

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní



## **Bakalářská práce**

**Použití senzoru deformace pro sledování procesu soustružení**

**The use of a deformation sensor for monitoring of the turning process**

Vypracoval:

Josef Fiala

Vedoucí práce:

doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D., Ing. Petr Mašek, Ph.D.

Studijní program:

Teoretický základ strojního inženýrství

Zadávací ústav:

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Praha, 2024**



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fiala** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **509156**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Použití senzoru deformace pro sledování procesu soustružení**

Název bakalářské práce anglicky:

**The use of a deformation sensor for monitoring of the turning process**

Pokyny pro vypracování:

1. Princip technologie soustružení.
2. Sílové jevy při soustružení a jejich měření.
3. Využití senzorů sil a deformace pro monitoring obráběcího procesu.
4. Zprovoznění metody měření s vybraným senzorem deformace.
5. Experiment nasazení vybraného senzoru pro monitorování procesu soustružení.
6. Zhodnocení výsledků.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MÁDL, J.: Teorie obrábění. Fakulta strojní, ČVUT Praha, 1990. 156 s.  
[2] MÁDL, J.: Experimentální metody v teorii obrábění. Fakulta strojní, ČVUT Praha.  
Další:  
Jednotlivé odborné články na téma "Cutting process monitoring",  
Podklady a webové stránky firem: Artis, Prometec, Kistler, Marposs  
Další na vyžádání u vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

**Ing. Petr Mašek, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS**

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci s názvem Použití senzoru deformace pro sledování procesu soustružení vypracoval samostatně s použitím literatury uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne: .....

Podpis autora: .....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svým vedoucím bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. a Ing. Petru Maškovi, Ph.D. za skvělé vedení a cenné rady při konzultacích a samotném experimentu. Moje poděkování patří rovněž Ing. Janu Malému za pomoc a rady při realizaci experimentu a také Ing. Pavlu Švecovi Ph.D. za odborné konzultace k použitému senzoru a měřícím zařízením a pomoc při experimentu.

## Anotační list

Jméno autora:	Josef Fiala
Název:	Použití senzoru deformace pro sledování procesu soustružení
Title:	The use of a deformation sensor for monitoring of the turning process
Akademický rok:	2023/2024
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí BP:	doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D., Ing. Petr Mašek, Ph.D.
Klíčová slova:	Soustružení, monitorování, řezné síly, senzor, dynamometr
Keywords:	Turning, monitoring, cutting forces, sensor, dynamometer
Anotace:	Tato bakalářská práce se zabývá monitorováním řezného procesu soustružení senzorem 9232A. Teoretická část je věnována soustružení, řezným podmínkám, silovým jevům při obrábění a jejich monitorováním. Praktická část práce se zabývá monitorováním řezného procesu soustružení senzorem 9232A a porovnávání dat s dynamometrem. Dále byl řešen piezoelektrický drift a volba vhodné pozice.
Anotation:	This bachelor's thesis deals with monitoring of turning cutting process using sensor 9232A. The theoretical part is dedicated to turning, cutting conditions, force phenomena during machining, and their monitoring. The practical part of the work focuses on monitoring the turning process using the 9232A sensor and comparing the data with a dynamometer. Additionally, the piezoelectric drift and the selection of an appropriate position were addressed.

## Obsah

Seznam použitých zkratk, značek a veličin.....	9
Úvod a motivace práce.....	11
1. Podstata technologie soustružení.....	12
1.1. Technologie obrábění.....	12
1.2. Soustružení .....	12
1.3. Nástroje pro soustružení .....	13
1.4. Geometrie břitu soustružnického nože .....	14
2. Parametry řezného procesu pro soustružení.....	18
2.1. Řezná rychlost $v_c$ .....	18
2.2. Posuv $f$ .....	18
2.3. Hloubka řezu .....	18
3. Silové účinky při soustružení .....	19
3.1. Řezná síla a její složky.....	19
4. Metody měření silových účinků při soustružení .....	22
4.1. Přímé.....	22
4.2. Nepřímé .....	23
5. Silové senzory a dynamometry.....	24
5.1. Dynamometry .....	24
5.1.1. Mechanické .....	24
5.1.2. Hydraulické .....	24
5.1.3. Pneumatické.....	24
5.1.4. Elektrické .....	25
5.1.5. Odporové.....	25
5.1.6. Indukční.....	25
5.1.7. Kapacitní.....	26
5.1.8. Piezoelektrické.....	26
6. Metody monitoringu řezného procesu.....	27
6.1. Řezné síly .....	27
6.2. Vibrace .....	27
6.3. Teploty .....	28
6.4. Zvuk.....	28
6.5. Akustická emise.....	28
7. Příprava vlastního experimentu.....	29
7.1. Strojní vybavení.....	29

7.2.	Nástrojové vybavení.....	32
7.2.1.	Soustružnický nůž.....	32
7.2.2.	Vyměnitelné břitové destičky .....	32
7.3.	Měřicí vybavení.....	32
7.3.1.	Senzor 9232A.....	33
7.3.2.	Prototyp magnetického pouzdra .....	34
7.3.3.	Zesilovače .....	35
7.3.4.	Dynamometr .....	36
7.3.5.	DAQ.....	36
7.3.6.	Notebook a použité programy .....	37
7.4.	Volba vhodné kombinace sestavy měření .....	37
7.5.	Prvotní testy a zlepšení kvality měřeného signálu.....	38
7.5.1.	Uzemnění .....	42
7.5.2.	Úprava zesilovače 5017 .....	43
7.6.	Doporučení pro práci se senzorem 9232A ve zvolené sestavě .....	43
8.	Určení driftu senzoru .....	44
8.1.	Motivace .....	44
8.2.	Návrh experimentu .....	44
8.3.	Vlastní experiment .....	44
8.3.1.	Měření driftu bez zatěžování .....	44
8.3.2.	Měření driftu po dlouhém ustálení bez zatěžování.....	45
8.3.3.	Měření driftu zatěžovaného konstantní silou.....	45
8.4.	Dílčí shrnutí .....	46
9.	Určení vhodné pozice senzoru 9232A .....	47
9.1.	Motivace .....	47
9.2.	Definice ideálního místa.....	47
9.3.	Rozhodovací kritéria.....	47
9.3.1.	Kritérium citlivosti .....	47
9.3.2.	Kritérium stability měření.....	48
9.3.3.	Kritérium rozsahu sil a deformací .....	48
9.3.4.	Kritérium bezpečnosti umístění senzoru.....	48
9.3.5.	Kritérium složitosti upnutí senzoru .....	48
9.4.	Návrh experimentu .....	49
9.4.1.	Volba a nastavení zařízení, volba obrobku a pozic .....	49
9.4.2.	Volba řezných podmínek, vyměnitelných břitových destiček a soustružnického nože	50

9.4.3.	Problematika připevnění senzoru s pouzdrém.....	51
9.5.	Vlastní experiment .....	51
9.5.1.	Umístění na boční straně ocelového bloku se senzorem ve vodorovné poloze	51
9.5.2.	Umístění na boční straně ocelového bloku se senzorem ve svislé poloze.....	58
9.5.3.	Umístění na horní ploše dynamometru pod nožem .....	59
9.5.4.	Umístění na spodní ploše bloku.....	60
9.5.5.	Umístění na horní ploše bloku .....	61
9.5.6.	Umístění na koníku .....	62
9.5.7.	Vyhodnocení experimentu .....	63
9.6.	Rozhodovací analýza .....	63
9.6.1.	Kritérium citlivosti .....	64
9.6.2.	Kritérium stability měření .....	66
9.6.3.	Kritérium rozsahu sil a deformací .....	67
9.6.4.	Kritérium bezpečnosti umístění senzoru.....	68
9.6.5.	Kritérium složitosti upnutí senzoru .....	68
9.7.	Dílčí shrnutí .....	69
10.	Citlivostní analýza na vybraném místě.....	70
10.1.	Motivace .....	70
10.2.	Návrh experimentu .....	70
10.3.	Vlastní experiment .....	71
10.3.1.	Na horní ploše bloku se senzorem ve vodorovné poloze .....	71
10.3.2.	Na horní ploše bloku se senzorem ve svislé poloze .....	72
10.3.3.	Na boční ploše bloku se senzorem ve svislé poloze .....	73
10.3.4.	Na boční ploše bloku se senzorem ve vodorovné poloze.....	74
10.4.	Dílčí shrnutí .....	75
11.	Závěr.....	76
	Seznam použité literatury .....	78
	Seznam obrázků .....	81
	Seznam tabulek .....	82



## Seznam použitých zkratk, značek a veličin

Zkratka	popis	
DAQ	Sběr dat (data acquisition)	
$P_r$	Nástrojová základní rovina	
$P_s$	Nástrojová rovina ostří	
$P_o$	Nástrojová ortogonální rovina	
CNC	Computer Numerical Control (počítačem řízené numerické ovládání)	
BP	Bakalářská práce	
Značka veličiny	Jednotka	Název/popis
$\kappa_r, \kappa_r'$	°	Úhly nastavení ostří
$\lambda_s$	°	Úhel sklonu hlavního ostří
$\gamma_o$	°	Ortogonální úhel čela
$\alpha_o$	°	Ortogonální úhel hřbetu
$\beta_o$	°	Ortogonální úhel břitu
$\delta_o$	°	Ortogonální úhel řezu
$r_\varepsilon$	°	Poloměr zaoblení špičky
$v_c$	m/min	Řezná rychlost
D	m	průměr obráběné plochy
d	m	Průměr obrobené plochy
n	1/min	počet otáček vřetene za minutu
$v_f$	m/min	Posuvová rychlost
$f$	m/ot	Posuv na otáčku
$v_e$	m/min	Rychlost rezného pohybu
$a_p$	m	Hloubka řezu
L	m	Délka obráběné plochy
l	m	Délka obrobené plochy
$b_D$	m	Jmenovitá šířka třísky
$h_D$	m	Jmenovitá tloušťka třísky

Značka veličiny	Jednotka	Název/popis
$A_D$	$m^2$	Jmenovitý průřez třísky
$\vec{F}, F$	N	Síla řezání
$\vec{R}, R$	N	Řezný odpor
$F_{ok}$	N	Okamžitá hodnota síly řezání
$\Delta F$	N	Rozptyl hodnot síly řezání
$F_1$	N	Aktivní složka síly řezání
$F_2$	N	Pasivní složka síly řezání
$F_x, F_p$	N	Axiální složka síly řezání
$F_y, F_p$	N	Radiální složka síly řezání
$F_z, F_c$	N	Tangenciální složka síly řezání
$P_{už}$	W	Užitečný výkon
$P_C$	W	Celkový výkon
$P_0$	W	Výkon naprázdno
$M_k$	Nm	Krouticí moment
$M_b$	Nm	Brzdný moment
$C$	F	Kapacita kondenzátoru
$S$	$m^2$	Plocha desek kondenzátoru
$d'$	m	Vzdálenost desek kondenzátoru
$R$	$\Omega$	Elektrický odpor
$\Delta R$	$\Omega$	Změna odporu
$k$	-	Konstanta tenzometru
$\varepsilon$	-	Poměrná deformace
$\mu\varepsilon$	$\mu\varepsilon$	Označení jednotky měřené piezoelektrickými senzory (micro strain)
$R_a$	$\mu m$	Střední aritmetická odchylka drsnosti povrchu
$\Delta$	-	Poměrná jednotka kritéria citlivosti

## Úvod a motivace práce

Problematika monitorování řezných systémů je s moderní výrobou velice aktuální téma. Prvotní impulz a námět této práce vzešel od specialistů ze společnosti Kistler. Hlavní náplní práce je zjištění, zda lze použít piezoelektrický senzor 9232A, viz Obrázek 16 Senzor 9232A [16], pro monitorování řezného procesu soustružení. Tento senzor má sloužit jako částečná nebo celková náhrada jiných metod monitoringu, primárně monitorování dynamometry, viz kapitola 6. Ty budou použity jako etalony a bude s nimi senzor porovnáván a kalibrován. Dalším cílem bude zjištění rozsahu použitelnosti zmíněného senzoru, ve smyslu paramentů řezného procesu s největším důrazem na řeznou sílu. Dále bude rozebírána nejvhodnější pozice daného senzoru se sekundárním požadavkem na univerzálnost pozice. V rozsahu bakalářské práce bude měření probíhat pouze na jednom stroji, CNC soustruhu SP 430 viz kapitola 7.1, a na něm bude probíhat volba pozice. Tato práce je koncipována primárně prakticky, a tedy náplní teoretické části bude poskytnutí informací, které podpoří lepší pochopení práce a objasnění problematiky. Zmíněné informace se budou týkat silových jevů při obrábění a jejich monitorování, řezných podmínek, soustružení atd.

# 1. Podstata technologie soustružení

## 1.1. Technologie obrábění

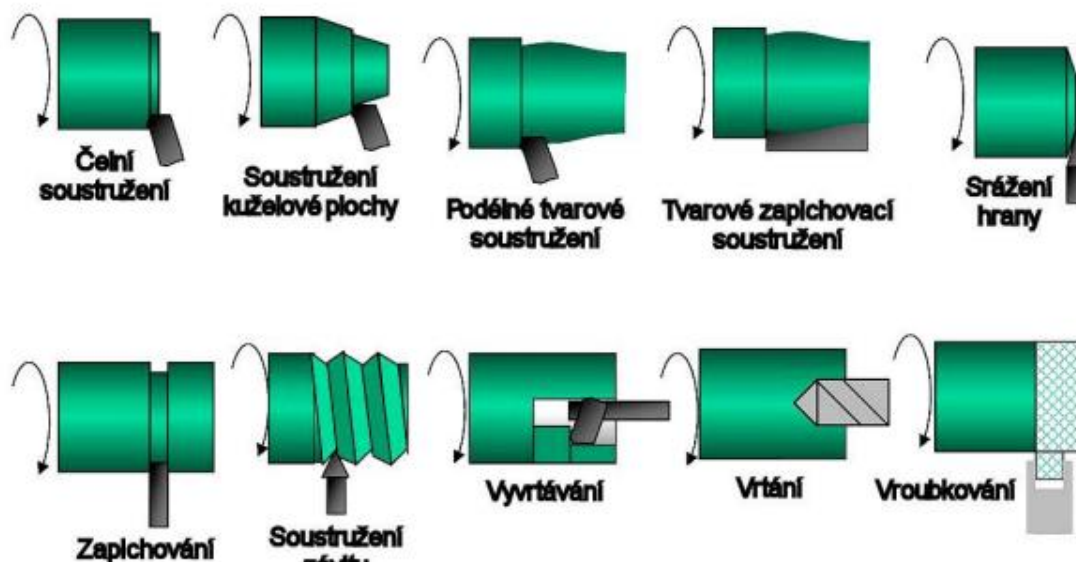
Obecně je technologie obrábění vědní obor, který zkoumá, studuje a analyzuje děje a pochody obráběcího procesu. Ten se realizuje v obráběcím systému, který jde dále dělit na jednotlivé systémy obráběcího stroje, nástroje, prostředí atd. Obráběný objekt nazýváme obrobek a výstupem obráběcího procesu je buď výrobek nebo polotovár pro další operace. Obrábění je technologický proces, kterým tvoříme obrobek požadovaného tvaru, rozměrů a kvality povrchu odstraňováním částic materiálu za působení mechanických, chemických a elektrických dějů, nebo případně jejich kombinacemi. Více specifickou kategorií obrábění je třískové obrábění. Pod tímto pojmem si představíme takové pochody, kdy je materiál obrobku odebrán v podobě třísek. Tříska je odříznutá a zdeformovaná část odebírané vrstvy materiálu. Mezi nejznámější takové metody náleží soustružení, frézování, vrtání a mnoho dalších. [1, 2, 4] Více bude dále rozebráno soustružení, jakožto metoda použitá v experimentální části.

## 1.2. Soustružení

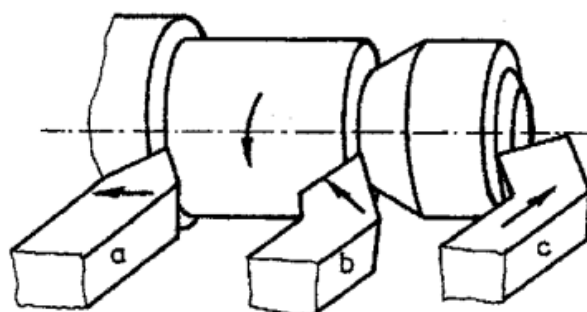
Soustružení je nepoužívanější metodou třískového obrábění. Řadí se mezi nejstarší výrobní metody. První použití soustružení se odhadem datuje před více jak 3000 lety. [1]

Podstatou soustružení je rotace obrobku, který vykonává hlavní řezný pohyb ve směru hlavního pohybu. Nástroj koná posuvový pohyb podélný (viz Obrázek 2 a), příčný (viz Obrázek 2 c) i obecný (viz Obrázek 2 b) ve směru posuvového pohybu s rychlostí  $v_f$ . Nejčastěji je jednobřítý s mnoha možnými provedeními. Soustružení se používá především k obrábění válcových ploch vnějších i vnitřních, kuželových ploch, tvarově obecných rotačních ploch, čelních rovinných ploch a k řezání závitů, viz Obrázek 2 Hlavní pohyby při soustružení [1], viz Obrázek 1. [1, 2, 4]

Mimo to je možné na soustruzích vrtat, vyhrubovat, zahlubovat a vystružovat, v ojedinělých případech frézovat a vykonávat i jiné práce. [1, 4]



Obrázek 2, Základní operace při soustružení [2]



Obrázek 1 Hlavní pohyby při soustružení [1]

### 1.3. Nástroje pro soustružení

Nástroje pro obrábění obecně jsou popsány řezným materiálem a geometrií.

Běžně používanými řeznými materiály jsou rychlořezné oceli, slinuté karbidy povlakované/nepovlakované, cermety, keramiky, kubický nitrid bóru a diamant.

Nejběžnější rozdělení soustružnických nožů je následovné: [1, 3]

- Podle druhu materiálu břitu
- Podle konstrukce
- Podle geometrického tvaru

Základní druhy řezných materiálů jsou uvedeny výše. Nože z rychlořezných ocelí bývají nejčastěji monolitní. U nožů s řeznou částí ze slinutých karbidů převládá provedení s vyměnitelnou břítovou destičkou stejně jako u keramických, diamantových a z kubického nitridu bóru. [1, 3]

Dle geometrie dělíme nože na radiální, tangenciální a kotoučové. Nejběžnější je radiální provedení. Dále nože dělíme na levé a pravé a podle použití jako ubírací, rohový, hladicí, zapichovací atd., viz Obrázek 3. [1, 3]



a – ubírací nůž čelní, b – rohový nůž, c – ubírací nůž přímý, d – ubírací nůž ohnutý, e – hladicí nůž, f – zapichovací nůž, g – ubírací nůž stranový, h – nabírací nůž, i – závitový nůž, j – rádiusový nůž, k – vnitřní ubírací nůž, l – vnitřní rohový nůž, m, n – vnitřní nože zapichovací, o – vnitřní nůž závitový

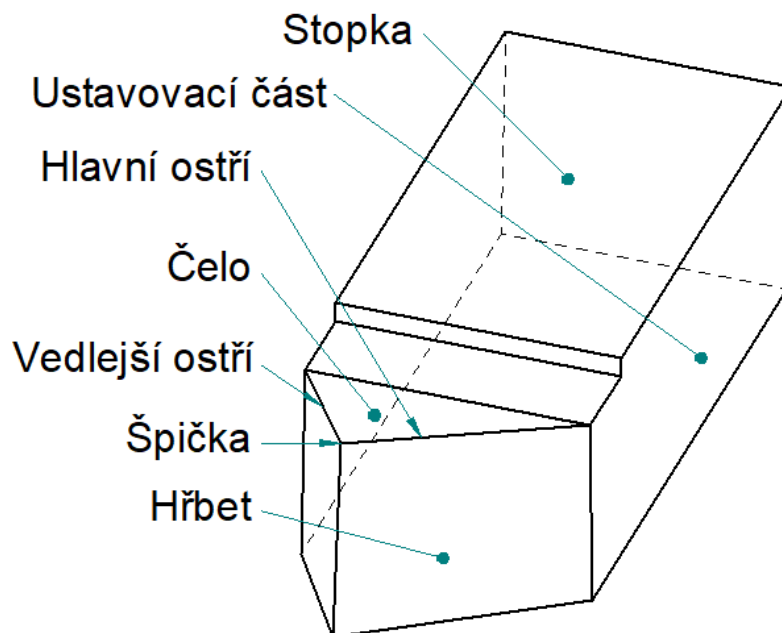
Obrázek 3 Radiální soustružnické nože [1]

#### 1.4. Geometrie břítu soustružnického nože

Pro jednotlivé technologie obrábění se používají odlišné nástroje. Zaměření proběhne na geometrii soustružnického nože. Svou geometrií významně ovlivňuje parametry řezného procesu, trvanlivost nástroje, jakost povrchu, teplotu řezání a mnoho dalších. Volba nástrojových úhlů musí proběhnout primárně podle mechanických a fyzikálních vlastností obráběného materiálu, dále podle vlastností nástrojového materiálu, řezných podmínek a požadavku kvality obrobku. [1,2, 3]

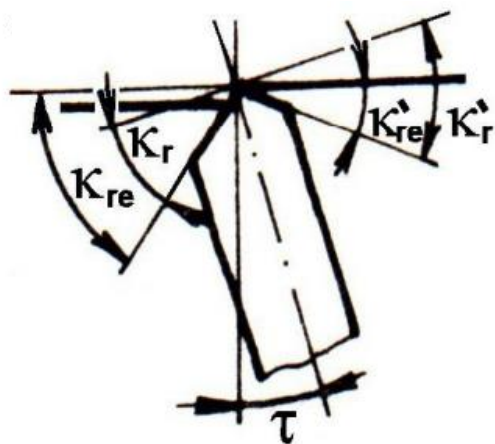
Soustružnický nůž má tyto části, viz Obrázek 4 geometrie soustružnického nože [1].: [1]

- těleso – základní část nástroje pro upevnění řezného elementu
- stopku – slouží k upnutí
- břit – část určená pro odebrání materiálu, skládá se z ostří, čela, hřbetu
- čelo – plocha, po které odchází tříška
- hřbet – plocha, která se přibližuje ploše řezu
- ostří – přechod mezi čelem a hřbetem, dělí se na hlavní a vedlejší
- špičku – spojnice hlavního a vedlejšího ostří
- ustavovací plochu – u konvenčních soustruhů slouží k nastavení úhlů nože



Obrázek 4 geometrie soustružnického nože [1]

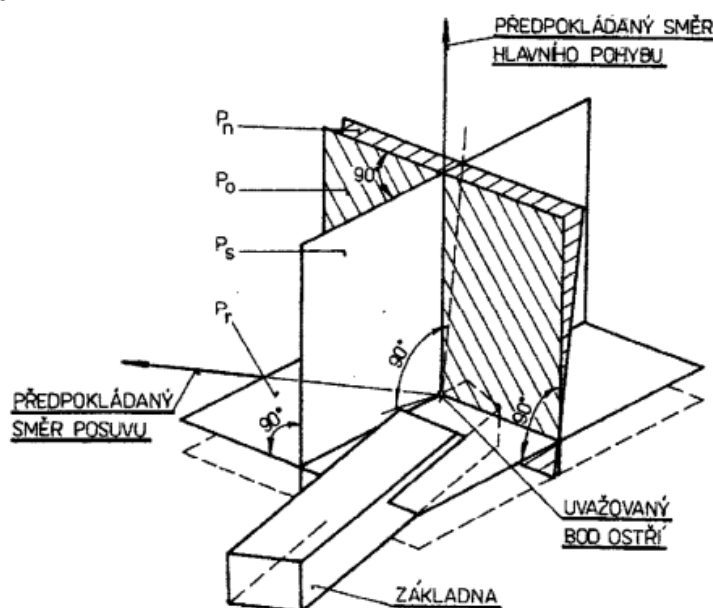
Pro jednoznačné určení úhlů řezné části nástroje definujeme souřadnicové soustavy nástrojové a pracovní. Soustava nástrojová definuje geometrii v pojetí statickém a její hlavní využití je při konstrukci, výrobě a kontrole. V této soustavě jsou roviny nazvané nástrojové roviny. Soustava pracovní definuje geometrii v procesu řezání. Tyto roviny jsou nazvány pracovní roviny. Ty jsou zaváděny z důvodu vlivů procesu obrábění, jelikož nástroj při své funkci některé z nástrojových úhlů nevyužívá, a proto se úhly mění na pracovní, viz Obrázek 5. Roviny soustav se vztahují k bodu na ostří, kde je nástrojová geometrie uvažována a jsou značeny velkým písmenem P a indexem odlišujícím jednotlivé roviny. Pro odlišení pracovní roviny je použit doplňkový index e. [1, 2, 3]



Obrázek 5 Změna nástrojových úhlů na pracovní [2]

V obou rovinách definujeme úhly, které jsou pojmenovány podle svého souřadného systému, tedy úhly nástrojové a pracovní, a podle části nože, které se zmíněné úhly týkají. Jsou značeny řeckým písmenem, které je určeno částí nástroje a indexem odpovídajícím indexu roviny, ve které se úhel nachází. Pro zavedení úhlů, které nejvíce ovlivňují řezný proces, využijeme nástrojové roviny. Potřebné roviny jsou: [1, 2, 3]

- Nástrojová základní rovina  $P_r$  – rovina kolmá na předpokládaný směr hlavního pohybu, která prochází uvažovaným bodem ostří.
- Nástrojová rovina ostří  $P_s$  – rovina kolmá na nástrojovou základní rovinu  $P_r$  a tečná k ostří v uvažovaném bodě.
- Nástrojová ortogonální rovina  $P_o$  – rovina kolmá na nástrojovou rovinu ostří  $P_s$  a nástrojovou základní rovinu  $P_r$ , která prochází uvažovaným bodem ostří, viz Obrázek 6.



Obrázek 6, Nástrojová souřadnicová soustava pro soustružení [1]

Nástrojové úhly, které nejvíce ovlivňují řezný proces jsou následující:

Úhly nastavení ostří  $\kappa_r$  a  $\kappa_r'$  významně ovlivňují tvar třísky úhlem  $\kappa_r$  a strukturu povrchu obrobku úhlem  $\kappa_r'$ . [2, 3]

Úhel sklonu hlavního ostří  $\lambda_s$  ovlivňuje tuhost břitu a zatížení špičky nože. Když je úhel kladný, tak tříska odchází směrem od obrobku, v opačném případě odchází směrem k obrobku. [2]

Ortogonální úhel čela  $\gamma_o$  má vliv na odchod třísky z místa řezu a mechanismus tvorby třísky. Při menších hodnotách úhlu dochází k intenzivnějšímu přechování třísky. [2, 3]



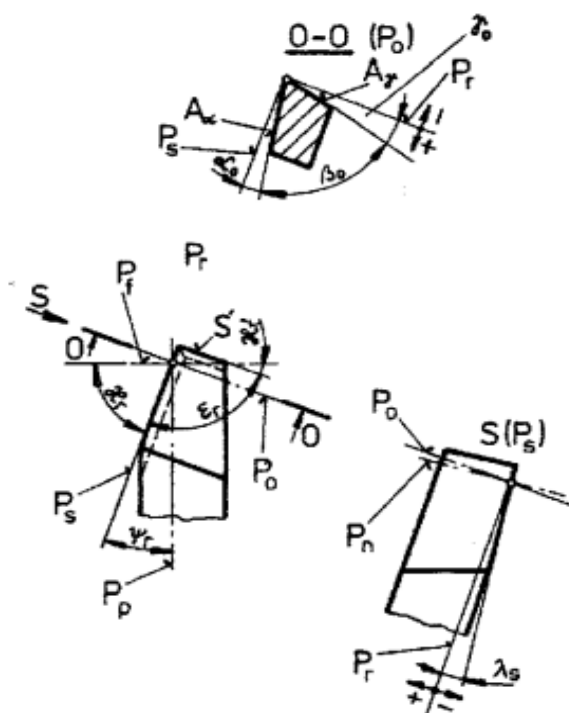
Ortogonalní úhel hřbetu  $\alpha_o$  ovlivňuje tření na hřbetě nože a menší hodnoty tohoto úhlu zvyšují tuhost břitu. [2]

Ortogonalní úhel břitu  $\beta_o$  má vliv na tuhost břitu. Nízké hodnoty tohoto úhlu, okolo  $40^\circ$ , se volí pro obrábění materiálů s nízkou pevností. Vysoké hodnoty, okolo  $100^\circ$ , pro materiály s vysokou pevností. [2, 3]

Ortogonalní úhel řezu  $\delta_o = \alpha_o + \beta_o$ . Na tento úhel je požadavek co nejmenších hodnot omezených tuhostí, která musí odpovídat danému zatížení při obrábění. [2, 3]

Poloměr zaoblení špičky  $r_\epsilon$  nabývá hodnot 0,2 až 5 mm. Výrazně ovlivňuje strukturu povrchu. Vyšší hodnoty poloměru zaoblení přinášejí větší trvanlivost nástroje. [2, 3]

Popsané úhly jsou pro přehlednost zakresleny v Obrázek 7.



Obrázek 7 Nástrojové úhly břitu soustružnického nože  
v rovinách  $P_o$ ,  $P_r$ ,  $P_s$  [1,2]

## 2. Parametry řezného procesu pro soustružení

Pod pojmem parametry řezného procesu při soustružení rozumíme primárně určení řezné rychlosti, posuvu a hloubky řezu. Z těchto veličin a znalosti řezného nástroje určíme dílčí parametry, které objasní pochody při řezném procesu. [1, 2]

### 2.1. Řezná rychlost $v_c$

Řezná rychlost  $v_c$  je rychlost hlavního řezného pohybu. Dle druhu nástroje a obrobku volíme velikost této rychlosti. Odpovídá obvodové rychlosti, kterou bychom změřili na obráběné ploše. Vypočítá se ze vztahu: [1, 2]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (m/min). \quad (1.1)$$

Kde  $D$  je průměr obráběné plochy (m),  $n$  je počet otáček vřetene za minutu (1/min).

### 2.2. Posuv $f$

Posuv  $f$  je dráha, kterou urazí nástroj za jednu otočku obrobku. Posuvu se stanoví ze vztahu: [1, 2]

$$f = \frac{v_f}{n} \quad (m), \quad (1.2)$$

Kde  $v_f$  je posuvová rychlost (m/min),  $n$  je počet otáček vřetene za minutu (1/min)

Z řezné rychlosti a posuvové rychlosti lze vypočítat rychlost řezného pohybu  $v_e$ :

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = 10^{-3} \cdot n \cdot \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + f^2} \quad (m/min). \quad (1.3)$$

### 2.3. Hloubka řezu

Hloubka řezu pro podélné soustružení

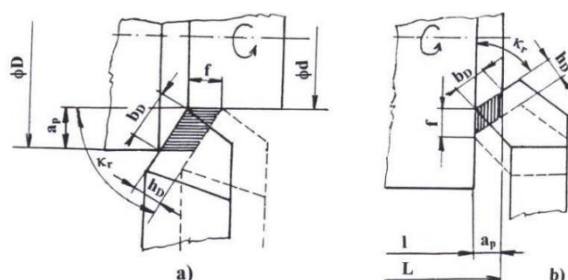
$$a_p = 0,5(D - d) \quad (mm), \quad (1.4)$$

Kde je  $D$  průměr obráběné plochy (mm),  $d$  průměr obrobené plochy (mm).

Hloubka řezu pro čelní soustružení

$$a_p = L - l \quad (mm), \quad (1.5)$$

Kde je  $L$  délka obráběné plochy (mm),  $l$  délka obrobené plochy (mm).



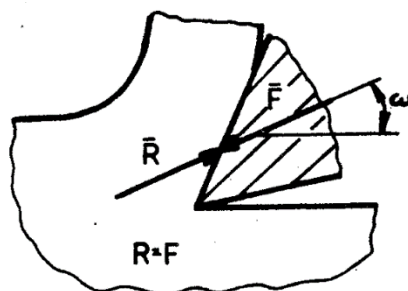
Obrázek 8 Průřez odřezávaných vrstev, a) podélné soustružení, b) čelní

### 3. Silové účinky při soustružení

Obecně při obrábění klade obráběný materiál řeznému nástroji odpor. Ten nazveme řezným odporem  $\vec{R}$  a aby došlo k obrábění, tak musí být překonán silou řezání  $\vec{F}$ . Pro silovou rovnováhu musí platit: [5, 8]

$$\vec{F} = \vec{R}, \quad \text{případně} \quad F = R \quad (1.9)$$

Síla řezání i řezný odpor působí v jedné rovině a úhel mezi touto rovinou a obvodovou úsečkou obrobené plochy nazýváme úhel působení síly řezání  $\omega$ , viz Obrázek 9. [5, 8]

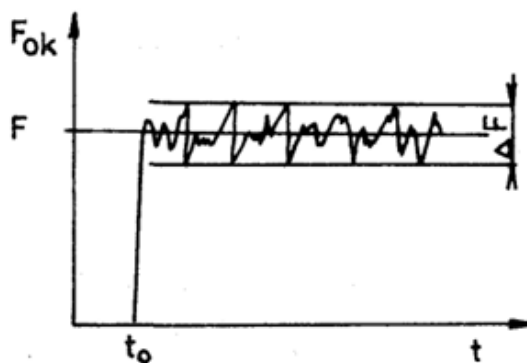


Obrázek 9 Znárodnění řezné síly a řezného odporu [9]

#### 3.1. Řezná síla a její složky

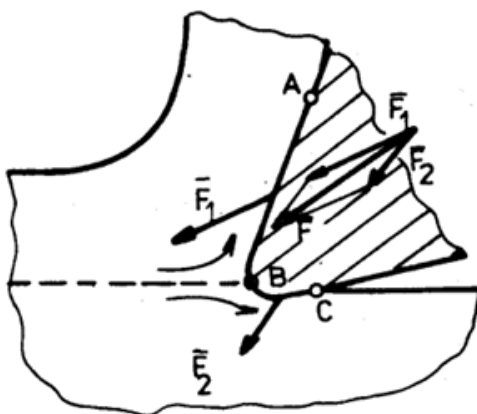
Při určování velikosti řezné síly a jejích složek stačí uvažovat buď řezný odpor a jeho složky nebo řeznou sílu a její složky. Nejčastěji se při obrábění uvažuje síla řezání  $F$  a její složky. [3, 5]

Tato síla je dynamickým jevem závislým na čase obrábění  $t$ . Její okamžitá hodnota  $F_{ok}$  kolísá a pohybuje se kolem své střední hodnoty  $F$ . Toto kolísání se projevuje i za stejných řezných podmínek v důsledku drsnosti plochy obrobku, mechanických vlastností této plochy apod. Střední hodnotu průběhu síly řezání  $F$  nazveme silou řezání a určíme jí způsobem početním nebo experimentálním. Rozptyl hodnot síly řezání označíme  $\Delta F$ . Velikost tohoto rozptylu se pohybuje v rozmezí jednotek až desítek procent řezné síly. Tato problematika je znázorněna na Obrázek 10. [5]



Obrázek 10 Grafické znázornění veličin spjatých s řeznou silou

Sílu řezání lze rozložit do dvou složek. Je to složka aktivní  $F_1$  a pasivní  $F_2$ . Aktivní složka působí v úseku AB, což je oblast styku třísky s čelem. Pasivní složka působí v úseku BC, což je oblast styku hřbetu břitu nože s plochou řezu. V bodě B dochází k dělení materiálu. [5] Jednotlivé body a síly jsou vyznačeny v Obrázek 11.

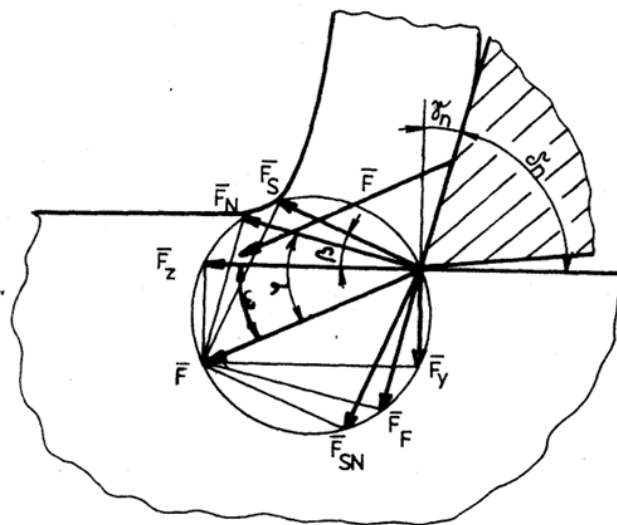


Obrázek 11 Schéma vzniku pasivní a aktivní složky řezné síly s označenými významnými body [5]

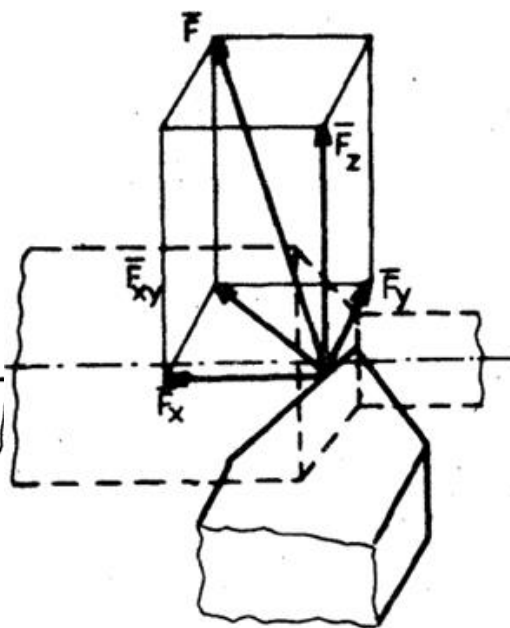
Sílu řezání  $F$  i její složky  $F_1$  a  $F_2$  lze rozložit na mnoho dalších složek do jednotlivých rovin. V tomto případě je působíště síly  $F$  posunuto do ostří. Poté vrcholy vektorů složek síly řezání i samotné síly leží na kružnici, viz Obrázek 12. Tímto posunutím je možný vzájemný jednoduchý přepočít mezi silami přes úhly mezi nimi. Toto je rozložení sil při ortogonálním řezání, které se uplatní například při zapichování. [5]

U většiny technologických operací se uplatňuje vázané řezání a při něm má síla obecný směr. Namísto dvou složek síly řezání rozkládáme do tří, a to na sílu řeznou označenou  $F_c$  nebo  $F_z$ , pasivní označenou  $F_p$  nebo  $F_y$  a sílu posuvu označenou  $F_f$  nebo  $F_x$ . Řezná složka síly řezání působí ve směru hlavního řezného pohybu, pasivní složka působí ve směru kolmém k ose obrobku a posuvová složka působí ve směru osy obrobku, viz Obrázek 13. [5, 3]

Pro složky síly řezání  $F_z$ ,  $F_y$  a  $F_x$  platí, že odmocněný součet druhých mocnin složek je roven celkové síle řezání  $F$ . [5, 3]



Obrázek 12 Složky řezné síly s vyznačenými úhly



Obrázek 13 Řezné síly při vázaném řezání

Z hlediska poměru složek řezných sil je nejdůležitější použitá technologie a geometrie nástroje. Hlavním prvkem pro určení omezujících podmínek při optimalizaci obrábění je tangenciální složka řezné síly. Ta je také nejvýznamnější a určuje efektivní výkon při obrábění. V pasivní složce se odráží tuhost soustavy řezného procesu a vyvolává v ní deformace. Spolu s řeznou silou se nejvíce podílejí na nepřesnosti výroby. Posuvová složka má mezi ostatními nejmenší význam. [5, 3]

## 4. Metody měření silových účinků při soustružení

Experimentální studium silových jevů je významnou částí teorie obrábění. Zjišťování je zaměřeno na závislosti složek řezné síly nebo momentů na řezných podmínkách. Pro konstrukci a funkčnost obráběcích strojů, nástrojů apod. a pro optimalizaci řezných podmínek je tato znalost velice významná a stěžejní. Problematika silových účinků je více probrána v kapitole 3. [6]

Měřicí techniku pro studium silových jevů při řezném procesu lze dělit následovně: [6]

- Podle charakteru a konstrukce:
  - a. Laboratorní
  - b. Provozní
- Podle typu obrábění:
  - a. Soustružení
  - b. Frézování
  - c. Vrtání apod.
- Podle počtu měřených složek
  - a. Jednosložkové
  - b. Dvousložkové
  - c. Třísložkové
- Podle fyzikálního principu
  - a. Mechanické
  - b. Hydraulické
  - c. Pneumatické
  - d. Elektrické apod.
- Podle typu měření
  - a. Přímé
  - b. Nepřímé

Dělení dle typu měření bude použito jako primární v kapitolách 4.1 a 4.2.

### 4.1. Přímé

Většina metod používaných pro měření silových jevů při obrábění je založena na měření deformace určitého členu soustavy řezného procesu. Deformace je způsobena v důsledku působení řezné síly. V této soustavě lze konstatovat, že konstrukce obráběcího stroje je velice tuhá a přítomné deformace budou malé a obtížně měřitelné. Proto se zavádí opatření jako zeslabení určitého členu soustavy, typicky vřetena, které můžeme vnímat jako vestavěný dynamometr. Dále lze použít přídavné zařízení, obvykle dynamometr s deformačním členem. [6, 8]

Ve zmíněných případech se v soustavě řezného procesu vytváří určitá deformace, která je ale svou hodnotou limitovaná tak, aby neovlivňovala proces obrábění. Při navrhování deformačních členů je požadavek na co nejvyšší tuhost a citlivost, což jsou protichůdné požadavky, které je potřeba uvést do optimální kombinace. Nejlepší výsledky lze dostat od zařízení, která jsou navržena pro specifický účel měření a kombinace jejich parametrů jsou na míru tomuto měření. [6, 8]

## 4.2. Nepřímé

U nepřímého měření silových jevů se řezná složka síly řezání  $F_z$  určuje z měření výkonů na hnací jednotce, nejčastěji na elektromotoru nebo z kroutícího momentu na vřetenu. Nejčastěji použítá měřidla jsou wattmetry, případně ampérmetry. [6]

Při výpočtu je nejprve potřeba zjistit celkový příkon stroje při obrábění  $P_c$  a dále příkon nezatíženého stroje  $P_0$ . Z těchto hodnot jsme schopni dopočítat užitečný výkon vztahem: [6, 7, 8]

$$P_{už} = P_c - P_0 \quad (W) \quad (1.10)$$

Řeznou složku síly řezání určíme vztahem: [6]

$$F_z = \frac{P_{už}}{v} = \frac{P_c - P_0}{v} \quad (N) \quad (1.11)$$

Kde  $P_c$  je celkový příkon zatíženého stroje (W),  $P_0$  je příkon stroje naprázdno (W),

$F_z$  je řezná složka síly řezání (N),  $v$  je řezná složka rychlosti obrábění (m/s).

Pro určení řezné složky síly řezání přes krouticí moment se používají wattmetry pro změření celkového příkonu při obrábění a dále pro měření kroutícího momentu na vřeteni při brždění, které odpovídá změřenému příkonu. Pro vyvození brzdného momentu se nejčastěji používají mechanické brzdy. Při měření se nejprve zjistí celkový příkon stroje. Poté se nástroj vysune ze záběru a při stejných řezných podmínkách se zvyšuje brzdný moment, než wattmetr ukáže stejnou hodnotu jako při obrábění. Velikost řezné složky síly řezání určíme ze vztahů: [6, 7, 8]

$$M_k = F_z \cdot \frac{D}{2} = M_b \quad (Nm) \quad (1.12)$$

$$F_z = \frac{2 \cdot M_b}{D} \quad (N) \quad (1.13)$$

Kde  $F_z$  je řezná složka síly řezání (N),  $M_k$  je krouticí moment na vřetenu (Nm)

$M_b$  je brzdný moment vyvozený brzdou (Nm),  $D$  je průměr nástroje nebo obrobku (mm)

## 5. Silové senzory a dynamometry

### 5.1. Dynamometry

Dynamometr je přístroj k měření velikosti síly nebo momentu síly. Z hlediska konstrukce a provedení musí dynamometr splňovat určité základní požadavky. Těmi nejdůležitějšími jsou nezávislost sledované veličiny na okolním prostředí a jiných vnějších vlivech, dále měření dané veličiny v požadovaném rozsahu s potřebnou citlivostí. Základním prvkem každého dynamometru je deformační člen nebo čidlo, jehož deformace je přímo úměrná velikosti působící síly. Tyto deformace se transformují na jinou fyzikální veličinu pro přenos informace. Tyto měronosné veličiny musí mít jasnou funkční závislost k měřené veličině. [6, 8]

#### 5.1.1. Mechanické

Princip mechanických dynamometrů spočívá ve snímání deformace mechanickým způsobem. Pod tímto pojmem si lze představit použití úchylkoměrů, mikrokátorů apod. Jako čidla lze použít kroužky, třmeny, membrány apod. Mechanické dynamometry jsou jednoduché, poměrně spolehlivé a podávají stále údaje. Přesnost měření u těchto dynamometrů závisí na konstrukci a kvalitě výroby a pohybuje se obvykle mezi 1 až 2 %. Nevýhodou těchto dynamometrů je nízká vlastní frekvence, která znemožňuje měření dynamických účinků. Další významnou nevýhodou je teplotní závislost zařízení, protože při vyšších teplotách jsou i vyšší deformace. Z uvedených důvodů se mechanické dynamometry používají pro monitoring řezného procesu obrábění jen výjimečně. [6, 8]

#### 5.1.2. Hydraulické

Hydraulické dynamometry pracují na principu přenosu účinku měřené síly nebo momentu na píst či membránu. Tento přenos způsobí změnu tlaku v kapalině, typicky glycerinu nebo oleji, a ten je snímán vhodným přístrojem. Výhodou těchto dynamometrů je hlavně konstrukční jednoduchost. Nevýhodou je malá citlivost a nutnost dokonalého utěsnění vnitřního systému s kapalinou. Z těchto důvodů se tyto dynamometry pro monitorování procesu obrábění používají jen výjimečně. [6, 8]

#### 5.1.3. Pneumatické

Princip fungování těchto dynamometrů spočívá v použití čidla umožňujícího měření v systému klapka-tryska. Tento systém využívá dynamických vlastností vzduchu protékajícího štěrbinou. Tyto dynamometry tedy měří tlakové nebo průtokové změny vzduchu v závislosti na změně velikosti štěrbin mezi klapkou a tryskou v čidle. Jako čidlo se používá speciální siloměrné tělísko s tryskou a stavitelnou klapkou. Různé rozsahy měření nastavujeme změnou velikosti mezery čidla. Používají se dva systémy měření, a to nízkotlaký a vysokotlaký. Výhodou těchto dynamometrů je jejich jednoduchost, snadná údržba i používání, dobrá spolehlivost a citlivost. [6, 8]



#### 5.1.4. Elektrické

Měření sil pomocí elektrických dynamometrů je velice rozšířený způsob. Jejich principem je transformace deformace na elektrickou veličinu pomocí snímače. Tento snímač můžeme chápat jako mechanicko-elektrický transformátor. Pro zmíněnou transformaci se využívá různá řada fyzikálních jevů s různými vlastnostmi a principy, které zajistí požadovanou přesnost a citlivost i při malé deformaci. [6, 8]

#### 5.1.5. Odporové

Základem těchto dynamometrů, jak název napovídá, je změna elektrického odporu snímače způsobená deformací čidla. Často používaným snímačem jsou odporové tenzometry. U těchto tenzometrů dochází ke změně odporu v důsledku deformace vodiče nebo polovodiče. Tenzometr je pevně spojen s deformačním elementem dynamometru a také se deformuje. Změna odporu vodiče je úměrná deformaci vyvozené řeznou silou nebo momentem. [6, 8]

#### 5.1.6. Indukční

V těchto dynamometrech je indukční snímač, ve kterém měřená deformace způsobí změnu indukčnosti cívky. Indukční snímače se dají dělit do třech skupin, na snímače s uzavřeným magnetickým obvodem, s otevřeným magnetickým obvodem a se stálým magnetickým obvodem. [6, 8]

Pro měření řezných sil se primárně používají snímače pracující se vzduchovou mezerou. Působením síly se mění šířka mezery  $d$  a tím i indukčnost cívky. [6, 8]

Indukční snímače mají dostatečně silný signál, čili není nutná potřeba dalšího zesílení signálu. Používají se na statická i dynamická měření, ale jsou omezeny maximálními frekvencemi měřené veličiny. Indukční snímače nejsou mechanicky namáhány a jsou teplotně stabilní a velmi citlivé. Nevýhodou jsou velké rozměry a hmotnosti snímačů. [6]

### 5.1.7. Kapacitní

Kapacitní dynamometry měří deformaci na základě změny kapacity snímače. Jsou to vlastně deskové kondenzátory s proměnnou vzdáleností jednotlivých desek nebo proměnnou plochou desek. Toto vyplývá ze vztahu pro výpočet kapacity C: [6, 8]

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad (1.14)$$

Kde C je kapacita kondenzátoru (F),  $\varepsilon$  je relativní permitivita (-), S je plocha desek (m<sup>2</sup>), d je vzdálenost desek (m)

Pro měření silových jevů při obrábění se používají oba typy kondenzátorů. Dynamometry se snímačem s proměnlivou vzdáleností desek nemají lineární průběh závislosti kapacity na vzdálenosti desek, ale jsou velice citlivé. Největší citlivost mají, když je vzduchová mezera co nejmenší. Dynamometry se snímačem s proměnlivou plochou desek mají lineární průběh, ale jsou mnohem méně citlivé. Kapacitní snímače mají celkově dostatečně velkou citlivost a malou hmotnost, ale jsou velice náchylné na vnější vlivy, a proto se pro měření při obrábění používají relativně málo. [6, 8]

### 5.1.8. Piezoelektrické

Piezoelektrické dynamometry fungují na principu piezoelektrického jevu pro měření deformace. Při tomto jevu vzniká na povrchu určitých krystalů elektrický náboj v důsledku deformace. Nejpoužívanější piezoelektrický materiál je křemen a některé keramické materiály. Základem pro tato měřidla je vhodně vyříznutá destička z daného materiálu. Krystaly této destičky jsou orientovány do směrů tří hlavních os. Při zatížení destičky ve směru kolmém na elektrickou osu vznikají na protilehlých plochách elektrické náboje opačných polarit. Velikost náboje je úměrná velikosti zatížení. Piezoelektrické snímače mají poměrně jednoduchou konstrukci, jsou lehké a relativně malé. Hlavními výhodami jsou linearita v širokém rozsahu a vysoká citlivost. Piezoelektrické snímače jsou velice rozšířené a vhodné pro měření sil při obrábění. Nevýhodou je vysoká cena samotného zařízení i měřící aparatury. [6, 8]

## 6. Metody monitoringu řezného procesu

Při procesu obrábění se vyskytuje několik jevů, které mohou ovlivnit efektivitu produkce snížením kvality a přesnosti obrobku nebo zvýšením ceny výroby. Znalost těchto jevů napomáhá vhodné volbě řezných podmínek, zvýšení efektivitu výroby a zvýšení bezpečnosti. K pochopení těchto jevů napomáhá monitorování řezného procesu jako například měření řezných sil, teplot a vibrací. Získaný signál nám může poskytnout informaci o opotřebením nástroje, kvalitě obrábění a možných chybách při výrobě. V tomto odstavci budou popsány známé a používané metody monitorování řezného procesu. [9, 11]

### 6.1. Řezné síly

Informace o řezných silách je velice podstatná pro objasnění řezného procesu a návrh optimálního řezného nástroje. Tato informace má významnou roli při sledování teplot řezného procesu, opotřebením nástroje a drsnosti povrchu. Vysoké řezné síly znamenají vysokou spotřebu energie a tato sledování napomáhají ke snížení a optimalizaci těchto veličin. Řezné síly se dají rozložit na složku statickou a dynamickou a dají se měřit přímo a nepřímo, viz kapitola 4. Nejčastějšími zařízeními pro měření řezných sil jsou dynamometry v celém rozsahu jejich typů, viz kapitola 5.1. Dále lze měřit příkon elektromotoru vřetene nebo kroutící moment vřetene. [9, 10, 11]

### 6.2. Vibrace

Velice častým jevem, který doprovází řezné operace, jsou vibrace systému způsobené nízkou tuhostí obrobku. Vibrace jsou nejvíce sledovány při dokončovacích operacích a jsou nežádoucím jevem z důvodu zhoršení kvality obráběného povrchu a možného poničení součástí stroje. Monitorování vibrací vyžaduje méně snímacích zařízení než při sledování akustických emisí, viz kapitola 6.5, a vypovídá o robustnosti, spolehlivosti a použitelnosti řezné soustavy. Tato metoda má také výhodu rychlého reakčního času pro použití pro měření v reálném čase. Ze získaného signálu lze odlišit různé typy opotřebením, ale při dlouhodobém měření je signál citlivější na řezné podmínky než na opotřebením nástroje. Nejběžněji používaným měřicím zařízením jsou akcelerometry. Ty se velice jednoduše používají, ale nevýhodou je, že podávají informaci jen o frekvenci a amplitudě vibrací. [9, 10, 11]

### 6.3. Teploty

Měření teplot je velice obtížné, jelikož teplota je skalární pole, které se liší v celém systému. Mnoho technických problémů při obrábění je přímo nebo nepřímo spojeno s teplotou. Energie spotřebovaná při obrábění je přeměňována na teplo na řezné části nástroje. Existují dva hlavní důvody monitorování teploty a těmi jsou zjištění rozložení teploty v řezném procesu a hodnoty těchto teplot, dále určení teploty v místě kontaktu řezné části nástroje a obrobku. Teplota v řezném prostředí výrazně ovlivňuje opotřebení nástroje, difuzi a korozi, únavové pochody a materiálové změny obrobku. Nejběžněji používanými měřicími zařízeními jsou termočlánky. Ty mohou být zakomponovány přímo do nástroje nebo obrobku, čímž zjednodušují a zpřesňují měření. Fungují ve velkém rozsahu hodnot, jsou levné a odolné. Existují i jiná měřicí zařízení, jako pyrometry, infračervené senzory a termokamery. Tato zařízení jsou ale komplikovanější na používání a dražší. [9, 11]

### 6.4. Zvuk

Zvuk vydávaný řezným procesem v sobě nese mnoho informací. Stejně jako operátor slyší, co za pochody se při obrábění odehrává, tak tento zvuk může být zaznamenáván i mikrofonom. Existuje celá řada unikátních zvuků, které jsou vydávány při obrábění, jako abnormální kondice řezného procesu nebo poškození řezného nástroje. Frekvence vydávaného zvuku je vyšší než frekvence vibrací. Tento zvuk je zaznamenán a je vhodný pro vyhodnocení charakteristických dynamických pochodů, zejména chvění. Mikrofony pro měření zvuku při obrábění jsou v porovnání s dynamometry a akcelerometry levnější variantou. Dále jsou limitovány citlivostí na okolní zvuky. Problematické je snímání nízkofrekvenčních zvuků a zaznamenávání zvuků ze směrů jiných, než jak je mikrofون nastaven. [9, 11]

### 6.5. Akustická emise

Akustická emise je definovaná jako jev, při kterém se generují přechodné elastické vlny při uvolnění energie z určitého zdroje v materiálu. Akustickou emisí najdeme v primární, sekundární i terciální zóně řezu. V primární zóně ji generuje tvorba třísky, v sekundární zóně je způsobena třením mezi třískou a nástrojem a v terciální zóně následkem tření boku nože a obrobku. Monitorování akustické emise je velice efektivní a spolehlivé a je schopné detekovat závady díky vysoké citlivosti senzoru na řezný proces. Technika monitorování akustické emise je považována za jednu z nejcitlivějších metod. Svou vysokou citlivostí neztrácí ani při obrábění s velice nízkými hloubkami řezu. Senzory pro akustickou emisii se dají efektivně použít pro zjišťování závad na nástroji i pro kontrolu kvality povrchu. [9, 10, 11]

## 7. Příprava vlastního experimentu

Z teoretické části vyplynulo, že sledování řezných sil je nejčastěji provedeno dynamometry nebo nepřímou metodou z příkonu na vřetení. V praktické části byla řešena možnost sledování řezných sil senzorem 9232A a porovnávání jeho dat k dynamometru. Praktická část byla tvořena třemi hlavními částmi. Určením driftu senzoru 9232A, určením vhodné pozice pro senzor a citlivostní analýzou na vybraném místě. Zkoušky driftu senzoru proběhly z důvodu potřeby informace o chování senzoru při používání a zjištění vlivu driftu na měření. Volba vhodné pozice se skládá z měření na mnoha místech a následné vícekriteriální analýzy jednotlivých pozic. V nevhodnějších pozicích byl senzor upnut a byla provedena finální měření s citlivostní analýzou.

### 7.1. Strojní vybavení

Číslicově řízený soustruh SP 430 SY 2 1100, viz Obrázek 14, byl stroj použitý pro monitoring řezného procesu. V rozsahu bakalářské práce se bylo možné zaměřit pouze na jeden specifický stroj, a tedy celé měření a kalibrace senzoru a dynamometru bylo prováděno pouze na zmíněném stroji.



Obrázek 14 Soustruh SP 430 [12]

#### 7.1.1. Specifikace od výrobce

Stroj je proveden modulárně s možností varianty s osou Y a velkým zdvihem v této ose, spodní hlavou s poháněnými nástroji, lunetou a protivřetenem. Stroj je velice tuhý s vysokým krouticím momentem na vřetení, tedy umožňuje výkonné soustružení na maximálním průměru. Svou dynamikou a vysokými rychlostmi v jednotlivých osách zajišťuje krátké vedlejší časy a efektivnější využití stroje. Dlouhodobé obrábění s vysokou přesností je možné kvůli valivému vedení ve všech osách. Řídicí systém je od firmy SIEMENS typ SINUMERIK 840Dsl a pohony řady SINAMIC a FANUC série OiTD. Dále je stroj vybaven integrovanou bezpečností SAFETY INTEGRATED firmy SIEMENS a DUAL CHECK SAFETY firmy FANUC nebo bezpečnostními moduly s řídicí technikou HEIDENHAIN. [12]

**Pracovní prostor stroje: [12]**

Oběžný průměr nad ložem: 680 mm

Oběžný průměr nad příčným suportem: 480 mm

Maximální délka soustružení: 1100 mm

Maximální průměr soustružení – horní hlava: 550 mm

Maximální průměr soustružení – spodní hlava: 430 mm

**Hlavní vřeteno stroje: [12]**

Maximální výkon S1/S6 – 40 %: 28/42 kW

Maximální moment S1/S6 – 40 %: 1403/2106 Nm

Maximální otáčky: 3150 m/min

Maximální moment pro osu C: 327 Nm

Maximální rychlost pro osu C: 30 m/min

**Nástrojové vřeteno horní hlavy stroje: [12]**

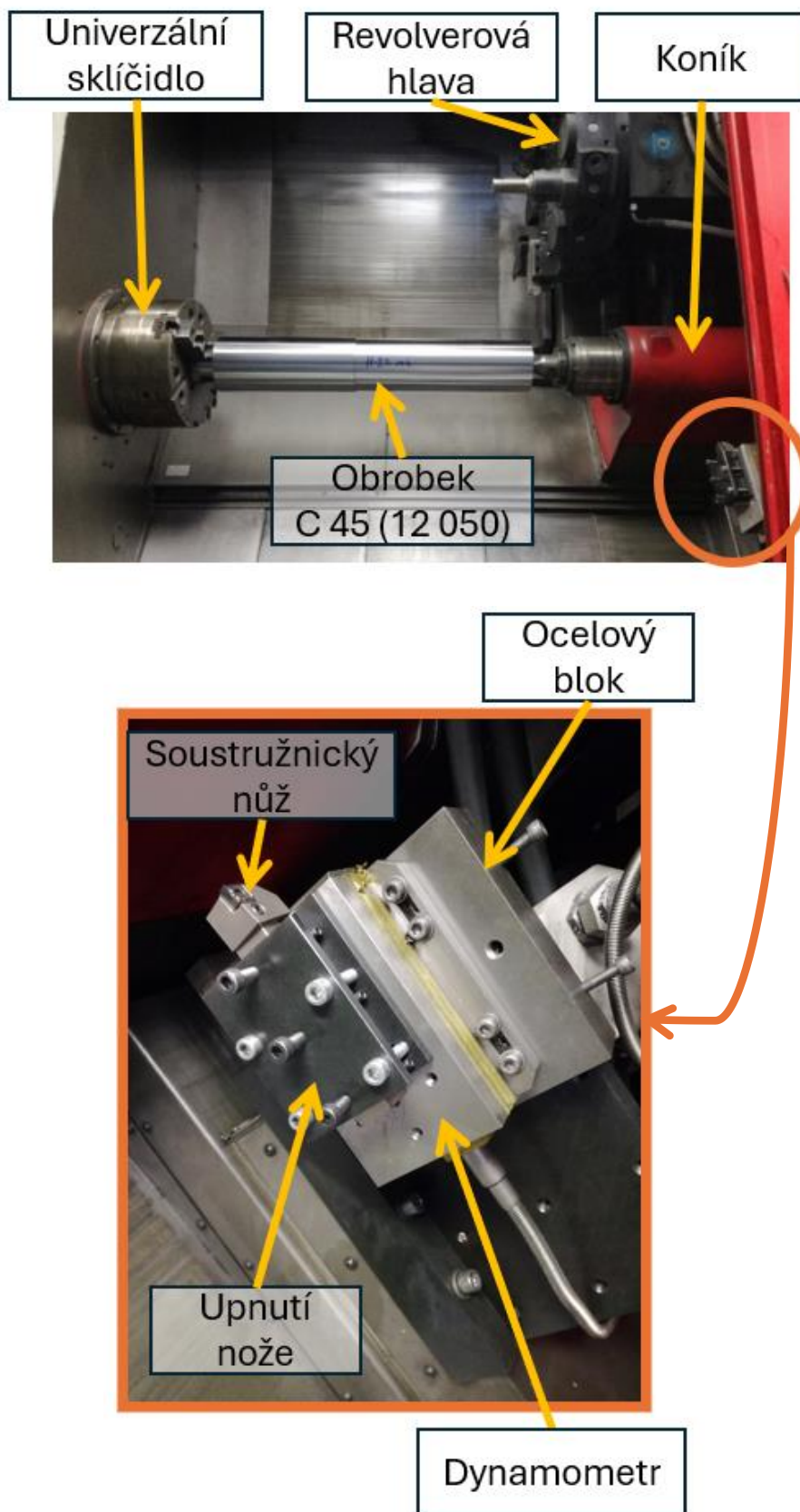
Maximální výkon S3-40 %: 22,3 kW

Maximální moment S3-40 %: 71 Nm

Maximální rychlost vřetena nástroje: 4000 m/min

Počet poloh: 12

Ukázka částí vnitřku stroje a zařízení, které se běžně objevují napříč experimentem, viz  
Obrázek 15.



Obrázek 15 Popis částí stroje a zařízení

## 7.2. Nástrojové vybavení

Pro část experimentu s obráběním byl použit soustružnický nůž PCLNL 2525 M12 primárně s vyměnitelnou břitovou destičkou CNMG 12404E-FM. V prvotních experimentech byla také použita vyměnitelné břitová destička CNMG 120412E-RM. [13, 14, 15]

### 7.2.1. Soustružnický nůž

Nůž PCLNL 2525 M12 je určený pro vyměnitelné břitové destičky s označením CNxx1204yy s úhlem břitu 95 °. Značení xx znamená dvě písmena a yy znamená dvě čísla. Průřez stopky nože je 25x25 [mm] s celkovou délkou 150 mm a maximálním vyložení 27,2 mm. [13]

### 7.2.2. Vyměnitelné břitové destičky

CNMG 12404E-FM je dvoustranná negativní destička s tvarem 80° kosodélníku. Průměr vnitřního upínacího otvoru je 12,7 mm. Tloušťka destičky je 4,76 mm s poloměrem zaoblení špičky 0,4 mm. Destička je vybavena lamačem třísek a je MT-CVD povlakovaná, základní materiál je v rozmezí ISO P15-P35. [14] Tato destička byla v experimentu použita pro naprostou většinu testů, až na prvotní, s  $a_p = 1,5$  mm.

CNMG 120412E-RM je dvoustranná negativní destička s tvarem 80° kosodélníku. Průměr vnitřního upínacího otvoru je 12,7 mm. Tloušťka destičky je 4,76 mm s poloměrem zaoblení špičky 1,2 mm. Destička je vybavena lamačem třísek RM. [15] Tato destička byla v experimentu použita pro prvotní testy s  $a_p = 3$  mm.

## 7.3. Měřicí vybavení

Pevně daným zařízením v tomto experimentu byl senzor 9232A. Ten byl použit samostatně nebo v kombinaci s magnetickým pouzdrem. Od těchto zařízení se odvíjela volba dalších měřidel.

Zařízení použitá pro měření se senzorem 9232A byla volena od firmy Kistler. Na výběr byli následující zařízení. Vícekanálový zesilovač náboje od Kistler typ 5017, Kistler LabAmp typ 5165A, Kistler DAQ-systém for Dynoware typ 5697A.

Zařízení použitá pro měření sil byla volena v sestavě více komponentního dynamometru 9257B a zesilovače náboje LabAmp s DAQ 5167A, obě zařízení jsou také od firmy Kistler.



### 7.3.1. Senzor 9232A

Je to piezoelektrický senzor povrchových napětí pro měření dynamických a kvazistatických sil na fixních i pohybujících se konstrukcích, zařízeních apod. Senzor měří silově proporcí napětí. Díky kompenzaci zrychlení je použitelný pro měření při vysokorychlostních operacích. [16] Konstrukční provedení senzoru lze vidět na Obrázek 16.



Obrázek 16 Senzor 9232A [16]

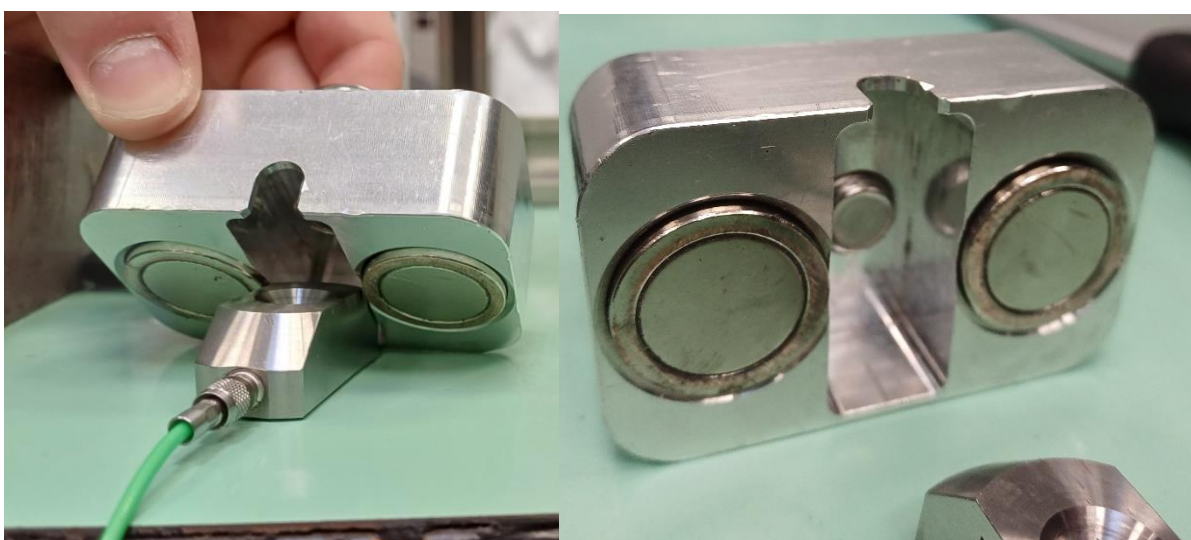
Tabulka 1 Parametry senzoru 9232A [16]

Rozsah měření	(-600 až 600) $\mu\epsilon$
Přetížení	(-900 až 900) $\mu\epsilon$
Nominální citlivost	-80 pC/ $\mu\epsilon$
Rozměry	40x17x15 [mm]
Typ signálu na výstupu	Elektrický náboj (piezoelektrický, PE)
Připojení na výstupu	KIAG 10-31 neg., 10-32 UNF neg.
Uváděcí cena	735 €
Linearita	$\approx \leq \pm 2 \% FSO$
Stupeň ochrany EN 60529	IP65
Rozmezí pracovních teplot	(0 až 70) °C
Hmotnost	50 g
Odpor izolace při 20 °C	$\leq 10 T\Omega$
Odpor izolace při 70 °C	$\leq 0,01 T\Omega$

Pro správné fungování senzoru musí být povrch pod senzorem dostatečně odmaštěn a výstup senzoru musí být očištěn speciálním přípravkem ve spreji, který zajistí správné vedení signálu v podobě náboje.

### 7.3.2. Prototyp magnetického pouzdra

Pro zjišťování vhodného místa, s dostatečným silovým tokem v blízkosti silového působení, pro upevnění senzoru byl použit prototyp magnetického upínání pro senzor 9232A. Zesponu přípravku jsou dva magnety, které zajistí polohu na měřené součásti. Těmi je senzor přitlačen k monitorované oblasti pomocí šroubu, který se nachází v závitové díře prototypu. Rozměry spodní plochy pouzdra jsou 70x50 mm. Geometrie pouzdra je zobrazena níže, viz Obrázek 17. Připevněné pouzdro se senzorem, viz Obrázek 18.



Obrázek 17 Magnety a vnitřní uspořádání prototypu magnetického pouzdra



Obrázek 18 Upevněné pouzdro se senzorem

### 7.3.3. Zesilovače

#### Vícekanálový zesilovač náboje od Kistler typ 5017

Zesilovač 5017 je kalibrované vícekanálové zařízení s mikroprocesorovou kontrolou. Typicky se používá v kombinaci s piezoelektrickými dynamometry pro měření sil a momentů. Požadované parametry měření se dají nastavit na displeji zařízení nebo ve vhodném programu. Veškeré funkce lze také nastavovat prostřednictvím IEEE-488 nebo RS-232C.

Tento zesilovač je ze starší generace, která se již ze stránek Kistler nedá zakoupit, a tedy není veřejně dostupný ani katalogový list. Je možné ho získat na vyžádání. Podoba zařízení viz Obrázek 21 na straně 36.

#### Kistler LabAmp typ 5165A

Univerzální laboratorní zesilovač náboje lze použít pro měření libovolných dynamických signálů získaných piezoelektrickými senzory. Příchozí signál je převeden přímo na digitální hodnotu nebo na proporční hodnoty elektrického napětí. Je vybaven čtyřmi 24bitovými kanály s minimální latencí. Ovládání a nastavení je realizováno v prostředí prohlížeče nebo v Lab Software 2910B. [17] Podoba zařízení viz Obrázek 21 na straně 36.

#### Zesilovač náboje LabAmp s DAQ 5167A

LabAmp lze použít pro měření kvazistatických i dynamických sil od senzorů i dynamometrů. Rozsah tohoto zařízení je od  $\pm 100$  do  $\pm 1\,000\,000$  pC s možností použití až osmi kanálů. [18]. Podoba zařízení viz Obrázek 19.



Obrázek 19 Zesilovač náboje LabAmp s DAQ 5167A

### 7.3.4. Dynamometr

Více komponentní dynamometr 9257B je piezoelektrický s možností měření sil ve třech směrech s rozsahem měření od -5 kN do 10 kN. Výstupní signál je v podobě elektrického náboje s konektorem typu Fischer 104 9-pin. [19]. Podoba zařízení viz Obrázek 20.

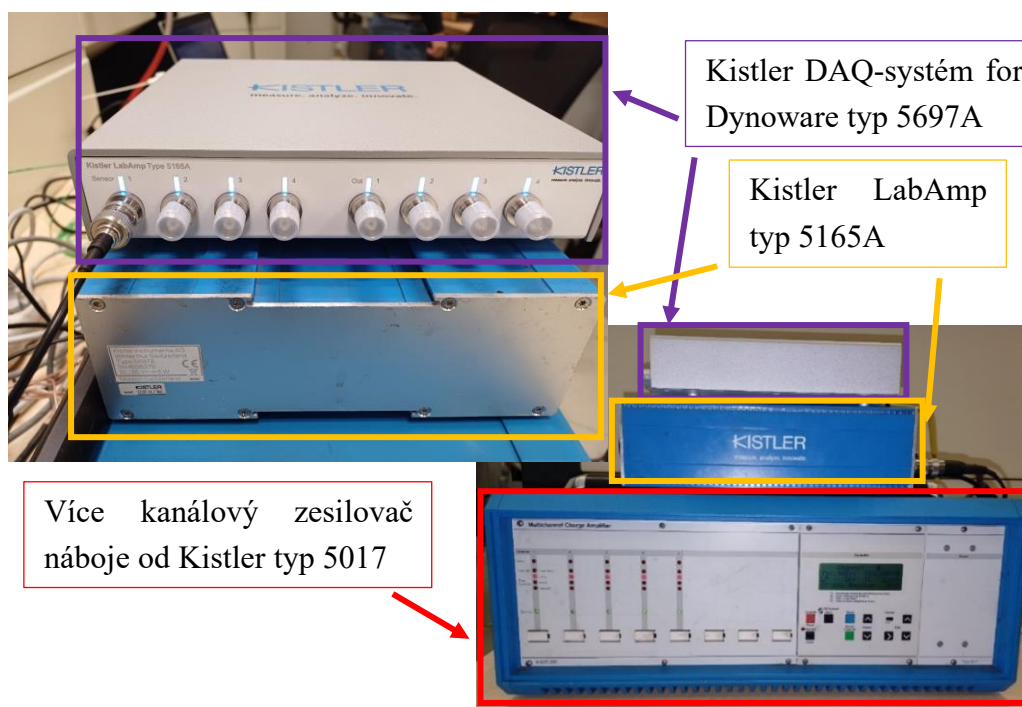


Obrázek 20 Více komponentní piezoelektrický dynamometr

### 7.3.5. DAQ

#### Kistler DAQ-systém for Dynoware typ 5697A

Systémem získávání dat pro ovládání a nastavení zesilovačů náboje a zařízení pro úpravu signálu s obecným použitím a pro měření rezných sil. Lze použít pro měření s více komponentními senzory a dynamometry. Systém se propojí pomocí USB 2.0 a je ovládán programem DynoWare 3.2. Je vybaven 28 kanály s 16bitovým rozlišením a maximální snímkovací frekvencí 1000 kS/s. [20] Podoba zařízení viz Obrázek 21.



Obrázek 21 Měřicí zařízení od firmy Kistler pro měření se senzorem

### **7.3.6. Notebook a použité programy**

Notebook použitý pro finální získání a práci daty byl Lenovo ideapad 330. Pro vyhodnocení dat byl primárně použit program DynoWare 3.2. Tento program je od firmy Kistler a specializuje se na práci s většími objemy dat a jejich vyhodnocení. [21] Druhý program pro vyhodnocení dat byl Microsoft Excel. Ten byl použit jen minimálně ze začátku měření. Tato varianta byla později zavržena z důvodu častého neodpovídání programu při práci s daty. Exportování dat do Microsoft Excel proběhlo přes webovou aplikaci od firmy Kistler.

### **7.4. Volba vhodné kombinace sestavy měření**

Pro volbu vhodné měřicí sestavy bylo několik podmínek a z uvedených měřicích zařízení bylo možno sestavit jen tři kombinace. Jednou byl samotný LabAmp 5165A, druhou zesilovač 5017 pro zpracování signálu a LabAmp 5165A pro dodatečnou úpravu signálu od zesilovače, nastavení a export do Microsoft Excel, třetí byl zesilovač 5017 s DAQ 5697A pro export do DynoWare.

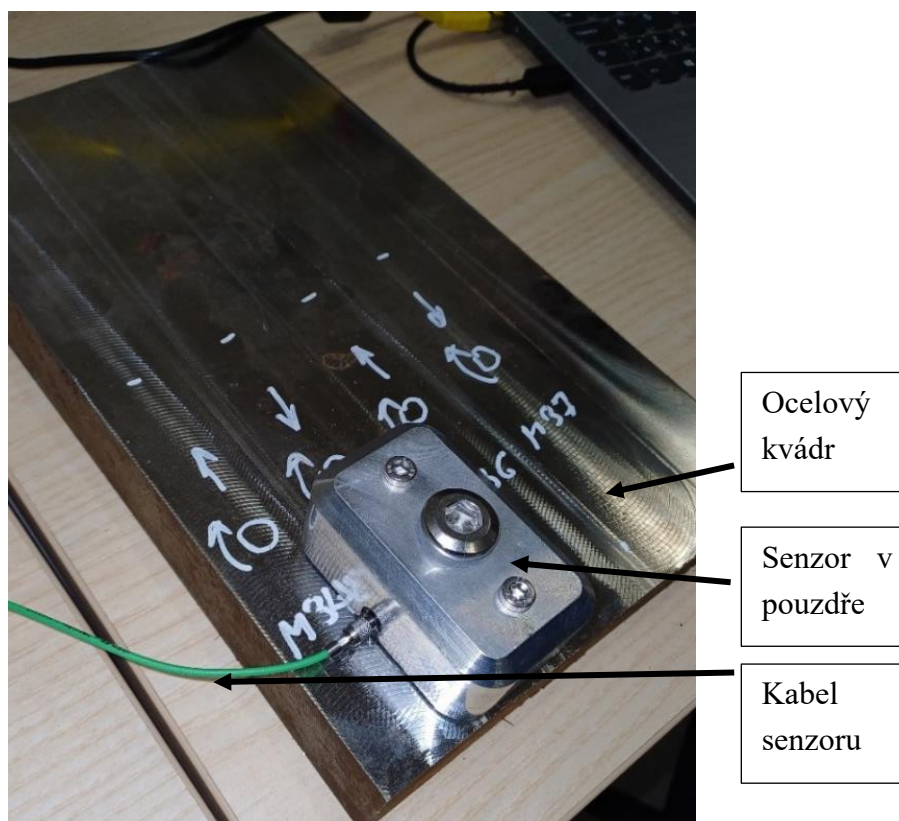
Hlavní podmínkou pro měřicí techniku byla možnost měření statických i dynamických účinků, které byly oba stěžejní pro monitorování řezného procesu. Další podstatnou podmínkou bylo použití programu pro vyhodnocení, který je vhodný pro práci s většími objemy dat. Se znalostí těchto dvou podmínek bylo rovnou zavrženo použití samotného LabAmp 5165A, který byl schopen vyhodnocovat pouze dynamickou složku u signálu v podobě elektrického náboje. Stále bylo možné použít druhou a třetí variantu.

U druhé varianty byl LabAmp 5165A použit pro dodatečné zpracování signálu již v podobě elektrického napětí od zesilovače, u kterého byl schopen vyhodnotit i složku statickou. Tato varianta byla problematická v části vyhodnocování dat, která byla exportována do Microsoft Excel, který nebyl vhodný pro práci s velkými objemy dat a často neodpovídal. Tato varianta byla použita v prvotních testech měření.

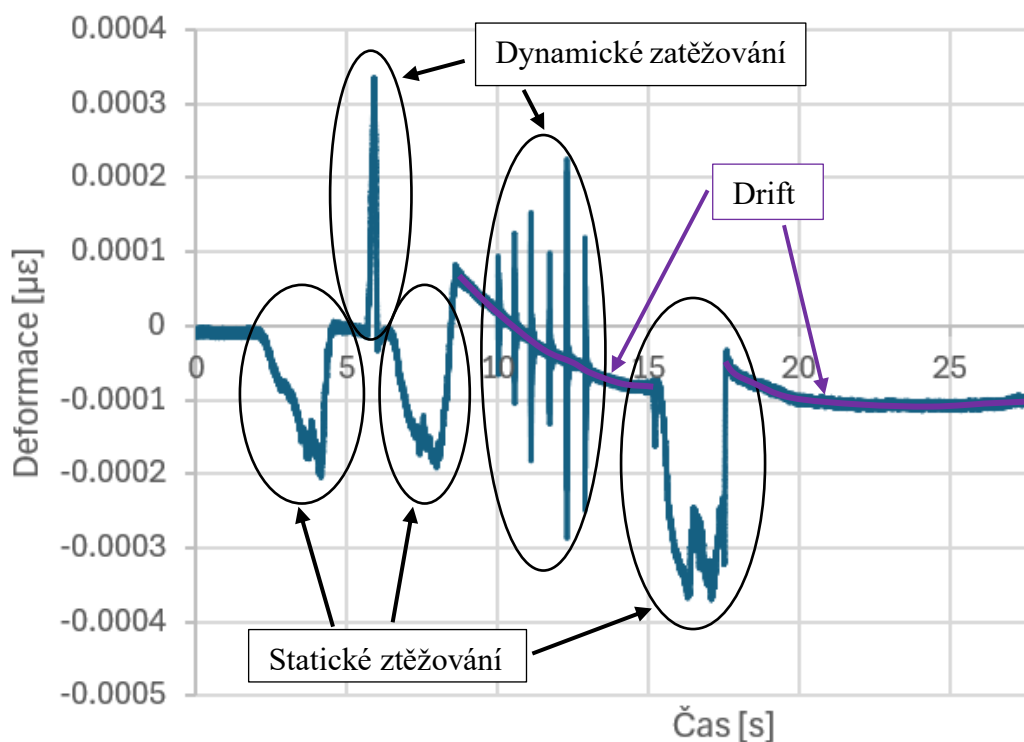
Poslední a nejvíce vhodnou variantou bylo použití zesilovače 5017 s DAQ 5697A. Tato kombinace byla použita v převážné části experimentu a byla schopna vyhodnotit obě složky signálu a snadno bez problémů zpracovávat data v prostředí DynoWare 3.2.

## 7.5. Prvotní testy a zlepšení kvality měřeného signálu

První zkouška proběhla se sestavou v podobě vícekanálového zesilovače 5017 a LabAmp 5165A. Senzor s magnetickým pouzdrem byl umístěn na ocelový kvádr, viz Obrázek 22, a ten byl zatěžován dynamicky a krátkodobě staticky. Na signálu získaném z měření, viz Obrázek 23, bylo vidět odezvu na dynamické a statické zatěžování. Signál byl čistý, bez přítomnosti šumu nebo jiných interferencí a pohyboval se v rozmezí deseti tisícín microstrain.



Obrázek 22 První zkouška měření se senzorem v magnetickém pouzdře na ocelovém kvádru

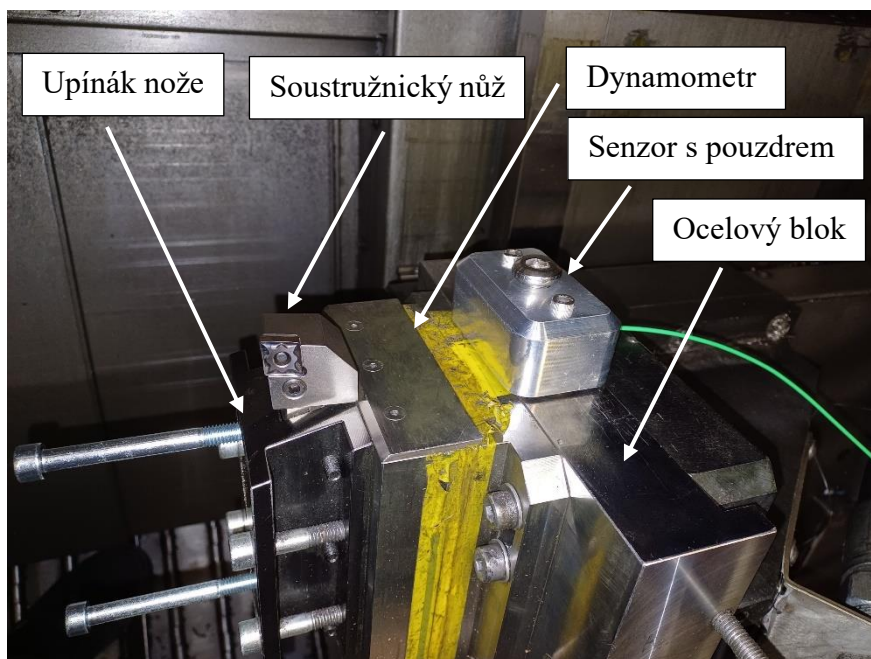


Obrázek 23 Data první zkoušky

Dále proběhly zkoušky měření na stroji SP 430 zatím bez obrábění. Ty proběhly se stejnou hardwarovou sestavou jako předchozí měření. Na zesilovači náboje byla nastavená dlouhá časová konstanta a citlivost odečtená z kalibračního listu senzoru  $-79 \text{ pC}/\mu\epsilon$ . Rozsah hodnot měření byl vždy volen co nejnižší podle potřeby každého měření, aby nedocházelo ke ztrátám citlivosti senzoru z důvodu příliš vysokého rozsahu. Snímkovací frekvence byla nejčastěji nastavena na 10 000 Hz po dobu 30 s.

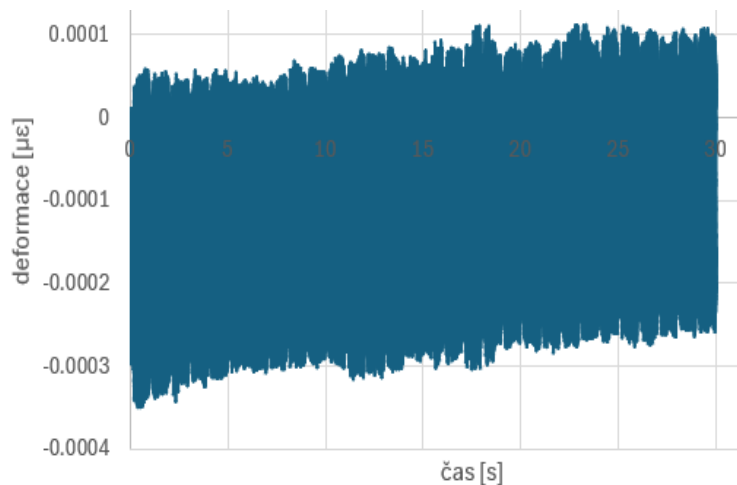
V následujících měření byla volena umístění senzoru s pouzdem například na ocelovém bloku pod dynamometrem, na upínáku nože, na revolverové hlavě, na koníku apod. Ve všech pozicích byla provedena tři měření, a to na vypnutém stroji, zapnutém stroji a na zapnutém stroji s vazbou posuvu. Zatěžování systému probíhalo podle potřeby nebo přítomno nebylo vůbec. V případě měření se zatěžováním bylo silově působeno na součást, která by byla zatěžována při obrábění. Při měření u dynamometru byl zatěžován nůž, při měření na koníku obrobek.

Jako příklad umístění senzoru je uvedena pozice na ocelovém bloku, viz Obrázek 24 .



Obrázek 24 Umístění senzoru na ocelovém bloku

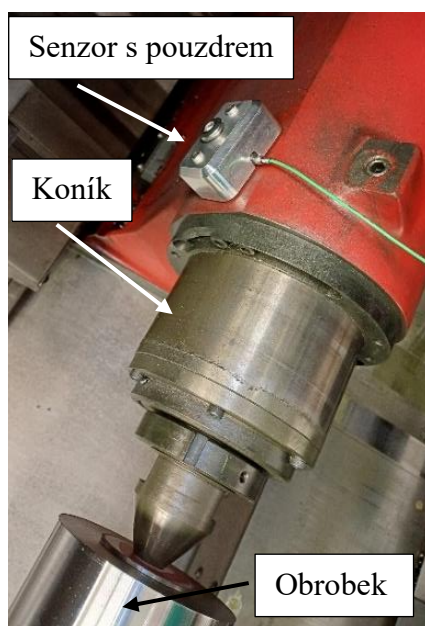
Po provedení prvních měření se dalo říct, že byl signál něčím rušen. Toto rušení se projevuje výrazným šumem, a tedy znehodnocením měření. Následující testy tohle tvrzení dále podložily. Špatný signál byl obdržen z měření v libovolné pozici s vypnutým i zapnutým strojem, se zatěžováním i bez zatěžování. Při měření na ocelovém kvádru byla šířka signálu ve sta tisícinách  $\mu\epsilon$ , zatímco při rušeném signálu byl v rozsahu deseti tisícín  $\mu\epsilon$ . Typický průběh rušeného signálu, viz Obrázek 25.



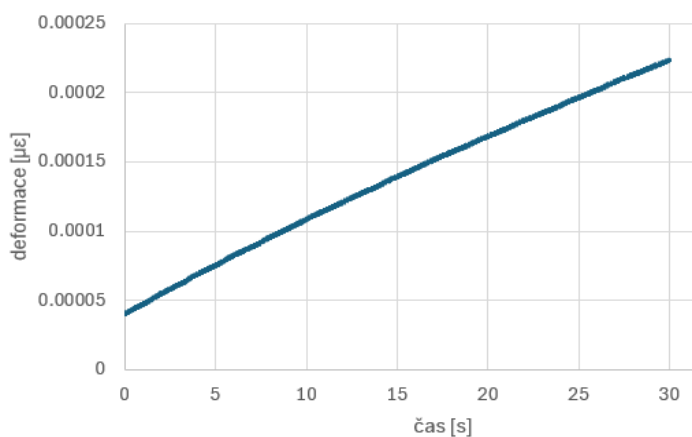
Obrázek 25 Typický průběh rušeného signálu



Jedinou výjimkou bylo měření na koníku, viz Obrázek 26. V této pozici byl signál rušen méně a v grafu, viz Obrázek 27, lze pozorovat přirozený drift. Signál byl rušen méně z důvodu umístění senzoru na povrchovou nevodivou vrstvu laku koníku.



Obrázek 26 Umístění senzoru na koníku

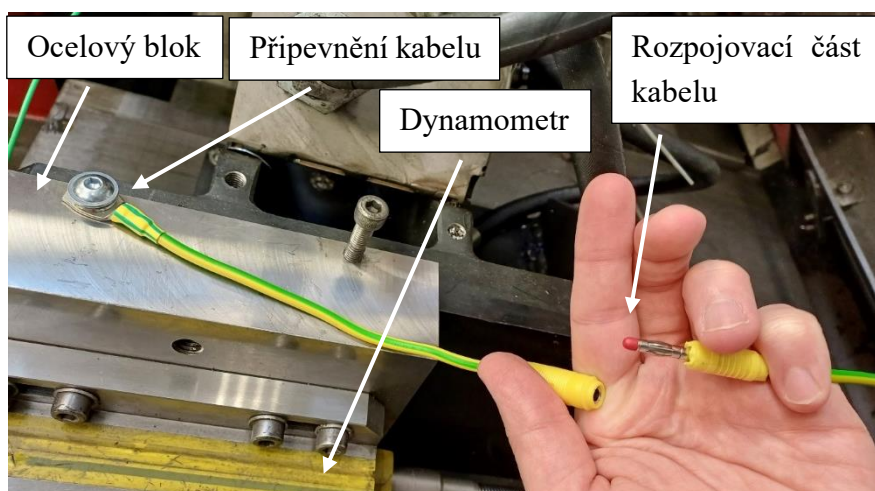


Obrázek 27 Průběh signálu při měření na koníku

Ve všech pozicích, kromě na koníku, byl senzor umístěn na ocelových součástech, a tedy toto rušení bylo pravděpodobně způsobeno úniky elektrického proudu do kostry stroje. To bylo možné řešit vhodnějším uzemněním měřicích zařízení a stroje. Dále se ukázalo, že toto provedení uzemnění nebylo dostatečné řešení. Problém bylo třeba hledat ještě jinde. Jelikož byl ve všech měřicích sestavách použit zesilovač 5017, tak by další problém mohl být s tímto zařízením.

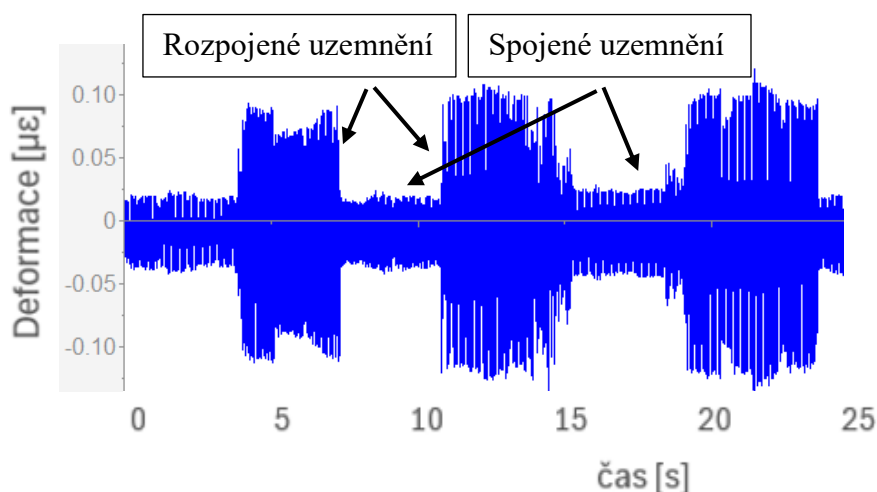
### 7.5.1. Uzemnění

Uzemnění soustavy proběhlo z důvodu snahy o eliminaci nebo snížení rušení signálu senzoru. Přes společný potenciál celé kostry místnosti byl kabelem spojen zesilovač náboje 5017 a od něho byl kabel vyveden přímo na ocelový blok pod dynamometrem, kde probíhalo nejvíce měření. Kabel byl v této pozici připevněn šroubem. Z důvodu bezpečnosti a snadného rozebrání byl zvolen kabel s možností rozpojení, aby se šroub upevňující kabel nemusel pokaždé po konci měření vyšroubovávat a aby nedošlo k přetržení kabelu, viz Obrázek 28. DAQ-systém 5697A byl uzemněn přes napájecí kabel.



Obrázek 28 Část uzemňovacího kabelu s rozpojením a připevněním k bloku

Po realizaci uzemnění proběhlo měření, kdy byl uzemňovací kabel opakovaně rozpojován, pro zjištění odezvy signálu na toto opatření. Z dat lze jednoznačně usoudit, že uzemnění soustavy bylo podstatné, ale samo o sobě nedostačující. Užší části signálu

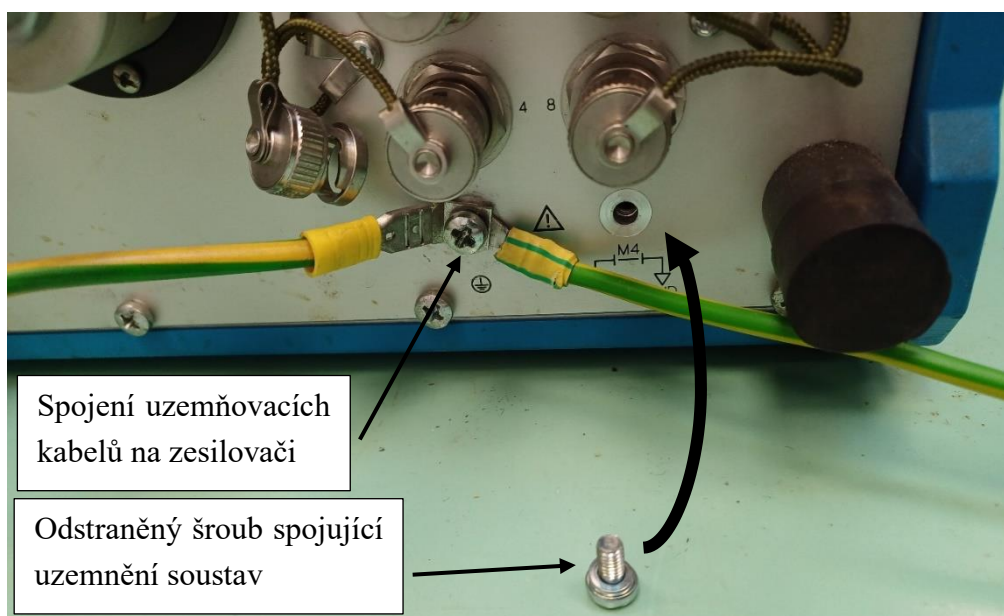


Obrázek 29 Vliv uzemnění měřicí soustavy

jsou se spojeným kabelem a širší části s rozpojeným kabelem, viz Obrázek 29.

### 7.5.2. Úprava zesilovače 5017

Po neúspěšných pokusech o získání kvalitního signálu byla navázána úzká spolupráce s techniky ze společnosti Kistler, jestli by věděli, z jakého důvodu byl signál rušen. Ti si pro porovnání přivezli vlastní zařízení. S jejich měřicí aparaturou nebyl problém a signál byl kvalitní a bez šumu. Pro měření nám byl dodatečně doporučen vícekanálový zesilovač náboje 5017 a Kistler DAQ-systém 5697A primárně z důvodu jejich přesnosti. Po několika zkušebních měřeních vzešel návrh na odstranění šroubu, který propojuje uzemnění vnitřní soustavy zesilovače a vnější uzemnění stroje, viz Obrázek 30. Po tomto opatření byla všechna následující měření bez šumu a signál jasně reagoval na zatěžování.



Obrázek 30 Možnosti uzemnění na zesilovači 5017

### 7.6. Doporučení pro práci se senzorem 9232A ve zvolené sestavě

Při práci se senzorem 9232A bylo potřeba dbát na správné zacházení, jelikož senzor pracuje se signálem v podobě elektrického náboje, což je veličina velice náchylná na ovlivnění okolním prostředím a zanedbání řádných opatření může degradovat měření.

Bylo nutné provést opatření pro úpravu plochy pod senzorem. Drsnost této plochy má být Ra 1,6, ještě lépe Ra 0,8. Z plochy musí být odstraněny mechanické nečistoty a dále musí být odmaštěna. Samotný senzor musí být také držen v čistotě. Po těchto opatřeních senzor dával pravdivé informace.

Dále musí být zajištěna čistota kabelů vedoucích elektrický náboj a jejich konektorů. To bylo zajištěno nastříkáním lehce žíravé látky ve spreji. Po nanesení se konektor kabelu nechá zaschnout, než látka vyprchá. Poté bude kabel vést čistý signál bez dalších rušení.

## 8. Určení driftu senzoru

### 8.1. Motivace

Znát chování driftu je velice důležité pro měření s piezoelektrickými zařízeními. Neznalost tohoto chování může způsobit znehodnocení naměřených dat, a to tím významněji, čím menší deformace měříme. To je velice důležité, jelikož piezoelektrické senzory jsou známé také díky své veliké přesnosti a citlivosti na nejmenší vnější vlivy. Zjištění chování driftu je potřebné pro určení časového rozsahu, kdy po umístění senzoru ještě hraje drift významnou roli při získávání dat. Dále je potřeba vědět, jak se drift chová po významně dlouhé době po ustálení, a tedy zda je možné provádět dlouhodobá měření. Potřebná je informace, zda a případně jak řezné podmínky ovlivňují drift.

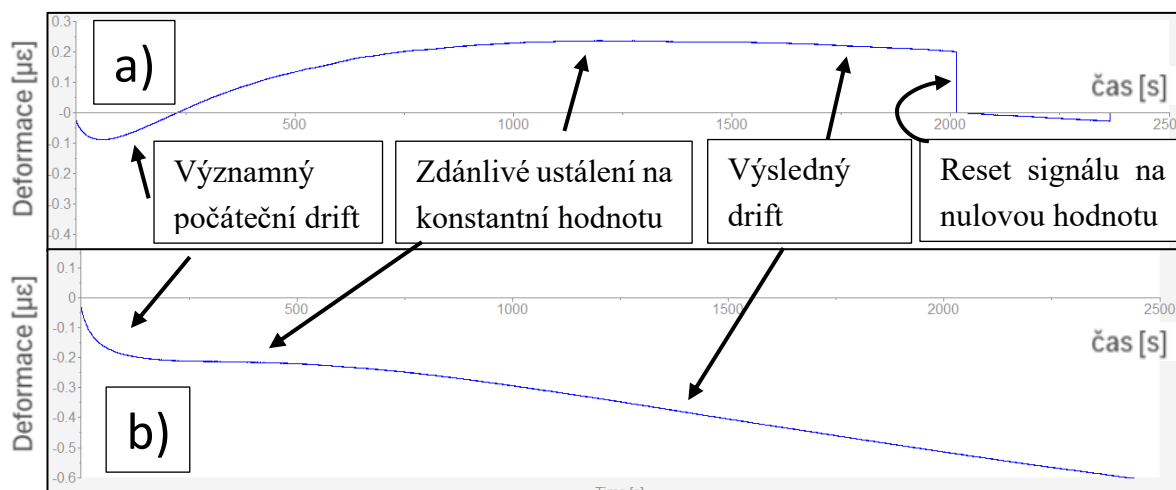
### 8.2. Návrh experimentu

Měření pro zjištění průběhů driftů proběhlo ve variantách bez zatěžování a se zatěžováním konstantní silou po dobu 600, 900 a 2500 s. V těchto měřeních nebylo obráběno.

### 8.3. Vlastní experiment

#### 8.3.1. Měření driftu bez zatěžování

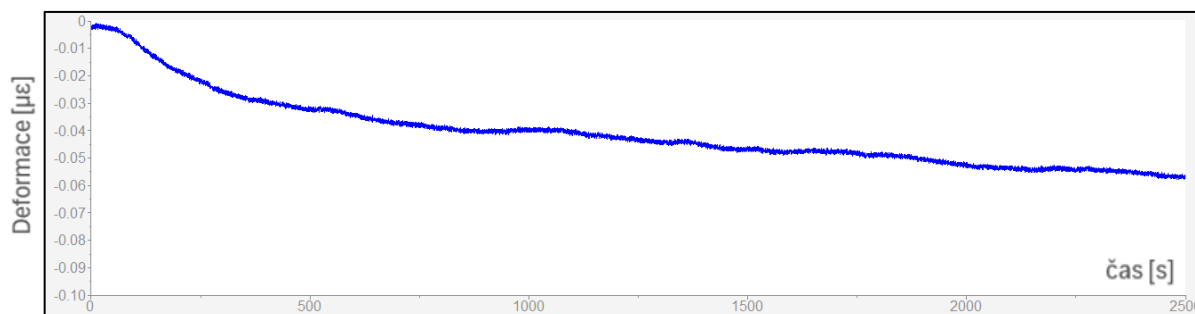
Tato měření byla prováděna bezprostředně po upnutí senzoru na měřený povrch. Z grafů bylo možné vyvodit, že byl drift nejvýraznější do 600 s a poté se měnil významně méně s téměř lineárním stoupáním nebo klesáním. Tedy hodnota 600 s byla prvotní orientační hodnotou pro měření s ustáleným driftem. Prakticky to znamenalo, že se senzor v magnetickém pouzdru upevnil na měřený povrch a minimálně deset minut se nechal ustálit. V Obrázek 31 a) lze vidět po 600 s méně výrazný drift s následným mírným klesáním. V Obrázek 31 b) lze vidět po počátečním výrazném driftu zdánlivé ustálení na konstantní hodnotu, které bylo ale následováno téměř lineárním klesáním.



Obrázek 31 Průběhy nezatěžovaného driftu po dobu 2500 s

### 8.3.2. Měření driftu po dlouhém ustálení bez zatěžování

Tato měření proběhla po dlouhé době po upnutí senzoru na měřený povrch, ve smyslu vyšších desítek minut až jednotek hodin. Požadovaná informace byla, jak drift ovlivňuje měření dlouhodobě. Z grafů lze konstatovat, že vliv driftu byl po dlouhém ustálení o řád menší než drift měřený bezprostředně po připevnění a mění se jen minimálně. Průběh takového signálu je na Obrázek 32.



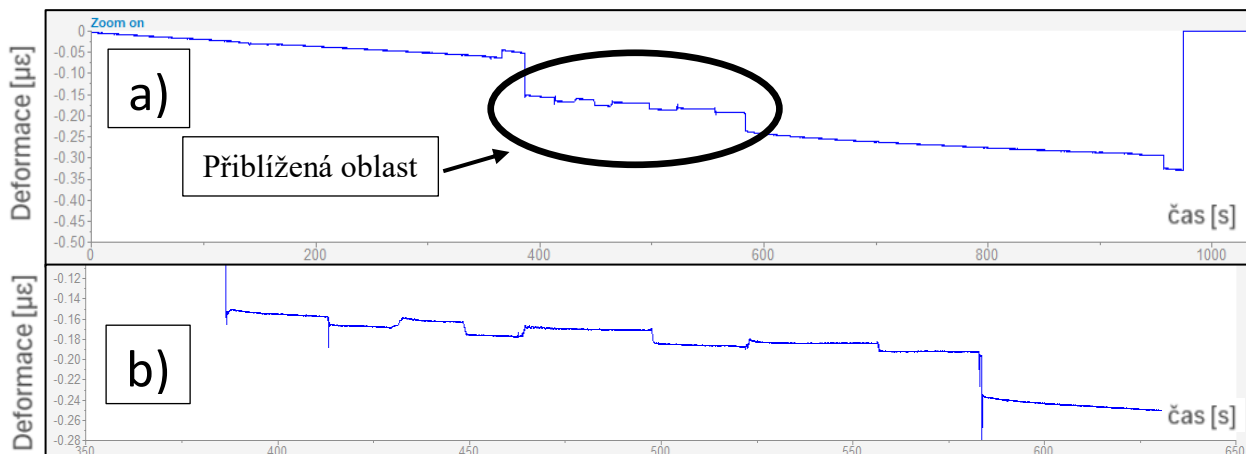
Obrázek 32 Průběh driftu po dlouhém ustálení

### 8.3.3. Měření driftu zatěžovaného konstantní silou

Realizace konstantní síly proběhla pomocí ocelového závaží s možností zavěšení. Závaží mělo hmotnost 6,28 kg, což byla oproti zatížení při soustružení nízká hodnota. Senzor tyto hodnoty zaznamenával, což indikuje, že nebude problém se zjištěním větších deformací při obrábění.

Z dat získaných při konstantním zatěžování bylo možné říct, že signál někdy reaguje na zatížení výrazným odskočením na jinou hodnotu a setrváním na této hodnotě, posunutím na jinou hodnotu a následným vrácením na původní hodnotu, posunutím bez vrácení nebo pouze odskočením a nevýrazným posunutím. Toto nebylo ideální chování, jelikož jeho charakter byl zdánlivě nahodilý, ale to by se dalo vysvětlit primárně sebemenším posunutím pouzdra senzoru, což bylo zaznamenáno jako skoková změna hodnoty deformace. Toto chování bylo možné dále vysvětlit nepřesností lidského zacházení se závažím, které bude při obrábění eliminováno. Tato skoková změna signálu byla dále v textu nazývána offset signálu.

V Obrázek 33 a) byly pozorovány dva nahodilé offsety signálu na začátku a konci měření. V průběhu měření nebyla pozorována. V Obrázek 33 b), což je přibližná oblast vyznačená na Obrázek 33 a), byla blíže pozorována reakce signálu na konstantní zatížení.



Obrázek 33 Chování signálu při zatěžování konstantní silou

#### 8.4. Dílčí shrnutí

Z tohoto bloku měření jednoznačně vyplývá, že bylo potřeba senzor nechat ustálit minimálně 600 s před započítáním měření. Drift byl přítomen po celou dobu měření, ale po dostatečné době bylo jeho chování předvídatelné, alespoň dle měření bez zatěžování. Po ustálení byly hodnoty driftu nízké oproti předpokládaným hodnotám deformace při obrábění. Nepředvídatelné offsety signálu vlivem posunutí senzoru mohou být problematická a při působení dynamických účinků rezného procesu by byla rozhodující o správnosti měření. Když by se v signálu projevil offset v průběhu měření, tak by byly výsledky znehodnoceny. U dlouhodobého měření by byla problematická volba rozsahu hodnot deformace, jelikož by ho drift po určitém čase překročil a byl by nutný reset měření.

## 9. Určení vhodné pozice senzoru 9232A

### 9.1. Motivace

Tento blok měření byl proveden pro zjištění vhodných parametrů řezného procesu, zjištění horního a dolního limitu měření se senzorem 9232A a pro volbu co nejlepší pozice pro finální experiment.

### 9.2. Definice ideálního místa

V tomto experimentu pro nás byla ideální pozice taková, ve které je co nejvyšší citlivost senzoru, nedochází v ní k offsetům signálu a není v cestě odcházející třísky od obrábění.

### 9.3. Rozhodovací kritéria

Z důvodu obtížného rozhodování u komplexních problémů byl volen postup bodovým ohodnocením jednotlivých kritérií, která byla pro daný problém stěžejní. Do této analýzy nebyla zahrnuta měření na koníku, jelikož se koník využije jen u dlouhých obrobků, a to by ubíralo na univerzálnosti tohoto experimentu. Bodové ohodnocení jednotlivých kritérií bylo od 1 do 5, s tím že 5 bodů bylo přiděleno nejpriznivějšímu případu.

#### 9.3.1. Kritérium citlivosti

Jedno z kritérií pro volbu nejvhodnější pozice pro finální měření bylo určení citlivostí ze všech dat z jednotlivých pozic. Ta byla porovnána vůči sobě v jednotlivých grafech podle složek řezné síly. Důležitý výsledný parametr byla směrnice spojnice trendu jednotlivých závislostí síly na deformaci. Dle jednoduché úvahy bylo považováno za nejcitlivější měření to, kde připadá co nejméně řezné síly na co nejvíce poměrné deformace. Toto kritérium by bylo nejvhodnější vyhodnocovat pro spojnice trendu vytvořené ze stejného počtu bodů, ale to napříč měření není splněno.

### 9.3.2. Kritérium stability měření

Další parametr pro volbu vhodné pozice bylo porovnání poměrů deformace a odpovídající síly pro jednotlivé složky řezné síly. Čím byl tento poměr vyšší, tím bylo měření citlivější. Graf byl doplněn i směrodatnou odchylkou, která nám dala informaci o stabilitě měření. Čím byla směrodatná odchylka nižší, tím bylo měření stabilnější.

### 9.3.3. Kritérium rozsahu sil a deformací

Toto kritérium zohledňovalo citlivost jednotlivých pozic ještě významněji oproti předchozím. Bralo v potaz celý rozsah vhodných hodnot sil a deformací a v absolutních hodnotách z nich udělalo poměr. Čím byla hodnota nižší, tím byla citlivost vyšší.

Vzorec pro výpočet byl následující:

$$\Delta = \frac{|F_{max} - F_{min}|}{|\varepsilon\mu_{max} - \varepsilon\mu_{min}|} \quad (2.1)$$

Graf byl doplněn směrodatnými odchylkami, které byly při rozhodování zohledněny a vypovídaly o stabilitě systému. Čím byla směrodatná odchylka menší, tím bylo měření stabilnější.

### 9.3.4. Kritérium bezpečnosti umístění senzoru

Tohle kritérium nebylo vyhodnocované z naměřených dat a řešilo možné poničení senzoru odvodem třísky a procesní kapalinou.

### 9.3.5. Kritérium složitosti upnutí senzoru

Poslední kritérium řešilo problematiku ve smyslu obtížnosti vyvrtání závitové díry a dostatečného prostoru pro senzor.



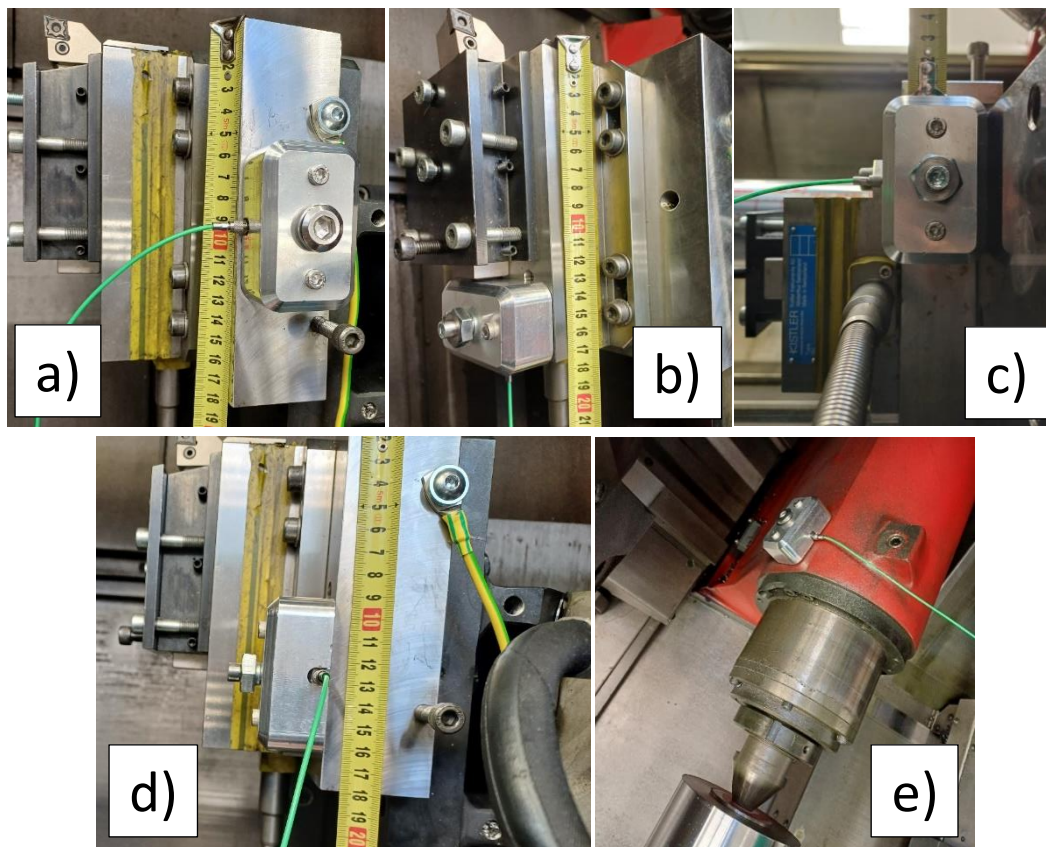
## 9.4. Návrh experimentu

### 9.4.1. Volba a nastavení zařízení, volba obrobku a pozic

Tato měření probíhala z důvodu zjištění, zda byly nějaké pozice podstatně vhodnější než jiné a zda v nich byla znatelná odezva signálu na zatěžování. Celé měření proběhlo při obrábění. Vyhodnocované pozice zůstaly obdobné pozicím, ve kterých byl měřen drift, viz kapitola 8. Pro měření byla použita sestava vícekanálového zesilovače náboje 5017 a Kistler DAQ-systém pro Dynoware 5697A dle doporučení odborníků. Senzor byl umístěn v prototypu magnetického pouzdra, které vyžadovalo větší volnou plochu než samotný senzor. Zjišťovanými parametry byly citlivost, tedy velikost odezvy na zatěžování, offsety signálů, drift, ze kterých byla částečně tvořena rozhodovací kritéria. Měření byla prováděna při obrábění válcového obrobku z materiálu C45 při zatěžování s dynamickým i statickým charakterem. Pro tato měření byl použit rozsah  $1 \mu\epsilon$  a měřítko  $0,1 \mu\epsilon / V$  nebo rozsah  $2 \mu\epsilon$  a měřítko  $0,2 \mu\epsilon / V$ . Kabel od senzoru a uzemnění byly protaženy mezerou v oplechování stroje pod posuvným krytem. Měření probíhalo v různých délkách zhruba od 30 do 60 s, ale doba obrábění byla jen 5 s, tedy měření bylo spuštěno s dostatečným předstihem před obráběním a po konci vypnuto podle potřeby.

Měření probíhala v následujících pozicích:

- a) Na boční straně ocelového bloku, viz Obrázek 34 a) dvě polohy – svisle a vodorovně
- b) Na horní ploše dynamometru pod nožem, viz Obrázek 34 b).
- c) Na spodní ploše bloku, viz Obrázek 34 c).
- d) Na horní ploše bloku, viz Obrázek 34 d).
- e) Na koníku, viz Obrázek 34 e).



Obrázek 34 Pozice jednotlivých měření

#### 9.4.2. Volba řezných podmínek, vyměnitelných břitových destiček a soustružnického nože

Měření byla prováděna ve velkém počtu s mnoha kombinacemi parametrů, aby mohli být posouzeny nejvhodnější řezné podmínky pro tento experiment. Stálým parametrem při tomto měření byla řezná rychlost  $v_c = 255$  m/min. U některých sad měření byla měněna šířka záběru ostří  $a_p$ , V tomto měření byly použity hodnoty 1,5 a 3 mm. S každým měřením byl měněn posuv na otáčku  $f$  v rozmezí 0,1 až 0,5 mm po kroku 0,1 mm. Všechna měření byla provedena třikrát. Změnou velikosti posuvu a třísky byla simulována různá silová zatížení řezného procesu. Více této problematiky bylo probráno v kapitole 2.

V tomto měření byl použit jeden typ soustružnického nože a dvě vyměnitelné břitové destičky. Viz kapitola 7.2.

### 9.4.3. Problematika připevnění senzoru s pouzdrém

V katalogovém listu k senzoru 9232A od firmy Kistler byl předepsaný utahovací moment šroubu senzoru 10 Nm, ale to platilo pro případ upnutí šroubem. V našem případě bylo použito magnetické pouzdro, které nešlo utáhnout na tento moment. Na plné magnetické ploše bylo možné toto pouzdro přitáhnout k ploše momentem 0,6 Nm. V některých pozicích docházelo k odtažení magnetů při momentech nižších a tato informace byla u jednotlivých měření uvedena.

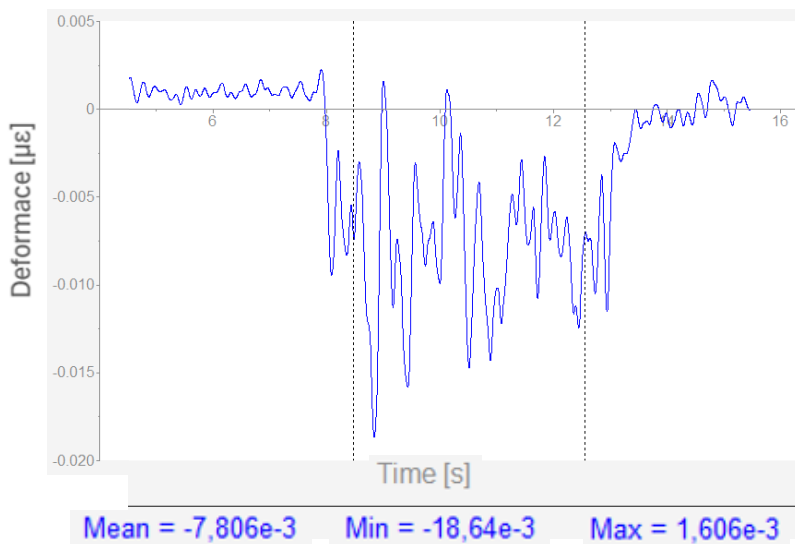
## 9.5. Vlastní experiment

### 9.5.1. Umístění na boční straně ocelového bloku se senzorem ve vodorovné poloze

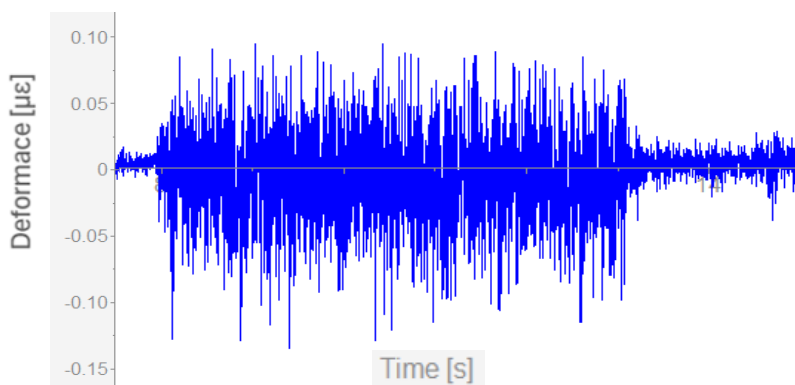
Senzor byl umístěn na horní straně ocelového bloku a nastaven do vodorovné polohy s kabelem směřujícím od řezného procesu. V této pozici byl šroub pouzdra dotažen na 0,6 Nm. Tento první experiment byl probrán a okomentován detailněji než ostatní pro objasnění procesu vyhodnocení.

#### Úprava dat senzoru 9232A

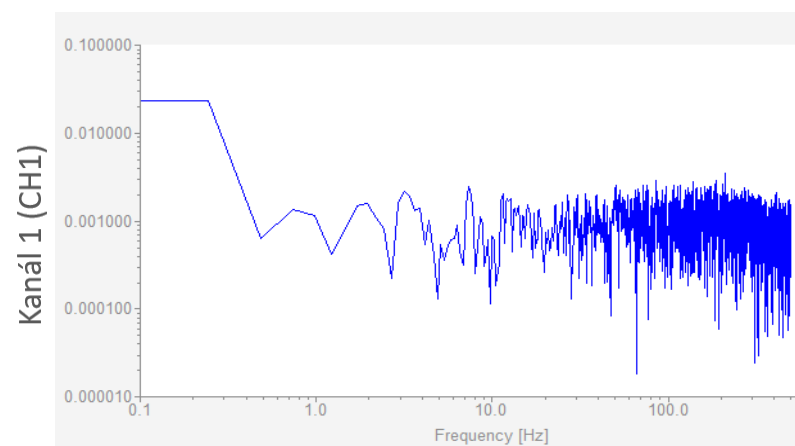
Pro toto měření byla data získávána ze senzoru a dynamometru. Ta byla navzájem porovnávána. Do samotného signálu z měření vstupovalo mnoho rušení od řezného procesu, viz Obrázek 36. To bylo kompenzováno filtrem low-pass. Podle frekvenční analýzy byla volena hodnota 5 Hz pro filtr, viz Obrázek 37. Dále byl pomocí funkce DynoWare kompenzován drift signálu. Výstupem těchto operací byla filtrovaná část signálu vypovídající o průběhu zatěžování doplněná hodnotami minima, maxima a průměru signálu pomocí funkce suma, viz Obrázek 35.



Obrázek 35 Finálně upravená data senzoru



Obrázek 36 Neupravená data senzoru



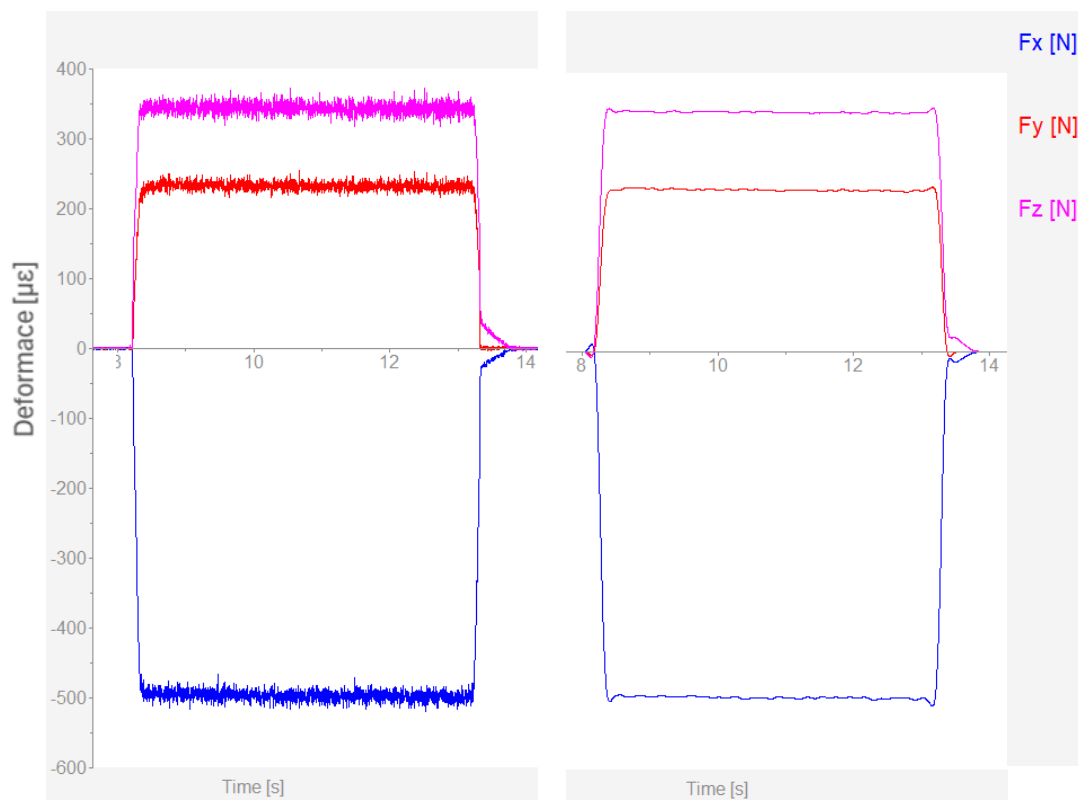
Obrázek 37 Frekvenční analýza programu DynoWare

U tohoto ukázkového příkladu byla hodnota minima  $-18,64 \cdot 10^{-3} \mu\epsilon$ , maxima  $1,606 \cdot 10^{-3} \mu\epsilon$  a průměru  $-7,806 \cdot 10^{-3} \mu\epsilon$ . Pro tento typ měření byla výhradně používána průměrná hodnota.

### Úprava dat dynamometru

Data byla zpracována obdobně jako u dat senzoru, ale v tomto případě byly vyhodnocovány jednotlivé složky řezné síly, kterými jsou  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ .

Data byla filtrovaná filtrem low-pass na frekvenci 5 Hz jako u předchozího případu. Neupravená data jsou na Obrázek 38 a) a upravená data na Obrázek 38 b).

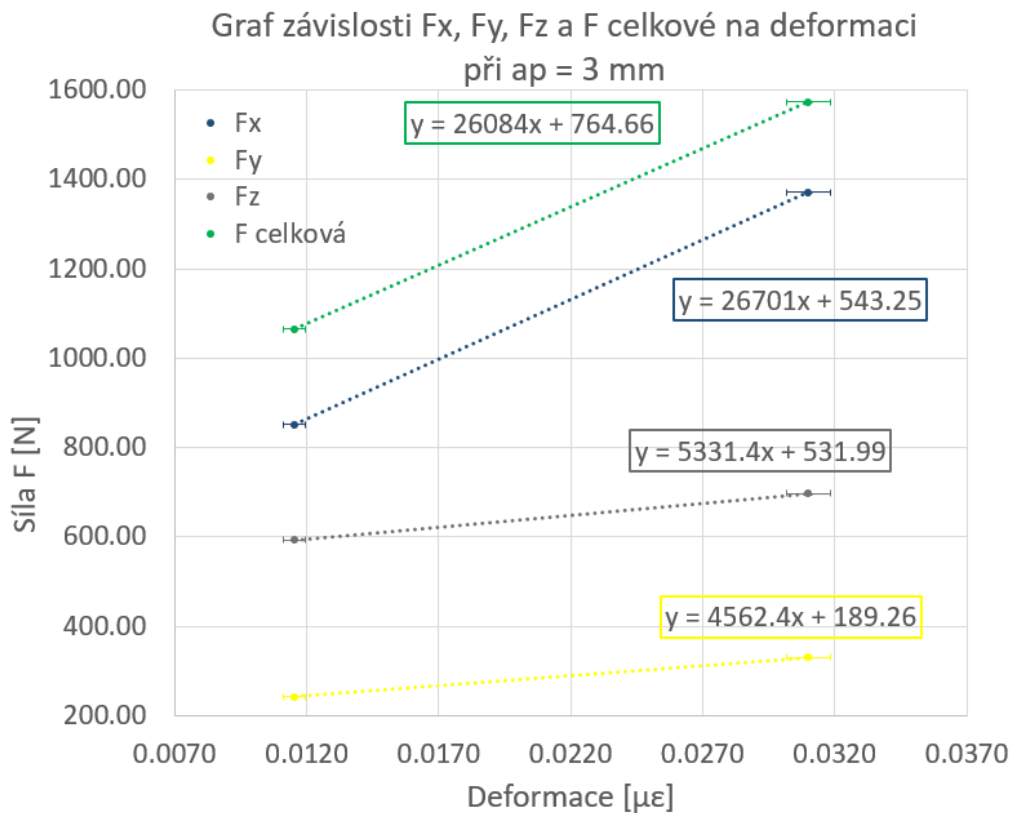


Obrázek 38 Data dynamometru, vlevo a) neupravená, vpravo b) upravená

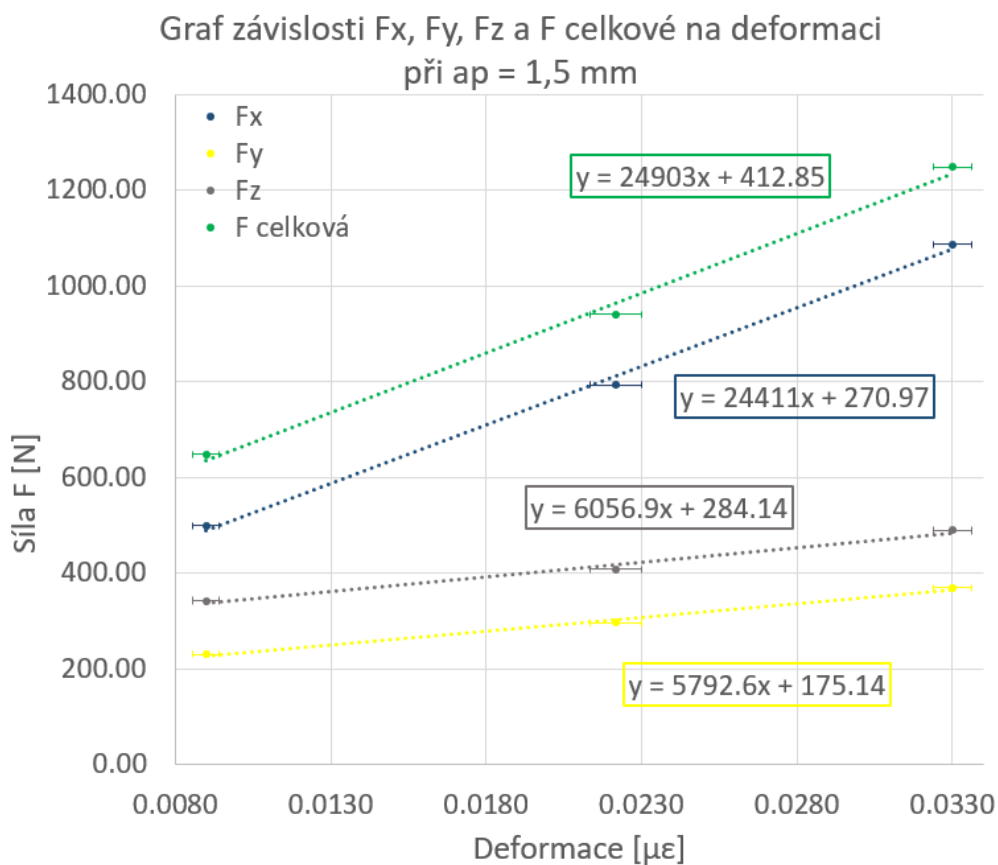
## Výsledky měření

V grafech měření, viz Obrázek 40 a Obrázek 39, byly vytvořeny závislosti řezné síly na odpovídající deformaci. Data z měření byla zpracovávána v Microsoft Excel v podobě tabulek a následně grafů. Uvedeny byly pouze grafy z důvodu přehlednosti a vypovídací hodnoty. Chybové úsečky byly uvedeny jen u deformace, jelikož informace o řezné síle od dynamometru byly velice přesné. Hodnoty řezných sil se pohybovaly v nižších řádech tisíců a jejich směrodatná odchylka v řádech jednotek až desetin. V některých případech, kdy řezné síly byly již příliš vysoké, data senzoru obsahovala offsety a byla nekvalitní. Uvedena byla pouze data kvalitní. Toto se začalo dít u řezných sil vyšších než zhruba 1600 N. Některá měření měla tedy místo pěti dat s různými posuvy jen data dvě, tři nebo čtyři.

V grafech, viz Obrázek 40 a Obrázek 39, byly jednotlivé body proloženy lineární spojnicí trendu, i přesto, že jejich chování nebylo zcela lineární. U grafů s porovnáním analogických měření s různými parametry  $a_p$  šlo konstatovat, že se směrnice průběhů liší o 5 až 27 % a konstanty jsou odlišné až o 50 %. U konstant byl významný rozdíl očekávaný a způsoboval ho primárně piezoelektrický drift a rozdílná pozice nulové hodnoty deformace, která se pro každé měření nastavovala nová a odlišná. U směrnice byl tento velký rozdíl hodnot problematičtější a byl způsoben použitím rozdílných vyměnitelných břitových destiček pro  $a_p = 1,5$  mm a  $a_p = 3$  mm, viz kapitola 7.2.2. Rozdílné poměry rádiusu špičky ku zbytku řezné části nože zatížené řezným procesem ovlivňovaly poměr složek řezné síly. To způsobilo, že si závislosti složek řezné síly na deformaci neodpovídaly a nebyly analogické, protože použitý senzor zjišťoval deformaci pouze v jednom směru. Hodnoty celkové síly se napříč měřeními shodovaly, ale složky byly rozděleny různě. Jelikož u měření s parametrem  $a_p = 3$  mm byly vhodné jen dvě hodnoty a u zbytku se projevily offsety signálu. Dále byla prováděna pouze měření s  $a_p = 1,5$  mm se shodnou vyměnitelnou břitovou destičkou.



Obrázek 39 Graf závislosti při  $a_p = 3 \text{ mm}$

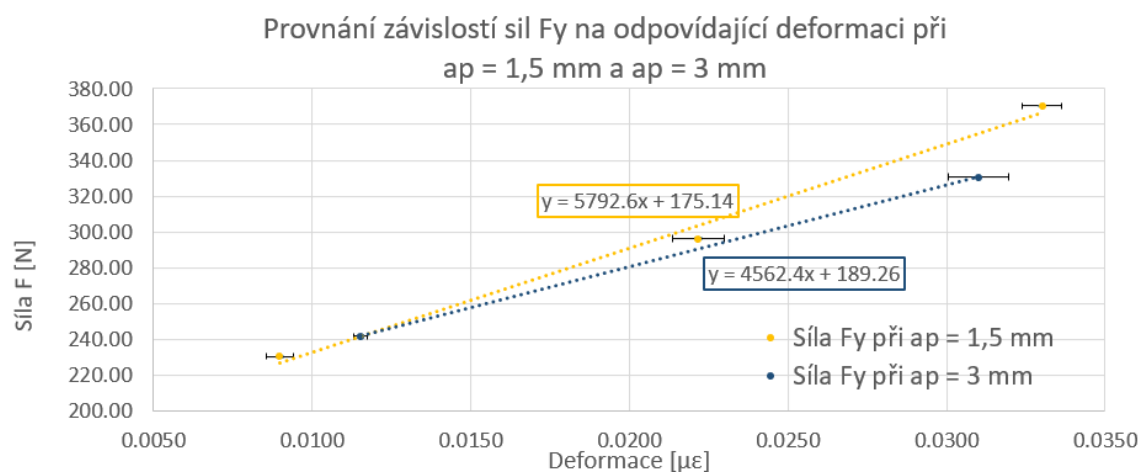
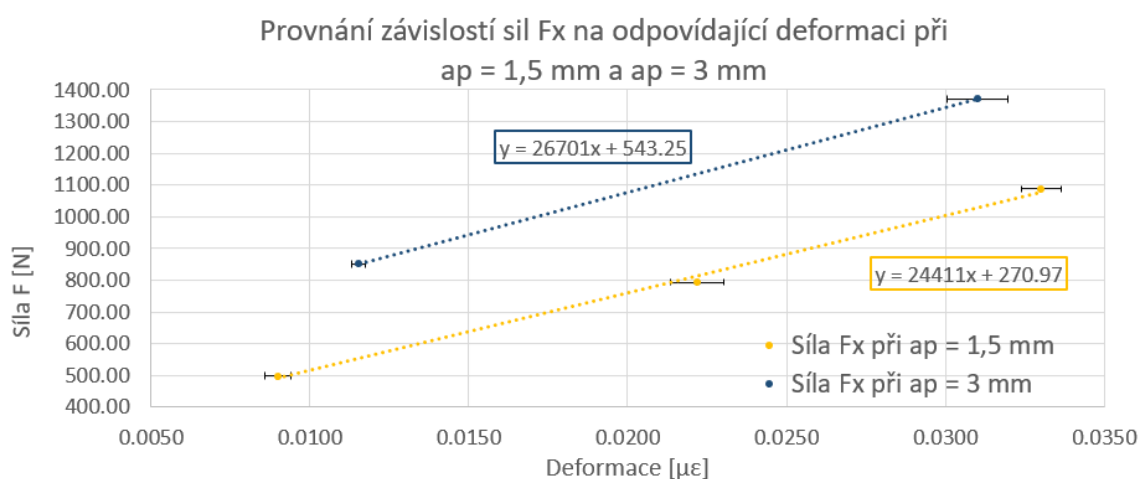


Obrázek 40 Graf závislosti při  $a_p = 1,5 \text{ mm}$

### Totožné měření pro zjištění opakovatelnosti v dané pozici

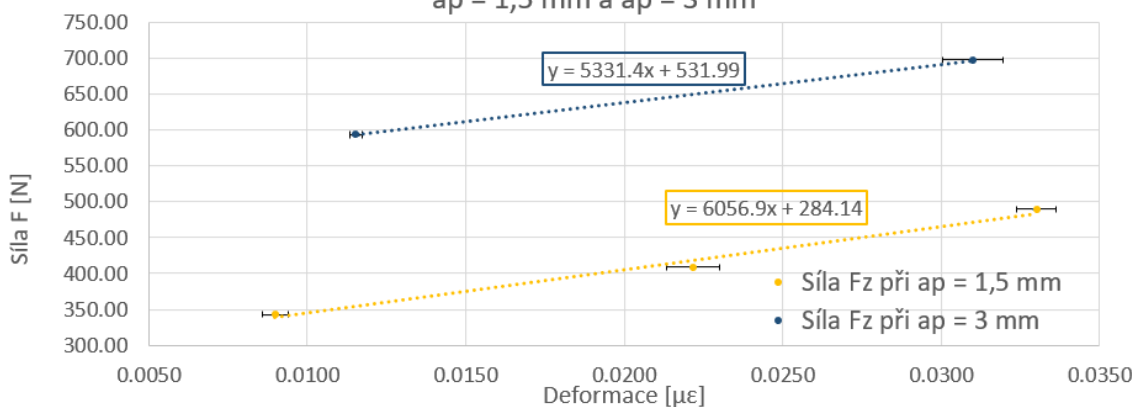
Tento test byl proveden pro zjištění, zda budou závislosti vícekrát provedených stejných měření stejné nebo alespoň analogické. Utahovací moment šroubu magnetického pouzdra byl 0,6 Nm. Toto a následující měření byly provedeny jen s variantou  $a_p = 1,5$  mm.

Z grafu bylo vidět, že síly zjištěné dynamometrem byly dle očekávání podobné a liší se maximálně o 10 %. Hodnoty deformace na senzoru se lišily maximálně o 12 % a to na koncích měření. Směrnice spojnic trendu se lišily maximálně o 35 %, což bylo pro stejná měření mnoho. Tyto hodnoty byly vypočítané z porovnávacích grafů závislostí, viz Obrázek 41, Obrázek 42, Obrázek 43, Obrázek 44.



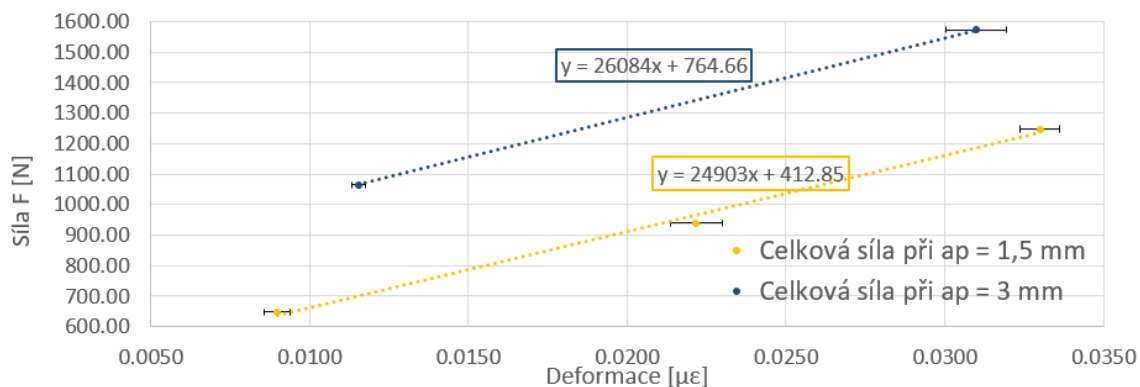


Prognáza závislosti sil  $F_z$  na odpovídající deformaci při  
 $a_p = 1,5 \text{ mm}$  a  $a_p = 3 \text{ mm}$



Obrázek 44 Porovnání závislostí pro  $F_z$

Prognáza závislosti celkových sil na odpovídající deformaci při  
 $a_p = 1,5 \text{ mm}$  a  $a_p = 3 \text{ mm}$

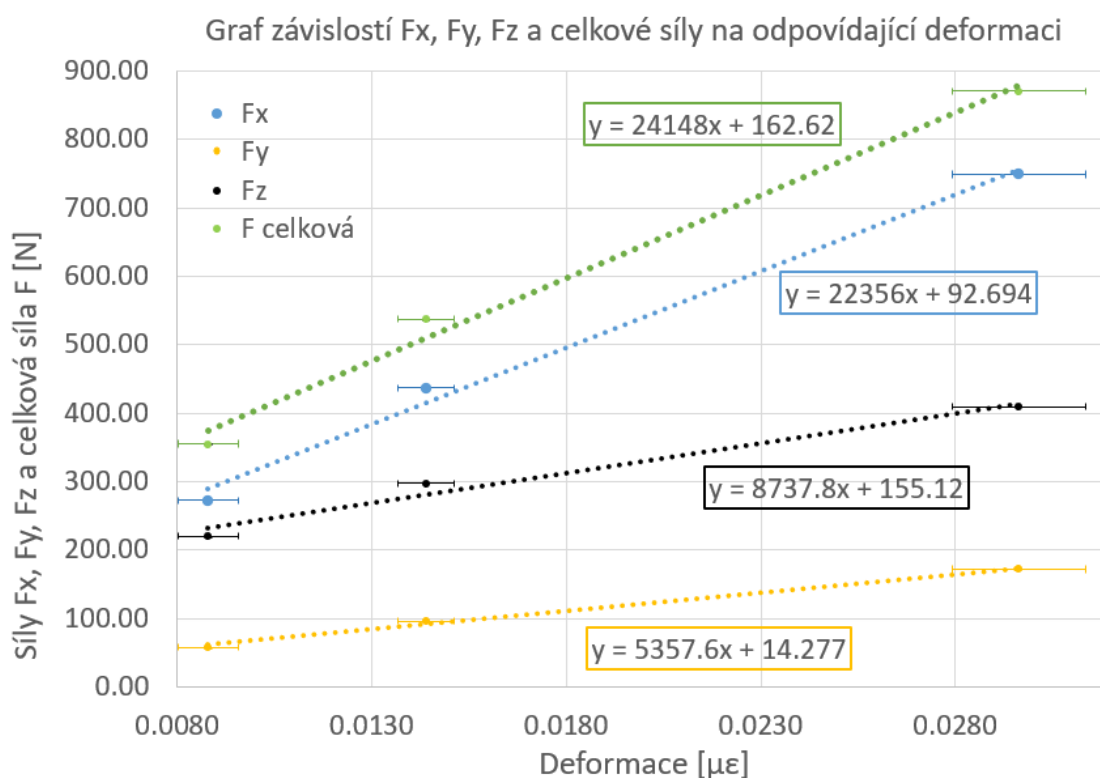


Obrázek 43 Porovnání závislostí pro  $F$  celkovou

### 9.5.2. Umístění na boční straně ocelového bloku se senzorem ve svislé poloze

Umístění bylo obdobné prvnímu měření, viz kapitola 9.5.1, a porovnávacímu měření s jedinou změnou, a to že byl senzor otočen o  $90^\circ$  okolo pomyslné osy utahovacího šroubu magnetického pouzdra. Offsets signálu se v záznamech měření prvně projevovala u  $f = 0,2$  mm/ot a významně u  $f = 0,3$  mm/ot. V této pozici byl senzor předeprnut momentem nižším než 0,6 Nm.

Změřená závislost v této pozici viz Obrázek 45.



Obrázek 45 Graf závislosti sil na deformaci na boční straně bloku se senzorem ve svislé poloze

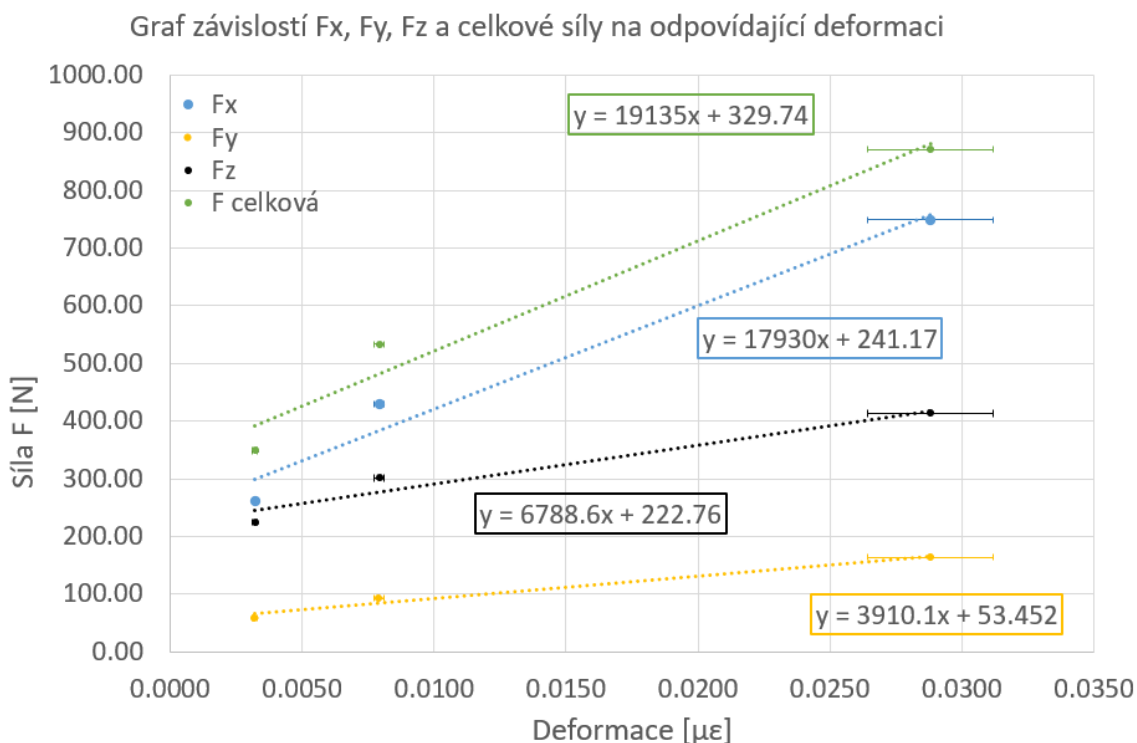
### 9.5.3. Umístění na horní ploše dynamometru pod nožem

Další pozice použitá pro měření byla se senzorem umístěným na horní ploše dynamometru pod upnutím nože a zarovnaným do pravého dolního rohu dynamometru.

Pro toto a následující měření byla volena hloubka řezu 1,5 mm s odpovídající vyměnitelnou břitovou destičkou a posuvy  $f = 0,05$  mm/ot,  $f = 0,1$  mm/ot,  $f = 0,2$  mm/ot,  $f = 0,3$  mm/ot. Tyto parametry odpovídaly nižším řezným silám, a tedy z tohoto a následujících měření by bylo možné zjistit informaci o spodním limitu použitelnosti senzoru.

V této pozici začala odskakování signálu při  $f = 0,2$  mm/ot a významně se toto projevilo při vyšších posuvech. Utahovací moment šroubu magnetického pouzdra byl 0,6 Nm.

Změřená závislost v této pozici viz Obrázek 46.



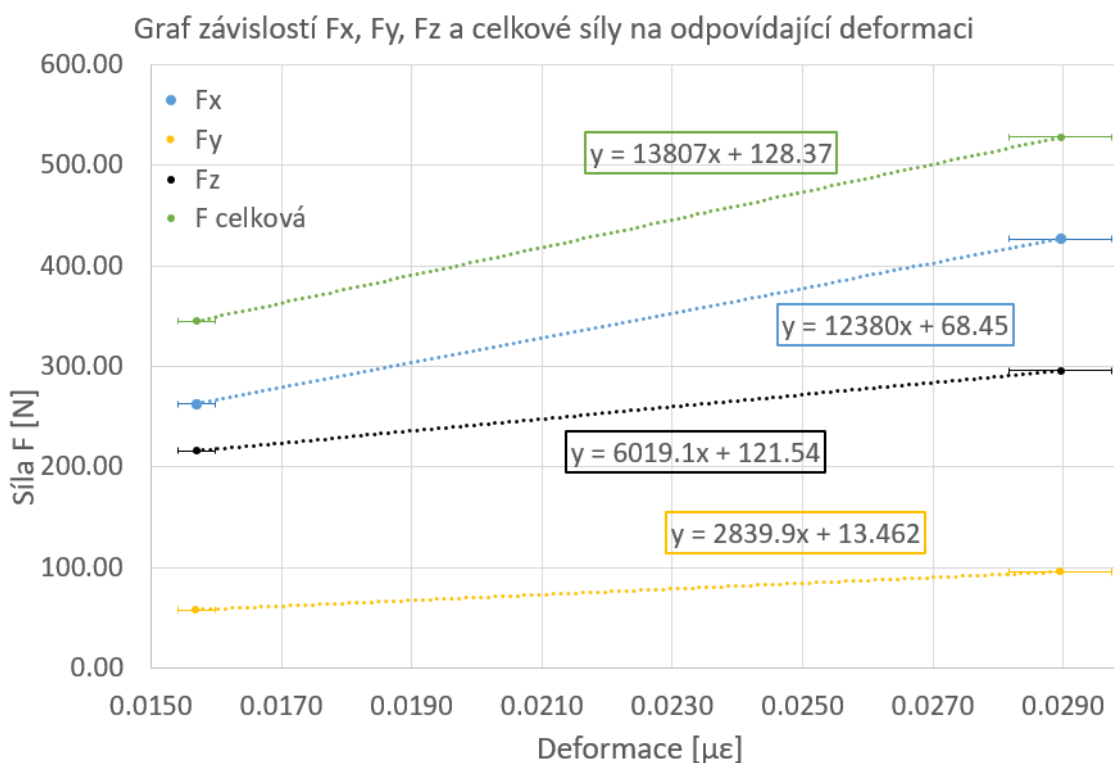
Obrázek 46 Graf závislosti sil na deformaci na horní ploše dynamometru

#### 9.5.4. Umístění na spodní ploše bloku

V této pozici pouzdro senzoru nedosadalo celé na vodivou plochu, tedy utahovací moment byl nižší než 0,6 Nm. Z důvodu nedoléhání magnetického pouzdra na celou plochu neměly magnety takovou sílu, aby udržely daný moment. Senzor byl umístěn na spodní stěnu ocelového bloku a byl nastaven centimetr od pravého rohu.

Z grafu bylo vidět, že byly vyneseny je dvě hodnoty a významné offsety signálu pozorujeme již u  $f = 0,2$  mm/ot. Toto bylo možné vysvětlit utažením šroubu na nižší moment, a tedy vyšší náchylností k offsetům signálu vlivem dynamických účinků řezného procesu.

Změřená závislost v této pozici viz Obrázek 47.



Obrázek 47 Graf závislosti sil na deformaci na spodní ploše bloku

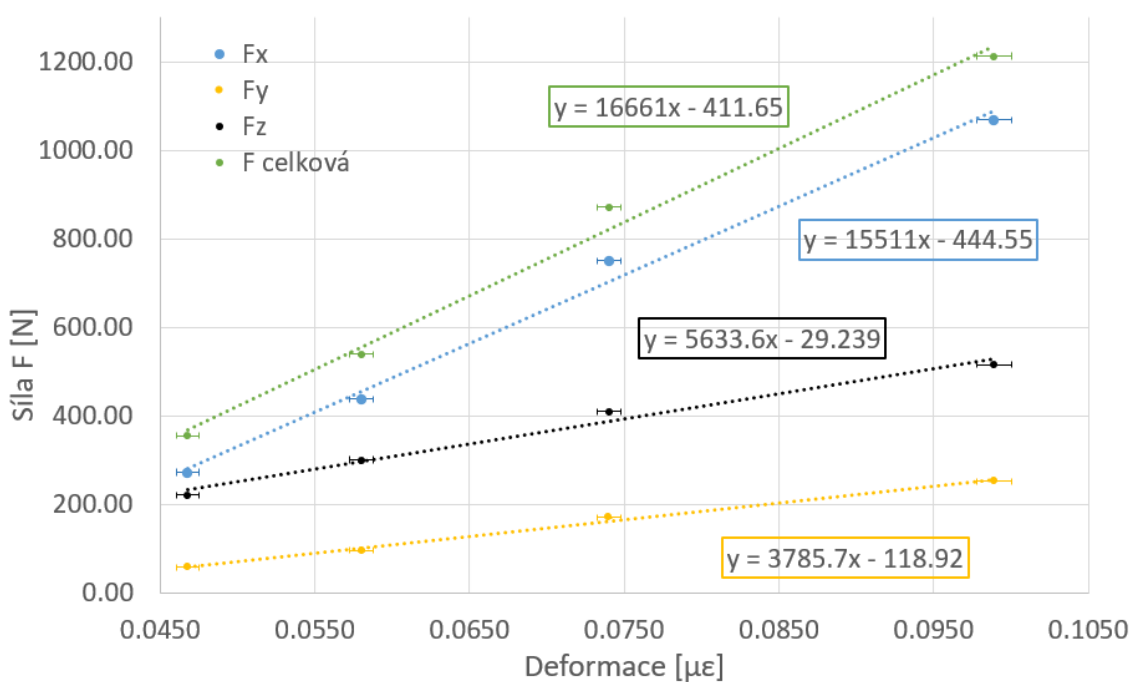
### 9.5.5. Umístění na horní ploše bloku

V této pozici bylo pouzdro se senzorem na horní ploše ocelového bloku. Pouzdro se bokem opíralo o dynamometr. Šroub magnetického pouzdra byl utažen momentem 0,6 Nm.

Na tomto místě nedocházelo k oskočení signálu při měření nebo jiným potížím v celém rozsahu posuvů. Směrodatná odchylka hodnot senzoru byla nízká v celém měření. Jednotlivé naměřené hodnoty se chovaly, oproti ostatním měřením, více lineárně, i přestože bylo spojnicí trendu proloženo více bodů než v předchozích měřeních.

Změřená závislost v této pozici viz Obrázek 48.

Graf závislostí  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a celkové síly na odpovídající deformaci



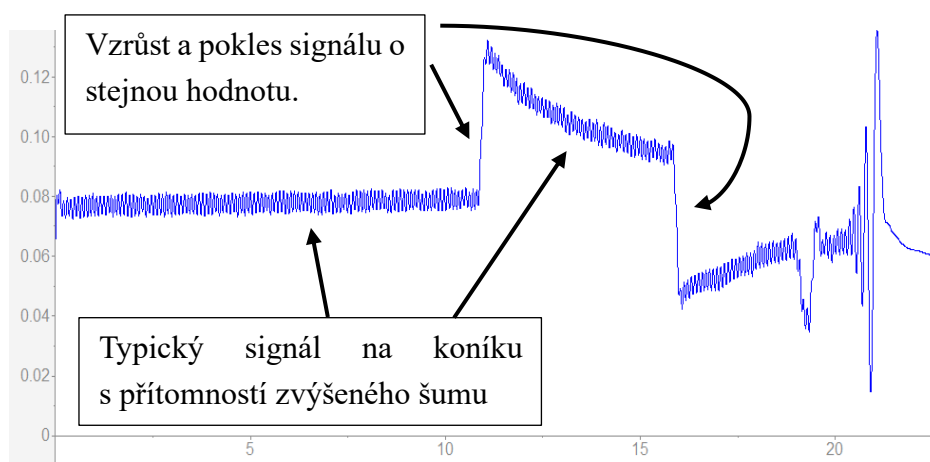
Obrázek 48 Graf závislosti sil na deformaci na horní ploše bloku

### 9.5.6. Umístění na koníku

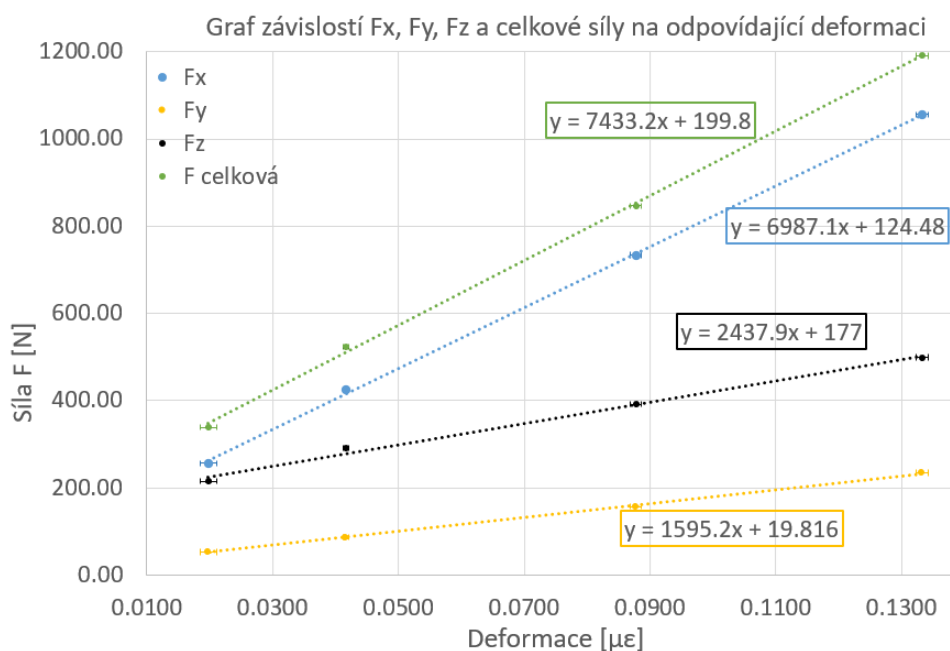
Umístění bylo obdobné jako v předešlém měření driftu, viz kapitola 8.3, a to na rovné horní ploše koníku. Senzor byl předeprnut momentem nižším než 0,6 Nm.

Získaný signál byl odlišný od ostatních pozic, nejspíše kvůli nevodivé povrchové vrstvě s jinými mechanickými vlastnostmi. Po filtrování obsahoval signál více šumu než předešlá měření, viz Obrázek 49.

Závislost vykazovala vysokou linearitu a minimální směrodatnou odchylku, viz Obrázek 50 .



Obrázek 49 Typický signál z měření na koníku



Obrázek 50 Graf závislosti sil na deformaci na koníku

### 9.5.7. Vyhodnocení experimentu

U všech testovaných pozic senzoru byla zjištěna odezva na deformaci a bylo k ní možno přiřadit odpovídající řeznou sílu. To je pozitivní, jelikož v nejhorším případě by senzor podával nesmyslná data a pozici by bylo nutno kompletně vyřadit. Méně pozitivní informací bylo, že opakovatelnost měření je nízká a směrnice i konstanta spojnice trendu se liší o desítky procent. Pro volbu nejvhodnější pozice byl obdržen dostatek informací, abychom mohli více kriteriálně rozhodnout o nejvhodnější pozici. V této pozici bude senzor upevněn podle katalogového listu od výrobce do závitové díry.

### 9.6. Rozhodovací analýza

Informace k jednotlivým kritériím byly psány v kapitole 9.3. Pozice na koníku byla do grafů pro informaci zahrnuta, ale nebyla hodnocena, jelikož koník by byl použit jen při obrábění dlouhých obrobků, a výrazně by to snižovalo univerzálnost měření.

Měření byla označena zkrácenými pojmenováními, která odpovídají umístění senzoru a jsou následující:

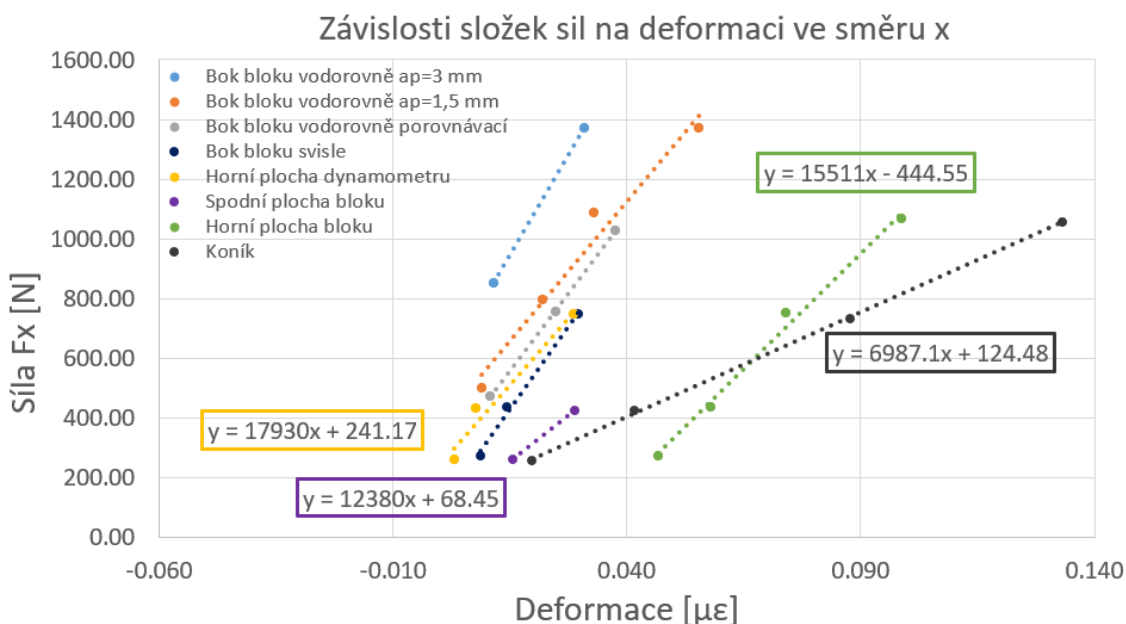
- Bok bloku vodorovně – z pravé strany bloku se senzorem ve vodorovné poloze, stejně jako porovnávací měření
- Bok bloku svisle – z pravé strany bloku se senzorem ve svislé poloze, senzor pootočen o 90° v pomyslné ose šroubu oproti prvnímu měření
- Horní plocha dynamometru – na horní ploše dynamometru pod nožem
- Spodní plocha bloku – na spodní ploše bloku v pravém rohu
- Horní plocha bloku – na horní ploše bloku v pravém dolním rohu
- Koník

### 9.6.1. Kritérium citlivosti

Hodnocen byl sklon křivky s požadavkem na co nejmenší směrnicí. Toto kritérium mělo vlastní vyhodnocení, jelikož třikrát zastoupená obdobná kritéria by příliš ovlivnila výsledek. Grafické zpracování tohoto kritéria, viz Obrázek 51, Obrázek 52, Obrázek 53. Bodové ohodnocení je následující, viz Tabulka 2:

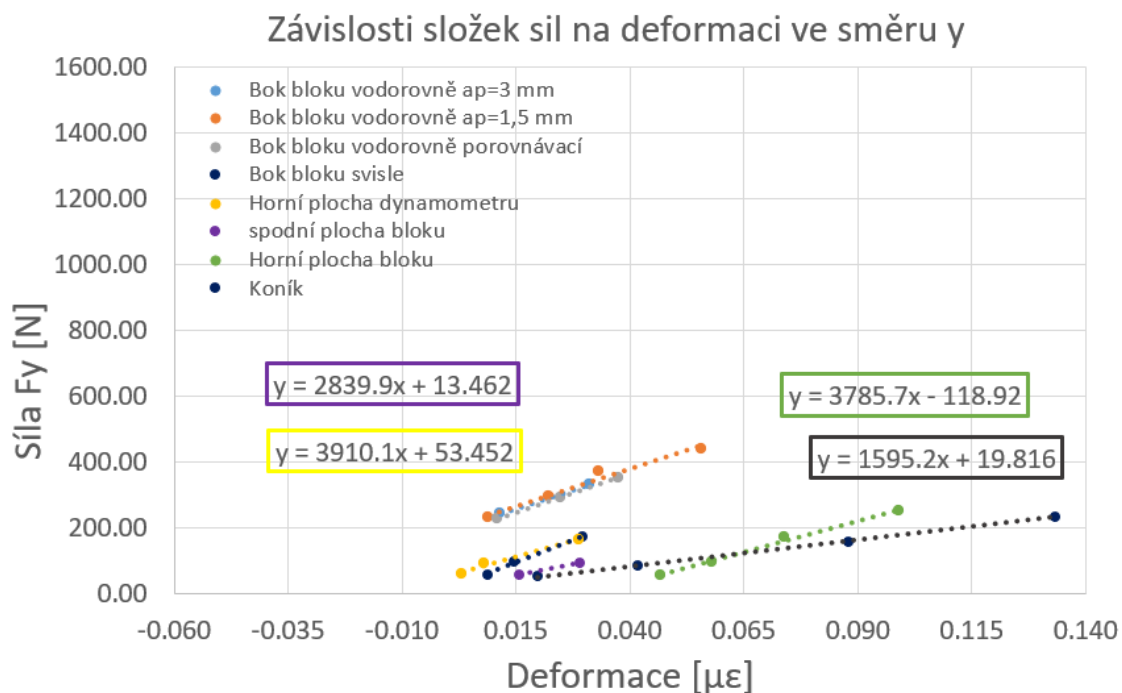
Tabulka 2 Rozhodovací analýza sklonů grafů

Rozhodovací analýza pro sklony grafů					
	Bok bloku vodorovně	Bok bloku svisle	Horní plocha dynamometru	Spodní plocha bloku	Horní plocha bloku
Sklonu grafu Fx	2	1	3	5	4
Sklonu grafu Fy	2	1	3	5	4
Sklonu grafu Fz	3	1	4	5	2
součet bodů	7	3	10	15	10
Bodové ohodnocení do celkové analýzy	2	1	2.5	5	2.5

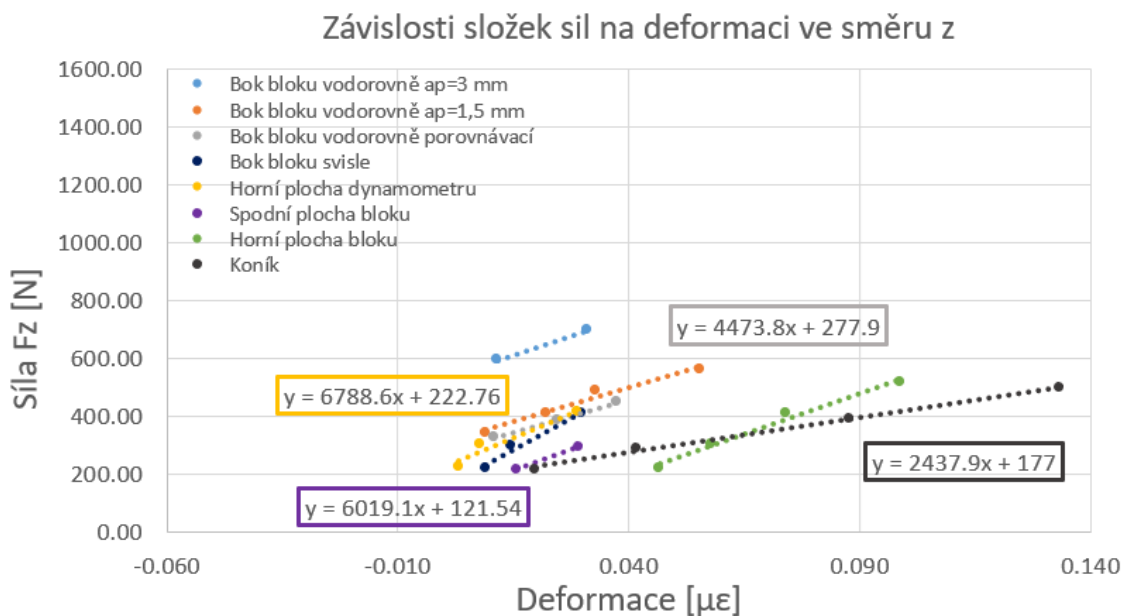


Obrázek 51 Graf citlivosti ve směru x





Obrázek 53 Graf citlivostí ve směru y



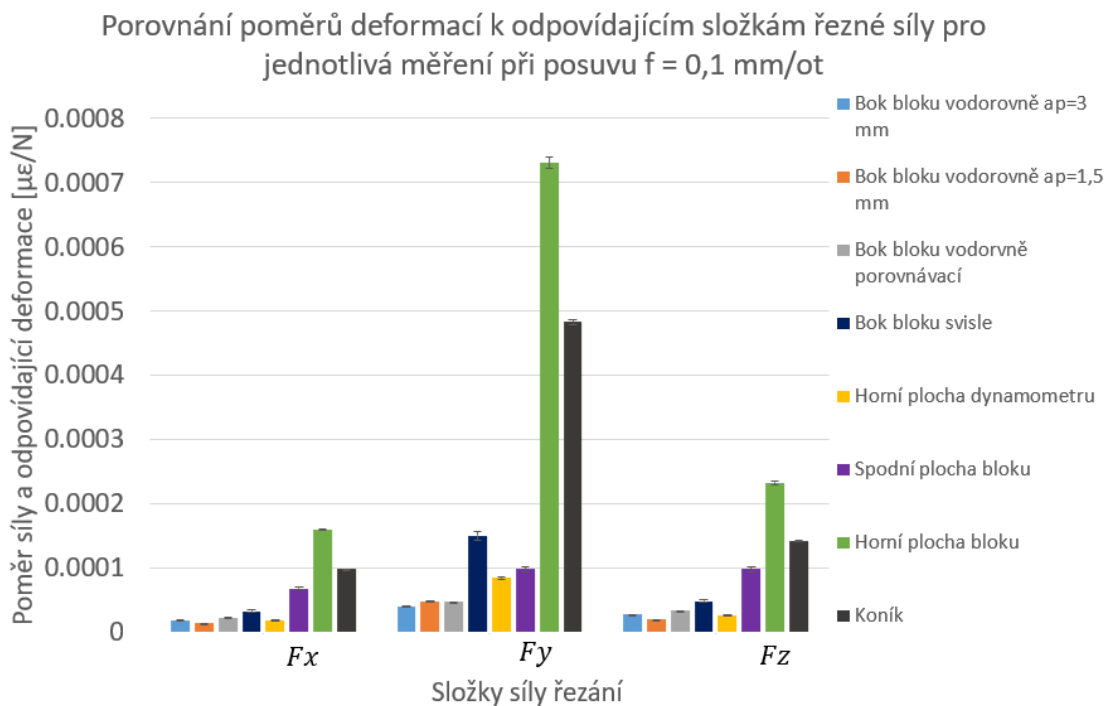
Obrázek 52 Graf citlivostí ve směru z

### 9.6.2. Kritérium stability měření

V tomto kritériu byly hodnoceny výšky grafů s požadavkem na co nejvyšší hodnotu. Grafické zpracování tohoto kritéria, viz Obrázek 54. Bodové ohodnocení je následující, viz Tabulka 3.

Tabulka 3 Bodové ohodnocení poměrů deformací a řezných sil

Bodové ohodnocení stability měření				
Bok bloku vodorovně	Bok bloku svisle	Horní plocha dynamometru	Spodní plocha bloku	Horní plocha bloku
1	3	2	4	5



Obrázek 54 Graf poměrů deformací a řezných sil

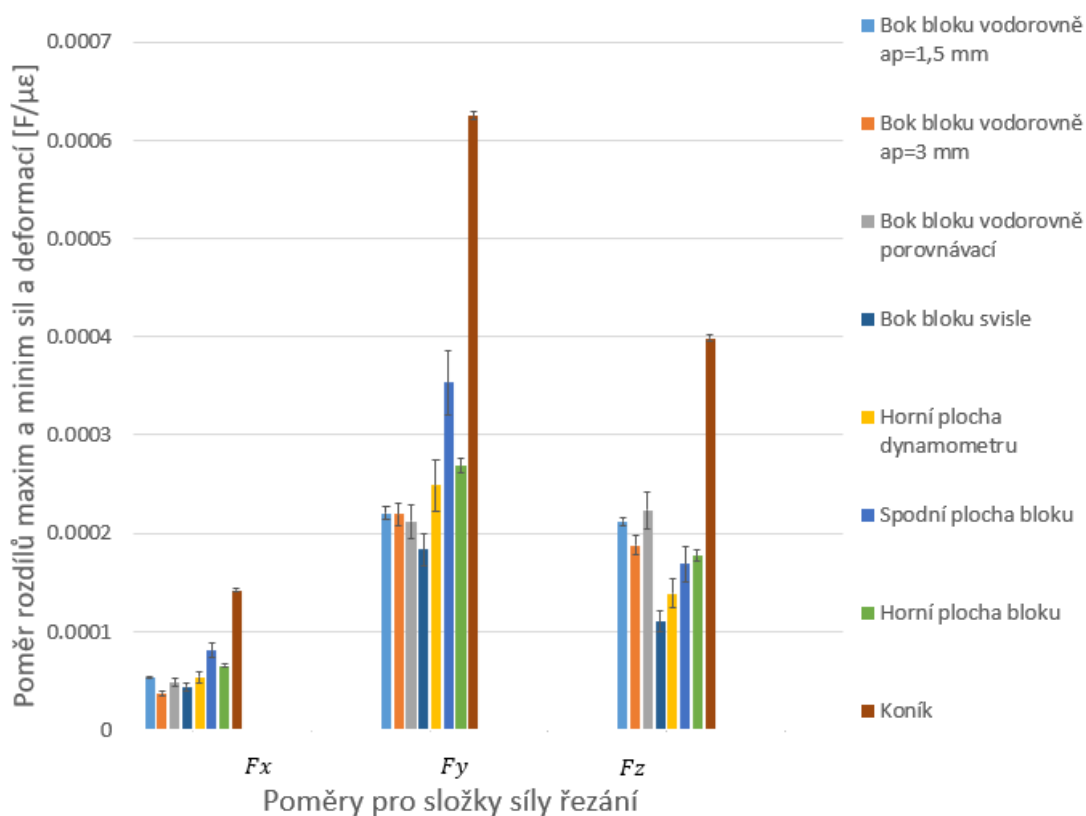
### 9.6.3. Kritérium rozsahu sil a deformací

V kritériu minim a maxim sil a deformací byly hodnoceny celkové rozsahy měření a jejich směrodatné odchytky. Grafické zpracování tohoto kritéria, viz Obrázek 55. Bodové ohodnocení je následující, viz Tabulka 4.

Tabulka 4 Bodové ohodnocení minim a maxim sil a deformací

	Bodové ohodnocení rozsahu sil a deformací				
	Bok bloku vodorovně	Bok bloku svisle	Horní plocha dynamometru	Spodní plocha bloku	Horní plocha bloku
Výšky grafů	4	5	3	1	2
Směrodatné odchytky	5	3	2	1	4

Porovnání poměrů rozdílů maxim a minim sil a deformací pro jednotlivé složky řezné síly



Obrázek 55 graf porovnání jednotlivých rozdílů minim a maxim sil a deformací

#### 9.6.4. Kritérium bezpečnosti umístění senzoru

Hodnocená byla bezpečnost pozice senzoru ve smyslu možného poničení senzoru. Nejlépe bylo hodnocené umístění na spodní ploše bloku, jelikož tímto směrem byl velice nepravděpodobný odvod třísky i procesní kapaliny. Nižší bodové ohodnocení měly boky bloku, a to kvůli tomu, že to byly stejné pozice, jen s jinak natočeným senzorem. Nejhorší hodnocení měly horní plochy dynamometru a bloku, jelikož byly nejbližší reznému procesu. Bodové ohodnocení tohoto kritéria je následující, viz Tabulka 5.

Tabulka 5 Bodové ohodnocení bezpečnosti umístění senzoru

Bodové ohodnocení bezpečnosti umístění senzorů				
Bok bloku vodorovně	Bok bloku svisle	Horní plocha dynamometru	Spodní plocha bloku	Horní plocha bloku
3.5	3.5	1.5	5	1.5

#### 9.6.5. Kritérium složitosti upnutí senzoru

Toto kritérium řešilo jednoduchost připevnění senzoru. Nejhůře byla hodnocená horní plocha dynamometru, jelikož v této pozici bylo primárně zkoušeno chování signálu u nože a vrtat do dynamometru by nebylo vhodné. Druhé nejhorší hodnocení obdržela spodní plocha bloku kvůli nedostatku místa pro senzor i vrták. Zbylé pozice jsou hodnoceny stejným počtem bodů, protože na nich byl dostatek místa pro senzor i přípravu upevnění. Bodové ohodnocení tohoto kritéria, viz Tabulka 6.

Tabulka 6 Bodové ohodnocení složitosti upnutí senzoru

Bodové ohodnocení složitosti upnutí senzoru				
Bok bloku vodorovně	Bok bloku svisle	Horní plocha dynamometru	Spodní plocha bloku	Horní plocha bloku
4	4	1	2	4

## 9.7. Dílčí shrnutí

Ve výsledné rozhodovací analýze byla všechna bodová ohodnocení dána dohromady a sečtena. Pozice s nejvyšším počtem bodů byla nejvhodnější. Výpis a součet bodů, viz Tabulka 7.

Tabulka 7 Celková rozhodovací analýza

Celková rozhodovací analýza					
	Bok bloku vodorovně	Bok bloku svisle	Horní plocha dynamometru	Spodní plocha bloku	Horní plocha bloku
Výsledné ohodnocení citlivostí grafů	2	1	2.5	5	2.5
Výšky grafů kritéria stability měření	1	3	2	4	5
Výšky grafů kritéria rozsahu sil a deformací	4	5	3	1	2
Směrodatné odchylky grafů kritéria rozsahu sil a deformací	5	3	2	1	4
Složitost upnutí senzoru	4	4	1	2	4
Bezpečnost umístění senzoru	3.5	3.5	1.5	5	1.5
Součet bodů	19.5	19.5	12	18	19

Jako nejlepší pozice pro senzor byla vyhodnocena pozice z boku bloku vodorovně a svisle. Jelikož to byly stejné pozice, jen s pootočeným senzorem, tak bude ještě vybrána pozice senzoru na horní ploše bloku. Blízké bodové hodnocení měla i měření se senzorem na spodní ploše bloku, ale tam by byla tvorba závitové díry podstatně složitější. Celkově lze říct, že se senzor nejlépe choval, když byl upnutý na ocelovém bloku. Finální měření s řádně upnutým a dotaženým senzorem bylo tedy provedeno na ocelovém bloku na boční a horní straně.

## 10. Citlivostní analýza na vybraném místě

### 10.1. Motivace

Tato finální měření byla provedena pro zjištění primárně citlivosti, ale i driftu, náchylnosti k offsetům signálu a mnoha dalších aspektů, které byly řešeny v předchozích experimentech. Se senzorem řádně upnutým dle katalogových listů společnosti Kistler byla měření porovnávána s předchozími s magnetickým pouzdrům.

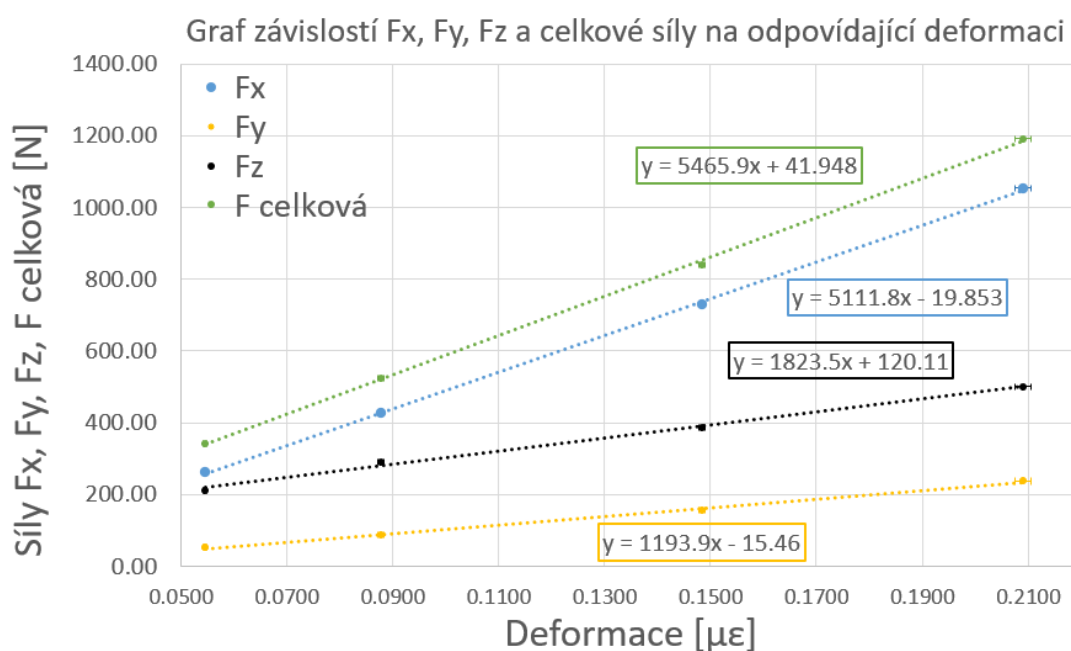
### 10.2. Návrh experimentu

V tomto finálním bloku měření byly vyvrtány díry minimálně 15 mm hluboké se závitem M6 minimálně do hloubky 10 mm v pozicích zvolených v kapitole 9.7. Šroub senzoru byl utažen momentem 10 Nm. Parametry řezného procesu zůstaly stejné a posuvy byly voleny  $f = 0,05$  mm/ot,  $f = 0,1$  mm/ot,  $f = 0,2$  mm/ot,  $f = 0,3$  mm/ot s odpovídající vyměnitelnou břitovou destičkou a hloubkou řezu  $a_p = 1,5$  mm. Byla provedena čtyři měření, vždy dvě ve stejných pozicích, jen se senzorem pootočeným o  $90^\circ$  v pomyslné ose šroubu. Vyhodnocení dat proběhlo standartně jako v předchozích měřeních.

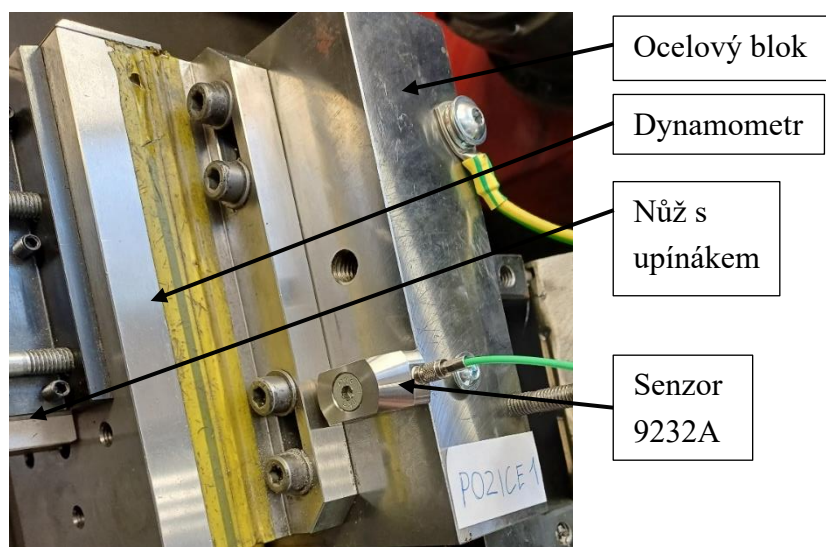
### 10.3. Vlastní experiment

#### 10.3.1. Na horní ploše bloku se senzorem ve vodorovné poloze

V této pozici byla pozorována nízká směrodatná odchylka dat senzoru a malá hodnota směrnice spojnice trendu, při porovnání s měřením s magnetickým pouzdrům, viz kapitola 9.6.1. Měření bylo celkově velice lineární s vysokou citlivostí senzoru ve směrech y a z. V celém průběhu měření nebyla pozorovány offsety signálu ani výrazný drift. Grafická závislost je vynesena na Obrázek 56. Umístění senzoru je ukázané na Obrázek 57.



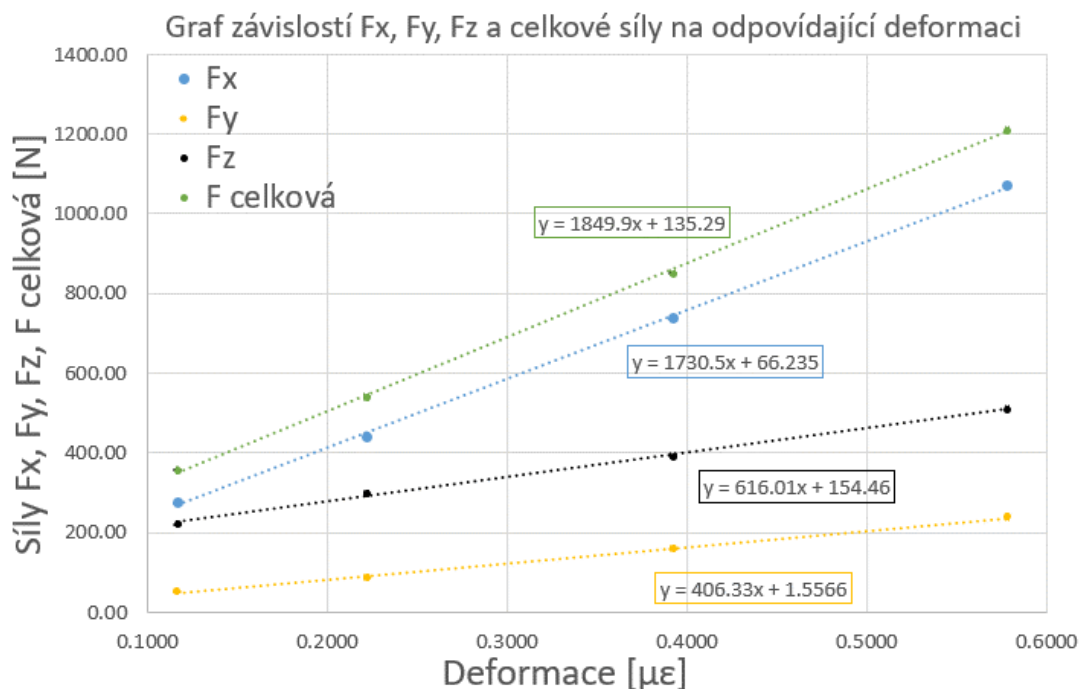
Obrázek 56 Graf závislosti sil na deformaci v pozici 1



Obrázek 57 Umístění senzoru na první pozici

### 10.3.2. Na horní ploše bloku se senzorem ve svislé poloze

Oproti prvnímu měření tohoto bloku byla pozorována ještě vyšší citlivost, nižší směrodatná odchylka a srovnatelná linearita. Offsets signálu ani výrazný drift také nebyly pozorovány. Grafická závislost je vynesena na Obrázek 58. Umístění senzoru je ukázané na Obrázek 59.



Obrázek 58 Graf závislosti sil na deformaci v pozici 2

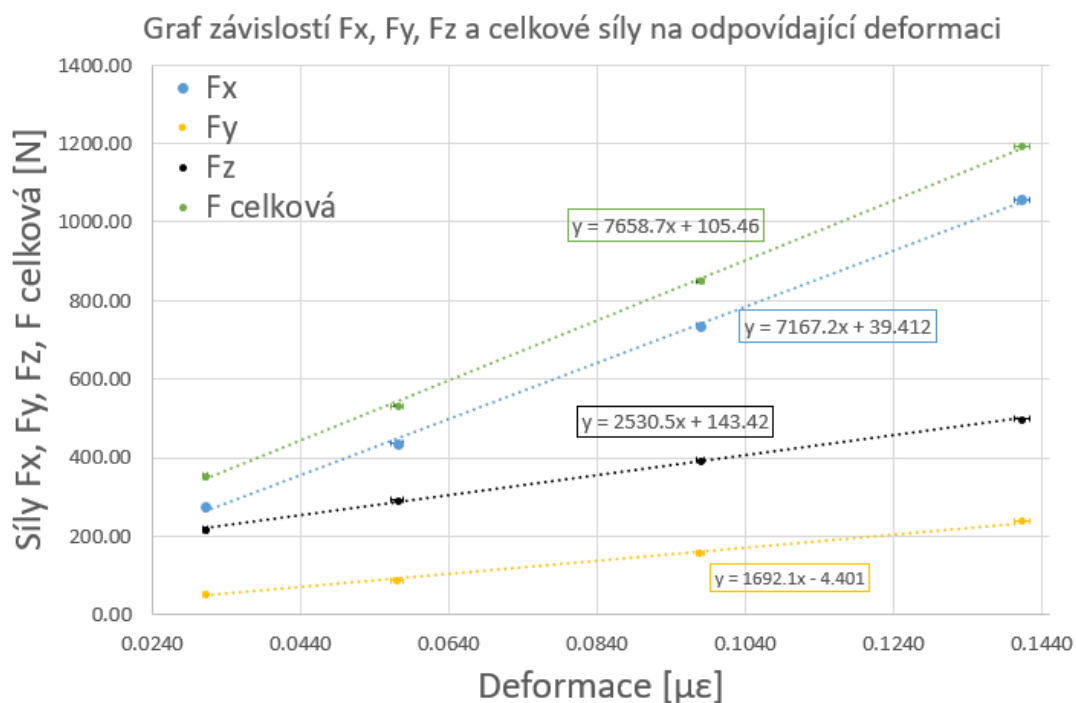


Obrázek 59 Umístění senzoru na druhé pozici

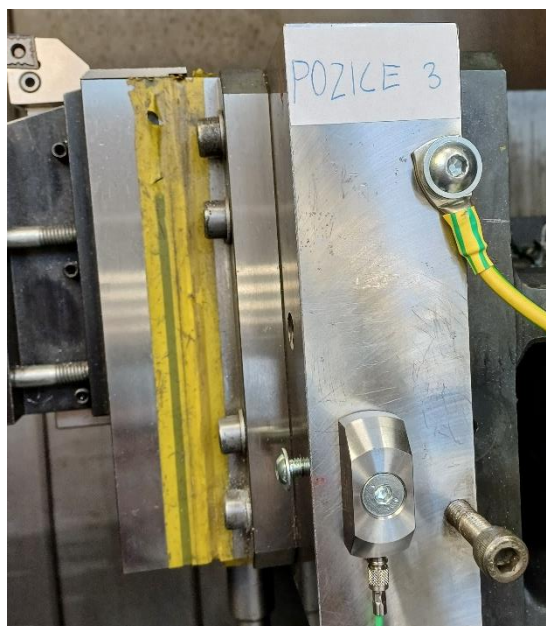


### 10.3.3. Na boční ploše bloku se senzorem ve svislé poloze

Z tohoto bloku měření byly v této pozici pozorovány druhé nejvyšší směrnice průběhů závislosti síly na deformaci a tedy nízká citlivost. Směrodatné odchylky byly v porovnání také vyšší. Offsets signálu a drift se chovaly stejně. Grafická závislost je vynesena, viz Obrázek 60. Umístění senzoru je ukázané, viz Obrázek 61.



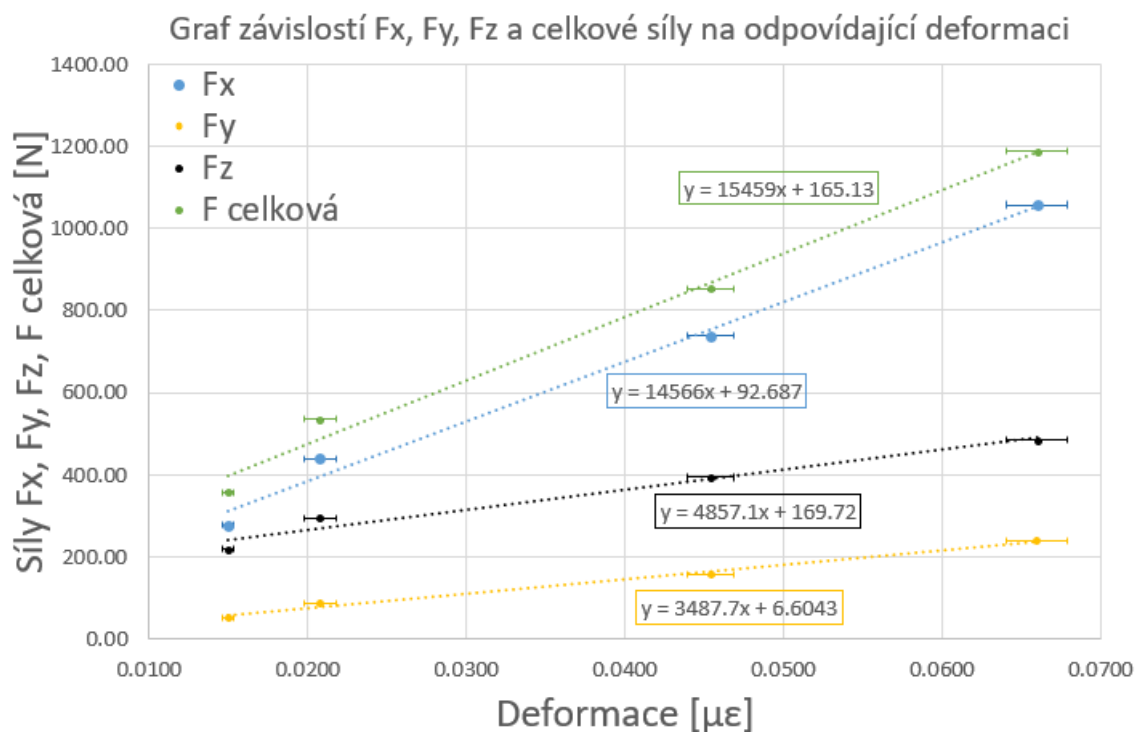
Obrázek 60 Graf závislosti sil na deformaci v pozici 3



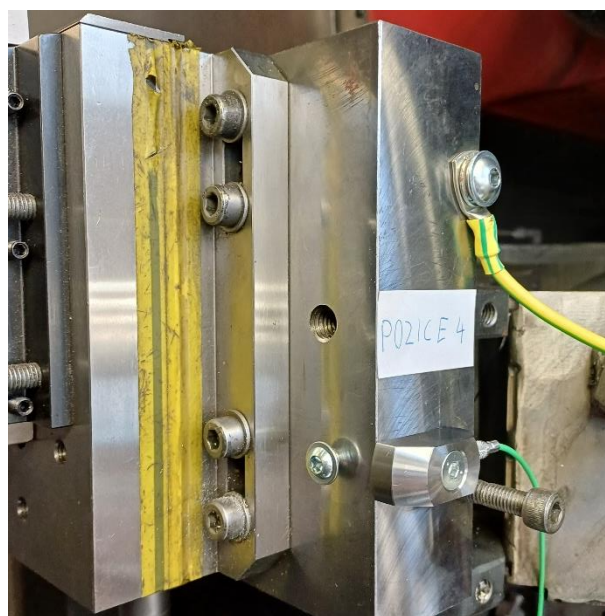
Obrázek 61 Umístění senzoru na třetí pozici

### 10.3.4. Na boční ploše bloku se senzorem ve vodorovné poloze

V tomto měření byly pozorovány nejvyšší směrnice a směrodatné odchylky. Linearita, v porovnání s předchozími měřeními tohoto bloku, byla nízká, ale vysoký drift ani offsety signálu stále nebyly přítomny. Grafická závislost je vynesena, viz Obrázek 62. Umístění senzoru je ukázané, viz Obrázek 63.



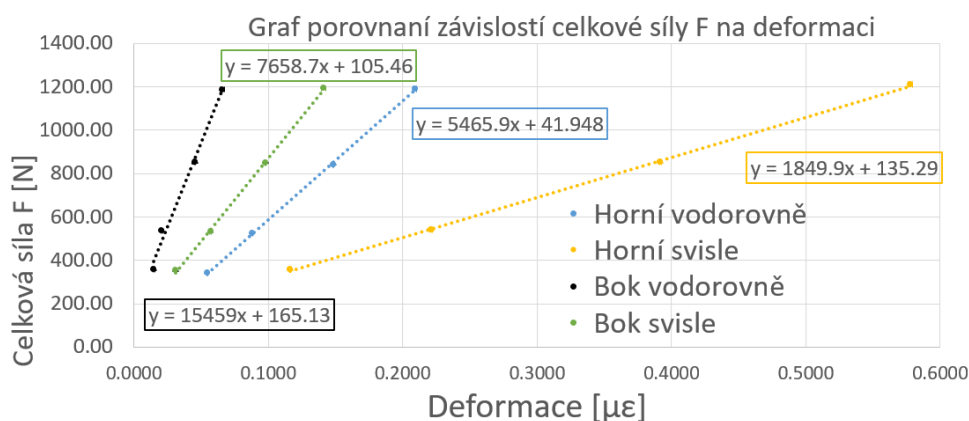
Obrázek 62 Graf závislosti sil na deformaci v pozici 4



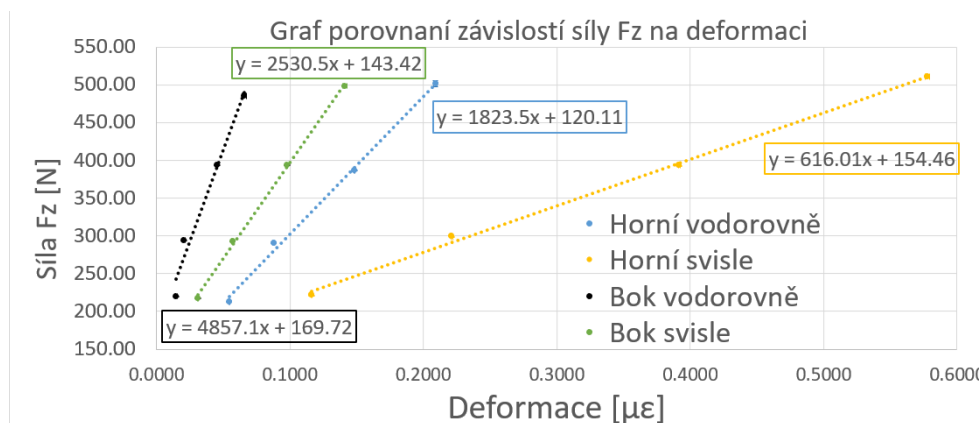
Obrázek 63 Umístění senzoru na čtvrté pozici

## 10.4. Dílčí shrnutí

V měřeních tohoto bloku byla jasně ukázána důležitost správného upnutí senzoru. Oproti předchozímu utahovacímu momentu 0,6 Nm na magnetickém pouzdru byl moment při upnutí do závitové díry 10 Nm, což bylo zhruba 10x více a na citlivosti senzoru se to velice projevilo. Mimo posledního čtvrtého měření byly pozorovány extrémy až 10x vyšší citlivosti oproti měření s pouzdrům. U prvních třech měření byl taktéž pozorován výrazný nárůst linearitu průběhů a snížení směrodatné odchylky. Toto bylo také způsobeno řádným upnutím a výrazný vliv měla i volba nejlepší možné pozice, jak bylo řešeno dříve, viz kapitola 9.6. Ve všech měřeních nebyl pozorován výrazný drift ani offsety signálu, což indikuje, že takto upnutý senzor měl větší rozsah řezných sil a k limitám měření se nebylo přiblíženo. V případě tohoto měření byly limitami řezného procesu předepsané parametry vyměnitelných břitových destiček soustružnického nože. Závislosti z jednotlivých měření pro sílu  $F_z$  a  $F$  celkovou jsou porovnány v grafech, viz Obrázek 64, Obrázek 65.



Obrázek 64 Graf porovnání závislostí celkové síly  $F$  na deformaci



Obrázek 65 Graf porovnání závislostí síly  $F_z$  na deformaci

## 11. Závěr

V této práci bylo řešena problematika použití senzoru 9232A pro sledování řezného procesu soustružení. Senzor byl porovnáván k dynamometru a byly testovány jeho vlastnosti. Významnou částí práce byla také měření ve velkém počtu pozic, pro objevení nejlepší možné pozice pro umístění senzoru.

Byla provedena podrobná rešerše na téma monitoringu řezného procesu, jehož součástí byl rozbor technologie soustružení, řezných nástrojů pro soustružení a jejich geometrie, podmínek řezného procesu, silových účinků při soustružení a jejich měření, silových senzorů a dynamometrů a metod monitoringu řezného procesu.

Před započítím měření bylo potřebné upravit soustavu měřidel, aby bylo měření validní. V tomto případě bylo nutné zajistit vhodné uzemnění měřící aparatury a řezné soustavy. To bylo realizováno propojením zmíněných částí na společný potenciál celé místnosti. Po tomto opatření bylo pozorováno zlepšení kvality signálu a pro získání výsledného vhodného signálu bylo zapotřebí rozdělit vnitřní a vnější soustavu uzemnění zesilovače 5017. Bez těchto zásahů nebylo možné započít měření. Další vhodná opatření byla péče o senzor a kabely s konektory vedoucí elektrický náboj dle doporučení výrobce a zajištění očištěné měřené plochy.

Při práci s piezoelektrickými senzory bylo nutné brát v potaz vliv driftu. Před měřením byla minimální doba ustálení driftu určena 600 s. Po ustálení významně delším než 600 s byl zjištěn vliv driftu o řád menší než bezprostředně po této době. Při zatěžování senzoru v prototypu magnetického pouzdra docházelo k offsetům signálu zřejmě vlivem byt' malých posunutí senzoru. Tyto offsety mohou během měření znehodnotit měřená data. Při experimentu s řádně upnutým senzorem přes šroub k měřené ploše nebude toto posunutí možné. Je pravděpodobné, že při působení dostatečně velkých dynamických účinků nastane obdobná situace. Dále by mohl nastat problém s určením rozsahu měření, které by bylo po dostatečně dlouhé době driftem překročeno.

Hledání vhodného místa pro finální upnutí senzoru proběhlo s použitím prototypu magnetického pouzdra. To bylo limitováno svými výrazně většími rozměry a potřebou feromagnetické měřené plochy. Nevyužitá plocha magnetů snižovala kvalitu připevnění senzoru a zvyšovala šanci na znehodnocení měření vlivem offsetů signálu. Při krátkodobém (5 s) měření na jednotlivých pozicích nebyl pozorován výrazný drift. Offsety signálu byly pozorovány od posuvu 0,2 mm/ot výše.

Senzor 9232A byl velice citlivý a dokázal zaznamenat i ty nejmenší deformace. Jeho omezení spočívala ve snímání deformací pouze v jednom směru. Směr působení největších deformací, a tedy největšího silového toku od řezného procesu, se měnil v závislosti na geometrii řezného nástroje.

Při finálních testech s řádně upnutým senzorem nebyl pozorován významný drift ani offsety signálu v celém rozsahu měření. Kalibrační křivky byly zhotoveny v podobě závislosti složek řezných sil na deformaci. Ty měly prakticky lineární průběh a citlivost vyšší než měření s magnetickým pouzdem. Limitami řezných podmínek těchto měření byly doporučené podmínky řezání vyměnitelných břitových destiček. Ty odpovídaly zhruba rozsahu řezných sil 50 až 1200 N. Skutečné limity se budou pohybovat v extrémnějším případech řezných sil.

Z poznatků zjištěných v této práci lze jasně konstatovat, že senzor byl dostatečně citlivý na změnu síly, ale je potřeba počítat s jeho limitami, jako sběr dat pouze v jednom směru, citlivost na změnu směru složek řezných sil, kratší délky měření v důsledku přítomnosti driftu apod. Pro určitá měření by bylo možné nahradit dynamometr tímto senzorem. Když se vezmou v potaz významné výhody tohoto senzoru jako malé rozměry, poměrně snadné upnutí a nízká cena, tak by sledování řezného procesu senzorem 9232A mohlo být novou atraktivní metodou. Pro realizaci této metody by ale bylo zapotřebí provést nemalé množství dalších testů, například pro hlubší pochopení chování piezoelektrického driftu a jeho kompenzaci, pokročilé určení vhodné pozice pro upnutí senzoru a pro objasnění odezev signálu na pochody řezného procesu.

## Seznam použité literatury

- [1] Prof. Ing. Jan Mádl, CSc. a Prof. Ing. Jan Barcala, CSc. *ZÁKLADY TECHNOLOGIE II*. 2. vyd. České vysoké učení technické v Praze: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03733-01.
- [2] Doc. Ing. Anton Humár, CSc. *TECHNOLOGIE I, TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část*. Vysoké učení technické v brně: CERM, s.r.o., [online]. 2003. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/TI_TO-1cast.pdf)
- [3] Prof. Ing. Jan Mádl, CSc., doc. Ing. Jindřich Kafka, CSc, Ing Martin Vrabec, CSc., Ing Rudolf Dvořák, CSc. *Technologie obrábění 1. díl*. České vysoké učení technické v Praze: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2
- [4] Prof. Ing. Jan Mádl, CSc., doc. Ing. Jindřich Kafka, CSc, Ing Martin Vrabec, CSc., Ing Rudolf Dvořák, CSc. *Technologie obrábění 3. díl*. České vysoké učení technické v Praze: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2
- [5] Doc. Ing. Jan Mádl, CSc. *Teorie obrábění*. Dotisk. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1989. ISBN 2660132186.
- [6] Doc. Ing. Jan Mádl, CSc. *Experimentální metody v teorii obrábění*. 4. přeprac. vydání. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1988.
- [7] *Silové poměry při procesu řezání, řezná síla a její složky*. ELUC [online]. [cit. 2024-7-30]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1196>
- [8] Robert Čep a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011 [cit. 2024-7-30]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: [https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni\\_metody\\_%20v\\_obrabeni.pdf](https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf)

- [9] *Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art*. Online, Akademická publikace, vedoucí Steven Y. Liang, Rogelio L. Hecker, Robert G. Landers. JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING: George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Universidad Nacional de La Pampa, University of Missouri-Rolla, 2004. Dostupné z: [http://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article-pdf/126/2/297/5566322/297\\_1.pdf](http://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article-pdf/126/2/297/5566322/297_1.pdf). [cit. 2024-08-01].
- [10] *Advanced monitoring of machining operations*. Online, Akademická publikace, vedoucí R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld. Journal Elsevier, CIRP Annals – Manufacturing Technology: University of Naples Federico II, Warsaw University of Technology, Trinity College Dublin, University of California, 2010. [cit. 2024-08-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610001976>.
- [11] *Monitoring and processing signal applied in machining processes—A review*. Online, Akademická publikace, vedoucí C.H.Lauro, L.C.Brandão, D.Baldo, R.A.Reis, J.P.Davim. Journal Elsevier, Measurement: University of Aveiro, Federal University of São João del Rei, 2014. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114003546>. [cit. 2024-08-02].
- [12] *Kovosvit MAS: SP Line, číslicově řízené soustruhy, 430/1100*. Česká republika, Sezimovo Ústí, 2014. Dostupné z: [https://www.kovosvit.cz/wp-content/uploads/2021/08/1540315079\\_cs\\_1\\_81\\_sp430cz-pl-web.pdf](https://www.kovosvit.cz/wp-content/uploads/2021/08/1540315079_cs_1_81_sp430cz-pl-web.pdf)
- [13] SANDVIK COROMANT. PCLNL 2525M 12. Online. c2000-2012. [cit. 2024-07-31]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/product-details?c=PCLNL%202525M%2012&m=5738233>.
- [14] DORMER PRAMET. CNMG 120404E-FM:T9325. Online. 2014, 23. 3. 2018. [cit. 2024-07-31]. Dostupné z: <https://dormerpramet.com/cz/en/p/6753878>.
- [15] DORMER PRAMET. CNMG 120412E-RM:T8415. Online. 2014, 23. 3. 2018. [cit. 2024-07-31]. Dostupné z: <https://dormerpramet.com/cz/en/p/8553068>.

- [16] AG, KISTLER HOLDING. *Piezoelectric surface strain sensor, highly sensitive (-600 ... 600  $\mu\epsilon$ ) / 9232A* [online]. Švýcarsko Winterthur: Kistler group. 2024 [cit. 2024-6-13]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/CZ/en/p/piezoelectric-surface-strain-sensor-9232a/000000000018007469>
- [17] AG, KISTLER HOLDING. *Laboratory charge amplifier LabAmp with data acquisition, charge, IEPE, voltage, 1 or 4 channels, meas. Ranges 100 to 1000000 pC/5165A* [online]. Švýcarsko Winterthur: Kistler group. 2024 [cit. 2024-6-13]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/CZ/en/p/laboratory-charge-amplifier-labamp-with-data-acquisition-5165a-config/000000000018044139>
- [18] AG, KISTLER HOLDING. *Laboratory charge amplifiers LabAmp with data acquisition, 4 to 8 channels/5167A* [online]. Švýcarsko Winterthur: Kistler group. 2024 [cit. 2024-6-13]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/US/en/p/laboratory-charge-amplifier-labamp-with-data-acquisition-5167a-config/000000000018044142>
- [19] AG, KISTLER HOLDING. *Multicomponent dynamometr, 5 kN, cover plate 10x170 mm/9257B* [online]. Švýcarsko Winterthur: Kistler group. 2024 [cit. 2024-6-21]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/CZ/en/cp/data-acquisition-system-5697a/P0000374>
- [20] AG, KISTLER HOLDING. *Data acquisition Systém (DAQ) for cutting force, test and measurement applications, with up to 28 channels/5697A* [online]. Švýcarsko Winterthur: Kistler group. 2024 [cit. 2024-6-13]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/CZ/en/cp/data-acquisition-system-5697a/P0000374>
- [21] AG, KISTLER HOLDING. *Software Dynoware for cutting force, test and measurement applications / 2825A* [online]. Švýcarsko Winterthur: Kistler group. 2024 [cit. 2024-6-13]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/US/en/cp/software-dynoware-2825a/P0000205>



## Seznam obrázků

Obrázek 1, Základní operace při soustružení [2].....	13
Obrázek 2 Hlavní pohyby při soustružení [1] .....	13
Obrázek 3 Radiální soustružnické nože [1] .....	14
Obrázek 4 geometrie soustružnického nože [1] .....	15
Obrázek 5 Změna nástrojových úhlů na pracovní [2].....	15
Obrázek 6, Nástrojová souřadnicová soustava pro soustružení [1].....	16
Obrázek 7 Nástrojové úhly břitu soustružnického nože v rovinách $P_o$ , $P_r$ , $P_s$ [1,2] .....	17
Obrázek 8 Průřez odřezávaných vrstev, a) podélné soustružení, b) čelní soustružení [1, 2] .....	18
Obrázek 9 Znárodnění řezné síly a řezného odporu [9].....	19
Obrázek 10 Grafické znázornění veličin spjatých s řeznou silou [9] .....	19
Obrázek 11 Schéma vzniku pasivní a aktivní složky řezné síly s označenými významnými body [5].....	20
Obrázek 12 Složky řezné síly s vyznačenými úhly .....	21
Obrázek 13 Řezné síly při vázaném řezání .....	21
Obrázek 14 Soustruh SP 430 [12] .....	29
Obrázek 15 Popis částí stroje a zařízení .....	31
Obrázek 16 Senzor 9232A [16] .....	33
Obrázek 17 Magnety a vnitřní uspořádání prototypu magnetického pouzdra .....	34
Obrázek 18 Upevněné pouzdro se senzorem .....	34
Obrázek 19 Zesilovač náboje LabAmp s DAQ 5167A.....	35
Obrázek 20 Více komponentní piezoelektrický dynamometr [19] .....	36
Obrázek 21 Měřicí zařízení od firmy Kistler pro měření se senzorem .....	36
Obrázek 22 První zkouška měření se senzorem v magnetickém pouzdře na ocelovém kvádru ..	38
Obrázek 23 Data první zkoušky.....	39
Obrázek 24 Umístění senzoru na ocelovém bloku .....	40
Obrázek 25 Typický průběh rušeného signálu .....	40
Obrázek 26 Umístění senzoru na koníku.....	41
Obrázek 27 Průběh signálu při měření na koníku .....	41
Obrázek 28 Část uzemňovacího kabelu s rozpojením a připevněním k bloku.....	42
Obrázek 29 Vliv uzemnění měřicí soustavy.....	42
Obrázek 30 Možnosti uzemnění na zesilovači 5017.....	43
Obrázek 31 Průběhy nezátěžovaného driftu po dobu 2500 s .....	44
Obrázek 32 Průběh driftu po dlouhém ustálení.....	45
Obrázek 33 Chování signálu při zatěžování konstantní silou .....	46
Obrázek 34 Pozice jednotlivých měření.....	50
Obrázek 35 Finálně upravená data senzoru.....	52
Obrázek 36 Neupravená data senzoru.....	52
Obrázek 37 Frekvenční analýza programu DynoWare .....	52
Obrázek 38 Data dynamometru, vlevo a) neupravená, vpravo b) upravená.....	53
Obrázek 39 Graf závislostí při $a_p = 3$ mm .....	55
Obrázek 40 Graf závislostí při $a_p = 1,5$ mm .....	55
Obrázek 41 Porovnání závislostí pro $F_y$ .....	56
Obrázek 42 Porovnání závislostí pro $F_x$ .....	56
Obrázek 44 Porovnání závislostí pro $F$ celkovou .....	57

Obrázek 43 Porovnání závislostí pro $F_z$ .....	57
Obrázek 45 Graf závislosti sil na deformaci na boční straně bloku se senzorem ve svislé poloze .....	58
Obrázek 46 Graf závislosti sil na deformaci na horní ploše dynamometru .....	59
Obrázek 47 Graf závislosti sil na deformaci na spodní ploše bloku .....	60
Obrázek 48 Graf závislosti sil na deformaci na horní ploše bloku .....	61
Obrázek 49 Typický signál z měření na koníku .....	62
Obrázek 50 Graf závislosti sil na deformaci na koníku .....	62
Obrázek 51 Graf citlivostí ve směru x .....	64
Obrázek 52 Graf citlivostí ve směru z .....	65
Obrázek 53 Graf citlivostí ve směru y .....	65
Obrázek 54 Graf poměrů deformací a řezných sil .....	66
Obrázek 55 graf porovnání jednotlivých rozdílů minim a maxim sil a deformací .....	67
Obrázek 56 Graf závislosti sil na deformaci v pozici 1 .....	71
Obrázek 57 Umístění senzoru na první pozici .....	71
Obrázek 58 Graf závislosti sil na deformaci v pozici 2 .....	72
Obrázek 59 Umístění senzoru na druhé pozici .....	72
Obrázek 60 Graf závislosti sil na deformaci v pozici 3 .....	73
Obrázek 61 Umístění senzoru na třetí pozici .....	73
Obrázek 62 Graf závislosti sil na deformaci v pozici 4 .....	74
Obrázek 63 Umístění senzoru na čtvrté pozici .....	74
Obrázek 64 Graf porovnání závislostí celkové síly F na deformaci .....	75
Obrázek 65 Graf porovnání závislostí síly $F_z$ na deformaci .....	75

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry senzoru 9232A [16] .....	33
Tabulka 2 Rozhodovací analýza sklonů grafů .....	64
Tabulka 3 Bodové ohodnocení poměrů deformací a řezných sil .....	66
Tabulka 4 Bodové ohodnocení minim a maxim sil a deformací .....	67
Tabulka 5 Bodové ohodnocení bezpečnosti umístění senzoru .....	68
Tabulka 6 Bodové ohodnocení složitosti upnutí senzoru .....	68
Tabulka 7 Celková rozhodovací analýza .....	69