vyžhání na měkko. Také je dobře obrobitelná a svařitelná. V praxi se používá především na součásti, u kterých se vyžaduje vysoká pevnost v jádře a tvrdost povrchu (po cementování a kalení) do průměru 35 mm, například ozubená kola, hřídele, pístní čepy a podobně. Ekvivalentní označení dle Din je 16MnCr5 a dle ISO 683/11-70. Chemické složení je uvedeno v tabulce (Tab. 8). [11]

Prvek	C	Mn	Si	Cr	P	S
Obsah [%]	0,14 – 0,19	1,1 – 1,4	0,17 – 0,37	0,8 – 1,1	Max 0,035	Max 0,035

Tab. 8 - Chemické složení ČSN 14 220 [11]

### 3.7.4 dynamometr

Pro měření řezných sil byl použit nástrojový dynamometr SPIKE od firmy Promicron. Použití tohoto dynamometru je asi nejzásadnějším rozdílem mezi předchozím a plánovaným experimentem. Díky této změně je možné hodnotit jednotlivé složky řezných sil z pohledu nástroje.

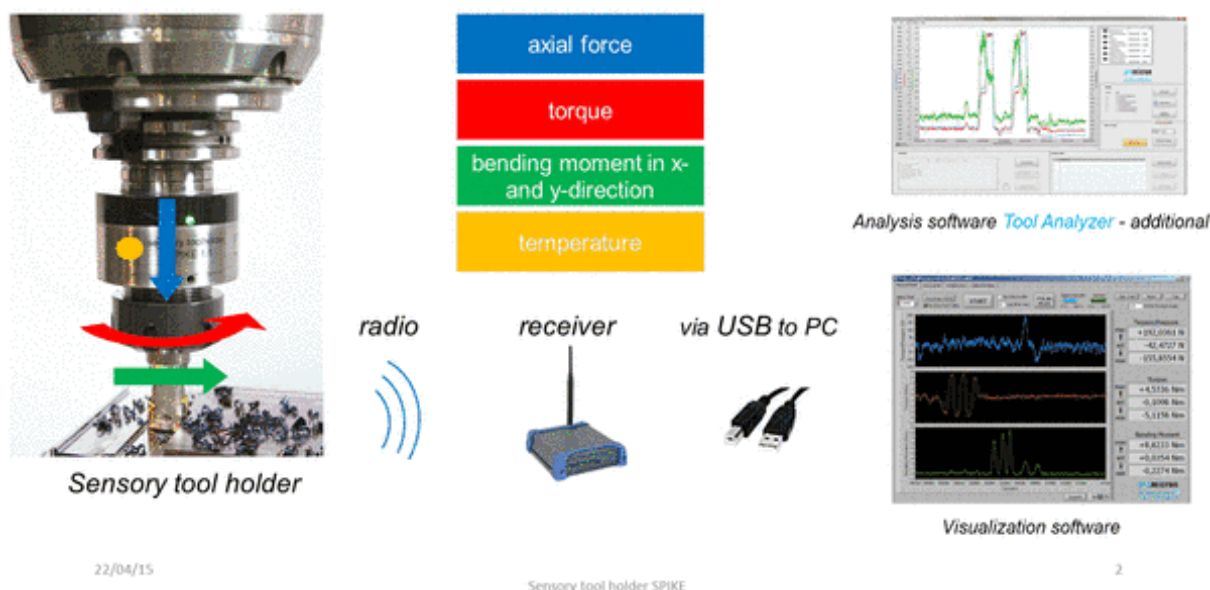
Do dynamometru byla pomocí kleštiny upnutá kulová fréza a dynamometr s nástrojem byl poté upnut do vřetena stroje. Dynamometr funguje na principu tenzometrického jevu. To znamená, že uvnitř přístroje jsou umístěny tenzometrické senzory, které vlivem deformace v určitých směrech mění svůj odpor. Změnu odporu zaznamenávají čidla, které jej převádí na zpracovatelný signál. Signál je z dynamometru přenesen bezdrátově do wifi přijímače, který je součástí měřicí aparatury a z tohoto přijímače pomocí USB kabelu do počítače, na kterém musí být nainstalovaný vyhodnocující software. Výhoda tohoto přenosu je, že se v prostoru stroje nenachází žádné kabely, u kterých by mohlo hrozit namotávání na rotační části stroje. Schéma zpracování signálu a veličiny, které je možné tímto dynamometrem měřit, jsou vyobrazeny na obrázku (Obr. 27). Technické parametry dynamometru se nacházejí v tabulce (Tab. 9).

<b>Kompatibilita s automatickou výměnou nástrojů</b>	Ano
<b>Počet bezdrátových kanálů:</b>	4
<b>Frekvence přenosu dat:</b>	2,45 GHz
<b>Vzorkovací frekvenci na kanál:</b>	Až 2 KHz
<b>Rozlišení naměřených hodnot:</b>	15 bit
<b>Maximální povolené otáčky</b>	18 000 ot/min
<b>Rozsah přenosu signálu</b>	2 až 3 m
<b>Životnost baterie</b>	až 12 h
<b>Doba nabíjení baterie</b>	4 h
<b>Kvalita dynamického vyvážení</b>	2,5 G
<b>Kompatibilita s chladicím systémem</b>	Vnitřní/vnější
<b>Výstup dat</b>	.txt
<b>Rozsah měření <math>F_{ax}/M_k/M_o</math></b>	60Kn/400Nm/400Nm

Tab. 9 - Technické parametry dynamometru [12]

## Measuring force and moments where these occur

**promicron**  
wireless solutions



Obr. 27 - Dynamometr SPIKE [12]

Pomocí tohoto dynamometru je možné měřit axiální sílu, krouticí moment, ohybový moment a teplotu senzoru. Krouticí moment byl použitý pro výpočet tangenciální složky řezné síly. Ramenem při tomto výpočtu byla polovina efektivního průměru. Pomocí ohybového momentu byla získána síla radiální. Pro výpočet této síly byla použita změřená hodnota složená z délky vyložení nástroje a dané části dynamometru. Teplotu dynamometru je nutné zaznamenávat proto, že tenzometrický jev je velmi závislý na aktuální teplotě a tak pokud by se teplota během experimentu výrazněji měnila, byly by naměřené hodnoty zkreslené.

Nevýhodou tenzometrického jevu je, že umožňuje použití mnohem menší vzorkovací frekvence, než dynamometry fungující na piezoelektrickém jevu. Takový dynamometr se sice na katedře také nachází, ale vzhledem k strojnímu vybavení parku jej nebylo možné použít na pětiosém frézovacím centru.

### 3.7.5 mikrofon

K záznamu zvuku byl použit elektretový mikrofon YOGA EM 070 (viz Obr. 28). Tento mikrofon má frekvenční rozsah 50 Hz až 18kHz, citlivost -65dB a impedanci  $1000 \Omega^3$ , což jsou parametry, které plně vyhovují plánovanému použití. Elektretový mikrofon je druh kondenzátorového mikrofону, u nějž je elektrické pole vytvářeno nevodivou hmotou, která je permanentně elektricky nabitá. Tato látka se nazývá elektret. S rozechvěním membrány se mění kapacita kondenzátoru, čímž dochází ke změně napětí mezi deskami. Pro zpracování těchto změn napětí je potřeba předzesilovače s vysokou vstupní impedancí, který je proto součástí mikrofónu. [13]

<sup>3</sup> viz zdroj [14]



Obr. 28 - Mikrofon YOGA EM 070 [14]

### 3.7.6 drsnoměr

Pro měření drsnosti byl, stejně jako u předchozího experimentu, použitý přenosný drsnoměr MarSurf M300 od firmy Mahr (viz Obr. 29). Toto zařízení měří dotykově pomocí diamantového hrotu. Rozsah měření je 350  $\mu\text{m}$  s rozlišením profilu 8 nm.



Obr. 29 - Drsnoměr MarSurf M300 [15]

Drsnoměr standardně disponuje vnitřní pamětí, kam by měly být ukládány jednotlivé záznamy včetně grafického vyobrazení měřeného povrchu. Tyto záznamy by mělo být možné přesunout z přístroje do počítače pomocí kabelu. Bohužel po poslední softwarové aktualizaci provedené před několika lety, nefunguje na používaném přístroji žádná z těchto doplňkových služeb. Drsnost povrchu ale měří přístroj spolehlivě, pouze byl mírně zhoršen komfort vyhodnocování, protože po každém měření je nutné získané hodnoty ručně zapsat do připravené tabulky v počítači, protože přístroj je schopný v paměti uchovat pouze jeden záznam.

### 3.7.7 software

Pro získání a vyhodnocení dat z experimentu byly použity tři počítačové programy. Řezné síly byly zaznamenávány a vyhodnocovány pomocí softwaru SPIKE BTKaBlue V 13.4, který poskytla škola. Postup získávání výsledků pomocí tohoto softwaru je uveden v kapitole 5.1. K nahrávání a vyhodnocování zvukových vzorků byl použit volně šiřitelný program Audacity. Práce s tímto programem je již podrobně popsána v kapitole 2.5.2. Získané hodnoty řezných sil, frekvenčních analýz a drsností povrchů byly zpracovány pomocí tabulkového procesoru Excel.

## 4 Experiment

Experiment se uskutečnil dne 30. 1. 2017 ve Vědeckotechnologickém parku v Plzni na stroji DMU 65 monoBLOCK®. Tento stroj byl zvolen proto, že jako jediný dostupný stroj vyhovoval požadavkům experimentu. To znamená, že má možnost řízení pěti os, je na něm možné použít dostupný nástrojový dynamometr, má dostatečný výkon a lze na něj upnout zvolený polotovar. Více je o tomto stroji popsáno v kapitole 3.7.1. Datum experimentu byl volen s ohledem na rozpracovanost této práce i na pracovní vytížení stroje. Dalším faktorem ovlivňujícím datum uskutečnění experimentu byla dostupnost materiálu a doba výroby polotovaru.

### 4.1 Příprava experimentu

Před samotným experimentem byla nejprve zapojena měřící technika do prostoru stroje a upnut polotovar. K upnutí polotovaru bylo použito čtrnáct šroubů M12 s kuželovou zápustnou hlavou.

Dále byl lehce poupraven připravený NC program. Důvodem nutnosti úprav byla neznalost detailnější kinematiky stroje v době tvorby programu. Předmětem úprav bylo například změna znamének u úhlů vyklonění. Díky parametrizaci programů bylo provedení úprav velmi rychlé a jednoduché.

Další fází před počátkem experimentu bylo testování vstupních parametrů v pomocném poli polotovaru. Pro toto testování byl vytvořen NC program, který byl velmi podobný programu „HLAVNI“. Lišil se pouze v tom, že parametry pro výpočet polohy drážky a nastavení řezných podmínek nebyly načítány z programu „UPNUTI-i“, ale byly zadávány přímo ve vytvořeném programu. Také zde byla nastavena pevná souřadnice počátku dráhy v x-souřadnici, aby testování probíhalo pouze v pomocném poli.

Při tomto testování bylo zjištěno, že při nastavených podmínkách nástroj dostatečně nejevil známky snížení stability. Aby mohlo být zkoumáno uklidnění řezu, je totiž potřeba, aby alespoň část obrábění probíhalo na mezi stability. Proto byla upravena délka vyložení z původních  $L = 92$  mm na  $L = 129$  mm, což byla maximální hodnota, kterou nástroj dovolil s ohledem na způsob upnutí. I přes změnu tohoto parametru obrábění stále dostatečně nejevilo známky snížení stability řezu. Následně byl zkoušen větší úhel podélného vyklonění  $\beta_f = 30^\circ$ . Ani tato změna dostatečně nesnížila stabilitu obrábění, a proto byl úhel podélného vyklonění vrácen na původní hodnotu  $\beta_f = 15^\circ$ . Obrábění na mezi stability se dosáhlo až zvětšením hloubky řezu na trojnásobnou hodnotu  $a_p = 0,6$  mm. Nové, skutečně použité řezné podmínky lze vidět v následující tabulce (Tab. 10).

Parametr	Pole 1	Pole 2	Pole 3	Pole 4	Pole 5	Pole 6	Pole 7	Pole 8	Pole 9
$f_z$ [mm/zub]	0,2	0,25	0,3	0,2	0,25	0,3	0,2	0,25	0,3
n [ot/min]	3000	3000	3000	3500	3500	3500	4000	4000	4000
$v_{ceff}$ [m/min] pro $\beta_n = 0^\circ$	54,9	54,9	54,9	64,1	64,1	64,1	73,3	73,3	73,3
$\beta_f$ [°]	15								
$a_p$ [mm]	0,6								
$D_{eff}$ [mm] pro $\beta_n = 0^\circ$	5,83								

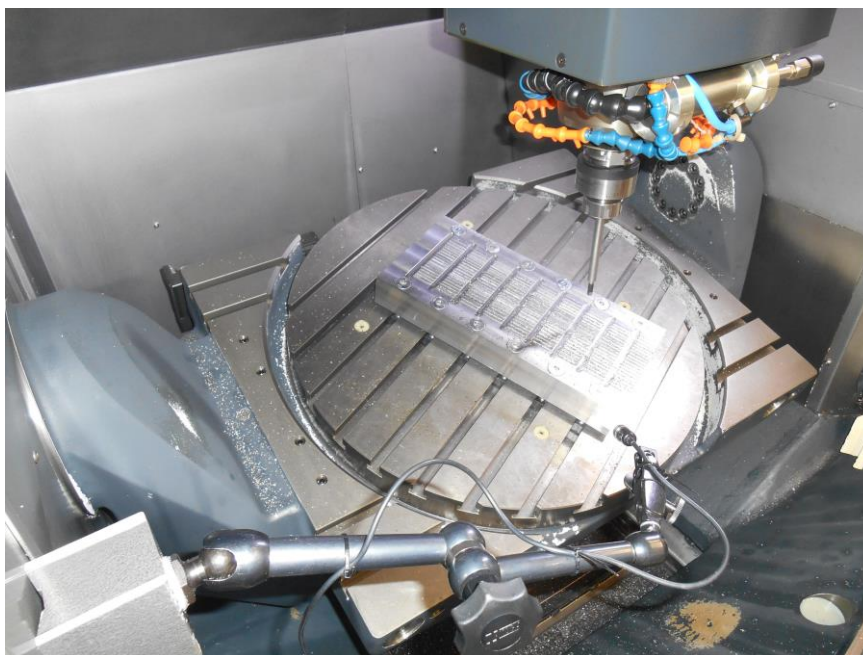
**Tab. 10 - Skutečně použité řezné podmínky**

Hodnoty efektivních průměrů frézy a velikosti řezných rychlostí pro všechny tři úrovně otáček vřetene v závislosti na úhlech příčného vyklonění je možné vyčíst z tabulky (Tab. 11). Pravděpodobných příčin, proč se při stejných parametrech chovalo obrábění v tomto experimentu stabilněji, než v předchozím experimentu, může být několik. Velký vliv může mít použití jiného stroje, protože nově použité obráběcí centrum má větší tuhost, než stroj použitý v předchozím experimentu. Dalším, možná i největším ovlivňujícím faktorem, je použití nástroje s lepeným spojem, který je popsán v kapitole 3.7.2. Lepidlo v tomto případě může totiž mít velmi tlumící účinky a tím výrazně zvyšovat stabilitu obrábění.

$\beta_n$ [°]	0	±5	±10	±15	±20	±25	±30	±35	±40	±45
$d_{eff}$ [mm]	5,83	5,84	5,85	5,88	5,92	5,98	6,05	6,15	6,26	6,41
$v_{ceff1}$ [m/min]	54,9	55,0	55,1	55,4	55,8	56,3	57,0	57,9	59,0	60,4
$v_{ceff2}$ [m/min]	64,1	64,1	64,3	64,6	65,1	65,7	66,5	67,5	68,8	70,4
$v_{ceff3}$ [m/min]	73,2	73,3	73,5	73,9	74,4	75,1	76,0	77,2	78,7	80,5

**Tab. 11 - Skutečné hodnoty  $d_{eff}$  a  $v_{ceff}$  v závislosti na  $\beta_n$**

Během testování vstupních parametrů bylo také otestováno zapojení a funkčnost měřících zařízení, především zda vyhovuje umístění mikrofonu a jestli získané záznamy zvukových projevů je možné zpracovat. Při zkušebních přejezdech se ukázalo, že umístění mikrofonu vyhovuje a zvukové záznamy jsou zpracovatelné. Umístění mikrofonu je vyobrazeno na obrázku (Obr. 30). V levém dolním rohu lze vidět upínací magnet stojánku. Od tohoto magnetu je podél dolní strany obrázku možné vidět rameno stojánku. Samotný mikrofon je umístěn na konci tohoto ramena. Protože byl mikrofon umístěn stále ve stejné pozici vůči obráběcímu prostoru, bylo nakonec možné zpracovat i hlučnost vzorků. Metoda použitá pro vyhodnocování zvukových vzorků se totiž ukázala jako nepřilíš vhodná pro tuto konkrétní aplikaci, jak je více popsáno v kapitole 5.3.



**Obr. 30 - Umístění mikrofonu**

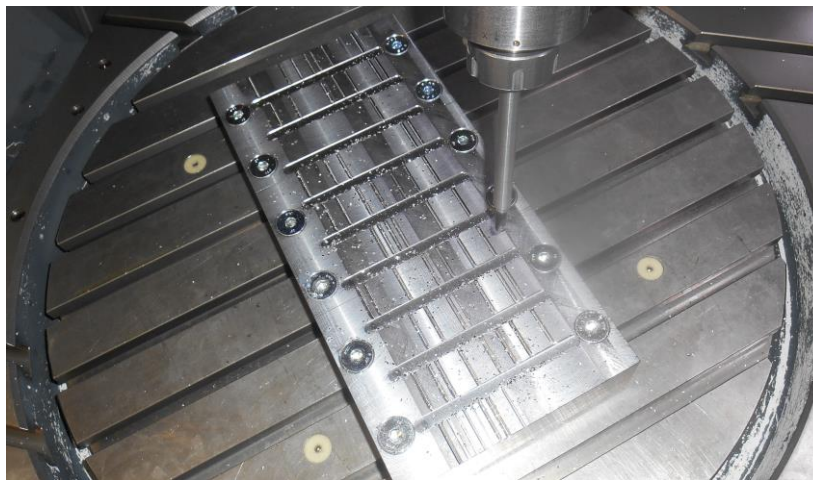
Posledním testem před začátkem experimentu byl test programu s provedenými, výše popsányi změnami. Před tímto testem byl posunut nulový bod obrobku 10 mm nad povrch

polotovaru a poté byl puštěn příslušný program. Při tomto testu se již neprojeví žádné nesrovnalosti, a tak bylo možné přistoupit k samotnému experimentu.

## 4.2 Průběh experimentu

Experiment proběhl ve stejný den, jako jeho příprava. Po otestování řídicího programu byl přenastaven nulový bod zpět na povrch polotovaru. Poté byl spuštěn program „UPNUTI-1“. Díky tomuto programu bylo zajištěno, že byl řezný proces pozastaven vždy po obrobení devíti drážek. Tato pauza byla použita k ukončení záznamu zvuku i řezných sil a k uložení získaných hodnot do příslušných souborů. Toto rozčlenění obrábění na úseky bylo provedeno proto, aby délka záznamů nebyla příliš dlouhá, což by mohlo vést k problémům se zpracováním, zvláště u řezných sil. Kratší záznamy jsou také mnohem přehlednější a lépe se v nich vyhledávají záznamy konkrétních drážek. Dalším důvodem přerušování chodu programu byla častá výměna břitové destičky, aby se zamezilo vlivu otupení na výsledky experimentu. Tato výměna probíhala při každém druhém zastavení programu, tedy vždy po obrobení osmnácti drážek.

Po uložení souborů bylo opět zapnuto nahrávání zvuku i záznamu řezných sil a následně byl spuštěn pozastavený program, čímž bylo obrobeno dalších devět drážek. Celý cyklus se během obrábění na jedné straně polotovaru opakoval devatenáctkrát. Na obrázku (Obr. 31) je možné vidět obrobení přibližně třetiny drážek na jedné straně polotovaru. Jak lze vidět na tomto obrázku, pořadí obrábění drážek není systematické. Pořadí drážek je řízeno programem, který byl vygenerován z tabulky znáhodnění. Důvod tohoto znáhodnění je potlačení takzvaného „vlivu času“. O této problematice je více napsáno v kapitole 3.5.

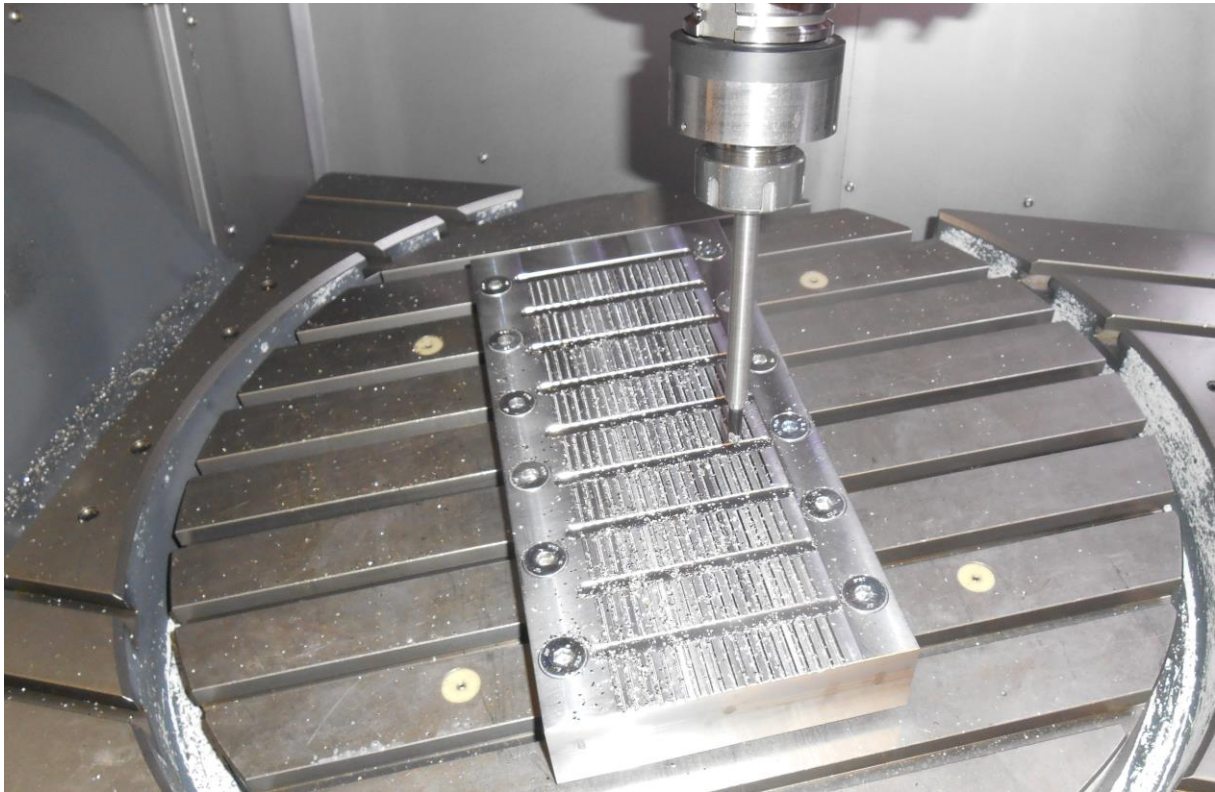


Obr. 31 - Průběh experimentu

Po obrobení všech drážek na první straně polotovaru byl polotovar přeupnut a celý experiment byl zopakován na straně druhé. Pro zopakování pokusu byl použit program „UPNUTI-2“. Tento program se od programu „UPNUTI-1“ liší pouze pořadím znáhodnění drážek. Změna pořadí obrábění drážek zaručuje, že pokud by „vliv času“ zkreslil výsledky na jedné straně polotovaru, na druhé straně polotovaru by bylo toto zkreslení odlišné, díky čemuž mají výsledky získané experimentem větší vypovídající hodnotu. Při obrábění na druhé straně polotovaru musel být program pozastaven po obrobení první drážky, protože byl špatně nastaven nulový bod pro obrábění. Kvůli této chybě najel nástroj při obrábění až do dalšího pole, kde obráběl asi 2 mm. Proto byl program pozastaven a nulový bod přenastaven na správnou hodnotu. Díky včasnému odhalení chyby nebyly ohroženy výsledky experimentu, pouze u záznamu zvukových projevů vznikla navíc jedna stopa a u záznamu řezných sil byl vytvořen jeden soubor navíc, obojí obsahuje záznam pouze této drážky.



A u záznamů prvních devíti drážek budou vyhodnocovány pouze drážky dva až devět. Na obrázku lze vidět druhou stranu polotovaru po ukončení experimentu, tedy po obrobení všech drážek.



Obr. 32 - Obrobené drážky

Soubor záznamu řezných sil bylo vždy nutné založit před začátkem obrábění konkrétních devíti drážek. Soubory byly pojmenovávány „up\_i“ pro obrábění na první straně polotovaru a „up2\_i“ pro stranu druhou. „i“ označuje, při kolikátém spuštění stroje na konkrétní straně polotovaru byl záznam pořízen a nabývá hodnot od jedné do devatenácti. Záznam prvních devíti drážek má tedy označení „up\_1“, záznam dalších devíti drážek nese označení „up\_2“, a tak dále. Při spuštění zaznamenávání bylo vždy nutné restartovat dynamometr pomocí tlačítka „Reset“ ještě před najetím frézy do řezu. Toto restartování bylo prováděno proto, aby měřené hodnoty nebyly ovlivněny předchozím měřením.

Při zaznamenávání zvukových projevů vznikly pouze dva soubory „Upnuti-1“ a „Upnuti-2“. Program Audacity, který byl pro nahrávání použitý, totiž umožňuje nahrání více stop do jednoho souboru. Po obrobení devíti drážek nebyl tedy zakládán nový soubor, ale byla založena pouze nová stopa. Jednotlivé stopy byly pojmenovávány čísla „1“ ... „19“. Tato čísla, stejně jako u označování souborů záznamů řezných sil, označuje, při kolikátém spuštění stroje byl záznam pořízen.

Díky popsanému způsobu označování záznamů řezných sil a zvukových projevů je velmi jednoduché přiřadit záznamy ke konkrétním drážkám a tím i ke konkrétním řezným podmínkám, čehož je využíváno při vyhodnocování experimentu.

## 5 Zpracování naměřených dat

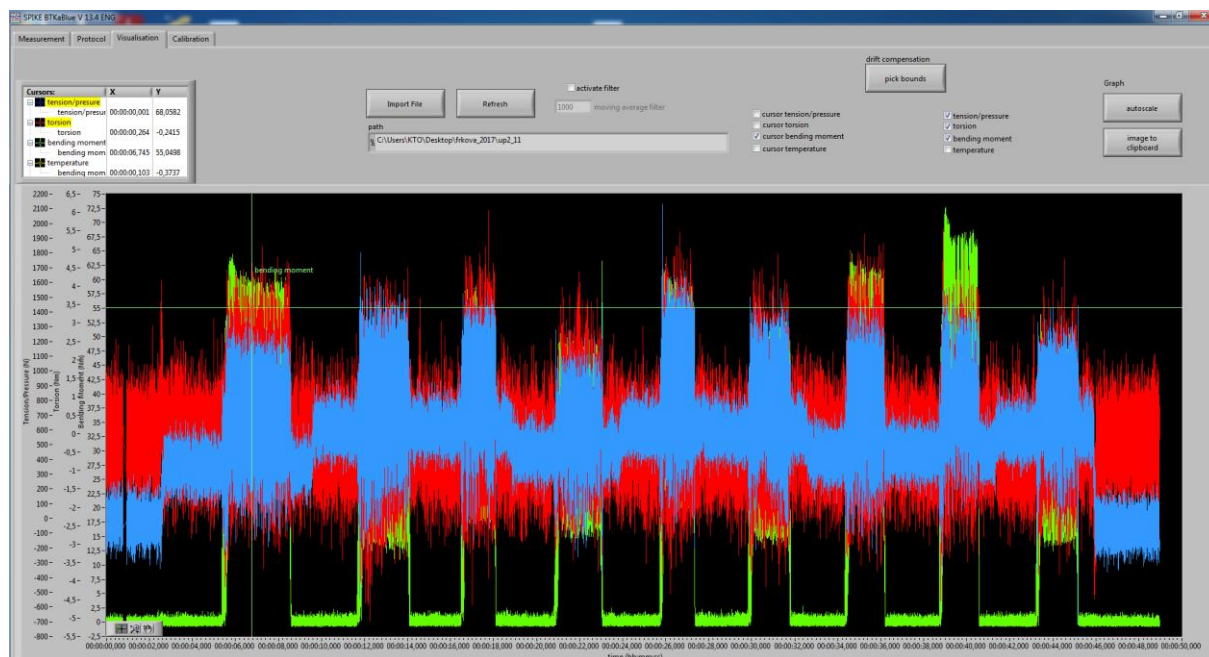
Hodnotícími odezvami experimentu jsou řezné síly, zvuková analýza obrábění a drsnost povrchu. V následujících kapitolách bude popsáno, jakým způsobem jsou jednotlivé hodnoty získávány a jakých metod bylo při tomto získávání použito.

## 5.1 Řezné síly

K získání řezných sil pro jednotlivé drážky byl použit rotační dynamometr SPIKE od firmy Promicon. (Více o tomto přístroji je uvedeno v kapitole 3.7.4.) Měření i následné vyhodnocování bylo uskutečněno pomocí softwaru SPIKE BTKaBlue V 13.4, který poskytla škola. K fungování licence programu bylo nutné mít k počítači připojen alespoň bezdrátový přijímač signálu z dynamometru, a tak zpracování výsledků řezných sil probíhalo na školním počítači v metrologické laboratoři, kde bylo zřízeno provizorní pracoviště.

### 5.1.1 Odečítání hodnot

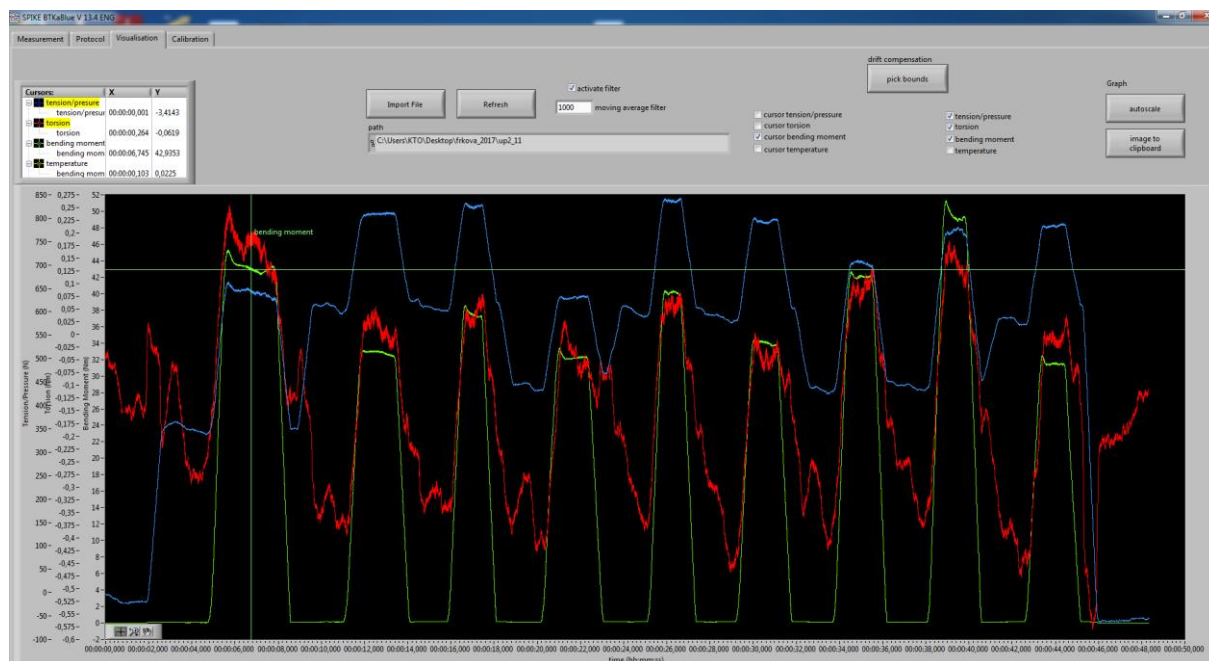
Při vyhodnocování záznamů byl do programu nejprve nahrán příslušný soubor dat pomocí tlačítka „Import file“. Podobu nahraného souboru dat je možné vidět na obrázku (Obr. 33).



Obr. 33 - Ukázka souboru v programu SPIKE BTKaBlue V 13.4

Zelenou barvou je zde vyobrazen průběh ohybového momentu. Červená barva označuje průběh krouticího momentu a modře je vyznačen průběh axiální síly. Dále se zde nachází pohyblivé kurzory pro jednotlivé naměřené složky. (Na obrázku je možné vidět pouze zelený kurzor patřící k záznamu ohybového momentu.) Tyto kurzory slouží pro snadnější odečítání hodnot. Aktuální souřadnice umístění kurzoru je možné vyčíst z okna umístěného v levém horním rohu programu. Za povšimnutí stojí přerušení záznamu krátce po začátku nahrávání. Toto přerušení je způsobeno restartováním dynamometru, které bylo nutno provést při začátku každého měření, aby záznam nebyl ovlivněn výsledky z předchozího měření.

V programu lze odfiltrovat jednotlivé záznamy a také se zde nachází několik možností zvětšení záznamu. Zvětšit lze měřítko na ose x, nebo na ose y, popřípadě použít zobrazení pouze vybraného okna, čímž se zvětší měřítko na obou osách zároveň. Dalším zajímavým nástrojem je filtr, který pomocí pohyblivého průměru vyhladí funkci průběhu záznamu podle nastavené hodnoty. To znamená, že při nastavení hodnoty filtru na sto, bude první bod záznamu průměrem z prvních sto hodnot, druhý bod bude průměrem hodnot dva až sto jedna a tak dále. Takto odfiltrovaný záznam s hodnotou filtru tisíc je možné vidět na obrázku (Obr. 34)



Obr. 34 - Odfiltrovaný záznam

Na obrázku (Obr. 34) se nachází stejný záznam, jako na obrázku (Obr. 33). Zapnutím filtru je možné zjednodušit odečítání zaznamenaných hodnot, protože se v některých případech výrazně sníží riziko špatného odečítání vlivem subjektivního vnímání vyhodnocujícího člověka. Hodnoty odečtené z tohoto záznamu ale budou nižší, než skutečně naměřené hodnoty, protože se bude jednat o jejich průměry.

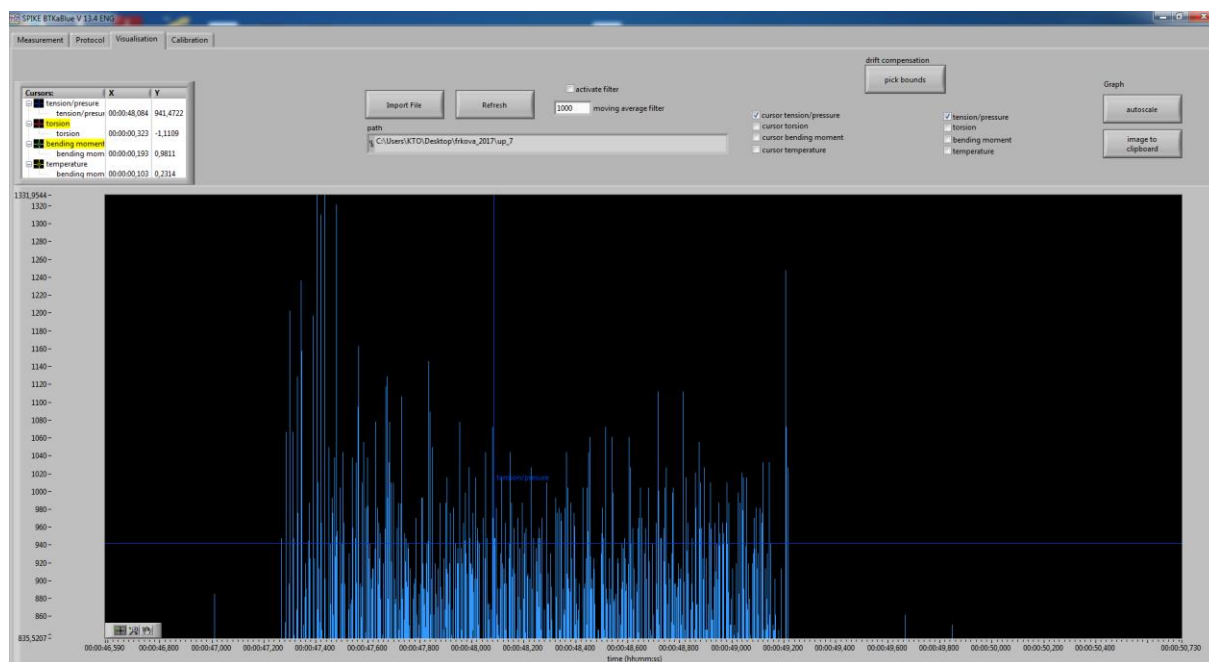
Jak je již zmiňováno v kapitole 4.2, každý takovýto soubor obsahuje data pro devět náhodně umístěných drážek. K identifikaci, o které konkrétní drážky se jedná, slouží tabulky znáhodnění pro jednotlivé strany. Tyto tabulky byly použité také pro tvorbu programů „UPNUTI-1“ a „UPNUTI-2“, které jsou popsány v kapitole 3.6. V tabulkách znáhodnění jsou pro vyhodnocování rezných sil nejdůležitější dva sloupce: sloupec „Původní pořadí“ a sloupec „Znáhodněné pořadí“. Ve sloupci „Původní pořadí“ se nachází skutečné pořadí drážek na polotovaru řazené primárně podle číslování polí a druhotně podle úhlu příčného vyklonění, obojí vzestupně.

Sloupec „Znáhodněné pořadí“ ukazuje pořadí, ve kterém byly obráběny jednotlivé drážky. Jak je popsáno v kapitole 3.5, tohoto pořadí bylo docíleno pomocí funkce „NÁHČÍSLO“ v softwaru Excel a je rozdílné pro jednotlivé strany polotovaru. Pomocí funkce „seřadit a filtrovat“ lze velmi jednoduše seřadit pořadí řádků v celé tabulce do požadovaného tvaru. Pokud je tabulka seřazená podle sloupce „Znáhodněné pořadí“, lze do ní postupně vpisovat data získaná pro jednotlivé drážky v programu SPIKE BTKaBlue. Poté je možné tabulku seřadit podle sloupce „Původní pořadí“ a takto seřazená data lze poté použít pro další zpracování. Na obrázku (Obr. 35) je vyobrazena ukázka tabulky, do které byly vpisovány hodnoty momentů a sil pro jednotlivé drážky na druhé straně polotovaru. Do sloupce I „Ohybový moment maxima“ byly vpisovány hodnoty ohybového momentu pro jednotlivé obrábění drážek získané z původního záznamu. Sloupec J „Ohybový moment průměr“ obsahuje výsledky získané ze záznamu s použitím filtru. Důvod, proč byl krouticí moment vyhodnocován dvakrát, je uveden níže. Ve sloupci K „Rozdíl“ je uveden rozdíl mezi hodnotami ve sloupcích I a J. Tento rozdíl byl vytvořen pouze pro zajímavost a výsledky v něm uvedené nejsou dále zpracovávány. Ve sloupci L „Krouticí moment“ jsou hodnoty naměřených krouticích momentů a hodnoty axiálních sil pro jednotlivé drážky se nachází ve sloupci M „Osová síla“.

Strana 2														
Původní pořadí	Znáhodněné pořadí	Podélné vyklonění Q1	Hloubka řezu Q2	Posuv Q3	Řezná rychlost Q4	Příčné vyklonění Q5	pole	Ohybový moment maxima	Ohybový moment průměr	Rozdíl	Krouticí moment	Osová síla		
1	1	91	1	1	1	1	-9	1	56,8	43,3	13,5	3,5	896	
2	2	61	1	1	1	1	-8	1	55	41,3	13,7	3	975	
3	3	114	1	1	1	1	-7	1	55,4	40,4	15	3,1	930	
4	4	142	1	1	1	1	-6	1	54,1	38,5	15,6	3,1	788	
5	5	170	1	1	1	1	-5	1	54,2	37,6	16,6	3,3	958	
6	6	117	1	1	1	1	-4	1	51,7	36,4	15,3	2,5	816	
7	7	33	1	1	1	1	-3	1	47,4	30,5	16,9	2,4	822	
8	8	125	1	1	1	1	-2	1	50,8	34,6	16,2	3,2	856	
9	9	40	1	1	1	1	-1	1	44,8	28,5	16,3	2,6	805	
10	10	111	1	1	1	1	0	1	47,7	33,3	14,4	3	780	
11	11	17	1	1	1	1	1	1	42,9	27,6	15,3	2,1	397	
12	12	54	1	1	1	1	2	1	47,9	31,3	16,6	2,3	850	
13	13	127	1	1	1	1	3	1	44,4	31,6	12,8	2,2	816	

Obr. 35 - Ukázka tabulky pro vyhodnocení momentů a řezných sil

Hodnoty z programu SPIKE BTKaBlue byly získávány graficky. Nejprve byly skryty všechny nepotřebné záznamy a kurzory. To znamená, že byla zobrazena pouze stopa hodnoceného záznamu (například modrá stopa pro axiální síly) a k ní příslušný kurzor. Následně bylo kurzorem najeto na přibližnou hodnotu u konkrétní drážky a poté byl záznam zvětšen tak, že byla zobrazena pouze oblast vrcholů záznamu. Kurzor byl nastaven tak, aby jeho hodnota v ose y obsahovala přibližně 80% vrcholů záznamu (viz Obr. 36) a následně byla v levém horním rohu programu odečtena příslušná hodnota, která byla ručně zapsána do připravené tabulky na vedlejším počítači.



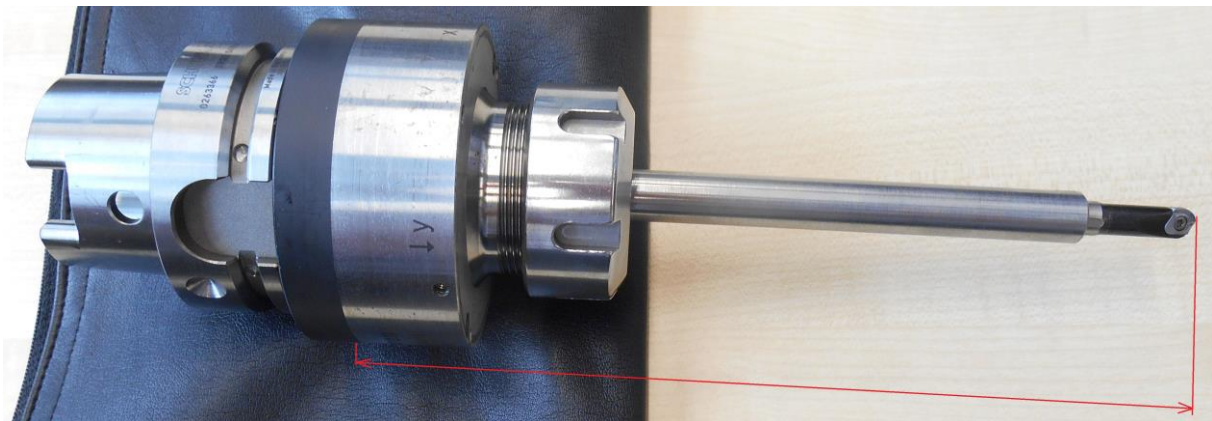
Obr. 36 - Ukázka vyhodnocování záznamu řezných sil

Vliv subjektivity je při tomto vyhodnocování velmi vysoký, a je možné, že pokud by vyhodnocování provádělo více lidí, získané výsledky by se od sebe mohly lišit. Proto bylo kompletní vyhodnocování prováděno jedním člověkem, a tak by výsledky měly mít velkou vypovídající schopnost, zvláště když je kladen důraz spíše na průběh sil v závislosti na příčném vyklonění frézy, než na jejich absolutní velikosti.

### 5.1.2 Radiální složka řezných sil

Jak je již zmiňováno výše, u řezných sil je hodnocena zvláště axiální, radiální a tangenciální složka řezných sil z důvodu rozdílné tuhosti kulové frézy v různých směrech. Největší vliv na stabilitu řezu má síla radiální. Tato složka síly se snaží odtlačit frézu do strany, a pokud její velikost překročí určitou utlumitelnou mez, dojde ke ztrátě stability řezného procesu.

Hodnoty radiální složky sil jsou získány z hodnot ohybového momentu změřeného dynamometrem. Rameno, na kterém ohybový moment působil, se rovná vzdálenosti mezi místem řezu a čidlem umístěným uvnitř dynamometru. V manuálu k dynamometru je uvedeno, že se čidlo nachází na začátku tmavé části. Požadovaná hodnota (viz Obr. 37) se tedy skládá z délky vyložení nástroje a pevně dané části dynamometru.



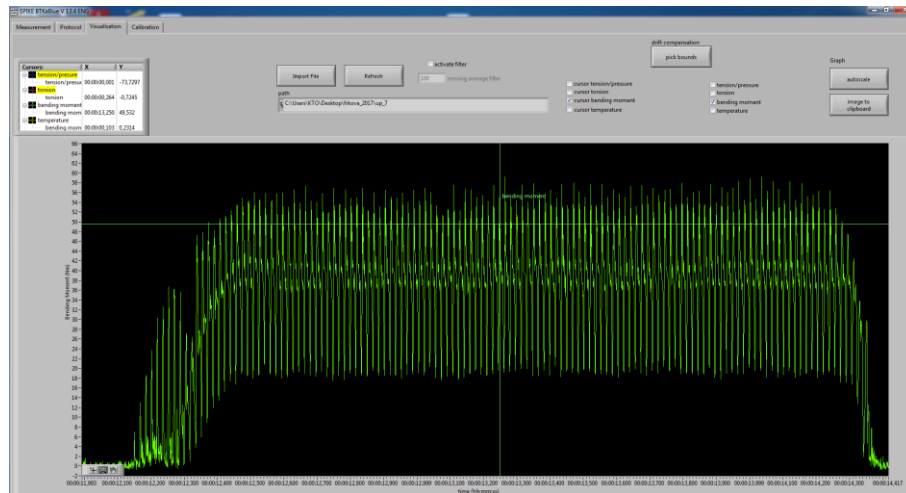
Obr. 37 - Rameno ohybového momentu

Aby bylo možné hodnoty radiální složky sil získat, bylo nutné toto rameno změřit pomocí posuvného měřítka. Radiální složka sil pro jednotlivé drážky je poté vypočtena z rovnice (11).

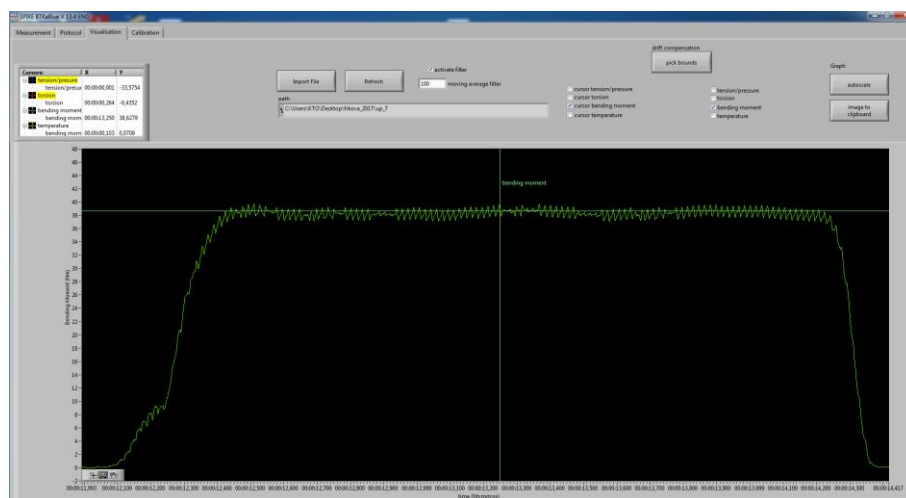
$$F_{rad\ i} = \frac{M_{o\ i}}{L_m} \quad (11)$$

- $i$  – označení konkrétní drážky,
- $F_{rad\ i}$  – radiální složka síly pro drážku  $i$ ,
- $M_{o\ i}$  – ohybový moment změřený dynamometrem pro drážku  $i$ ,
- $L_m$  – rameno momentu;  $L_m = 189$  mm.

Protože se jedná o nejdůležitější ukazatel výsledků experimentu, byly hodnoty ohybového momentu odečítány dvakrát: nejprve klasickým způsobem, jako u všech ostatních složek, a poté s použitím pohyblivého průměru s hodnotou filtru 1000. Použitím filtru se zkreslily velikosti momentů, protože nebyly hodnoceny maximální hodnoty ohybových momentů, ale jejich průměry. Zároveň byla ale téměř úplně eliminována možnost chyby způsobená subjektivitou hodnotitele, protože průběh křivky zobrazující hodnoty ohybového momentu, byl velmi vyhlazen. Rozdíl mezi křivkou se zapnutým a vypnutým filtrem je možné vidět na následujících obrázcích (Obr. 38, Obr. 39).



Obr. 38 - Průběh ohybového momentu pro jednu drážku bez filtru



Obr. 39 - Průběh ohybového momentu pro jednu drážku s filtrem

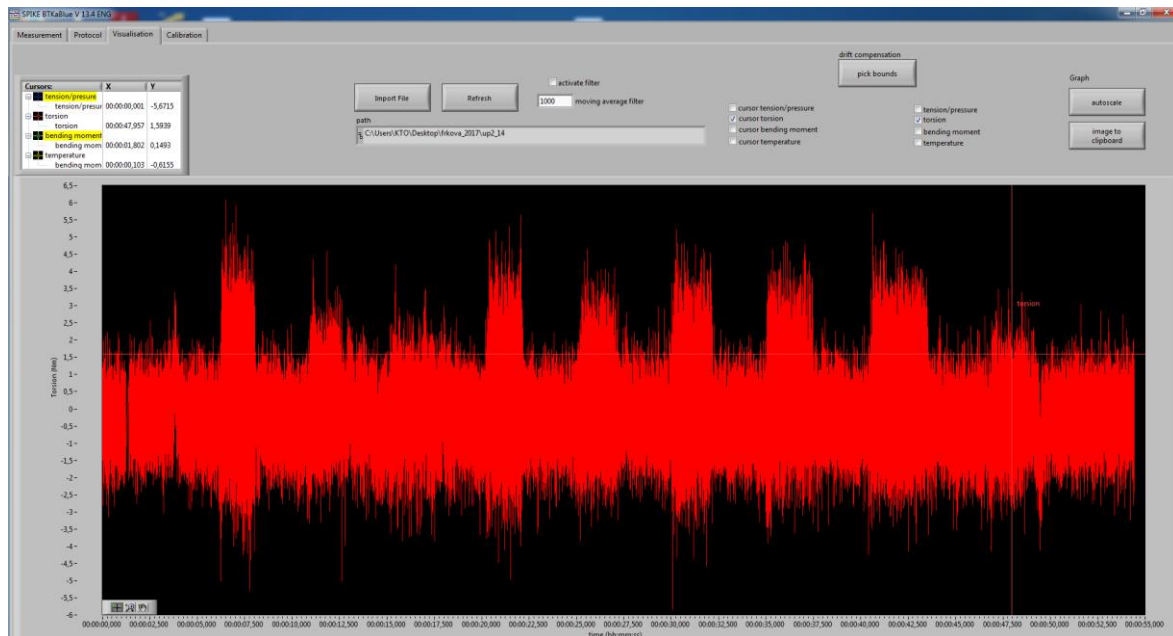
### 5.1.3 Tangenciální složka řezných sil

Tangenciální složka řezných sil byla získána pomocí krouticího momentu změřeného dynamometrem. Pro výpočet je potřeba znát hodnotu efektivního průměru, jehož polovina je ramenem, na kterém síla působí. Efektivní průměr je závislý na úhlu podélného i příčného vyklonění, a také na hloubce řezu. Vztahy pro výpočet efektivního průměru jsou uvedeny v kapitole 2.1. Hodnoty tohoto průměru jsou uvedeny v tabulce (Tab. 11), která se nachází v kapitole 4.1. Radiální složka řezných sil je poté vypočtena ze vzorce (12).

$$F_{\tan i} \frac{M_{k i}}{D_{\text{eff}} \beta_n} = \frac{2 \cdot M_{k i}}{D_{\text{eff}} \beta_n} \quad (12)$$

- $i$  – označení konkrétní drážky,
- $F_{\tan i}$  – tangenciální složka síly pro drážku  $i$ ,
- $M_{k i}$  – krouticí moment změřený dynamometrem pro drážku  $i$ ,
- $D_{\text{eff}} \beta_n$  – efektivní průměr pro úhel vyklonění  $\beta_n$ ,
- $\beta_n$  – úhel vyklonění v příčném směru.

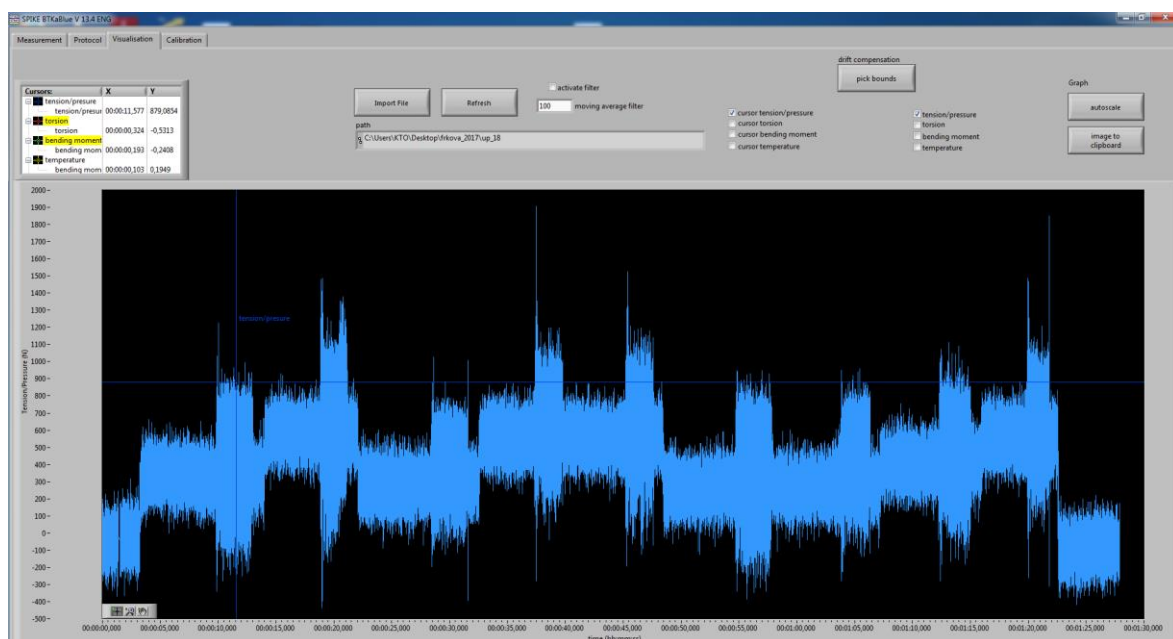
Některé hodnoty krouticího momentu mohou být mírně zkreslené. Důvodem je, že vlivem řezných podmínek a malého efektivního průměru frézy, nabývá moment někdy tak malé hodnoty, že téměř splývají s krouticím momentem při běhu na prázdko. Na obrázku (Obr. 40), lze vidět ukázkou záznamu momentů. Zmíněný problém se zde vyskytuje u druhé, třetí a deváté drážky. Takové množství nízkých hodnot se ale v jednotlivých záznamech vyskytovalo pouze velmi výjimečně.



Obr. 40 - Záznam krouticího momentu

### 5.1.4 Axiální složka řezných sil

Axiální složka řezných sil je jediná složka, kterou dynamometr zaznamenával přímo. Pro získání hodnot této složky řezných sil není tedy nutný žádný výpočet, lze je odečíst přímo z programu SPIKE BTKaBlue. Ukázkou záznamu axiální složky sil je vyobrazena na obrázku (Obr. 41).



Obr. 41 - Ukázkou záznamu axiální složky řezných sil

Na obrázku je také možné vidět, že axiální složka síly vykazuje při běhu na prázdko různé hodnoty. Tento jev je způsobený setrvačností dynamometru a nikterak neovlivňuje velikost naměřených hodnot sil pro jednotlivé drážky.

## 5.2 Drsnost povrchu

Hodnoty drsností povrchů pro jednotlivé drážky byly získány pomocí přenosného drsnoměru MarSurf M300 od firmy Mahr, který je popsán v kapitole 3.7.6. Měření drsností probíhalo ve školní metrologické laboratoři. Získané hodnoty byly zaznamenávány do připravené tabulky. Úryvek vyplněné tabulky je možné vidět na obrázku (Obr. 42).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	Úhel												Rmax	Rmax				
1	Pole	příčn	Ra 1	Ra 2	Ra 1_2	Ra 2_2	Rz 1	Rz 2	Rz 1_2	Rz 2_2	Rmax 1	Rmax 2	1_2	2_2	Rt 1	Rt 2	Rt 1_2	Rt 2_2
2	1	-45	2,954	2,42			12,2	11,54			13,98	14,39			13,98	14,4		
3	1	-40	4,662	2,76			20,6	12,45			25,74	19,1			25,74	19,1		
4	1	-35	4,377	3,6			18	15,7			20,32	18,04			21,37	21,5		
5	1	-30	3,923	4,7			18	18,67			19,15	19,65			20,07	19,9		
6	1	-25	5,583	3,71			26,7	15,63			32,2	17,98			32,2	19,4		
7	1	-20	5,19	4,17			22,9	16,71			24,63	17,7			25	18,2		
8	1	-15	5,353	3,25			23	19,75			25,12	21,35			25,12	22,1		
9	1	-10	4,439	3,26			21,9	14,37			26,62	15,22			27,77	15,3		
10	1	-5	4,81	3,83	1,263	1,058	20,8	19	6,695	5,469	21,86	23,41	7,923	8,686	22,33	24,1	8,527	8,686
11	1	0	3,851	4,9	0,873	1,255	15,7	21,16	4,351	6,87	17,19	25,23	5,103	13,97	18,39	25,2	5,591	14,21
12	1	5	4,495	4,84	1,835	1,47	20,7	20,45	10,84	8,101	21,8	22,54	14,84	10,94	23,32	22,5	15,67	12,72
13	1	10	4,898	4,61	1,24	0,917	21,9	20,6	6,509	4,6	23,5	22,04	7,709	5,719	24,65	22,5	7,709	6,104
14	1	15	4,696	4,8	1,062	0,895	20,3	20,25	6,171	4,87	21,2	21,71	7,672	7,129	21,71	21,7	8,472	7,526
15	1	20	3,074	4,67	1,218	1,187	15,1	18,82	7,879	10,46	16,25	21,33	9,656	13,26	17,56	21,3	10,04	16,53
16	1	25	2,95	3,7	0,787	0,684	16,7	18,79	4,348	3,817	20,12	20,75	6,269	4,81	20,33	21,4	6,269	4,944
17	1	30	3,233	3,27	1,482	0,866	16,1	14,7	8,073	5,703	20,09	15,59	12,13	8,966	21,59	16,2	12,13	8,966
18	1	35	2,218	2,18	1,006	0,665	9,9	13,61	5,711	3,578	11,69	15,7	6,464	4,151	12,73	16,9	6,83	4,462
19	1	40	4,904	2,89	1	0,714	21,4	11,14	5,458	3,485	27,16	11,77	6,861	3,748	30,34	12	6,861	3,98
20	1	45	5,725	4,98	0,842	0,64	23,8	22,46	4,127	3,832	30,18	26,69	5,683	4,163	30,33	26,7	5,683	4,193
21	2	-45	2,742	5,41			11,9	21,35			14,61	23,19			14,61	25,2		
22	2	-40	4,959	4,87			20,1	20,27			24,92	26,78			24,92	26,8		
23	2	-35	3,188	4,98			13,9	18,89			14,77	20,81			15,58	20,8		

Obr. 42 - Ukázka tabulky drsností povrchů

Jak lze vidět i z názvů jednotlivých sloupců, drsnost byla hodnocena pomocí čtyř parametrů, které jsou popsány na následujících řádcích. Na obrázku (Obr. 42) je také vidět, že u drážek s úhlem příčného vyklonění  $\beta_n = -5^\circ$  až  $+45^\circ$  se nacházejí dvě, velmi rozdílné, hodnoty drsností. Tyto drážky, totiž obsahují dva různé typy povrchů, které jsou od sebe velmi lehce rozeznatelné pouhým okem a tak jejich drsnost byla měřena pro každý povrch zvlášť. Tento jev se projevoval od úhlu vyklonění  $\beta_n = -15^\circ$ , ale v prvních drážkách nebylo možné změřit jeho drsnost z důvodu velmi malé šířky tohoto povrchu. Více o tomto jevu je popsáno v kapitole 6.2.

Ra – je průměrná (nebo také střední) aritmetická úchylka posuzovaného profilu. Jedná se tedy o aritmetický průměr všech naměřených hodnot v rozsahu měřené délky. Tento parametr vypovídá o skutečném tvaru profilu velmi málo, přesto se jedná o nejčastěji předepisovaný ukazatel drsnosti. [16]

Rz – je střední hodnota z absolutních výšek pěti nejnižších prohlubní profilu a pěti nejvyšších výstupků profilu hodnocených v rozsahu měřené délky. Výšky profilů i prohlubní jsou měřené od čáry rovnoběžné se střední čarou profilu. [16]

Rmax – je maximální výška nerovností. Je to rozdíl mezi hodnotou nejvyššího vrcholu a hodnotou nejnižší prohlubně po celé délce měření. Tento parametr má význam



především při hodnocení, jestli se v měřeném úseku nenachází nějaká lokální nerovnost. [16] [4]

Rt – je celková výška profilu. Je to součet nejvyššího výstupku profilu a nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky. [16]

Způsob provedení měření drsností je možné vidět na obrázku (Obr. 43). Délka měření byla 5,6 mm. Každá drsnost profilu byla měřena minimálně jednou. Při měření drsností byl především sledován grafický průběh povrchu, a pokud byla v záznamu neočekávaná změna průběhu povrchu, bylo měření opakováno. Tato neočekávaná změna byla způsobena nejčastěji vyjetím hrotu drsnoměru ze záběru, protože části některých drážek, ve kterých měření probíhalo, byly jen o málo širší, než tělo snímače s hrotem. Dalším důvodem pro opakování měření bylo najetí hrotu na lokální nerovnost drážky (například na otřep), nebo vyjetí hrotu z drážky v případě měření poblíž okraje drážky. Tyto zádrhly se opět projeví změnou grafického průběhu povrchu.



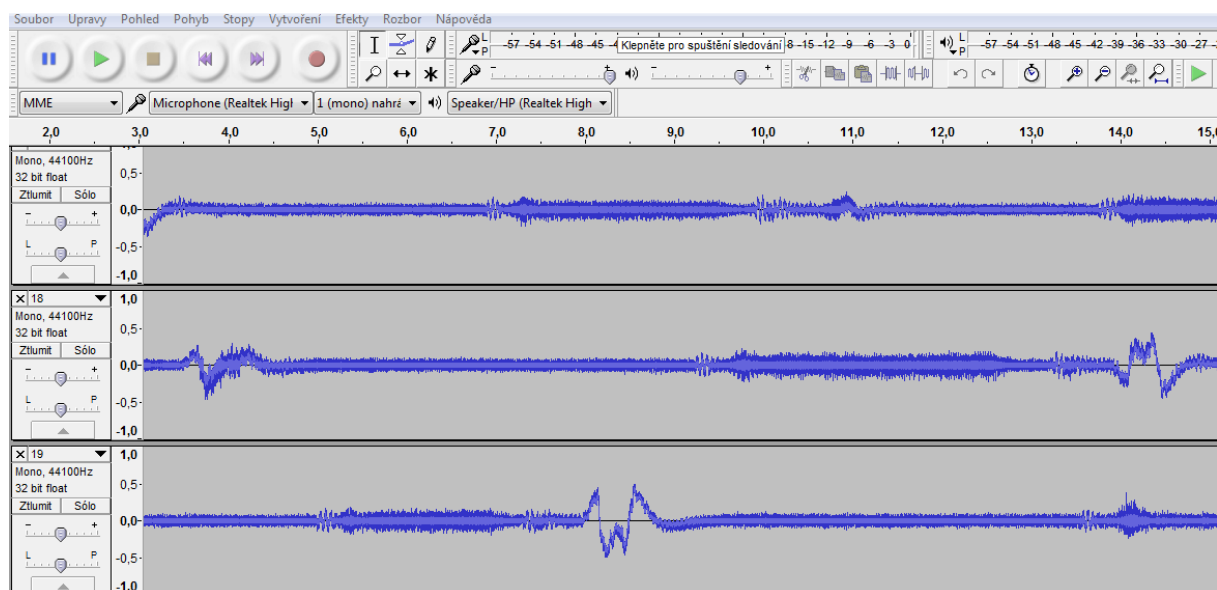
Obr. 43 - Měření drsností

### 5.3 Zvuková analýza

Zvukové projevy obrábění byly zaznamenávány pomocí elektretového mikrofону YOGA EM 070, o kterém pojednává kapitola 3.7.5. K nahrávání i následnému zpracování záznamů byl použit volně šiřitelný software Audacity. Způsob zaznamenávání a nastavení parametrů programu bylo provedeno podle doporučení popsané v kapitole 2.5.2.

Zvukové vzorky byly vyhodnocovány pomocí metody, kterou navrhl ve své diplomové práci Bc. Jan Lerch. Princip této metody je takový, že nehodnotí hlučnost zvukových projevů, ale klade důraz na vyhodnocování frekvenční charakteristiky vzorků, které jsou získány pomocí Fourierovy transformace. O této metodě je možné se více dozvědět z kapitoly 2.5.

Jak je již zmiňováno v kapitole 4.2, zvukové záznamy celého experimentu byly uloženy pouze do dvou souborů „Upnutí-1“ a „Upnutí-2“. V každém souboru se nachází devatenáct stop pojmenovaných „1“ až „19“. Čísla označující názvy stop značí, při kterém spuštění stroje na konkrétní straně polotovaru byl záznam pořízen. Každá stopa obsahuje, stejně jako záznam řezných sil, záznam obrábění devíti drážek ve znárodném pořadí. Ukázkou záznamu zvukových projevů v programu Audacity lze vidět na následujícím obrázku (Obr. 44).



Obr. 44 - Ukázka zvukového záznamu

V souboru „Upnutí-2“ se navíc nachází stopa s označením „1-jedna draha“ která obsahuje záznam pouze první obrobene drážky na druhé straně polotovaru. Důvod vzniku tohoto záznamu je, že kvůli špatně nastavenému nulovému bodu při obrábění druhé strany polotovaru, musel být program po obrobení jedné drážky pozastaven a nulový bod přenastaven. Více o tomto problému je popsáno v kapitole 4.2.

Před samotným vyhodnocováním zvukových projevů bylo nutno získat frekvenční charakteristiky pro jednotlivé drážky. To bylo prováděno tak, že nejprve byly dočasně potlačeny ostatní stopy pomocí tlačítka „sólo“ u právě vyhodnocované stopy. Následně byl kurzorem označen časový úsek aktivní stopy, ve kterém se nacházel záznam zkoumané drážky. Pomocí funkce „Kreslit spektrum...“ schované pod záložkou „Rozbor“ byla vykreslena frekvenční charakteristika zvukových projevů při obrábění konkrétní drážky. Takto vykreslená charakteristika byla následně pomocí programu „Výstřižky“ uložena ve formátu „.jpg“ do adresáře v počítači a zároveň byla jako obrázek vložena do tabulky v textovém editoru. Toto dvojí ukládání bylo zvoleno proto, aby se zamezilo možnosti vnesení chyby při ručním označování jednotlivých frekvenčních charakteristik. Způsob identifikace a pojmenovávání jednotlivých charakteristik je popsán v následujícím odstavci.

Pořadí záznamu drážek odpovídá znáhodněnému pořadí obrábění, a tak pro identifikaci konkrétní drážky byla použita tabulka znáhodnění, jejíž úryvek je vyobrazen na obrázku (Obr. 22) v kapitole 3.5. Při získávání hodnot byla tabulka seřazena podle sloupce „Znáhodněné pořadí“. Pořadí řádků tedy odpovídalo skutečnému pořadí, ve kterém byly drážky obráběny. Z této tabulky byly použity sloupce „Pole“ a „Příčný výklon“. Označení každé frekvenční charakteristiky se skládá z třímístného číselného kódu ve tvaru  $a_b_c$ . Číslo „a“ označuje pole, ve kterém se zkoumaná drážka nachází, tedy číslice v intervalu  $\langle 1; 9 \rangle$  Pod číslem „b“ se nachází pořadové číslo příčného vyklonění, které může nabývat hodnot  $\langle -9; +9 \rangle$ . Třetí číslice „c“ označuje, na které straně polotovaru se obráběná drážka nachází. Toto číslo může být proto pouze „1“, nebo „2“. Všechny tyto charakteristiky jsou součástí příloh na přiloženém DVD.

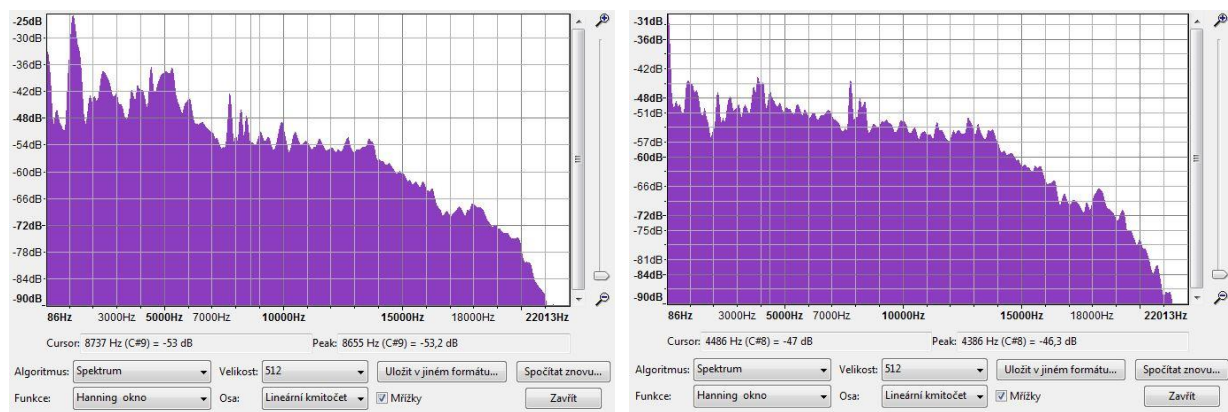
Během získávání frekvenčních charakteristik se ukázalo, že metoda navržená Bc. Janem Lerchem není příliš použitelná pro tuto konkrétní aplikaci. Metoda se totiž zabývá především kontinuálním řezem (vrtání, soustružení, a podobně) Při těchto způsobech obrábění se nestabilita projevila velkým množstvím frekvencí, které svou intenzitou výrazně převyšují

své okolí. Při frézování během experimentu se ale tyto frekvence projeví jen velmi málo. Důvodem je pravděpodobně časté najíždění do a vyjíždění nástroje z řezu. Tyto rychlé změny záběrových podmínek pravděpodobně zastínily frekvence vzniklé nestabilním obráběním, a proto se ve frekvenčních charakteristikách projeví málo.

Při navrhování experimentu se počítalo s tím, že zvuková analýza bude jeden z nejdůležitějších hodnotících ukazatelů, ale vzhledem k získaným poznatkům, bude mít tato odezva pouze doplňkový charakter. Aby byly výsledky přesvědčivější, bylo by nutné metodu navrženou Bc. Janem Lerchem upravit i pro metody obrábění s dělenou třískou. Na tyto úpravy ale není v tomto výzkumu dostatek času, ani prostoru, a tak u vzorků bude hodnocena také hlučnost vzorků, čemuž se navrhovaná metoda snaží vyhnout. Nicméně během experimentu bylo získáno velké množství vzorků zvukových projevů, které mohou být použity jako podklad při budoucím vylepšování stávající metody. Na následujících obrázcích (Obr. 45, Obr. 46) lze vidět srovnání frekvenčních charakteristik získaných při vrtání a frézování při stabilnějším a méně stabilním obrábění.



Obr. 45 - Frekvenční charakteristika nestabilního (vlevo) a stabilního (vpravo) vrtání [8]



Obr. 46 - Frekvenční charakteristika méně stabilního (vlevo) a stabilnějšího (vpravo) frézování

Na obrázcích lze vidět markantní rozdíly mezi frekvenčními charakteristikami při vrtání (Obr. 45) a charakteristikami při frézování získanými při tomto experimentu (Obr. 46). Přestože u frekvenčních charakteristik získaných během experimentu nejsou rozdíly mezi stabilnějším a méně stabilním obráběním tak výrazné, jak bylo očekáváno, je možné najít několik znaků, ve kterých se charakteristiky liší. Charakteristika méně stabilního frézování (Obr. 46 – vlevo) má strmější průběh a více frekvencí, které svou intenzitou převyšují okolí, než charakteristika stabilnějšího obrábění (Obr. 46 – vpravo). Nicméně tyto frekvence mají mnohem menší intenzitu i četnost, než při frekvenční charakteristice získané při kontinuálním obrábění (Obr. 45). Proto jejich vyhodnocení není snadné, a aby měly získané výsledky skutečně

odpovídající hodnotu, bylo by nutné se tomuto tématu dále věnovat, například v dalších diplomových pracích.

Po získání frekvenčních charakteristik pro každou drážku byly tyto charakteristiky graficky porovnávány a rozříděny do skupin. Porovnávání probíhalo tak, že získané charakteristiky včetně jejich označení, byly vytištěny, rozstříhány a nejprve rozříděny do tří velkých skupin. Tyto velké skupiny byly následně ještě tříděny, až vzniklo 24 skupin. Hodnotícími faktory byly strmost průběhu charakteristiky a počet i výška frekvencí, které svou intenzitou značně převyšují své okolí. Získané skupiny byly následně seřazeny podle těchto faktorů od charakteristik vyobrazujících nejvíce stabilní obrábění po charakteristiky méně stabilního obrábění. Takto seřazené skupiny byly následně obodovány, přičemž jeden bod náležel skupině s největší stabilitou a dvacet čtyři bodů získala nejméně stabilní skupina.

Protože se mikrofon nacházel stále na stejném místě vůči pracovnímu prostoru stroje, bylo možné hodnotit také hlučnost jednotlivých vzorků, čemuž se původní metoda snaží vyhnout. Nicméně v tomto případě je toto vyhodnocení vhodné, protože použitá metoda vyhodnocování není zatím navržena pro nekontinuální obrábění, jak je popsáno výše.

Hlučnost byla odečítána z frekvenční charakteristiky. Hodnotilo se, kolik decibelů daný vzorek nejvíce dosáhnul. Absolutní hodnota tohoto čísla byla poté vepsána do připravené tabulky, jejíž úryvek je možné vidět na obrázku (Obr. 47). Protože se všechny hodnoty hlučnosti nacházely v záporných číslech a do tabulky byly vpisovány jejich absolutní hodnoty, největší hodnotu hlučnosti měl nejtišší vzorek. Proto bylo nutné před dalším zpracováním převést tyto hodnoty na body. To bylo provedeno tak, že od čísla 33 byla odečtena absolutní hodnota získané hlučnosti. Číslo 33 bylo použito proto, že nejméně hlasité vzorky dosahovaly hlučnosti -32 dB a tak tyto vzorky získaly za hlučnost právě jeden bod. Nejhlasiťejší vzorek měl hlučnost -18 dB a získal tak 15 bodů.

Hodnoty použité pro grafy vyobrazené v kapitole níže se skládají ze součtů bodů z rozdělení vzorků do skupin a z bodů získaných za hlučnost vzorku.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
		Úhel přič. Výklonu	Znáh. pořadí Strana 1	Znáh. pořadí Strana 2	Hlučnost strana 1	Hlučnost strana 2	Skupina strana 1	skuppina strana 2	Body Hluk strana 1	body Hluk strana 2	Strana 1	Strana 2
1	Pole											
2	1	-45	109	91	30	30	17	19	3	3	20	22
3	1	-40	25	61	31	30	19	19	2	3	21	22
4	1	-35	147	114	32	26	19	19	1	7	20	26
5	1	-30	29	142	29	29	19	18	4	4	23	22
6	1	-25	52	170	27	29	18	18	6	4	24	22
7	1	-20	154	117	29	28	18	19	4	5	22	24
8	1	-15	159	33	31	24	15	14	2	9	17	23
9	1	-10	2	125	30	26	18	19	3	7	21	26
10	1	-5	119	40	29	27	19	19	4	6	23	25
11	1	0	164	111	30	29	19	16	3	4	22	20
12	1	5	36	17	30	30	16	18	3	3	19	21
13	1	10	69	54	29	30	7	12	4	3	11	15
14	1	15	45	127	29	30	7	18	4	3	11	21
15	1	20	116	48	28	30	4	11	5	3	9	14
16	1	25	50	32	29	30	2	18	4	3	6	21
17	1	30	156	79	29	30	5	11	4	3	9	14
18	1	35	107	46	29	30	3	14	4	3	7	17
19	1	40	5	7	29	29	3	1	4	4	7	5
20	1	45	86	42	28	30	1	4	5	3	6	7
21	2	-45	104	167	31	29	18	19	2	4	20	23
22	2	-40	90	124	29	28	19	19	4	5	23	24

Obr. 47 - Ukázka tabulky vyhodnocení zvukové analýzy

Sloupec A „Pole“ obsahuje informaci, ve kterém poli se konkrétní drážka nachází. Informace o úhlu vyklonění se nachází ve sloupci B „Úhel příč. vyklonění“. Ve sloupcích C a D „Znáh. pořadí strana i“ jsou umístěna znáhodněná pořadí drážek pro jednotlivé strany. Tyto pořadí slouží pro zpětnou identifikaci záznamu, pokud by to bylo potřeba. Ve sloupcích E a F „Hlučnost strana i“ se nachází absolutní hodnoty dosažených hlučností pro vzorky ze strany 1 (sloupec E) a vzorky ze strany 2 (sloupec F). Sloupce G a H „Skupina strana i“ obsahují informace, do které skupiny byla frekvenční charakteristika obrábění konkrétní drážky zařazena. Body získané odečtením absolutní hodnoty hlučnosti od čísla 33, se nacházejí ve sloupcích I a J „Body hluk strana i“. Sloupce K a L „Strana i“ obsahují součty bodů získaných za umístění vzorků do skupiny a za hlučnost vzorků. Hodnoty umístěné v těchto sloupcích jsou dále použity při grafickém vyhodnocování výsledků. Sloupec K je součtem sloupců G a I, a součet sloupců H a J se nachází ve sloupci L.

## 6 Vyhodnocování naměřených dat

Všechna data, která byla naměřena a následně zpracována způsoby popsány v předchozí kapitole, jsou vyhodnocena pomocí grafů v tabulkovém procesoru Excel. Pro každou hodnotící odezvu bylo nejčastěji použito deseti grafů. V devíti grafech jsou vyobrazeny hodnoty konkrétní odezvy pro jednotlivá pole. Tyto grafy obsahují dvě, nebo čtyři datové řady – pro každou stranu polotovaru jednu, popřípadě dvě, pokud je potřeba sdělit další informace. V desátém grafu jsou obsaženy všechny získané hodnoty napříč poli jednoho parametru. Během práce bylo vytvořeno celkem 82 grafů, a tak vyobrazení všech grafů by bylo značně nepřehledné. V následujících kapitolách jsou proto vyobrazeny pouze vybrané grafy a ostatní jsou součástí příloženého DVD.

Výhodou grafické metody hodnocení je především její rychlost, přehlednost a názornost. Přesvědčivost takto vyhodnocených výsledků je celkem veliká, ale existují další metody vyhodnocování, které mohou poskytnout více informací o zkoumaném jevu a jejichž přesvědčivost je výrazně vyšší. Proto jsou nejdůležitější odezvy navíc vyhodnoceny pomocí statistiky.

Statistické vyhodnocení provedl Ing. Miroslav Gombár Ph.D. v programu Statistica. Hodnocenými odezvami jsou dvě složky řezných sil: radiální a tangenciální. Axiální složka řezných sil nebyla takto hodnocena, neboť na stabilitu řezu nemá tak výrazný vliv, jako zbylé dvě složky, protože tuhost kulové frézy v tomto směru je výrazně vyšší. Důvodem nehodnocení drsnosti povrchu pomocí statistiky je, že se změny příčného úhlu vyklonění projeví na této odezvě dosti nestandardně, jak je popsáno níže. Zvuková analýza také není statisticky hodnocena, protože metoda, kterou byly zvukové vzorky hodnoceny, zatím není dostatečně navržena pro obrábění s dělenou třískou, a proto mají výsledky zvukové analýzy v tomto experimentu spíše doplňkový charakter.

Radiální a tangenciální složky řezných sil jsou hodnoceny dvojím způsobem. Nejprve Ing. Gombár Ph.D. provedl lineární regresní analýzu závislosti jednotlivých složek řezných sil na úhlu příčného vyklonění zvlášť pro každé pole na obou stranách polotovaru. Poté pomocí ANOVY analýzy zkoumal vliv jednotlivých faktorů na velikosti zkoumaných složek řezných sil. Výsledky těchto analýz je možné vidět v podkapitole 6.1.4.

### 6.1 Řezné síly

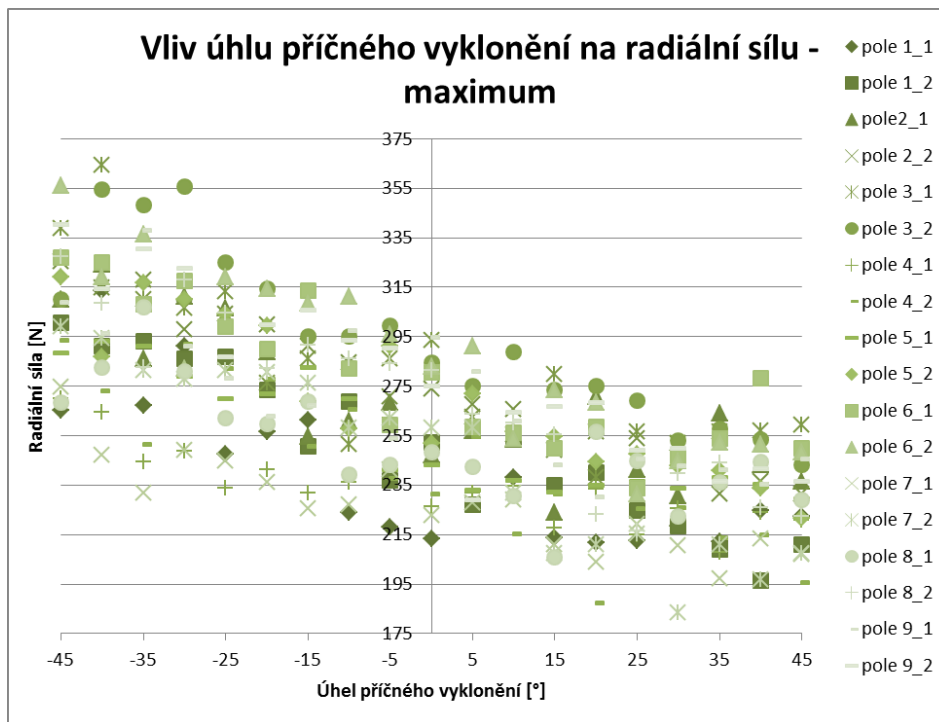
První skupinou hodnotících parametrů jsou řezné síly. Pokud řezné síly přesáhnou určitou, utlumitelnou mez, jejich působení má za následek ztrátu stability řezu. Rozkmitání soustavy se poté projeví dalším zvětšením řezných sil. Obecně tedy platí závislost, že čím jsou větší

velikosti řezných sil, tím je obráběcí proces méně stabilní. Této závislosti je využito při hodnocení zkoumané stability řezu. Jak je již zmiňováno výše, kulová fréza má jakožto dlouhý tenký nástroj velmi rozdílné tuhosti v jednotlivých směrech. Proto i jednotlivé složky řezných sil jsou hodnoceny samostatně.

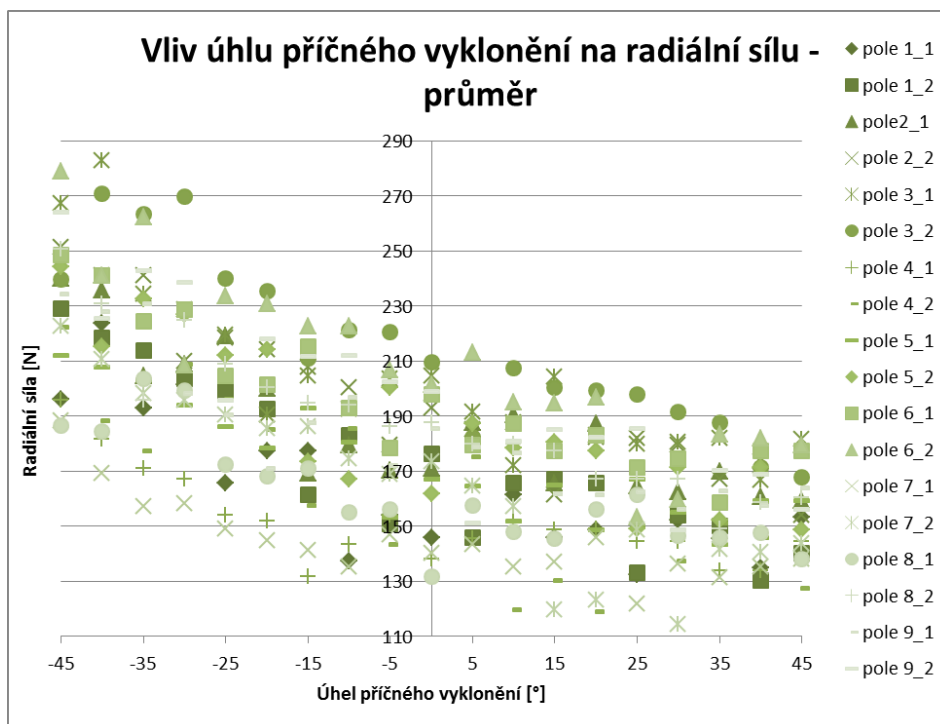
### 6.1.1 Radiální složka řezných sil

Radiální složka síly se snaží odtlačit frézu do strany. Tato složka má v experimentu na stabilitu řezu největší vliv, protože kulová fréza má nejmenší tuhost právě v tomto směru a riziko ztráty stability je proto značné.

Jak je již popisováno výše, hodnoty radiálních sil pro jednotlivé drážky jsou vypočítávány ze změřených ohybových momentů. Protože se jedná o nejdůležitější ukazatel výsledků, jsou hodnoty radiální síly graficky hodnoceny dvěma způsoby. Nejprve klasicky, jako u ostatních složek řezných sil, a poté s použitím průměrovacího filtru (více viz kapitola 5.1.2). Průběhy radiální složky sil napříč všemi poli bez použití filtru a s použitím filtru jsou vyobrazeny na grafech (Graf 11, Graf 12)

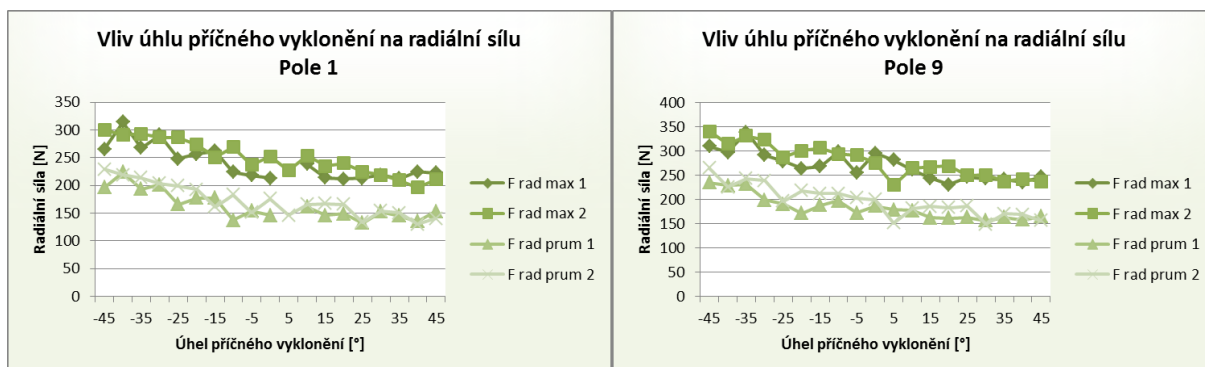


Graf 11 - Průběh radiální síly napříč poli - maximum



Graf 12 - Průběh radiální síly napříč poli - průměr

Z těchto grafů lze vypočítat, že velikost radiální složky řezných sil klesala s rostoucím úhlem příčného vyklonění. Na grafu (Graf 11) jsou vyobrazeny hodnoty získané klasickým způsobem, graf (Graf 12) ukazuje hodnoty vypočítané z naměřených momentů, kdy křivka byla vyhlazena použitím filtru. Oba grafy mají shodný, klesající průběh, liší se pouze ve velikosti vyobrazených hodnot. Rozdíl hodnot je více patrný z grafů (Graf 13) který vyobrazuje průběh řezných sil v poli 1 a poli 9.



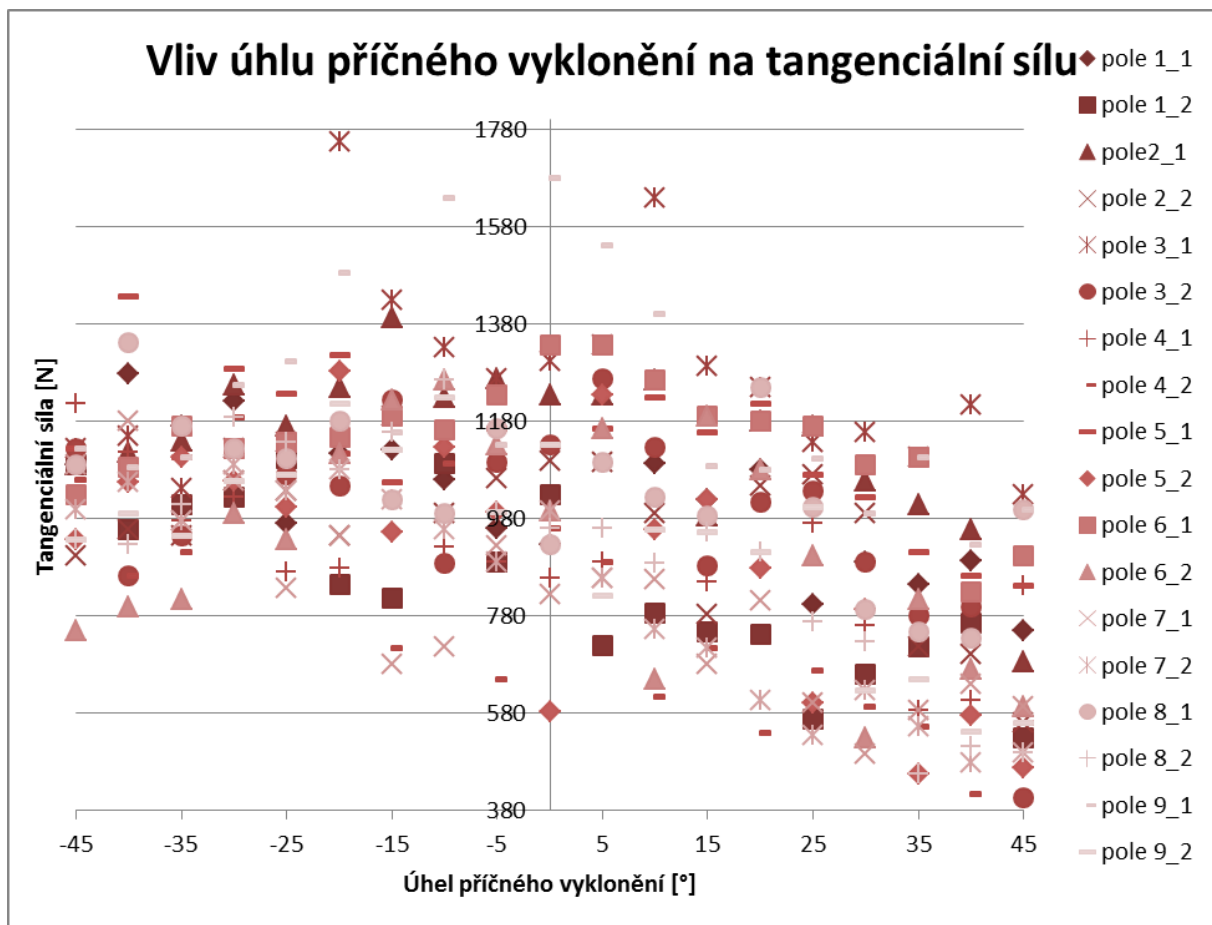
Graf 13 - Průběh radiální síly v poli 1 (vlevo) a v poli 9 (vpravo)

Datové řady „F rad max i“ označují průběh sil získaných klasickým způsobem a řady označené „F rad prum i“ obsahují hodnoty získané s použitím filtru. Parametr „i“ zde označuje stranu polotovaru. Z těchto grafů lze vypočítat, že rozdíl mezi těmito hodnotami je kolem 75 N a je přibližně stejný pro všechny hodnoty. Skutečnosti odpovídají síly získané bez použití filtru. Dále lze v grafech vidět, že rozdíl sil při úhlu příčného vyklonění  $\beta_n = -45^\circ$  a  $\beta_n = +45^\circ$  je přibližně 100 N. Oproti nevykloněnému nástroji ( $\beta_n = 0^\circ$ ) je při maximálním kladném vyklonění radiální síla příznivější asi o 35 N. Na grafu jsou vyobrazeny průběhy sil pouze pro pole 1 s nejnižšími řeznými podmínkami a pro pole 9, ve kterém byly řezné podmínky v rámci experimentu nejvyšší. Grafy pro ostatní pole jsou součástí příloh

na přiloženém DVD. Zvýšením řezných podmínek<sup>4</sup> se velikost sil zvětšila přibližně o 30 N. V grafu pro pole 1 si lze všimnout absence hodnoty radiální složky síly pro hodnotu výklonu  $\beta_n = 5^\circ$ . Tato hodnota nebyla naměřena, protože kvůli nepozornosti byl záznam řezných sil jednou ukončen po ujetí pouze osmi drah. Nicméně naměřených dat je takové množství, že absence jedné hodnoty nemá vliv na celkové výsledky.

### 6.1.2 Tangenciální složka řezných sil

Tangenciální složka řezných sil je druhou nejdůležitější odezvou při vyhodnocování experimentu, protože může způsobit torzní kmitání. Radiální složka řezných sil je vypočtena z krouticího momentu. Průběh této složky sil napříč všemi poli je vyobrazen na grafu (Graf 14)

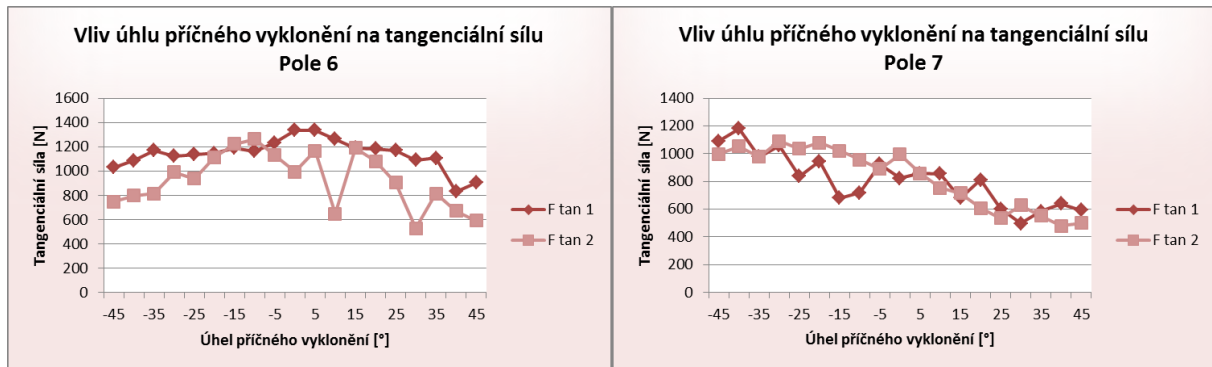


Graf 14 - Průběh radiální síly napříč poli

Z uvedeného grafu vyplývá, že i tato složka má s kladnějšími hodnotami úhlu příčného vyklonění převážně klesající průběh. V záporných úhlech příčného výklonu je klesání méně výrazné, a v některých polích se v určitých intervalech úhlů vyskytuje dokonce mírně rostoucí tendence. Od úhlu  $\beta_n = 0^\circ$  do maximálního úhlu výklonu  $\beta_n = +45^\circ$  je pokles sil již výraznější. Průběhy tangenciální složky sil pro pole 6 a pole 7 je možné vidět na grafech (Graf 15). Průběhy sil pro ostatní pole je opět možné nalézt v přílohách na přiloženém DVD.

<sup>4</sup> v poli 1 je  $f_z = 0,2$  mm/zub;  $n = 3000$  ot/min a pro pole 9 je  $f_z = 0,3$  mm/zub;  $n = 4000$  ot/min



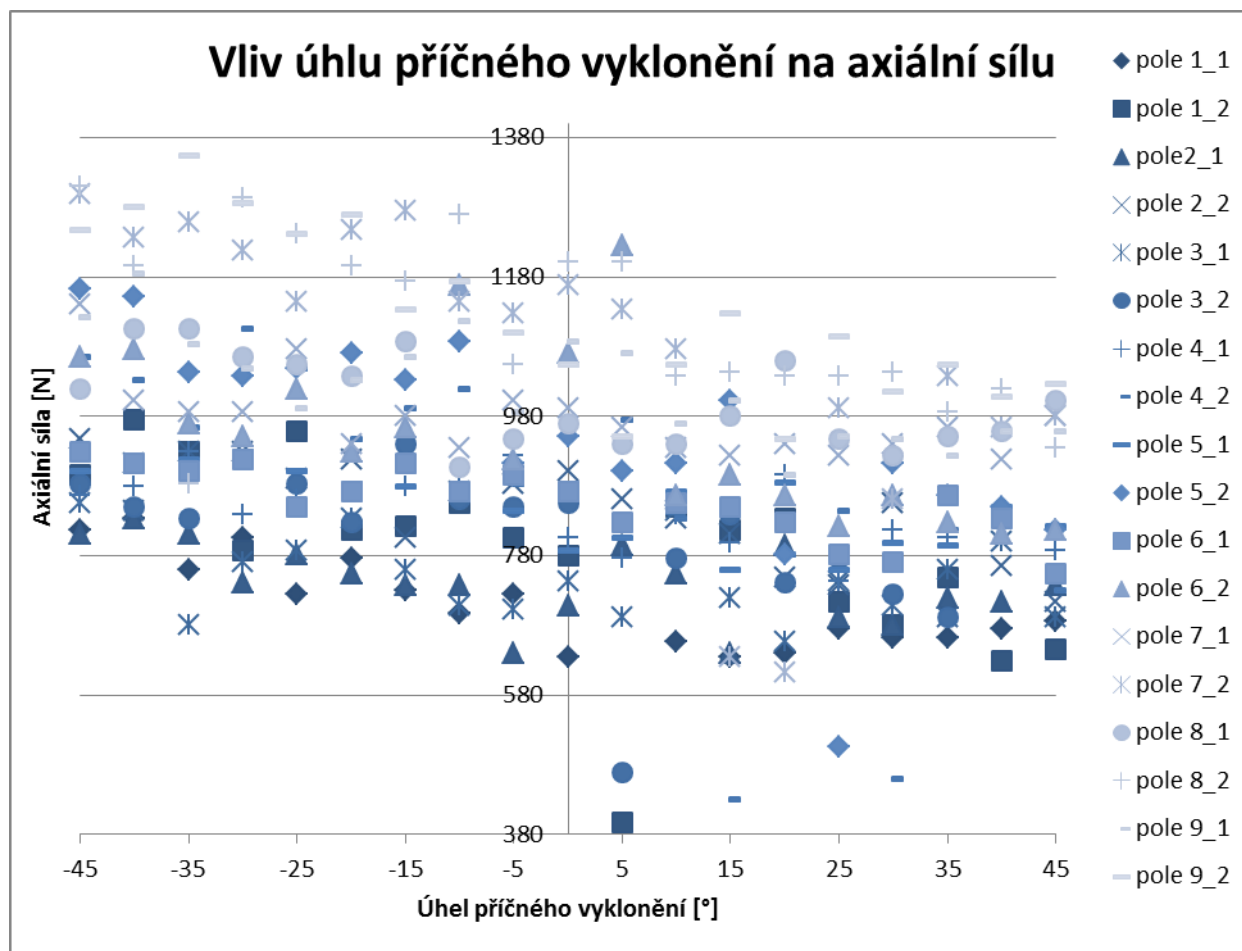


**Graf 15 - Průběh tangenciální síly v poli 6 (vlevo) a v poli 7 (vpravo)**

Datová řada „F tan 1“ ukazuje hodnoty průběhu tangenciální složky sil na první straně polotovaru a řada označená jako „F tan 2“ se skládá z hodnot získaných na druhé straně polotovaru. Ze srovnání těchto dvou polí je patrné, že tangenciální složka řezných sil nevykazuje tak jednoznačný průběh, jako složka radiální. Nicméně průběhy sil v obou polích ukazují, že při kladných úhlech výklonu mají velikosti sil příznivější hodnoty, než při výklonu záporném. Při porovnání dosažených hodnot při úhlech výklonu  $\beta_n = -45^\circ$  a  $\beta_n = +45^\circ$  se tangenciální složka řezných sil v poli 6 zlepšila o přibližně 170 N, v poli 7 bylo toto zlepšení kolem 500N. Nejlepších hodnot bylo dosaženo při největším zkoumaném úhlu vyklonění. Zlepšení oproti nevykloněnému nástroji je asi 450 N v šestém poli a přibližně 400 N v poli sedmém.

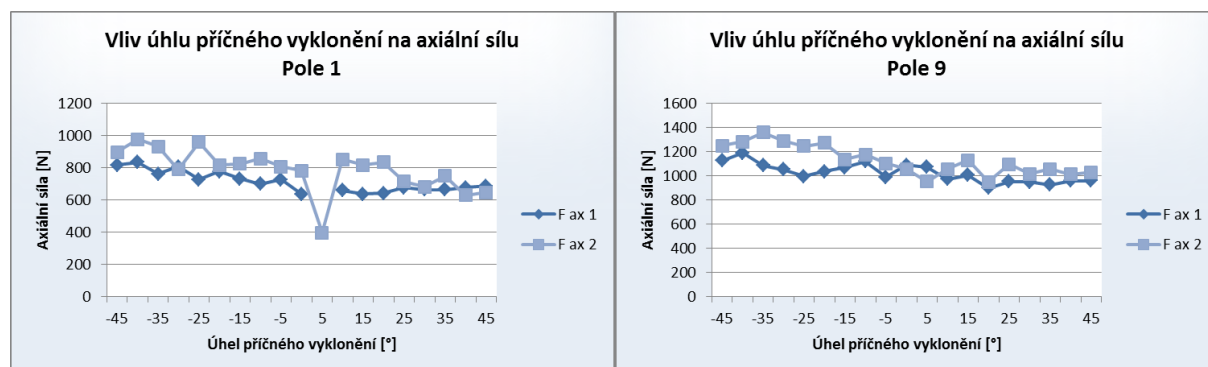
### 6.1.3 Axiální složka řezných sil

Axiální složka řezných sil je jediná složka, kterou zaznamenával dynamometr přímo a pro kterou tedy nebyl nutný žádný výpočet. Tato složka má během experimentu na stabilitu řezu nejmenší vliv, protože se v tomto směru nachází velké množství materiálu a tuhost je tudíž řádově větší, než ve směru radiálním. Průběh této složky síly ve všech polích je vyobrazen na grafu (Graf 16).



Graf 16 - Průběh axiální síly napříč poli

Z grafu lze vypožorovat, že i tato složka řezných sil má se zvyšujícím se úhlem výrazně klesající tendenci. Axiální složka sil jako jediná výrazně reaguje na zvyšování řezných podmínek. Se zvyšujícími se hodnotami řezných podmínek (vyšší označení poli), velikost této složky síly také výrazně roste. Průběhy sil v pro pole 1 a 9 lze vidět na grafech (Graf 17). Průběhy pro ostatní pole jsou součástí příloh na příloženém DVD.



Graf 17 - Průběh axiální síly v poli 1 (vlevo) a v poli 9 (vpravo)

Hodnoty naměřené na první straně polotovaru nesou označení „F ax 1“ a hodnoty z obrábění na straně druhé jsou označeny „F ax 2“. Ve zkoumaném intervalu úhlů příčného vyklonění se velikost síly zmenšila přibližně o 150 N. Rozdíl sil mezi poli 1 s nejmenšími řeznými podmínkami a poli 9 s největšími řeznými podmínkami je více než 350 N. V grafu nalevo (pole 1) je možné vidět výrazný propad hodnoty axiální síly při úhlu vyklonění  $\beta_n = +5^\circ$ .

Bohužel kvůli nepozornosti při měření není dostupná hodnota řezné síly v poli 1 na první straně polotovaru při tomto úhlu výklonu, a tak není možné určit, zda se jedná o chybu měření, nebo o velmi zajímavou kombinaci řezných podmínek. Podobný, i když menší, propad hodnoty axiální složky síly při  $\beta_n = +5^\circ$  vykazuje i průběh hodnot v poli 3. Ve zbylých polích, ani u ostatních složek řezných sil, se ale toto zlepšení neprojevílo, a tak není možné tomuto jevu přiřadit větší význam.

#### 6.1.4 Statistické vyhodnocení složek řezných sil

Jak je již zmiňováno výše, dvě hlavní odezvy jsou hodnoceny pomocí statistiky. Statisticky jsou hodnoceny radiální a tangenciální složky řezných sil, protože nejvíce vypovídají o stabilitě řezu. Obě složky jsou hodnoceny dvěma způsoby: nejprve lineární regresní analýzou pro průběhy sil v jednotlivých polích a poté ANOVOU analýzou, při které byl zkoumán vliv jednotlivých faktorů na výsledky řezných sil.

Pro statistické vyhodnocení radiální složky sil byly použity hodnoty, které byly vypočítány z hodnot momentů získaných bez použití průměrovacího filtru. Tyto hodnoty jsou v předchozích kapitolách označeny „F rad max i“. Toto značení je zachováno i při statistickém hodnocení tohoto parametru. Tangenciální složka síly je označena „F tan i“ přičemž „i“ značí stranu polotovaru, na kterém byl záznam pořízen.

##### 6.1.4.1 Regresní analýza

Při vyhodnocování výsledků pomocí regresní analýzy byla získanými hodnotami vhodně proložena přímka a následně bylo ověřováno, na kolik odpovídá skutečný průběh radiální složky sil průběhu proložené přímky. V přílohách na přiloženém DVD jsou obsaženy všechny grafy pro jednotlivé průběhy včetně doplňujících tabulek, v této kapitole je pouze ukázka několika grafů bez tabulek, protože nejdůležitější parametry jsou obsaženy v popisu grafu.

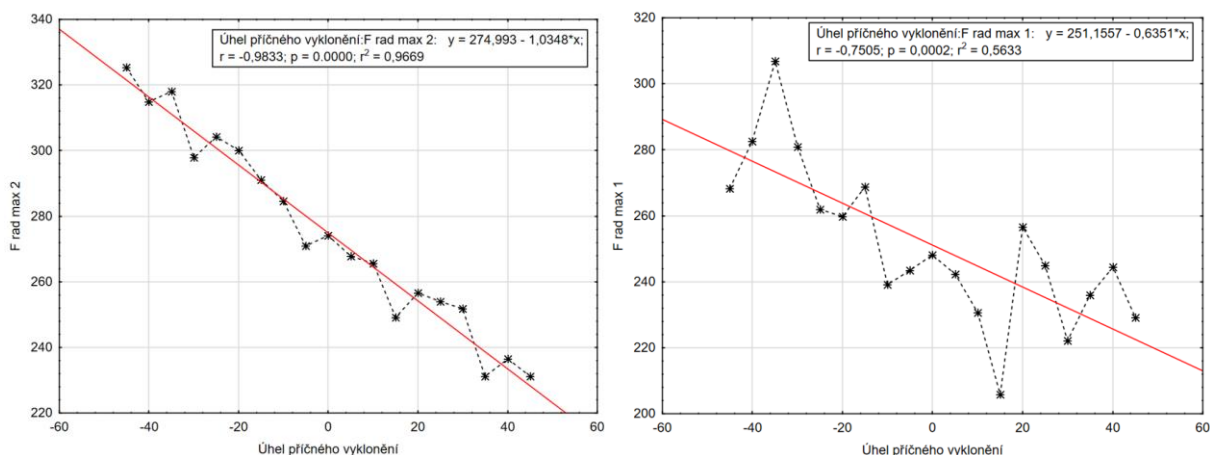
Nejdůležitějšími parametry při zjišťování, zda skutečný průběh odpovídá průběhu proložené křivky, jsou: vícenásobný korelační koeficient  $r^2$ , a dosažená hladina významnosti  $p$ . Hodnota vícenásobného korelačního koeficientu  $r^2$  je ukazatelem, na kolik procent se shoduje skutečný průběh sil s proloženou křivkou. Dosažená hladina významnosti ukazuje, jaká je pravděpodobnost, že bude zamítnuta nulová hypotéza, přestože je platná. Při uvažované hladině významnosti 95% musí být  $p < 0,05$ , což v experimentu splňují všechny průběhy radiální složky síly, a většina průběhů složky tangenciální, jak lze vidět v tabulce (Tab. 12).

Parametr		pole 1	pole 2	pole 3	pole 4	pole 5	pole 6	pole 7	pole 8	pole 9
F rad max 1	p	0,000091	0,000015	0,000021	0,000036	0,000000	0,000002	0,000001	0,000214	0,000017
	$r^2$	0,626382	0,677268	0,665388	0,643396	0,819857	0,739509	0,756404	0,563322	0,673573
F rad max 2	p	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
	$r^2$	0,909475	0,966902	0,848595	0,759219	0,847680	0,814231	0,900259	0,855369	0,841331
F tan 1	p	0,000057	0,018124	0,762712	0,000123	0,001412	0,295198	0,000004	0,001575	0,208176
	$r^2$	0,647382	0,286797	0,005507	0,589764	0,460073	0,064214	0,725322	0,453483	0,091479
F tan 2	p	0,000013	0,038044	0,026229	0,000034	0,000916	0,218257	0,000000	0,000148	0,001167
	$r^2$	0,683124	0,229335	0,258504	0,646136	0,485564	0,087715	0,861882	0,581187	0,471450

Tab. 12 - Hodnoty  $p$  a  $r^2$  pro jednotlivé průběhy

V této tabulce jsou hodnoty dosažených hladin významnosti a hodnoty vícenásobných korelačních koeficientů pro obě složky řezných sil ve všech polích na obou stranách polotovaru. U dosažené hladiny významnosti platí, že čím menší je hodnota  $p$ , tím je navržený model významnější. Vícenásobný korelační koeficient značí, na kolik procent odpovídá navržený model skutečnému průběhu. Pokud by se  $r^2 = 1$ , navržený model by odpovídal skutečnému průběhu na 100%.

Na následujících grafech (Graf 18) je možné vidět ukázkou průběhů radiální složky sil.

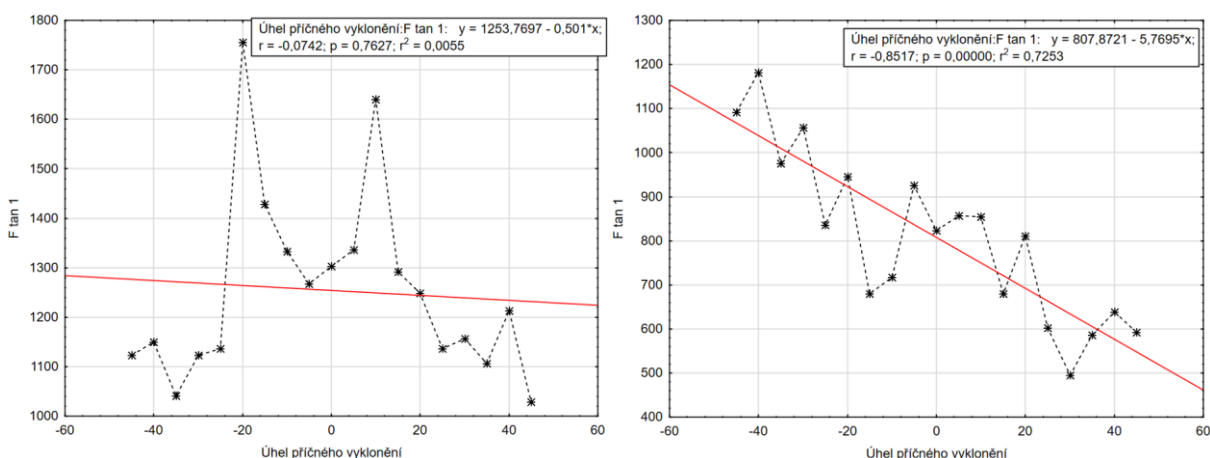


**Graf 18 - Regresní analýza pro F rad max 2 v poli 2 (vlevo) a pro F rad max 1 v poli 8 (vpravo)**

Proložené křivky mají u všech průběhů klesající tendenci s poměrně podobným úhlem klesání. Na grafu vlevo je možné vidět průběh radiální síly v poli 2 na druhé straně polotovaru. Tento průběh se s proloženou křivkou shoduje na 96,7%, jak lze vyčíst z hodnoty vícenásobného korelačního koeficientu  $r^2$ . Vlevo se nachází průběh radiální složky v poli 8 na první straně polotovaru. Tento průběh odpovídá proložené křivce pouze na 56,3%, což je nejméně ze všech průběhů radiální síly, jak lze vidět v tabulce (Tab. 12).

Uvedené výsledky ukazují, že ve všech polích na obou stranách polotovaru existuje při hladině významnosti 95% závislost mezi příčným úhlem vyklonění vlečeného kulového nástroje a velikostí radiální složky řezné síly. Průběh této složky je vždy klesající s rostoucí hodnotou úhlu vyklonění.

Na následujících grafech (Graf 19) se nachází ukázkou průběhů tangenciální složky sil.



**Graf 19 - Regresní analýza pro F tan 1 v poli 3 (vlevo) a pro F tan 1 v poli 7 (vpravo)**

V grafu vlevo se nachází průběh tangenciální složky sil v poli 3 na první straně polotovaru. U tohoto průběhu je hodnota dosažené hladiny významnosti  $p = 0,76$  tedy 76%. Aby bylo

možné model považovat za statisticky významný, je nutné, aby hodnota  $p < 0,05$ , což tento průběh opravdu nespĺňuje. Podmínku také nespĺňují průběhy tangenciální složky sil v poli 6 na obou stranách polotovaru a v poli 9 na první straně polotovaru. Tyto hodnoty jsou v tabulce (Tab. 12) označeny červeně. V těchto polích je průběh tangenciální složky sil odlišný od zbytku experimentu (průběh sil v poli 6 je možné vidět na grafu (Graf 15) výše.). Zajímavé je, že tyto odlišné průběhy byly zaznamenány vždy při největší hodnotě posuvu  $f_z = 0,3$  mm/zub. U této hodnoty posuvu síly zřetelněji vykazovaly mírně rostoucí průběh v záporných hodnotách příčného výklonu, a od úhlu  $\beta_n = 0^\circ$  byl průběh výrazněji klesající. Z tabulky (Tab. 12) lze vyčíst, že ani na druhé straně polotovaru průběh sil v těchto polích příliš neodpovídal průběhu proložené klesající přímkou. Tomuto pozoruhodnému jevu by bylo vhodné se ještě dále věnovat. Je možné, že pokud by byl zkoumán větší posuv na zub, průběhy tangenciální složky síly by více odpovídaly průběhům, které jsou v této práci považovány za nestandardní. V grafu vpravo se nachází průběh tangenciální složky sil v poli 7 na první straně polotovaru. Zde proložená křivka odpovídá skutečnému průběhu na 72%.

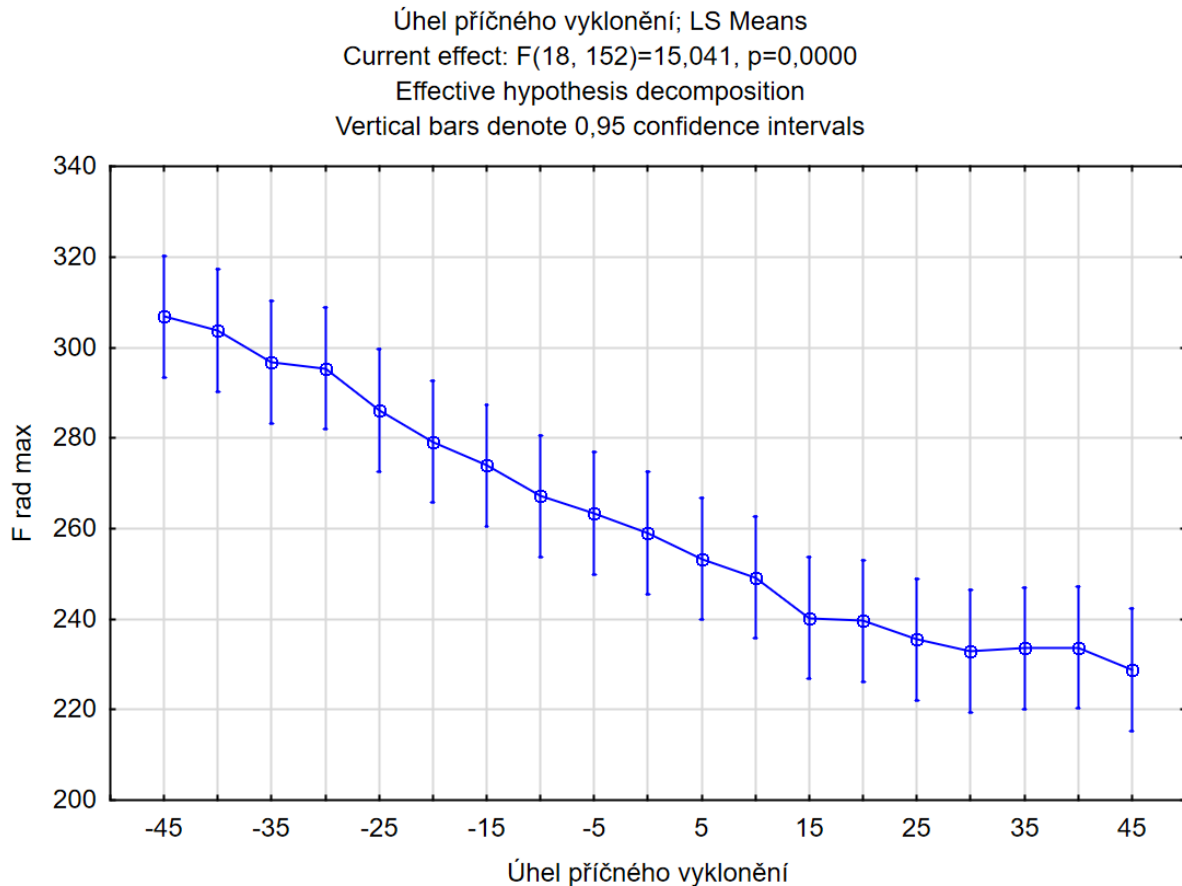
Přímky proložené jednotlivými poli mají vždy klesající tendenci, ale úhel, pod kterým přímky klesají, má mnohem větší rozptyl, než úhel přímkou proložené průběhy radiální složky síly. Z výsledků lze vyvodit, že i přes mírně rostoucí tendenci v záporných úhlech příčného výklonu, má průběh radiální složky celkově klesající průběh s narůstajícím úhlem příčného výklonu  $\beta_n$ . Statistická přesvědčivost tohoto tvrzení je sice významná, ale o něco nižší, než u tvrzení o radiální složce sil.

#### 6.1.4.2 ANOVA analýza

Pravděpodobně zajímavější výsledky ukázala ANOVA analýza kde Ing. Gombár Ph.D. zkoumal vliv jednotlivých faktorů na velikost radiální a tangenciální složky řezných sil. Při této analýze byly zprůměrovány hodnoty získané při stejných řezných podmínkách na obou stranách polotovaru. Aby bylo možné tuto analýzu provést, je potřeba, aby faktor byl diskrétní veličina, a odezva musí mít spojitý charakter. Zkoumanými faktory jsou úhly výklonu, typ vyklonění a vliv pole. Odezvami jsou vždy velikosti řezných sil. Jelikož jsou úhly výklonu  $\beta_n$  zkoumány s pevně daným krokem  $5^\circ$ , je tato podmínka vždy splněna. Grafické znázornění ukazuje vždy střední hodnotu a velikost rozptylu odezvy v závislosti na zkoumaných faktorech. Velikost rozptylů je reprezentována velikostí svislých čar u jednotlivých hodnot.

Soubor zpracování výsledků obsahuje grafické zpracování výsledků, doprovodné tabulky obsahující informaci o statistické významnosti výsledků, a tabulky obsahující data vyobrazená v grafech. Kvůli velkému množství informací budou v následujících odstavcích vyobrazena pouze grafická řešení, zbytek informací je součástí příloh na přiloženém DVD. Všechny níže uvedené modely jsou statisticky významné na zvolené hladině významnosti  $\alpha = 95\%$ , protože u všech modelů je  $p < 0,05$ .

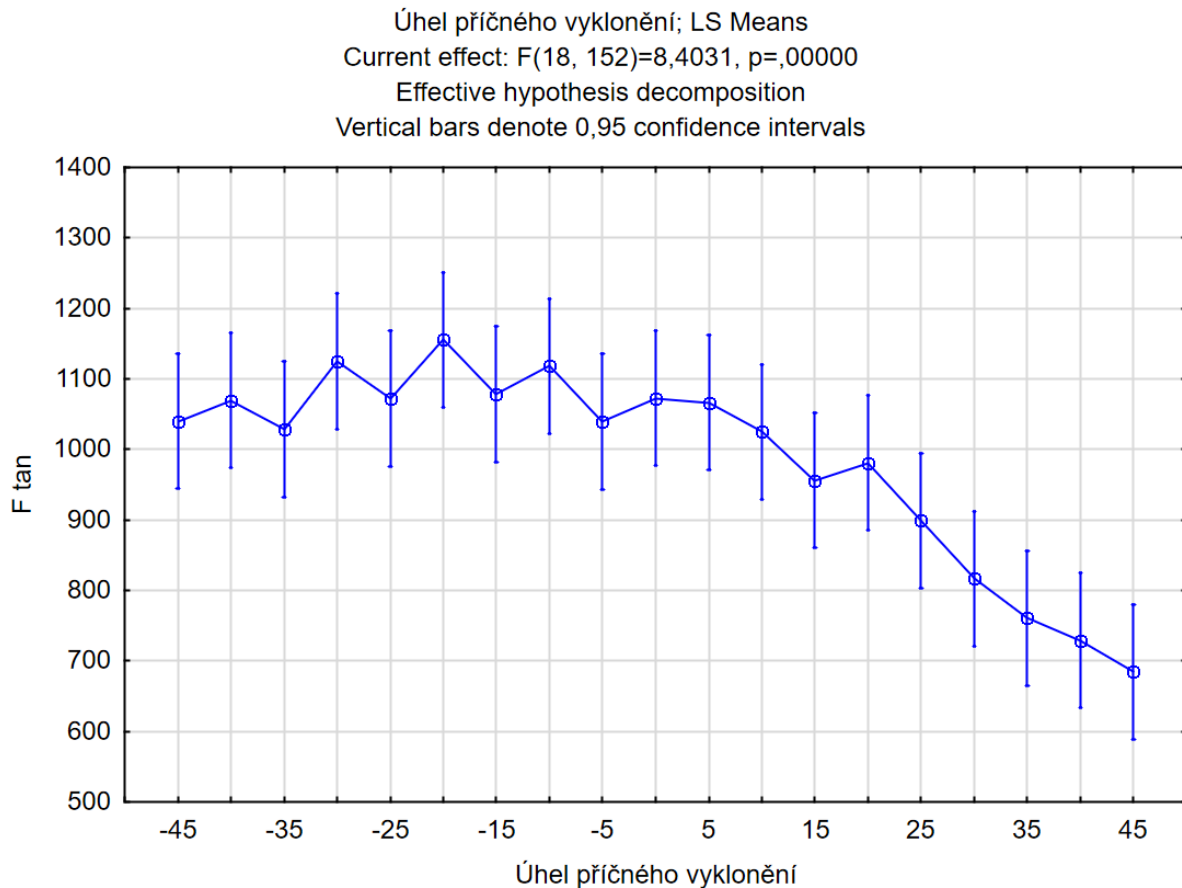
Prvním zkoumaným faktorem je úhel příčného vyklonění  $\beta_n$ . Grafické zpracování závislosti radiální složky řezných sil na tomto faktoru napříč všemi poli je možné vidět na následujícím grafu (Graf 20).



**Graf 20 - Závislost F rad max na úhlu příčného výklonu**

V grafu je možné vidět, že hodnoty radiální složky síly jsou s rostoucím úhlem výklonu  $\beta_n$  výrazně klesající a závislost má téměř lineární průběh. Při nejmenším úhlu výklonu  $\beta_n = -45^\circ$  je střední hodnota radiální složky síly 307 N. U nevykloněného nástroje má tato složka síly hodnotu 259 N a při maximálním vyklonění  $\beta_n = +45^\circ$  dosahuje radiální složka síly hodnoty 229 N. Na celém intervalu tedy poklesla síla o 78 N, což je přibližně 26%. Při maximálním úhlu výklonu je velikost síly o 30 N, tedy o 12% menší, než u nevykloněného nástroje.

Na grafu (Graf 21) se nachází závislost tangenciální síly na úhlu příčného vyklonění získaná ANOVOU analýzou.

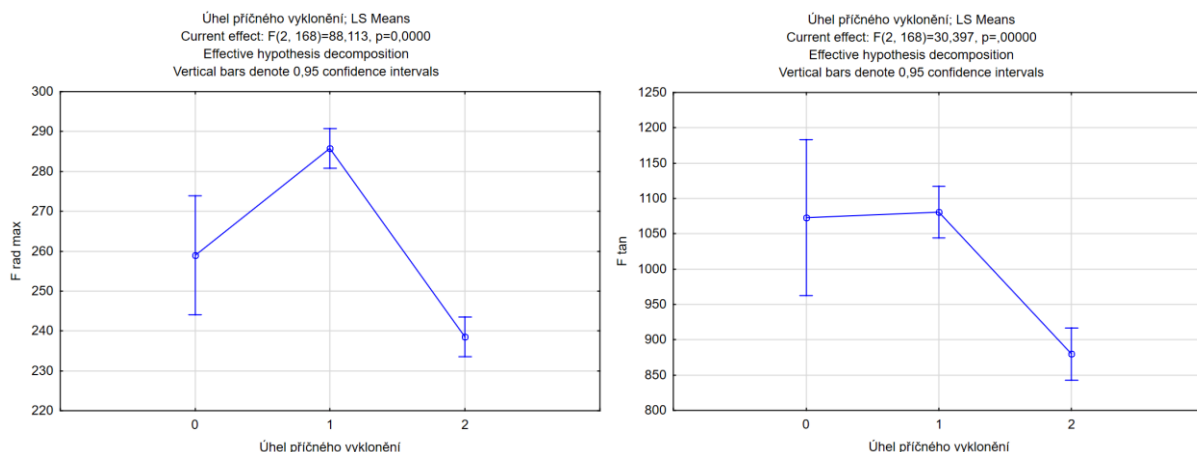


**Graf 21 - Závislost  $F_{\tan}$  na úhlu příčného výklonu**

Tento graf ukazuje, že velikost tangenciální složky řezných sil se skutečně mírně zvětšuje v záporných hodnotách úhlů příčného výklonu a střední hodnota tangenciální složky nabývá maximální hodnoty 1155 N při úhlu  $\beta_n = -20^\circ$ . Při úhlu výklonu  $\beta_n = -45^\circ$  je velikost síly 1040 N. Rozdíl mezi těmito hodnotami je tedy 110 N. Síla se zvýšila přibližně o 11%. Od úhlu  $\beta_n = -20^\circ$  velikosti sil klesají až do konce zkoumaného intervalu. Při úhlu  $\beta_n = +45^\circ$  dosahuje střední hodnota tangenciální složky síly hodnoty 684 N. Tato hodnota je o 471 N menší, tedy o 41%, než hodnota maximální. Při obrábění nevykloněným nástrojem byla hodnota této složky síly 1072 N, tedy velmi podobná hodnotě při minimálním úhlu výklonu. Na grafu je také možné si povšimnout zvlnění hodnot v záporných úhlech výklonu. Toto kolísání není příliš výrazné s ohledem na celkovou velikost sil a je pravděpodobně způsobené nahodilostními vlivy.

Druhým faktorem, kterým se Ing. Gombár Ph.D. věnoval, je typ vyklonění. Zde porovnával hodnoty jednotlivých složek řezných sil při vyklonění vlečené frézy do záporných a kladných úhlů výklonu, s hodnotami sil získanými při obrábění s nevykloněným nástrojem. Následující grafy (Graf 22) vyobrazují tuto závislost pro jednotlivé zkoumané složky řezných sil. V grafech je použito toto kódování:

- 0 – nevykloněný vlečený nástroj,
- 1 – vlečený nástroj je vykloněn do záporných úhlů  $\beta_n$ ,
- 2 – vlečený nástroj je vykloněn do kladných úhlů  $\beta_n$ .



**Graf 22 - Závislost radiální (vlevo) a tangenciální (vpravo) složky řezných sil na typu vyklonění**

Radiální složka řezných sil má největší velikosti při negativních úhlech výklonu, tedy v oblasti, kde se záběrové podmínky podobají nesouslednému obrábění. U tangenciální složky není téměř žádný rozdíl mezi obráběním s nevykloněnou vlečenou frézou a s vlečenou frézou vykloněnou do negativních úhlů příčného vyklonění. Při kladných úhlech výklonu vlečeného nástroje jsou obě složky řezných sil výrazně nižší. Tyto výsledky tedy jednoznačně potvrzují hypotézu, že s kladným příčným vykloněním vlečeného nástroje je obrábění stabilnější, což se mimo jiné projevuje poklesem sil.

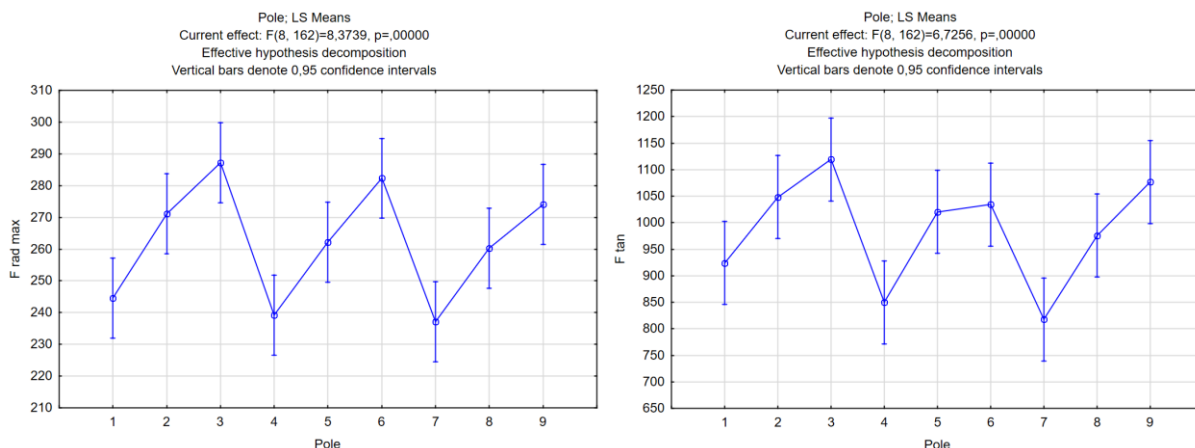
Posledním vlivem, který Ing. Gombár Ph.D. zkoumal, byl vliv pole a tedy použitých řezných podmínek. Pro přehlednost je zde uvedena tabulka (Tab. 1) řezných podmínek, která se nachází v kapitole 4.1.

Parametr	Pole 1	Pole 2	Pole 3	Pole 4	Pole 5	Pole 6	Pole 7	Pole 8	Pole 9
$f_z$ [mm/zub]	0,2	0,25	0,3	0,2	0,25	0,3	0,2	0,25	0,3
$n$ [ot/min]	3000	3000	3000	3500	3500	3500	4000	4000	4000
$v_{ceff}$ [m/min] pro $\beta_n = 0^\circ$	54,9	54,9	54,9	64,1	64,1	64,1	73,3	73,3	73,3
$\beta_f$ [°]	15								
$a_p$ [mm]	0,6								
$D_{eff}$ [mm] pro $\beta_n = 0^\circ$	5,83								

**Tab. 13 - Skutečně použité řezné podmínky**

Na následujících grafech (Graf 23) je uveden vliv pole na velikost obou zkoumaných složek řezných sil.



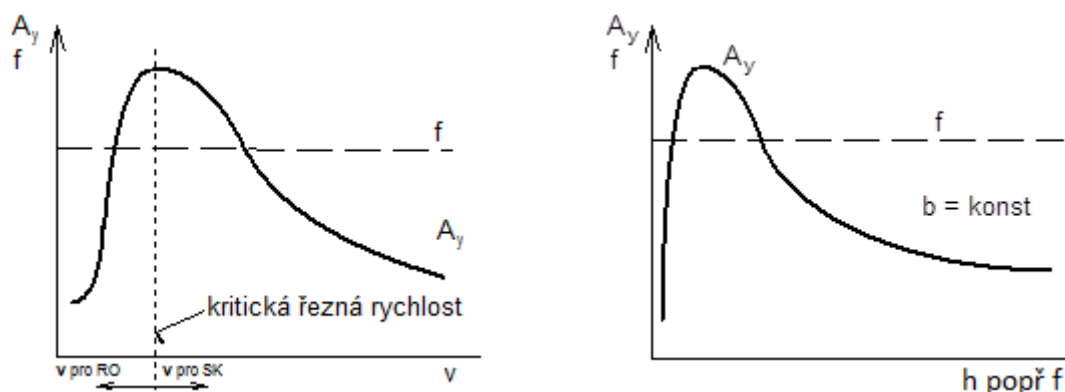


Graf 23 - Vliv pole na velikost radiální (vlevo) a tangenciální (vpravo) složky řezných sil

Oba dva grafy ukazují stejný průběh velikostí řezných sil v závislosti na jednotlivých polích. Pouze u tangenciální složky se pole 6 mírně odchyloje od plánovaného průběhu. Pro zjištění příčin této odchylky by byla nutná hlubší analýza problému, ale tato odchylka může mít souvislost s tím, že průběhy radiální složky síly na obou stranách polotovaru neodpovídaly průběhu v ostatních polích a nebylo možné pro ně vytvořit statistický model na zvolené hladině významnosti, jak je uvedeno výše.

Nicméně z grafů lze vyčíst velmi zajímavé závislosti mezi velikostí řezných sil a zkoumanými řeznými podmínkami. Se zvyšujícím se posuvem na zub rostly velmi výrazně také řezné síly. Lze tedy říci, že se zvyšujícím se posuvem klesá stabilita řezu. Pokud se zvyšovaly otáčky vřetene, řezné síly naopak mírně klesaly (viz porovnání polí 1, 4, 7; 2, 5, 8; a 3, 6, 9). Zvyšování otáček a tedy i řezné rychlosti má za následek uklidnění řezu.

V teoretické části práce v kapitole 2.3.1, jsou uvedeny jednotlivé vlivy faktorů na stabilitu řezu. Sice je zde uveden vliv řezné rychlosti, nikoliv otáček, ale vzhledem k tomu, že řezná rychlost je v přímém vztahu s otáčkami vřetene, lze předpokládat, že na stabilitu řezu působí stejným vlivem. Oba zkoumané faktory mají na stabilitu řezu proměnný vliv, jak lze vidět v následujících grafech (Graf 24).



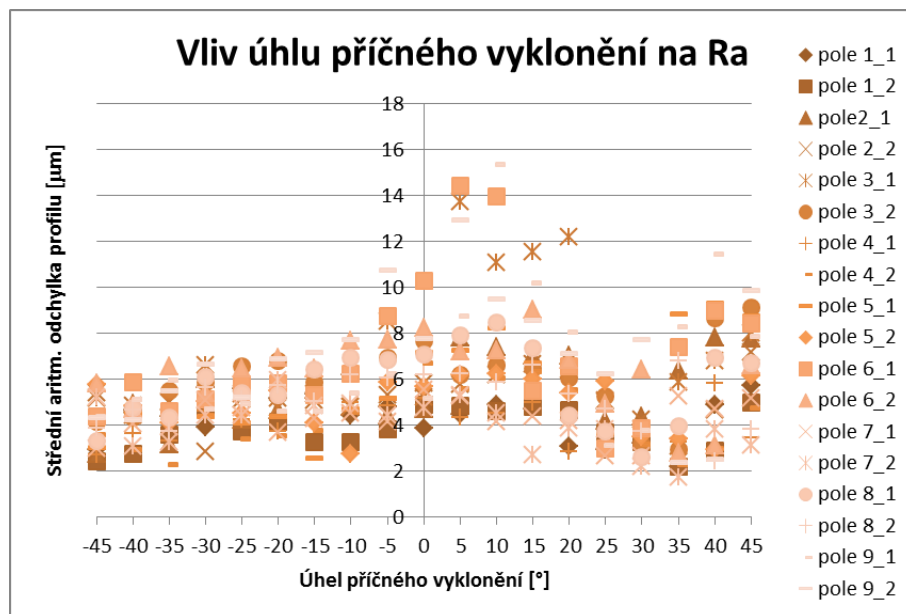
Graf 24 - Vliv řezné rychlosti (vlevo) a posuvu (vpravo) na stabilitu řezu [6]

Pokud se získané poznatky porovnají s těmito teoretickými poznatky, lze uvažovat, že z hlediska řezné rychlosti se řezné podmínky nacházely nad kritickou řeznou rychlostí, kdy se zvyšujícími se podmínkami roste stabilita obrábění. A z hlediska posuvu se zvolené řezné podmínky pravděpodobně nacházely v první části grafu, kde se stabilita prudce zhoršuje se zvyšující se hodnotou posuvu.

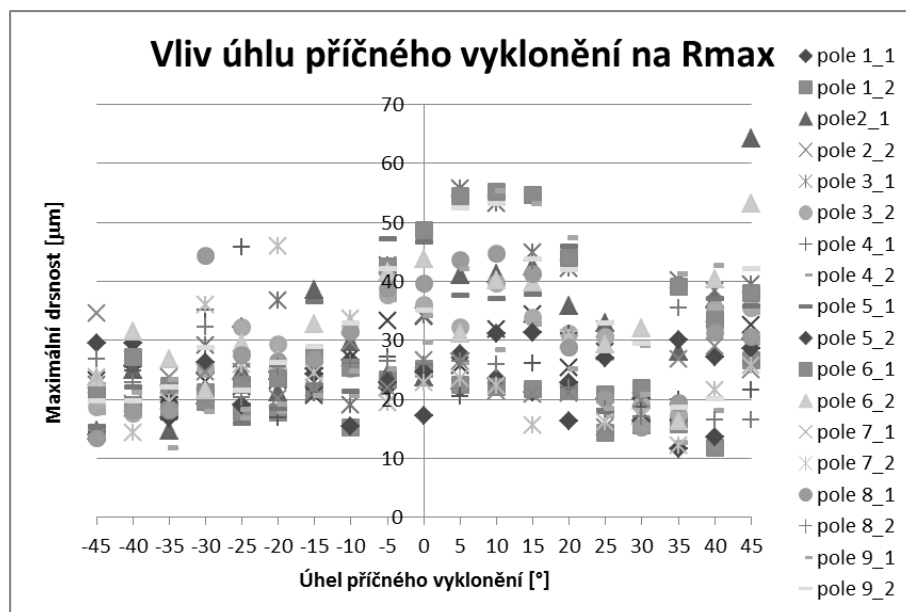
## 6.2 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu má velkou vypovídající schopnost o průběhu obrábění. Ztráta stability řezu se projevuje výrazným zhoršením kvality obrobeneho povrchu, protože dochází k nesourodému odebrání materiálu.

Jak je již zmiňováno výše, drsnost povrchu byla hodnocena pomocí čtyř parametrů Ra, Rz, Rmax a Rt. Protože průběhy Rz jsou velmi podobné průběhu Ra a parametr Rt vykazuje velmi podobnou závislost na úhlu příčného vyklonění jako odezva Rmax, budou v této kapitole popsány pouze parametry Ra a Rmax. Grafy pro zbylé dvě odezvy jsou součástí příloh na přiloženém DVD. Vliv příčného vyklonění vlečené kulové frézy na drsnost obrobeneho povrchu napříč všemi poli lze vypořizovat v následujících grafech (Graf 25, Graf 26).



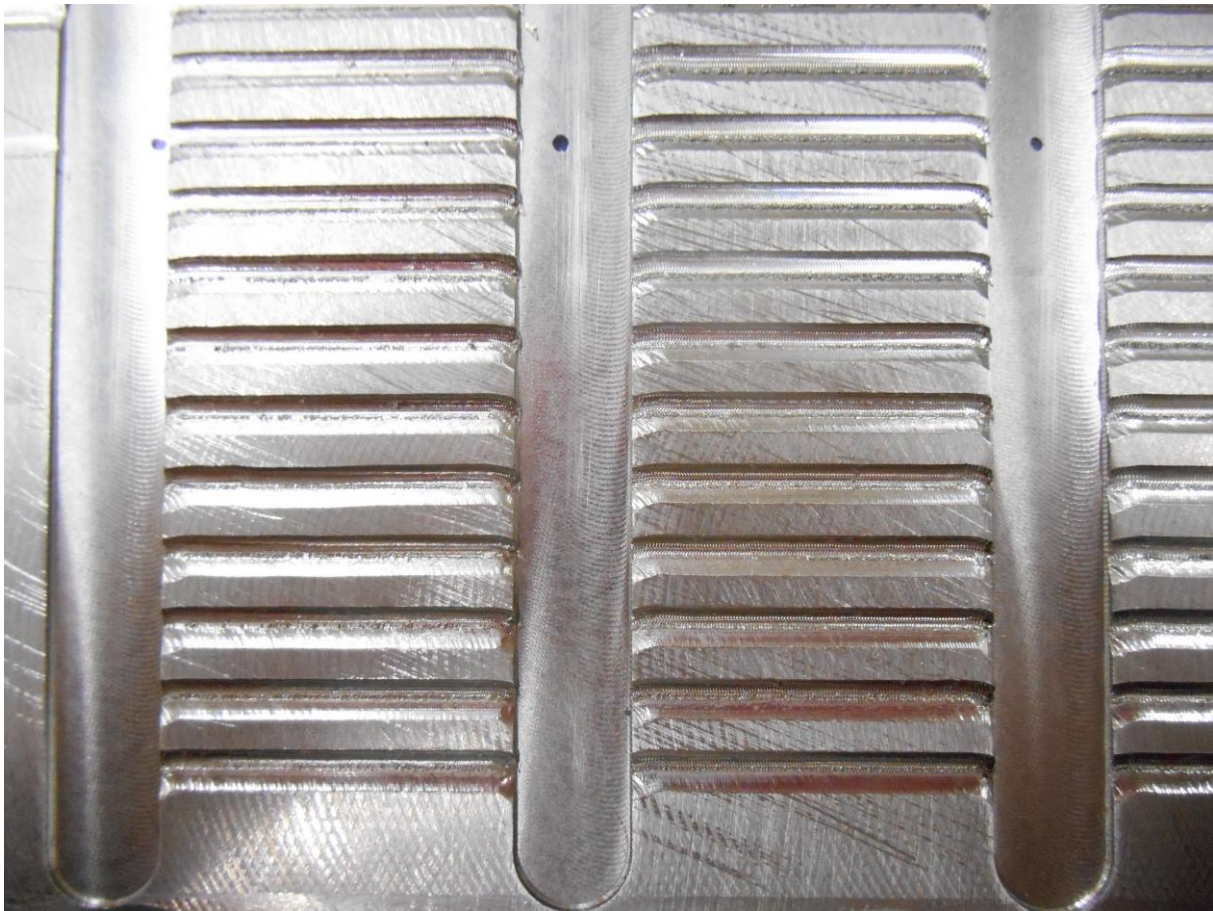
Graf 25 - Průběh Ra napříč poli



Graf 26 - Průběh Rmax napříč poli

Z uvedených grafů vyplývá, že zkoumaná hypotéza se na celkové drsnosti povrchu projevila nejméně. Drážky obrobené v kladných úhlech příčného vyklonění vykazují podobné hodnoty drsností povrchů, jako drážky obrobené v záporných úhlech příčného výklonu. Od začátku zkoumaného intervalu do úhlu výklonu  $\beta_n = +15^\circ$  se celková drsnost dokonce mírně zhoršovala. Poté se drsnost zlepšovala až do úhlu výklonu  $\beta_n = +30^\circ$ , nebo  $\beta_n = +35^\circ$ . V těchto úhlech výklonu vykazovala drsnost povrchu nejlepší hodnoty. Při vyšších úhlech příčného vyklonění se kvalita povrchu opět zhoršovala.

Při měření drsností povrchu bylo zjištěno, že se na drážkách s kladným úhlem příčného vyklonění nachází ještě jeden typ povrchu s mnohem lepší kvalitou. Tento povrch vznikl při výjezdu nástroje z řezu. Mezi těmito dvěma povrchy se nachází velmi ostrá a zřetelná hranice. Rozdíl mezi zmiňovanými povrchy je možné rozeznat pouhým okem, jak lze vidět na následujících obrázcích (Obr. 48, Obr. 49).



**Obr. 48 - Ukázka obrobených drážek**

Jak je popsáno výše, pořadí obrábění drážek bylo časově znáhodněno, ale umístění drážek je systematické. Jednotlivá pole se od sebe liší velikostí rezných podmínek. V rámci jednoho pole jsou rezné podmínky konstantní a jednotlivé drážky se od sebe liší různými úhly příčného výklonu. Na obrázku jsou vyobrazena pole 1, 2 a malá část pole 3 na první straně polotovaru. Nejspodnější drážky byly obrobeny při maximálním úhlu výklonu  $\beta_n = +45^\circ$ . Další řada drážek je obrobena s úhlem výklonu o  $5^\circ$  menším. Řada drážek označená černými tečkami má hodnotu výklonu  $\beta_n = 0^\circ$ .

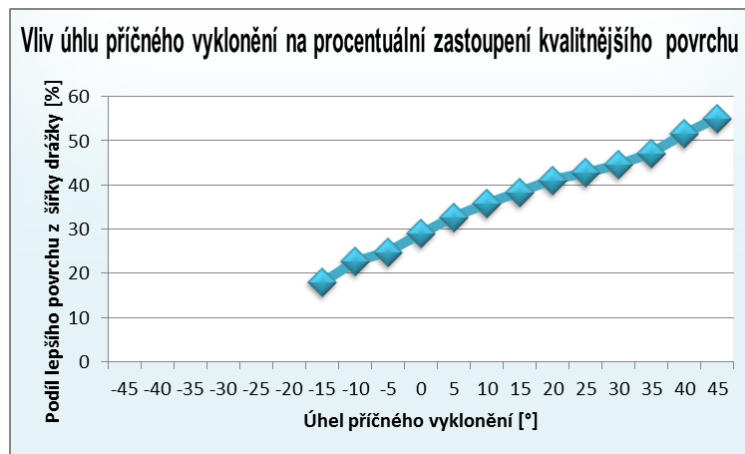
Výše zmiňovaný kvalitnější povrch se nachází na dolních částech jednotlivých drážek. Tento povrch je nejvíce patrný při úhlu výklonu  $\beta_n = +45^\circ$ , kde zaujímá přibližně 55% šířky drážky. S klesajícím úhlem příčného vyklonění klesá také procentuální zastoupení tohoto

kvalitnějšího povrchu, jak lze vidět na grafu (Graf 27). U úhlu příčného výklonu  $\beta_n = -15^\circ$  dosahoval tento povrch pouze 18% šířky drážky. Při nižších úhlech výklonu již tento povrch nebyl zjištěný, nebo dosahoval tak malé šířky, že jej nebylo možné změřit.

Na obrázku (Obr. 49) lze vidět zvětšený detail drážky v poli 2 obrobene s úhlem příčného výklonu  $\beta_n = +45^\circ$ . Pro názornost je kvalitnější povrch orámován zeleně a méně kvalitní povrch je orámován červeně. Vzhledem k velikosti polotovaru nebylo bohužel možné získat snímky povrchů drážek pomocí mikroskopu.

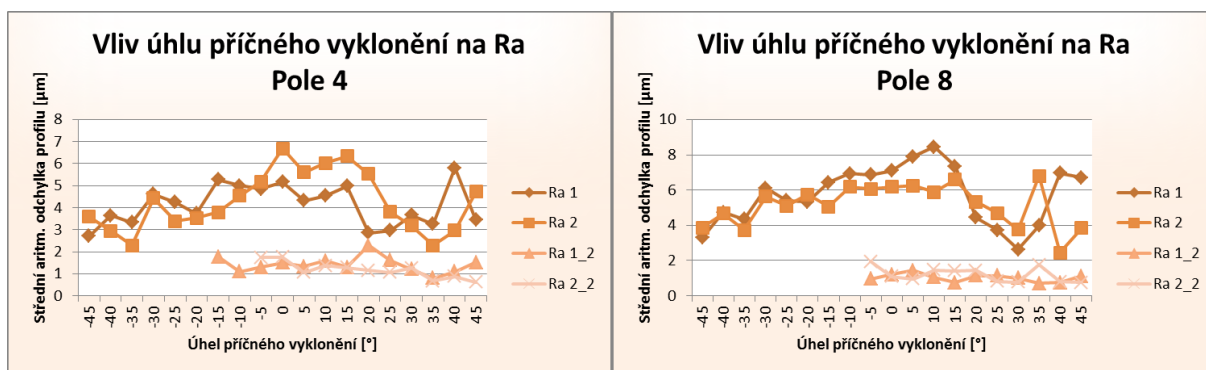


Obr. 49 - Detail obrobene drážky

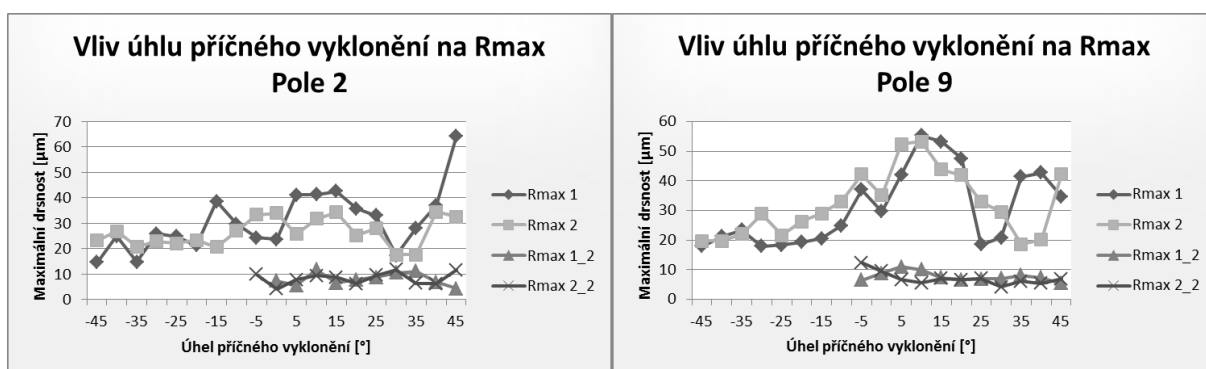


Graf 27 - procentuální zastoupení kvalitnějšího povrchu

Pro získání procentuálního zastoupení kvalitnějšího povrchu byla nejprve posuvným měřítkem změřena šířka tohoto povrchu v pěti náhodně vybraných polích (dvě na první straně polotovaru a tři na straně druhé). Z těchto hodnot byl poté vypočten průměr pro jednotlivé úhly výklonu a z něj procentuální zastoupení vůči celkové šířce drážky. Měření posuvným měřítkem sice nepatří mezi nejpřesnější metody, ale vzhledem k velikosti polotovaru nebyla jiná metoda měření v daný okamžik k dispozici. Hodnoty drsností kvalitnějšího povrchu je možné vyčíst z průběhů drsností pro jednotlivá, vybraná pole (viz Graf 28 a Graf 29). Zbylé grafy pro jednotlivá pole jsou součástí příloh na přiloženém DVD.



Graf 28 - Průběh Ra v poli 4 (vlevo) a v poli 8 (vpravo)

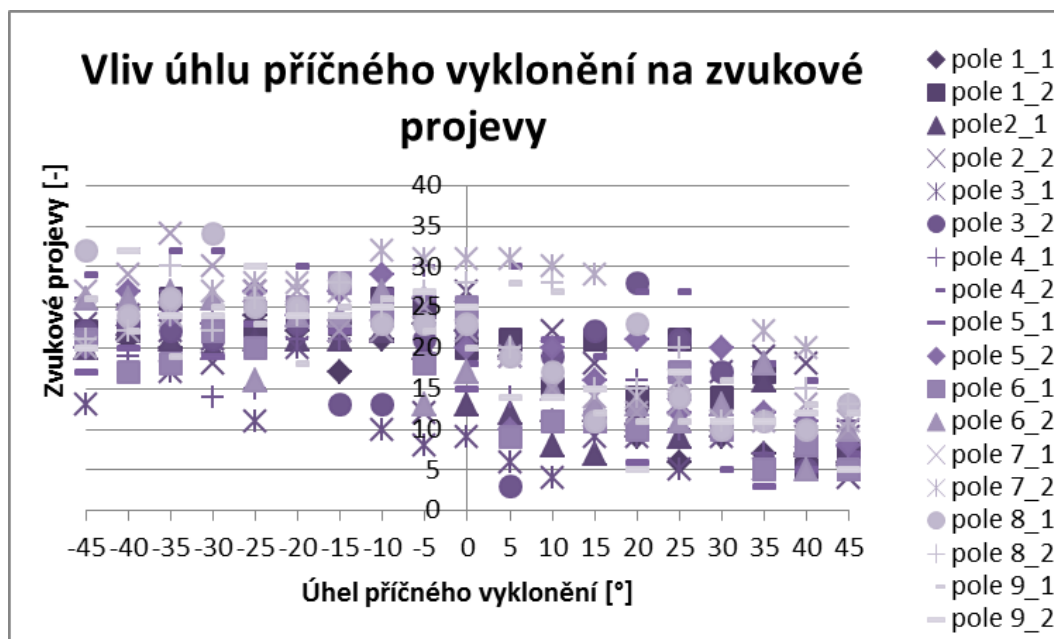


Graf 29 - Průběh Rmax v poli 2 (vlevo) a v poli 9 (vpravo)

Řady Ra 1, Rmax 1 ukazují hodnoty daného parametru na první straně polotovaru. Hodnoty jednotlivých parametrů získaných na druhé straně polotovaru nesou označení Ra 2 a Rmax 2. Řady, ke kterým je přidáno označení „\_2“ obsahují hodnoty drsností pro výše popsavý, kvalitnější povrch. Z grafů vyplývá, že tento povrch má drsnost přibližně Ra 1,6  $\mu\text{m}$  a tato hodnota je téměř nezávislá na úhlu příčného vyklonění. Drsnost tohoto povrchu Rmax je většinou kolem 6  $\mu\text{m}$  a také je ve zkoumaném intervalu úhlů konstantní. S úhlem vyklonění se ale mění procentuální zastoupení tohoto povrchu, jak je popsáno v grafu (Graf 27).

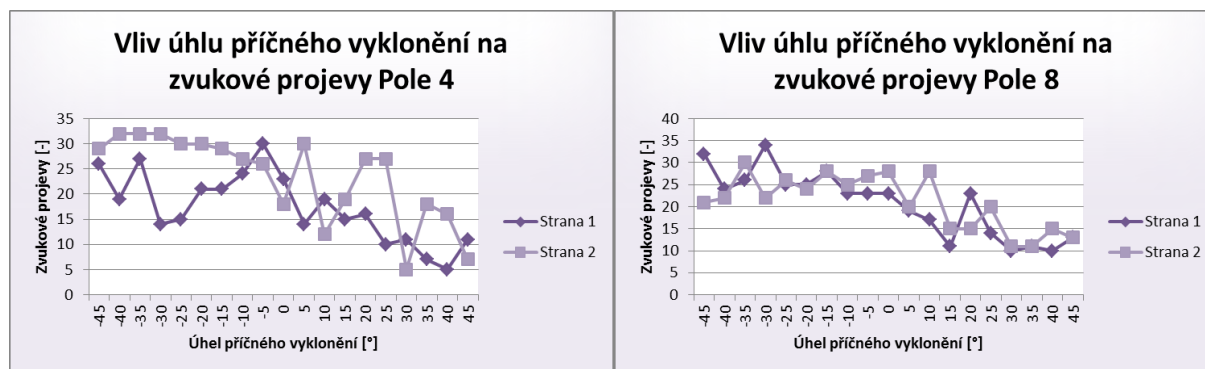
### 6.3 Zvuková analýza

Třetí hodnotící odezvou v experimentu je analýza zvukových projevů obrábění. Uklidnění řezu, nebo ztráta stability řezu je zpravidla sluchem dobře rozlišitelná. Během experimentu byly rozdíly mezi obráběním jednotlivých drážek, také dobře slyšitelné. Výsledky zvukové analýzy mají vzhledem k celkovému vyhodnocení experimentu spíše doplňkový charakter, protože zvolená metoda vyhodnocování zvukové analýzy není navržena pro nekontinuální obrábění, a pro větší přesvědčivost výsledků by bylo potřeba danou metodu upravit, jak je již popsáno v kapitole 5.3, na což nebyl během experimentu prostor, ani čas. Na grafu (Graf 30) lze vidět získanou závislost zvukových projevů na úhlu příčného vyklonění.



Graf 30 - Průběh zvukových projevů

Hodnoty v tomto grafu jsou součtem bodů z rozdělení frekvenčních charakteristik do skupin a bodů za hlučnost při obrábění jednotlivých drážek. Více o vyhodnocování těchto výsledků je popsáno v kapitole 5.3. Z uvedeného grafu (Graf 30) lze vyzorovat, že s narůstající hodnotou úhlu příčného vyklonění byly zvukové projevy obrábění příznivější, což je způsobeno uklidněním řezu. Průběh zvukových projevů ve vybraných polích je vyobrazen na následujících grafech (Graf 31). Grafy pro jednotlivá pole jsou součástí příloh na přiloženém DVD.



Graf 31 - Průběh zvukových projevů v poli 4 (vlevo) a v poli 8 (vpravo)

Na obou grafech se nacházejí dvě datové řady. Řada s názvem „Strana 1“ obsahuje výsledky získané při obrábění na první straně polotovaru a v řadě nazvané „Strana 2“ se nacházejí hodnoty bodů získané ze záznamu zvuku při obrábění druhé strany polotovaru. V grafu pro pole 4 lze vidět výrazné kolísání, zvláště u výsledků získaných při obrábění na druhé straně polotovaru. Toto kolísání může být způsobeno buď působením neznámých vlivů, nebo subjektivní chybou vyhodnocujícího člověka, Nicméně i přes toto kolísání mají průběhy zvukových projevů v závislosti na zvyšujícím se úhlu příčného vyklonění vždy klesající průběh.

## 6.4 Shrnutí výsledků

V experimentu byla zkoumána hypotéza, že určité příčné vyklonění vlečeného kulového nástroje by mohlo vést ke zklidnění řezu a zlepšení záběrových podmínek. Dle hypotézy by se tento úhel měl nacházet v kladných hodnotách příčného vyklonění  $\beta_n$ .

Experiment byl hodnocen pomocí tří skupin odezev: řezné síly, drsnost povrchu a zvuková analýza. Všechny tyto odezvy byly hodnoceny graficky. U řezných sil byly hodnoceny složky radiální, tangenciální a axiální. Radiální a tangenciální složky byly jako nejvíce signifikantní parametry hodnoceny také pomocí statistických metod. Drsnost povrchu byla vyhodnocována pomocí čtyř parametrů:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  a  $R_t$ . V textové části práce jsou hodnoceny pouze parametry  $R_a$  a  $R_{max}$  z důvodu podobnosti zbylých dvou parametrů na tyto vyhodnocované parametry, a také z důvodu velkého množství dat. U zvukové analýzy byly vyhodnoceny převážně frekvenční analýzy získané z Fourierovy transformace.

Výsledky všech těchto odezev zkoumanou hypotézu potvrdily a s příčným vykloněním vlečeného kulového nástroje do kladných úhlů  $\beta_n$  se skutečně zlepšila stabilita řezu a řezné podmínky.

Přesto experiment ukázal trochu jiné výsledky, než bylo očekáváno. Při navrhování experimentu se vycházelo z výsledků, které byly získány experimentem provedeným na toto téma Bc. Juklem. V tomto experimentu byly nejpříznivější výsledky kolem úhlů  $\beta_n = 10^\circ$  až  $20^\circ$ . Při obrábění vykloněným nástrojem do jednoho směru (příčném nebo podélném) se všeobecně doporučuje hodnota také kolem  $15^\circ$ . Proto byl v plánovaném experimentu zvolen interval úhlů  $\beta_n \in \langle -45^\circ; +45^\circ \rangle$  s krokem  $5^\circ$ . v tomto zvoleném intervalu ale nebyl nalezen žádný extrém, který by mohl být považován za nejvhodnější úhel příčného vyklonění. Všechny hodnotící parametry měly zlepšující se tendenci během celého zkoumaného intervalu úhlů. Možným důvodem, proč výsledky experimentu neodpovídají očekávaným, může být použití nástroje vlepeného do pouzdra (viz kapitola 3.7.2). Lepidlo v tomto případě možná zapůsobilo jako tlumič mikrovibrací a proto se možná nástroj choval jinak, než bylo očekáváno. K zodpovězení otázky, jaký úhel příčného vyklonění při vlečení je nejvhodnější, je potřeba provést další experiment, nejlépe s jiným nástrojem a širším intervalem zkoumaných úhlů.

Radiální a tangenciální složka řezných sil byla hodnocena dvěma způsoby. Graficky, stejně jako ostatní parametry, a statisticky. Výhoda druhé metody je, že takto vyhodnocené výsledky mají mnohem větší vypovídající schopnost o průběhu obrábění a přesvědčivost takto získaných výsledků je vysoká. Nicméně obě dvě metody ukázaly téměř stejné výsledky závislosti průběhu řezných sil na úhlu příčného vyklonění. Velmi zajímavým poznatkem získaným při vyhodnocování hodnot pomocí ANOVY analýzy, je získání informace i o vlivu jednotlivých zkoumaných řezných podmínek. Výsledky této analýzy ukázaly, že se zvyšující se hodnotou posuvu rostou velmi výrazně řezné síly a tudíž se zhoršuje stabilita řezu. Naopak zvyšování otáček vřetene vedlo k mírnému snižování řezných sil a tedy i ke zlepšení stability řezu.

Dalším velmi zajímavým a neočekávaným poznatkem je výskyt dvou různých drsností povrchů na jednom obrobeném povrchu. Jak je popsáno v kapitole 6.2, přibližně při úhlu výklonu  $\beta_n = -15^\circ$  se v drážce začal objevovat ještě jeden typ povrchu s mnohem lepší drsností. S narůstajícím úhlem rostlo téměř lineárně i procentuální zastoupení tohoto povrchu a při úhlu  $\beta_n = 45^\circ$ , byl tento kvalitnější povrch na přibližně 55% šířky drážky. Tento kvalitnější povrch vznikl při výjezdu nástroje z řezu. O tomto jevu se Bc. Jukl ve své práci nezmiňuje, a tak lze předpokládat, že se toto rozdělení obrobeného povrchu objevilo

až v tomto druhém experimentu. Tento jev je velmi zajímavý a bylo by vhodné mu věnovat více pozornosti, například provedením dalších experimentů.

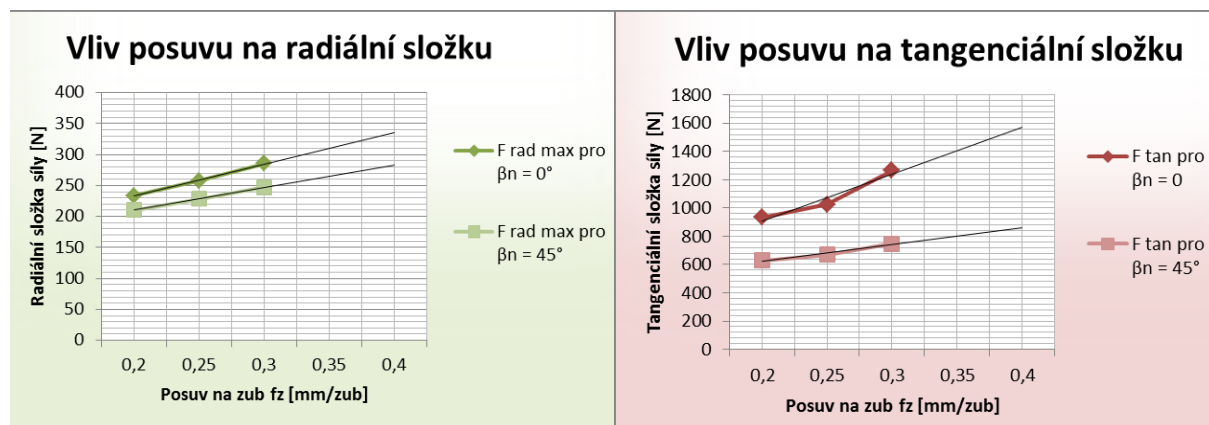
Výsledky zvukové analýzy měly být jeden z hlavních hodnotících faktorů, jak se předpokládalo při plánování experimentu. Při vyhodnocování této odezvy se ale ukázalo, že zvolená metoda vyhodnocování není dostatečně navržená pro obrábění s dělenou třiskou a hodnocení této odezvy bylo dosti problematické. Výsledky zvukové analýzy sice také potvrdily zkoumanou hypotézu, ale přesvědčivost těchto závěrů není příliš vysoká, a tak mají ve vztahu k výsledkům ostatních odezev spíše doplňkový charakter.

## 7 Technicko – ekonomické zhodnocení experimentu

Výstupem z každé studie by mělo být také ekonomické zhodnocení přínosů výsledků, aby bylo možné zanalyzovat, jaké úspory by objevené řešení mohlo přinést.

V tomto odstavci je zkoumán rozdíl mezi obráběním nevykloněným vlečeným nástrojem a nástrojem vykloněným v příčném směru o úhel  $\beta_n = +45^\circ$ . Při tomto úhlu vyklonění byl ve zkoumaném intervalu úhlů průběh obrábění nejpříznivější. Výsledky experimentu ukázaly, že pokud se vlečený kulový nástroj vykloní v příčném směru o tento úhel, velikost všech složek řezných sil poklesne. Radiální složka řezné síly se zmenšila v průměru o 11%, velikost tangenciální složky poklesla v průměru o 35% a axiální složka sil se průměrně snížila o 9%.<sup>5</sup>

Dále bylo zkoumáno, o kolik se mohou zvýšit řezné podmínky při zachování přiměřených řezných sil. V experimentu se společně s vlivem úhlu příčného vyklonění analyzoval také vliv posuvu na zub  $f_z$  a otáček vřetene  $n$ . V této kapitole je hodnocen pouze posuv na zub, protože výrazné zvýšení otáček by snížilo trvanlivost bříty. V následujících grafech (Graf 32) je vyobrazen vliv posuvu na velikost radiální a tangenciální složky řezných sil. Axiální složka zde není hodnocena, protože nemá na stabilitu tak výrazný vliv.



Graf 32 - Vliv posuvu na zub na radiální (vlevo) a tangenciální (vpravo) složku řezných sil

Hodnoty v grafech jsou průměrem všech naměřených hodnot při konkrétní hodnotě posuvu na zub (například hodnoty pro  $f_z = 0,2$  mm/zub jsou průměrem hodnot z polí 1\_1; 1\_2; 4\_1; 4\_2; 7\_1 a 7\_2) Datové řady „F rad max pro  $\beta_n = 0^\circ$ “ a „F tan pro  $\beta_n = 0^\circ$ “ značí hodnoty konkrétní složky řezných sil získané při obrábění nevykloněným vlečeným nástrojem. Datové řady „F rad max pro  $\beta_n = 45^\circ$ “ a „F tan pro  $\beta_n = 45^\circ$ “ jsou hodnoty složek sil při obrábění vykloněným nástrojem o úhel  $\beta_n = 45^\circ$ . Tyto grafy jsou proloženy lineární spojnicí trendů pro předpověď velikostí sil při zvýšení velikosti posuvu nad zkoumaný interval. Z grafu

<sup>5</sup> viz příloha na přiloženém DVD.



vpravo vyplývá, že při zachování stávajících sil by bylo možné při vyklonění zvýšit posuv o 0,15 mm/zub. Velikosti tangenciální síly umožňují zvýšení posuvu při příčném vyklonění o více než 0,2 mm/zub. Z následujících rovnic (13), (14) lze vyčíst úsporu času při zvolené délce obrábění  $L_o = 7000$  mm pokud bude posuv na zub zvýšen o 0,15 mm/zub:

$$t_{s1} = \frac{\pi \cdot D_{eff1} \cdot L_o}{1000 \cdot v_{c\,eff1} \cdot f_{z1} \cdot z} = \frac{\pi \cdot 5,83 \cdot 7000}{1000 \cdot 73,2 \cdot 0,25 \cdot 1} = 7 \text{ min} \quad (13)$$

$$t_{s2} = \frac{\pi \cdot D_{eff2} \cdot L_o}{1000 \cdot v_{c\,eff2} \cdot f_{z2} \cdot z} = \frac{\pi \cdot 6,41 \cdot 7000}{1000 \cdot 80,5 \cdot 0,4 \cdot 1} = 4,3 \text{ min} \quad (14)$$

Zvýšením posuvu o 0,15 mm/zub při zvolené délce obrábění se čas obrábění sníží o 2,7 min, což je 39 % z celkového obráběcího času. Úspora tohoto času se ale týká pouze jednotkového času při dokončovací operaci. Při kusové výrobě by takováto úspora času pravděpodobně neměla velký užitek, ale při velkosériové výrobě se jedná o poměrně velkou úsporu času a tím i financí. Dokončování ploch vykloněnou kulovou frézou je možné provádět pouze na moderních strojích s pěti řízenými osami. Hodinová sazba takovýchto strojů se běžně pohybuje kolem 1200 Kč/hod. Při této sazbě by vypočítaná úspora času ušetřila 54 Kč.

Při zavedení metody dvojnásobného vyklonění kulového nástroje do praxe bude úspora času i financí pravděpodobně vyšší, než ukazuje výpočet výše. Tento výpočet nemá příliš velkou vypovídající schopnost, protože zvolený interval posuvů je příliš úzký a předpověď chování sil není statisticky podložena. Pro přesnější výpočet by bylo potřeba zkoumat vliv úhlu příčného vyklonění na stabilitu řezu při vícero řezných podmínkách. Navíc díky zklidnění řezu bude pravděpodobně možné také zvýšit hloubku řezu, čímž bude výrazně zlepšena efektivita obrábění. Tento faktor byl ale během experimentu konstantní a tak není možné zde jeho vliv zhodnotit.

Dvojnásobným vykloněním frézy se také výrazně zlepšila kvalita povrchu. Při použití této metody by tak v budoucnu pravděpodobně mohly být vypuštěny ekonomicky náročné dokončovací operaci, jako například ruční broušení, nebo vyjiskřování, což by také vedlo k výraznému zlevnění výroby.

## 8 Závěr

Pomocí experimentu byla ověřována hypotéza, že určité vyklonění v příčném směru vlečeného kulového nástroje by mohlo zvýšit stabilitu řezu a záběrové podmínky. Kulová fréza má totiž při vlečení tendenci odvalit se do strany. Pokud by ale tato fréza byla vykloněna ještě v příčném směru, mohl by být směr, do kterého se snaží odvalit, velmi podobný směru posuvu, což by mohlo zvýšit stabilitu řezu. Toto vyklonění by se mělo nacházet v kladných úhlech příčného vyklonění, kde jsou záběrové podmínky podobné souslednému frézování, což by také mohlo pomoci k lepší stabilitě řezu.

Výsledky experimentu tuto zkoumanou hypotézu jednoznačně potvrdily, a to s velkou statistickou přesvědčivostí. Všechna získaná data byla hodnocena graficky. Radiální a tangenciální složky řezných sil byly navíc hodnoceny pomocí statistiky, což výrazně zvýšilo přesvědčivost výsledků. Tyto dva parametry byly pro statistické vyhodnocení vybrány proto, že jejich výsledky byly nejvíce signifikantní. Axiální složka řezných sil nemá na stabilitu řezu tak výrazný vliv, jako zbylé dvě složky, protože v tomto směru vykazuje kulová fréza výrazně vyšší tuhost, což je důvod, proč tento parametr nebyl statisticky vyhodnocen. Zbylé dvě odezvy nebyly statisticky hodnoceny z důvodů uvedených níže.

Experiment také ukázal další zajímavé poznatky a závislosti a přinesl mnoho námětů k dalším výzkumům.

Průběhy všech odezev se se zvětšujícím úhlem kladného výklonu zlepšovali během celého zkoumaného intervalu. Nejlepší výsledky tak ukázal maximální úhel vyklonění  $\beta_n = +45^\circ$ . Z teoretických východisek byly ale nejlepší výsledky očekávány kolem úhlu  $\beta_n = +15^\circ$ . Možným důvodem této odchylky je použití nástroje vlepeného do pouzdra. Lepidlo v tomto případě mohlo působit jako tlumič mikrovibrací, díky čemuž bylo možné chování nástroje jiné, než se očekávalo. K nalezení optimálního úhlu příčného vyklonění je potřeba provedení dalšího experimentu, nejlépe s jiným nástrojem a širším intervalem zkoumaných úhlů.

Při zkoumání jednotlivých průběhů tangenciální složky řezných sil pomocí regresní analýzy nebylo možné na zvolené hladině významnosti proložit odpovídající křivku polí na první straně polotovaru, kde byla zkoumaná hodnota posuvu  $f_z = 0,3$  mm (pole 3\_1, 6\_1 a 9\_1). Na druhé straně polotovaru nebylo možné proložit křivku pouze polem 6\_2. V polích 3\_2 a 9\_2 nebyly shody proložené přímkou se skutečným průběhem také příliš přesvědčivé. Tangenciální složka řezných sil měla v polích s  $f_z = 0,3$  mm odlišný průběh, než v ostatních polích. V těchto polích průběhy tangenciální složky zřetelněji vykazovaly mírně rostoucí průběh v záporných hodnotách příčného výklonu, a od úhlu  $\beta_n = 0^\circ$  byl průběh již výrazně klesající. Hodnota  $f_z = 0,3$  mm byla maximální zkoumaná hodnota posuvu. Je možné, že pokud by byly hodnoty posuvu vyšší, bude průběh tangenciální složky odlišný od průběhu, který ukázaly výsledky experimentu. Tomuto tématu by bylo vhodné se dále věnovat a při plánování dalších experimentů na toto téma by bylo zajímavé zvolit vyšší hodnoty posuvu.

Výsledkem zkoumání vlivu jednotlivých polí pomocí ANOVY analýzy, je velmi zajímavá závislost mezi zkoumanými řeznými podmínkami a velikostí řezných sil. Obě hodnocené složky řezných sil rostly se zvyšující se velikostí posuvu. Se zvyšováním otáček vřetene měly obě složky naopak mírně klesající tendenci.

Vliv úhlů příčného vyklonění se na drsnosti povrchu projevil neočekávaným způsobem. Celková drsnost povrchu se se zvyšujícím úhlem výklonu mírně zhoršovala od začátku zkoumaného intervalu až do úhlu vyklonění  $\beta_n = 15^\circ$ . Poté hodnoty drsností klesaly až do úhlu  $\beta_n = +30^\circ$ , nebo  $\beta_n = +35^\circ$ . V těchto úhlech výklonu vykazovala drsnost povrchu nejlepší hodnoty. Při vyšších úhlech příčného vyklonění se kvalita povrchu opět zhoršovala. Kolem úhlu  $\beta_n = -15^\circ$  se ale v obrobené drážce začal objevovat ještě jeden povrch s výrazně lepší kvalitou. Procentuální zastoupení tohoto povrchu rostlo téměř lineárně se zvětšujícím se úhlem zkoumaného vyklonění a při maximálním úhlu výklonu dosahoval tento kvalitnější povrch přibližně 55% šířky obrobené drážky. Kvalitnější povrch vznikl při výjezdu nástroje z řezu. O tomto jevu se autor předchozího experimentu nezmiňuje, a tak je možné, že se projevil až v tomto experimentu. Objevení tohoto nestandardního chování je důvodem, proč nebyla drsnost povrchu hodnocena statisticky. Tomuto pozoruhodnému jevu by bylo vhodné se dále věnovat, například dalším experimentem.

Poslední hodnotící odezvou je zvuková analýza. Vzorky byly hodnoceny metodou, kterou navrhl Bc. Jan Lerch. Principem této metody je grafické hodnocení frekvenčních charakteristik jednotlivých vzorků. Přestože rozdíly při obrábění jednotlivých drážek byly dobře slyšitelné, při získávání jednotlivých charakteristik bylo zjištěno, že hodnotící metoda není dostatečně navržena pro obrábění s dělenou třískou a frekvenční charakteristiky mají výrazně odlišný tvar, než bylo očekáváno. Proto mají výsledky zvukové analýzy ve vztahu k ostatním hodnotícím parametrům spíše doplňkový charakter a nebyly statisticky vyhodnocovány. Aby bylo možné použítou metodu hodnocení využívat i pro podobné

aplikace, je nutné ji upravit a rozšířit. Podkladem pro vylepšení zmiňované metody mohou být například vzorky získané při tomto experimentu, které jsou součástí příloh na DVD.

Během experimentu bylo získáno ohromné množství dat. Vyobrazení všech použitých tabulek, grafů a informací by vedlo k velké nepřehlednosti. Proto jsou tato data umístěna v přílohách na přiloženém DVD.

## Seznam použité literatury

- [1] t-support. [Online] [Citace: 3. 11 2016.] <https://www.t-support.cz/kat/frezovani-ii-8?langchang=11>.
- [2] **SADÍLEK, M., SADÍLKOVÁ, Z.** *Počítačová podpora procesu obrábění*. Ostrava : Fakulta strojní VŠB-TUO, 2012. ISBN 978-80-248-2770-4.
- [3] **DVOŘÁČEK, J.** *Analýza silového zatížení řezného nástroje při pětiosém frézování*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta, 2008.
- [4] **JUKL, O.** *Hledání optimálního úhlu příčného vyklonění kulové frézy při vlečení z hlediska stability řezného procesu*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2011.
- [5] **SADÍLEK, M.** Strategie frézování naklopeným nástrojem - realizace experimentů. *MM Průmyslové spektrum*. 2006, 5.
- [6] **ŘEHOŘ, J.** *Teorie obrábění - skripta*. Plzeň : Západočeská univerzita.
- [7] Wikipedia. [Online] [Citace: 12. 2 2017.] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Fourierova\\_transformace](https://cs.wikipedia.org/wiki/Fourierova_transformace).
- [8] **LERCH, J.** *Možnosti zvukové analýzy procesu obrábění a její využití*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2012.
- [9] [Online] DMG MORI. [Citace: 15. 1 2014.] <http://en.dmgmori.com/products/milling-machines/universal-milling-machines-for-5-sided-5-axis-machining/dmu-monoblock/dmu-65-monoblock#Intro>.
- [10] [Online] ISCAR. [Citace: 1. 3 2017.] [http://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5601244&fnum=67&mapp=IT&app=71&GFS\\_TYP=M](http://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5601244&fnum=67&mapp=IT&app=71&GFS_TYP=M).
- [11] JKZ Bučovice a.s. [Online] [Citace: 20. 1 2017.] <http://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/csn-14-220-17131-16mncr5/>.
- [12] [Online] Promicron. [Citace: 6. 1 2017.] <http://www.pro-micron.de/en/products/sensory-tool-holder-spike/>.
- [13] Wikipedia. [Online] [Citace: 2. 3 2017.] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Mikrofon>.
- [14] I-sound. [Online] [Citace: 2. 3 2017.] <http://www.i-sound.cz/product/ozvucovaci-technika/mikrofony/yoga-em-070-/309490>.
- [15] [Online] Mahr. [Citace: 2. 3 2017.] <https://www.mahr.com/cs/Produkty-a-slu%20C5%BEby/V%20C3%BDrobn%C3%AD-m%C4%9B%C5%99ic%C3%AD-technika/Produkty/MarSurf---Mobiln%C3%AD-za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD-na-m%C4%9B%C5%99en%C3%AD-drsnosti/MarSurf-M-300---P%C5%99enosn%C3%BD-drsnom%C4%9Br/>.
- [16] **NEZDAŘILÍKOVÁ, M.** *Metrologická konfirmace měřidla*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2011.

## Seznam příloh na DVD

### **Příloha č. 1: Výrobní výkres polotovaru**

### **Příloha č. 2: Tabulka znáhodnění**

Soubor v tabulkovém procesoru Excel. Tabulky obsažené v tomto souboru byly použity pro tvorbu programů. „List1“ obsahuje tabulku pro vytvoření programu „UPNUTI-1“. Program „Upnuti-2“ byl vytvořen pomocí tabulky na listě „List2“.

### **Příloha č. 3: NC programy**

Všechny použité parametrické programy ve formátu .H. Popis těchto programů se nachází v kapitole 3.6.

### **Příloha č. 4: Záznamy řezných sil**

Neupravené záznamy řezných sil získané z programu SPIKE BTKaBlue V 13.4. Každý záznam (vyjma záznamu up2\_1\_1) obsahuje záznam obrábění devíti drážek ve znáhodněném pořadí.

### **Příloha č. 5: Grafické vyhodnocení řezných sil**

Soubor v tabulkovém procesoru Excel. „List1“ obsahuje všechny potřebné hodnoty pro výpočet jednotlivých složek řezných sil. Dále tento list obsahuje vypočítané hodnoty těchto složek a grafy radiální, tangenciální a axiální složky řezných sil pro jednotlivá pole. Na listu „List2“ jsou obsaženy všechny hodnoty jednotlivých složek sil v jiném pořadí a grafy z těchto hodnot pro jednotlivé složky napříč všemi poli. „List3“ obsahuje potřebné hodnoty řezných sil a grafy z těchto hodnot použité při ekonomickém zhodnocení experimentu.

### **Příloha č. 6: Statistické vyhodnocení řezných sil**

Textový soubor obsahující výsledky statistického vyhodnocení radiální a axiální složky řezných sil od Ing. Miroslava Gombára Ph.D..

### **Příloha č. 7: Grafické vyhodnocení drsností povrchu**

Soubor v tabulkovém procesoru Excel. „List1“ obsahuje naměřené hodnoty drsností pro oba typy povrchu a grafy z těchto hodnot pro jednotlivé pole. Na listu „List2“ jsou obsaženy hodnoty drsností v jiném pořadí a grafy z těchto hodnot pro jednotlivé parametry napříč všemi poli. Na listu „List3“ je vyhodnocení procentuálního zastoupení kvalitnějšího povrchu.

### **Příloha č. 8: Zvukové záznamy obrábění**

Neupravené zvukové záznamy obrábění získané pomocí programu Audacity. Pořadí záznamu odpovídá znáhodněnému pořadí obrábění. Pro větší přehlednost jsou do souborů vloženy popisové řady s identifikačními kódy jednotlivých drážek, které jsou vysvětleny v kapitole 5.3.

### **Příloha č. 9: Frekvenční charakteristiky jednotlivých drážek**

Frekvenční charakteristiky zvukové analýzy jednotlivých drážek ve formátu .jpg. Názvy obrázků obsahují informaci o umístění drážky, na které byl záznam pořízen (viz kapitola 5.3).

### **Příloha č. 10: Grafické vyhodnocení zvukové analýzy**

Soubor v tabulkovém procesoru Excel. „List1“ obsahuje body získané rozdělením charakteristik do skupin, body za hlučnost, součet obou bodů a grafy pro jednotlivá pole vytvořená z těchto součtů. Na listu „List2“ jsou obsaženy součty bodů v jiném pořadí a graf z těchto hodnot napříč všemi poli.

## Seznam obrázků

Obr. 1 - Obrábění kulovou frézou [1] .....	5
Obr. 2 - Obrábění tvarové plochy kulovou frézou a stopkovou frézou s rádiusem v rohu [2] ..	6
Obr. 3 - Vliv řezných podmínek na drsnost povrchu při obrábění kulovou frézou [2].....	7
Obr. 4 - Gradient obvodové rychlosti a) nevykloněného, b) vykloněného nástroje [3].....	7
Obr. 5 - Závislost úhlu nastavení hlavního ostří na poměru průměru nástroje a hloubky řezu [3] .....	8
Obr. 6 - Vyklonění nástroje v podélném a příčném směru [4].....	9
Obr. 7 - Řezné síly na nevykloněné (vlevo) a vykloněné (vpravo) kulové fréze.....	10
Obr. 8 - Schéma nástrojového držáku CM D08-B-C12 [4] .....	14
Obr. 9 - Technické parametry VBD [4] .....	15
Obr. 10 - Rozdělení plochy obrobku [3] .....	15
Obr. 11 - Drsnost obrobené dráhy: Pole 1, $\beta_n = +40^\circ$ .....	21
Obr. 12 - Drsnost obrobené dráhy: Pole 1, $\beta_n = -60^\circ$ .....	21
Obr. 13 - Drsnost obrobené dráhy: Pole 1, $\beta_n = +20^\circ$ .....	22
Obr. 14 - Porovnání frekvenčních charakteristik s různou vzdáleností od místa řezu [8] .....	24
Obr. 15 - Rozdíl mezi ruchem okolí (zvýrazněná část) a zvukem obrábění [8] .....	24
Obr. 16 - Zvukový záznam před zesílením (nahore) a po zesílení (dole) .....	25
Obr. 17 - Srovnání lineárních (vlevo) a logaritmických (vpravo) souřadnic [8] .....	26
Obr. 18 - Srovnání frekvenčních charakteristik s vysokou (vlevo) a nízkou velikostí rozlišení [8] .....	26
Obr. 19 - Frekvenční charakteristika pro obrábění stabilní (vlevo), na mezi stability (uprostřed) a nestabilní (vpravo) .....	27
Obr. 20 - Úhly příčného vyklonění .....	30
Obr. 21 - Rozdělení polotovaru na pole .....	32
Obr. 22 - Ukázka tabulky znáhodnění.....	33
Obr. 23 - DMU 65 monoBLOCK® [9].....	36
Obr. 24 - kinematické schéma [9] .....	36
Obr. 25 - Obráběcí nástroj.....	37
Obr. 26 - Rozměry VBD [10].....	37
Obr. 27 - Dynamometr SPIKE [12] .....	39
Obr. 28 - Mikrofon YOGA EM 070 [14].....	40
Obr. 29 - Drsnoměr MarSurf M300 [15].....	40
Obr. 30 - Umístění mikrofonu.....	42
Obr. 31 - Průběh experimentu .....	43
Obr. 32 - Obrobené drážky.....	44

Obr. 33 - Ukázka souboru v programu SPIKE BTKaBlue V 13.4 .....	45
Obr. 34 - Odfiltrovaný záznam .....	46
Obr. 35 - Ukázka tabulky pro vyhodnocení momentů a řezných sil .....	47
Obr. 36 - Ukázka vyhodnocování záznamu řezných sil .....	47
Obr. 37 - Rameno ohybového momentu .....	48
Obr. 38 - Průběh ohybového momentu pro jednu drážku bez filtru .....	49
Obr. 39 - Průběh ohybového momentu pro jednu drážku s filtrem .....	49
Obr. 40 - Záznam krouticího momentu .....	50
Obr. 41 - Ukázka záznamu axiální složky řezných sil .....	50
Obr. 42 - Ukázka tabulky drsností povrchů .....	51
Obr. 43 - Měření drsností .....	52
Obr. 44 - Ukázka zvukového záznamu .....	53
Obr. 45 - Frekvenční charakteristika nestabilního (vlevo) a stabilního (vpravo) vrtání [8] ....	54
Obr. 46 - Frekvenční charakteristika méně stabilního (vlevo) a stabilnějšího (vpravo) frézování .....	54
Obr. 47 - Ukázka tabulky vyhodnocení zvukové analýzy .....	55
Obr. 48 - Ukázka obrobených drážek .....	70
Obr. 49 - Detail obrobené drážky .....	71

## Seznam grafů

Graf 1 - Vliv řezné rychlosti na amplitudu kmitání [6] .....	12
Graf 2 - Vliv hloubky řezu a posuvu amplitudu kmitání [6] .....	12
Graf 3 - Vliv úhlu řezu na amplitudu kmitání [6] .....	13
Graf 4 - Proložená spojnice trendu bodovým polem silového zatížení [1] .....	17
Graf 5 - Porovnání velikosti zatížení kulové frézy [4] .....	17
Graf 6 - Porovnání velikostí amplitud řezných sil [4] .....	18
Graf 7 - Srovnání hodnot $F_{abs}$ a $A_{abs}$ v intervalu $\beta_n = 0^\circ$ až $+40^\circ$ [4] .....	18
Graf 8 - Závislost charakteristik drsnosti na úhlu $\beta_n$ , při obrábění v poli 1 a 2 [4] .....	19
Graf 9 - Závislost charakteristik drsnosti na úhlu $\beta_n$ , při obrábění v poli 3 a 4 [4] .....	20
Graf 10 - Závislost $R_a$ na úhlu $\beta_n$ [4] .....	20
Graf 11 - Průběh radiální síly napříč poli - maximum .....	57
Graf 12 - Průběh radiální síly napříč poli - průměr .....	58
Graf 13 - Průběh radiální síly v poli 1 (vlevo) a v poli 9 (vpravo) .....	58
Graf 14 - Průběh radiální síly napříč poli .....	59
Graf 15 - Průběh tangenciální síly v poli 6 (vlevo) a v poli 7 (vpravo) .....	60
Graf 16 - Průběh axiální síly napříč poli .....	61

Graf 17 - Průběh axiální síly v poli 1 (vlevo) a v poli 9 (vpravo).....	61
Graf 18 - Regresní analýza pro $F_{rad\ max\ 2}$ v poli 2 (vlevo) a pro $F_{rad\ max\ 1}$ v poli 8 (vpravo) .....	63
Graf 19 - Regresní analýza pro $F_{tan\ 1}$ v poli 3 (vlevo) a pro $F_{tan\ 1}$ v poli 7 (vpravo) .....	63
Graf 20 - Závislost $F_{rad\ max}$ na úhlu příčného výklonu .....	65
Graf 21 - Závislost $F_{tan}$ na úhlu příčného výklonu .....	66
Graf 22 - Závislost radiální (vlevo) a tangenciální (vpravo) složky řezných sil na typu vyklonění.....	67
Graf 23 - Vliv pole na velikost radiální (vlevo) a tangenciální (vpravo) složky řezných sil ...	68
Graf 24 - Vliv řezné rychlosti (vlevo) a posuvu (vpravo) na stabilitu řezu [6].....	68
Graf 25 - Průběh $R_a$ napříč poli .....	69
Graf 26 - Průběh $R_{max}$ napříč poli .....	69
Graf 27 - procentuální zastoupení kvalitnějšího povrchu .....	71
Graf 28 - Průběh $R_a$ v poli 4 (vlevo) a v poli 8 (vpravo).....	72
Graf 29 - Průběh $R_{max}$ v poli 2 (vlevo) a v poli 9 (vpravo).....	72
Graf 30 - Průběh zvukových projevů .....	73
Graf 31 - Průběh zvukových projevů v poli 4 (vlevo) a v poli 8 (vpravo).....	73
Graf 32 - Vliv posuvu na zub na radiální (vlevo) a tangenciální (vpravo) složku řezných sil.	75

## Seznam tabulek

Tab. 1 - Řezné podmínky v předchozím experimentu [4].....	14
Tab. 2 - Technické parametry nástrojového držáku [4] .....	14
Tab. 3 - Průměrné hodnoty drsností při $\beta_n = 40^\circ$ [4] .....	21
Tab. 4 - Řezné podmínky v plánovaném experimentu.....	30
Tab. 5 - vliv $\beta_n$ na $d_{eff}$ a $v_{ceff}$ .....	30
Tab. 6 - Parametry programu .....	35
Tab. 7 - technické parametry stroje [9] .....	37
Tab. 8 - Chemické složení ČSN 14 220 [11] .....	37
Tab. 9 - Technické parametry dynamometru [12].....	38
Tab. 10 - Skutečně použité řezné podmínky .....	42
Tab. 11 - Skutečné hodnoty $d_{eff}$ a $v_{ceff}$ v závislosti na $\beta_n$ .....	42
Tab. 12 - Hodnoty $p$ a $r^2$ pro jednotlivé průběhy .....	62
Tab. 13 - Skutečně použité řezné podmínky .....	67