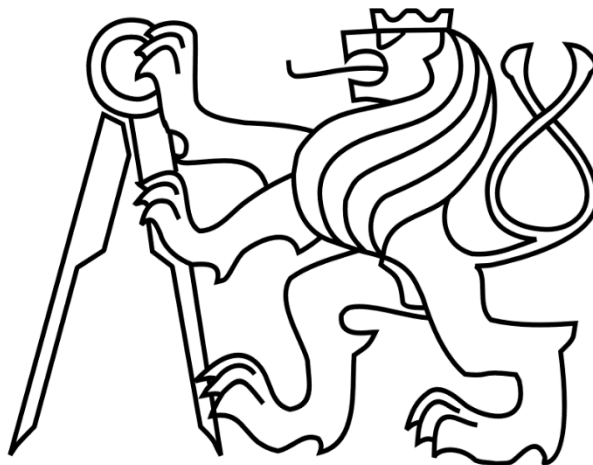


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

**Inprocesní identifikace koeficientů řezných sil na stroji MCU 700**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Blažek** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **484140**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**  
Studijní program: **Strojirenství**  
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Inprocesní identifikace koeficientů řezných sil na stroji MCU 700**

Název bakalářské práce anglicky:

**Inprocess Identification of Cutting Force Coefficients on the MCU 700 Machine**

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Trendem ve vývoji obráběcích strojů je zvyšování jejich inteligence. Jednou z pokročilých funkcí je schopnost OS pro daný řezný nástroj a obráběný materiál rozpoznat velikost řezných sil a znalost dále využít např. při kontrole opotřebení nástroje či při přizpůsobení řezných podmínek. Cílem práce je ověřit možnost nepřímého měření jednotlivých složek řezné síly na pětiosém stroji s přímými pohony otočně sklopného stolu. Bude sestaven model silové a momentové rovnováhy na otočném stole při jeho zatížení řeznou silou (popsanou mechanisticky). Tento model bude validován měřením při obrábění a bude využit pro identifikaci řezných koeficientů. Bude zpracováno porovnání identifikovaného modelu sil s měřením.; Osnova práce: Stručná rešerše v oblasti modelování a měření řezných sil. Teoretický rozbor působících sil a momentů. Návrh experimentu: dimenzování a umístění testovacího obrobku na otočně sklopný stůl, volba nástroje a řezných podmínek, účast při experimentu. Zpracování naměřených dat, identifikace řezných koeficientů a porovnání modelu sil s výstupy měření. Diskuze výsledků.; Rozsah textové části: 40-60 stran;

Seznam doporučené literatury:

[1] ALTINTAS, Y.: Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design, Cambridge University Press, 2000, ISBN 0 521 65973 6;  
[2] SOUČEK, Pavel. Servomechanismy ve výrobních strojích. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 210 s. ISBN 80-01-02902-6;

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

**Mgr. Jiří Falta ústav výrobních strojů a zařízení FS**

Datum zadání bakalářské práce: **29.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Petr Fojtů, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
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 vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne 25.7.2022

.....

podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petrovi Fojtů, Ph.D. za vedení této práce, jeho odborné rady a připomínky při její tvorbě. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Jiřímu Faltovi a Ing. Jaroslavu Kovalčíkovi, Ph.D. za jejich pomoc a rady při vypracování této práce. Chtěl bych také poděkovat své rodině za velkou podporu v průběhu celého studia, a v neposlední řadě také své přítelkyni a kamarádům za psychickou podporu.

# Anotace

Autor:	Michal Blažek
Název BP:	Inprocesní identifikace koeficientů řezných sil na stroji MCU 700
Rozsah práce:	69 str., 41 obr., 5 tab.
Školní rok vyhotovení:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12135 Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Petr Fojtů, Ph.D.
Konzultant:	Mgr. Jiří Falta
Zadavatel tématu:	ČVUT FS, Ú12135
Využití:	zjištění velikosti řezných sil, možnost prostřednictvím velikosti řezných sil kontrolovat opotřebení břitu a průběh řezného procesu
Klíčová slova:	koeficienty řezných sil, inprocesní identifikace, řezné síly, modely řezných sil, měření řezných sil
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá metodou inprocesní identifikace koeficientů řezných sil. V rešeršní části je popsáno modelování a měření řezných sil. Dále je uveden teoretický rozbor působících sil a momentů na stroji MCU 700, načež navazuje návrh postupu vyhodnocení dat. Pro získání dat je navržen experiment. Data jsou následně vyhodnocena. Zjištěné hodnoty řezných koeficientů jsou verifikovány měřením na stacionárním dynamometru. V závěru jsou diskutovány výhody a nevýhody navržené metody.

# Annotation

Author:	Michal Blažek
Title of bachelor dissertation:	Inprocess Identification of Cutting Force Coefficients on the MCU 700 Machine
Extent:	69 p., 41 fig., 5 tab.
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12135 Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Petr Fojtů, Ph.D.
Consultant:	Mgr. Jiří Falta
Submitter of Theme:	CTU FME, D12135
Application:	evaluation of cutting forces magnitude, possibility to monitor the cutting edge wear and progress of the cutting process
Keywords:	cutting force coefficients, inprocess identification, cutting forces, models of cutting forces, measurement of cutting forces
Annotation	Bachelor thesis deals with the inprocess identification of cutting force coefficients. The research part describes the modelling and measuring of cutting forces. Then the theoretical analysis of operating forces and moments on a machine tool MCU 700 is stated, followed by data evaluation procedure. To get the necessary data, an experiment is suggested. Afterwards the data gained from the experiment are evaluated. Detected values of cutting coefficients are verified by measurement on a stationary dynamometer. The advantages and disadvantages of this proposed method are discussed in the conclusion.

# Obsah

Přehled použitých veličin, zkratk a symbolů.....	9
1 Úvod.....	11
2 Cíl práce.....	12
3 Technologie frézování .....	13
3.1 Průřez třísky.....	15
3.1.1 Průřez třísky při čelním frézování.....	16
3.1.2 Průřez třísky při válcovém frézování.....	17
3.2 Řezné síly při frézování .....	18
3.3 Modely řezných sil při obrábění .....	20
3.3.1 Mechanistický model.....	20
3.3.2 Semi-mechanistický model.....	21
3.3.3 Bilineární model.....	21
3.3.4 Mocninný model/Kienzleho vztah.....	22
3.3.5 Polynomiální model.....	24
3.3.6 MKP model.....	24
3.4 Měření řezných sil při frézování.....	25
3.4.1 Dynamometry mechanické .....	27
3.4.2 Dynamometry pneumatické.....	28
3.4.3 Dynamometry elektrické.....	28
3.4.4 Dynamometry hydraulické.....	30
3.4.5 Dynamometry piezoelektrické.....	31
3.5 Dostupné inprocesní monitorování řezného procesu.....	32
3.6 Shrnutí rešerše.....	35
4 Vlastní řešení .....	36
4.1 Rozbor kinematiky stroje a působících sil.....	37
4.2 Teoretický výpočet reakčního momentu v pohonu osy C .....	39



---

4.3	Identifikace řezných koeficientů z momentu na pohonu osy C .....	41
4.4	Návrh uspořádání experimentu .....	42
4.4.1	Polotovary k obrábění .....	44
4.4.2	Nástroje .....	45
4.4.3	Měřicí aparatura .....	47
4.5	Provedení experimentu .....	48
4.6	Vyhodnocení experimentu .....	51
4.7	Verifikace výsledků .....	54
5	Diskuze výsledků .....	58
6	Závěr .....	60
	Seznamy .....	62
	Seznam použité literatury .....	62
	Seznam použitého softwaru.....	66
	Seznam obrázků.....	67
	Seznam tabulek.....	68
	Seznam příloh.....	69



## Přehled použitých veličin, zkratk a symbolů

Veličina	Jednotka	Popis
$A_D$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha odřezávané vrstvy (průřez třísky)
$A_{Dmax}$	[mm <sup>2</sup> ]	Maximální velikost plochy odřezávané vrstvy (průřezu třísky)
$a_e$	[mm]	Radiální hloubka řezu
$a_p$	[mm]	Axiální hloubka řezu
$b$	[mm]	Šířka odřezávané vrstvy (třísky)
$C_{FC}$	[-]	Konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu na velikost měrné řezné síly
$D$	[mm]	Průměr frézovacího nástroje
$F$	[N]	Celková řezná síla
$\bar{F}$	[N]	Střední hodnota síly za jednu otáčku
$F_a$	[N]	Aktivní složka síly řezání
$F_c (F_t)$	[N]	Řezná složka síly (tangenická složka řezné síly)
$F_{cN}$	[N]	Kolmá řezná složka síly
$F_f (F_a)$	[N]	Posuvová složka síly (axiální složka řezné síly)
$F_{fN}$	[N]	Kolmá posuvová složka síly
$F_p (F_r)$	[N]	Pasivní složka síly (radiální složka řezné síly)
$F_x$	[N]	Síla v ose X v souřadném systému stroje
$F_y$	[N]	Síla v ose Y v souřadném systému stroje
$F_z$	[N]	Síla v ose Z v souřadném systému stroje
$f_n$	[mm]	Posuv na otáčku, délka dráhy obrobku za dobu jedné otáčky nástroje
$f_z$	[mm/zub]	Posuv na zub, délka dráhy obrobku za dobu jedné otáčky nástroje dělená počtem zubů nástroje
$h$	[mm]	Tloušťka odřezávané vrstvy (třísky)
$k_c$	[MPa]	Měrná řezná síla (koeficient řezné síly)
$k_{c1.1}$	[MPa]	Měrná řezná síla pro plochu odřezávané vrstvy 1 mm <sup>2</sup>

$k_{cn}$	[MPa]	Normálový koeficient řezné síly
$k_{ct}$	[MPa]	Tečný koeficient řezné síly
$k_{en}$	[N/mm]	Normálový koeficient řezné hrany
$k_{et}$	[N/mm]	Tečný koeficient řezné hrany
$\bar{M}$	[Nmm]	Střední hodnota momentu za jednu otáčku
$M_{kA}$	[Nmm]	Kroutící reakční moment na pohonu osy A
$M_{kC}$	[Nmm]	Kroutící reakční moment na pohonu osy C
$\overline{M}_{kC}$	[Nmm]	Celkový střední kroutící moment působící na osu C
$M_{pas}$	[Nmm]	Parazitní třecí (pasivní) moment působící v pohonech os
$M_z$	[Nmm]	„Z“ složka momentu $\bar{M}$ působící v rovině XY
$N$	[-]	Počet zubů frézovacího nástroje v záběru
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky vřetene
$P_{už}$	[W]	Užitečný výkon obráběcího stroje
$p_f$	[MPa]	Tlak na hřbetu nástroje
$p_n$	[MPa]	Tlak na čelo nástroje
$R$	[mm]	Poloměr frézovacího nástroje
$v_c$	[m/min]	Řezná rychlost
$v_f$	[m/min]	Posuvová rychlost
$x$	[-]	Exponent vlivu tloušťky třísky na velikost měrné řezné síly
$x$	[mm]	Aktuální rameno vůči středu otáčení stolu (aktuální poloha břitu)
$\kappa_r$	[°]	Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
$\Phi (\varphi_i)$	[°]	Úhel záběru zubu řezného nástroje
$\eta$	[°]	Úhel toku třísky
$\lambda_s$	[°]	Nástrojový úhel skonu ostří
$\tau_s$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Napětí ve střížné rovině

# 1 Úvod

Tato závěrečná práce se zabývá inprocesní identifikací koeficientů řezných sil, jinými slovy tedy měřením poměru složek řezných sil za provozu stroje, u kterého není zapotřebí využívat externích měřících zařízení, jako je např. dynamometr. Důvodů, proč se zabývat tímto tématem a stejně tak obecně tématem řezných sil při obrábění, je mnoho. Znalost řezných sil je velmi důležitá, pokud chceme mít bezproblémový průběh obrábění, tzn. lepší stabilitu řezného procesu, jak z hlediska vibrací, tak z hlediska životnosti nástroje. Jestliže máme možnost kontrolovat velikost řezných sil v průběhu obrábění, tak poté můžeme korigovat a upravovat podmínky procesu dle individuálních potřeb v závislosti na velikosti těchto sil, což vede ke zlepšení průběhu řezného procesu, k lepšímu využití nástrojů a k lepší kontrole kvality výroby. Prostřednictvím inprocesního měření je možné získat přehled nad opotřebením břitu, což je poměrně zásadní pro výslednou kvalitu obrobku, rovněž je to důležité pro bezpečnost procesu. S rostoucím opotřebením narůstá i velikost odtlačení nástroje od obrobku vlivem řezných sil, což je zdrojem nepřesnosti při dokončovacím obrábění. Znalost sil by tedy měla teoreticky umožnit predikci kvality dílce, od čehož se může odvíjet následná kontrola kvality. Dalším velmi praktickým využitím by byla možnost porovnání nástrojů různých výrobců, z hlediska toho, jaké síly generují. Velkou motivací pro zavedení inprocesního měření do CNC strojů je jeho rychlost, a hlavně cenová dostupnost, která je daleko příznivější, nežli je tomu u dynamometrů.

## 2 Cíl práce

Cílem této práce je zpracování rešerše v oblasti modelování a měření řezných sil a následné ověření možnosti nepřímého měření jednotlivých složek řezné síly na pětiosém CNC stroji s otočně-sklopným stolem a přímými pohony.

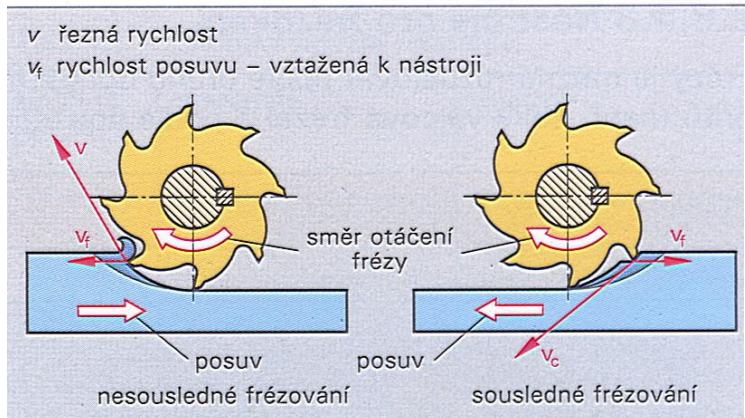
Rešeršní část bude zaměřená na popis řezných sil působících na břitu frézovacího nástroje a jejich vyjádření pomocí analytických a MKP modelů. Dále budou popsány způsoby měření řezných sil, mezi něž spadá měření přímé a nepřímé. V poslední části rešerše budou popsány možné způsoby inprocesního sledování řezného procesu.

Pro ověření bude proveden teoretický rozbor působících sil a momentů na pohony otočně-sklopného stolu společně s teoretickým výpočtem pro identifikaci řezných koeficientů. Potřebná data, která budou vstupovat do teoretických výpočtů, budou získána při experimentálním měření, které bude probíhat v laboratořích RCMT na stroji MCU 700. Součástí práce bude taktéž vyhodnocení experimentu s verifikací výsledků. Vyhodnocení bude představovat aplikaci navrženého postupu zpracování naměřených dat vedoucí k identifikování hodnot řezných koeficientů. Vyhodnocení bude provedeno pro vybraná měření pomocí skriptu v prostředí MATLAB. Identifikované hodnoty koeficientů budou poté vloženy do „kalkulátoru RCMT“, ze kterého budou získány průběhy složek síly  $F_x$  a  $F_y$ . Tyto průběhy budou porovnány s průběhy naměřenými na stacionárním dynamometru, čímž bude provedena verifikace metody. Zjištěné výsledky budou diskutovány.

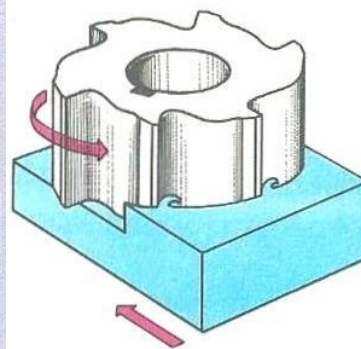
### 3 Technologie frézování

Jednou z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších metod obrábění je frézování. Je nedílnou součástí dnešní strojírenské výroby a neustále se vyvíjí směrem k vyšší produktivitě a bezpečnosti procesu. Velkou předností frézování je poměrně velká výkonnost při velmi dobré kvalitě obrábění. Frézování se využívá především pro výrobu rovinných a tvarových ploch, drážek různých profilů, závitů či ozubení. [2]

Technologie frézování je založena na způsobu obrábění, při kterém je tříska odebrána břity rotujícího nástroje – frézou. Hlavní pohyb při frézování vykonává nástroj a tento pohyb je rotační. Vedlejší pohyb posuvný nejčastěji koná upnutý obrobek převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních strojů (víceosé CNC frézky) jsou posuvy plynule řízené a mohou se realizovat ve více směrech zároveň. Řezný proces je přerušovaný, protože každý zub odřezává krátké třísky většinou proměnlivé tloušťky. [2] [4] Z technologického hlediska v závislosti na poloze osy nástroje k obráběné ploše se rozlišuje frézování válcové (obvodem nástroje) - Obr. 1 a čelní (čelem nástroje) - Obr. 2.



Obr. 2 – Obvodové frézování sousledné a nesousledné [4]



Obr. 1 - Čelní frézování [4]

U válcového frézování využíváme válcové a tvarové frézy. Zuby těchto fréz jsou umístěny pouze po jejím obvodu a osa nástroje je rovnoběžná s obráběnou plochou. Moderní válcové-stopkové frézy jsou zpravidla vybaveny vedlejším ostřím a břitem přes střed nástroje. Umožňují tak i osové zavrtání do materiálu nebo nájezd po rampě či šroubovici na požadovanou hloubku. Typické je to pro monolitní frézy broušené z karbidových polotovarů. Druhou skupinou nástrojů tvoří frézy s výměnnými břitovými destičkami (VBD), kdy jsou zpravidla do ocelového těla frézy upnuty břitové destičky ze slinutého karbidu.

Destičky jsou často navrženy tak, že mají několik řezných hran a po opotřebení jedné je možné destičku přepnout a pokračovat v obrábění s novým břitem. Hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu nástroje a na směr posuvu.

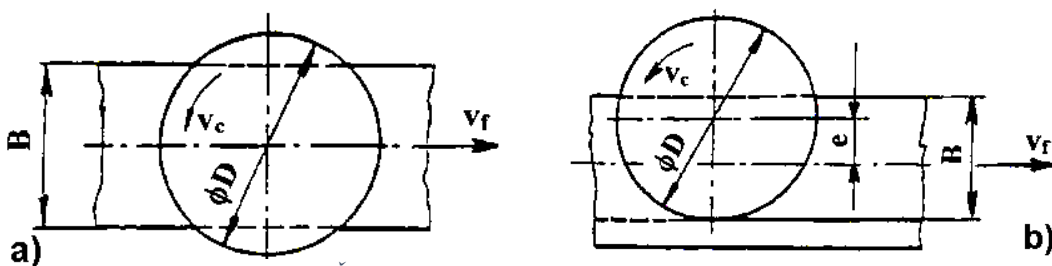
Čelní frézování využívá pro odběr materiálu čelní frézy, jejich břity jsou rozmístěny po obvodu a na čele nástroje. Typické je provedení čelních fréz s VBD. Osa nástroje je kolmá na obráběnou plochu, hloubka řezu se nastavuje ve směru osy nástroje. Od těchto dvou základních způsobů se dále odvozují další způsoby jako například okružní a planetové frézování. [2]

V závislosti na smyslu otáčení nástroje vůči posuvu obrobku rozlišujeme dva druhy válcového frézování, jimiž jsou sousledné a nesousledné, viz Obr. 1.

Při nesousledném (anglicky up-milling) frézování se ostří rotujícího nástroje v místě styku pohybuje proti směru posuvu obrobku. Tloušťka odebírané třísky je proměnlivá a mění se od nulové hodnoty na hodnotu maximální. Při vnikání nástroje do materiálu z počátku břit materiál pouze stlačuje, přičemž vznikají velké řezné síly, které vyvolávají silný tlak mezi obrobkem a frézou. Tyto silové účinky a deformace způsobují zvýšené opotřebení břitu. K oddělování třísky dochází v okamžiku, kdy tloušťka odřezávané vrstvy dosáhne určité velikosti. [2] [3]

Sousledné (anglicky down-milling) frézování je definováno tak, že ostří rotujícího nástroje se v místě styku pohybuje ve stejném směru jako posuv obrobku. Oproti frézování nesouslednému se tloušťka třísky mění z hodnoty maximální do nulové, toto ovšem může způsobit rázové namáhání břitu. Výhodami sousledného frézování mohou být například vyšší trvanlivost nástrojů, vyšší jakost obrobeného povrchu nebo možnost použití vyšších řezných rychlostí a posuvů. [2] [3]

U čelního frézování můžeme podle polohy osy otáčení frézy vzhledem k poloze obráběné plochy rozlišit 2 základní metody, které lze vidět na Obr. 3, frézování symetrické a nesymetrické.



Obr. 3 - Čelní frézování a) symetrické b) nesymetrické [2]

Při symetrickém čelním frézování prochází osa nástroje středem frézované plochy, naopak u nesymetrického čelního frézování je osa nástroje mimo střed frézované plochy.[2]

Hlavní pohyb, který při frézování vykonává fréza je definován řeznou rychlostí  $v_c$  [m/min]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3.1)$$

$D$  – průměr nástroje [mm]

$n$  – otáčky nástroje [ $\text{min}^{-1}$ ]

Vedlejší pohyb vykonávaný obrobkem je definován posuvovou rychlostí  $v_f$  [m/min]

$$v_f = \frac{f_n \cdot n}{1000} \quad (3.2)$$

$$f_n = f_z \cdot z \quad (3.3)$$

$f_n$  – posuv na otáčku, délka dráhy obrobku za dobu jedné otáčky nástroje [mm]

$f_z$  – posuv na zub, délka dráhy obrobku za dobu jedné otáčky nástroje dělená počtem zubů nástroje [mm/zub]

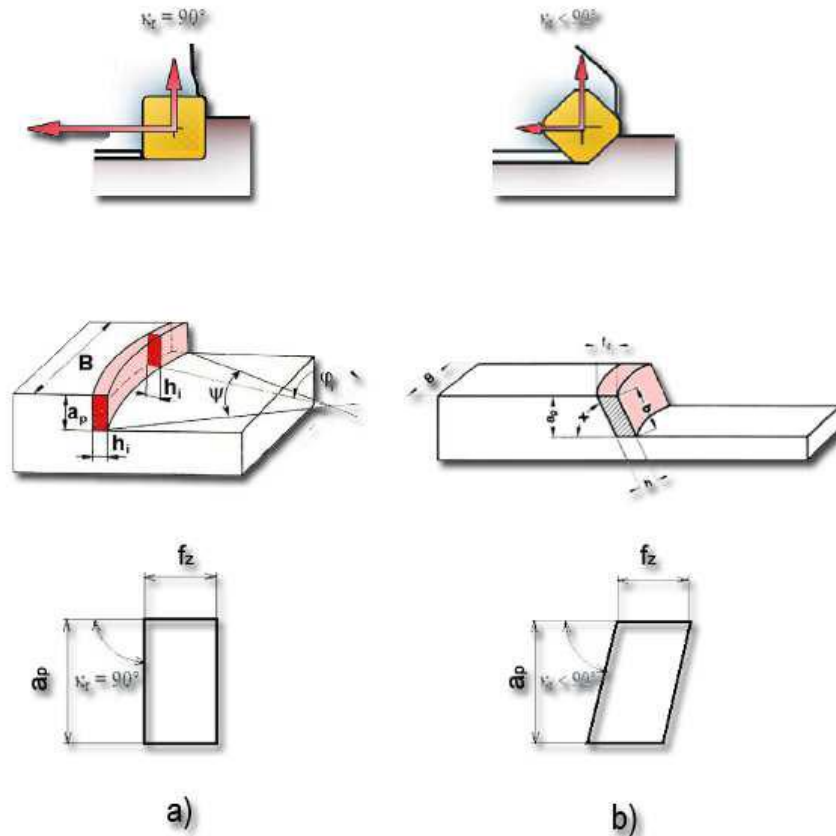
$n$  – otáčky nástroje [ $\text{min}^{-1}$ ]

### 3.1 Průřez třísky

Při řešení průřezu třísky při frézování je nutné vzít na vědomí, že průřez třísky a silové zatížení není konstantní (mění se tloušťka třísky během frézování) a v záběru může být i více zubů frézy. V úvahu se bere i to, že záběr břitů je periodicky přerušovaný a tříska je dělená. [19]

### 3.1.1 Průřez třísky při čelním frézování

U čelního frézování platí, že se tloušťka třísky mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu  $\varphi_i$ . Má na něj také vliv úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  - Obr. 4. [19]



Obr. 4 – Vliv úhlu nastavení hlavního ostří pro průřez třísky [3]  
a)  $\kappa_r = 90^\circ$       b)  $\kappa_r < 90^\circ$

Okamžitá tloušťka třísky  $h_i$  [mm] je definována vztahem:

$$h_i = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i \quad (3.4)$$

$\kappa_r$  – nástrojový úhel nastavení hlavního ostří

Jmenovitá šířka třísky  $b_i$  [mm] je definována vztahem:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (3.5)$$

$a_p$  – axiální hloubka řezu

Jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  [mm<sup>2</sup>]:

$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (3.6)$$

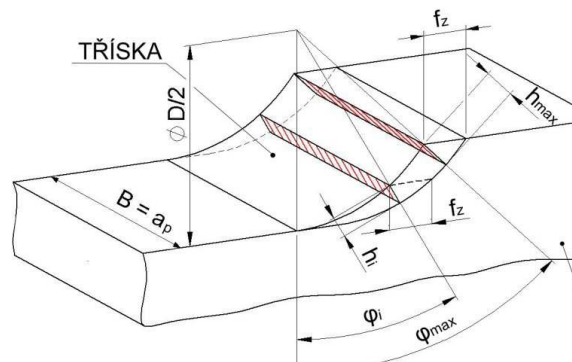


Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky  $A_{Dmax}$  [mm<sup>2</sup>] je při  $\varphi_i = 90^\circ$ :

$$A_{Dmax} = a_p \cdot f_z \quad (3.7)$$

### 3.1.2 Průřez třísky při válcovém frézování

U válcového frézování se mění plocha průřezu třísky v závislosti na úhlu záběru, ve kterém se zub nástroje nachází. Závislost změny plochy průřezu je vidět na Obr. 5. [2]



Obr. 5 - Průřez třísky při válcovém frézování [2]

Okamžitá tloušťka třísky  $h_i$  [mm] je definována vztahem:

$$h_i = f_z \cdot \sin\varphi_i \quad (3.8)$$

Jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  [mm<sup>2</sup>]:

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_i \quad (3.9)$$

Pokud  $\varphi_i = \varphi_{max}$ , potom maximální velikost jmenovitého průřezu  $A_{Dmax}$  [mm<sup>2</sup>] třísky bude:

$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_{max} \quad (3.10)$$

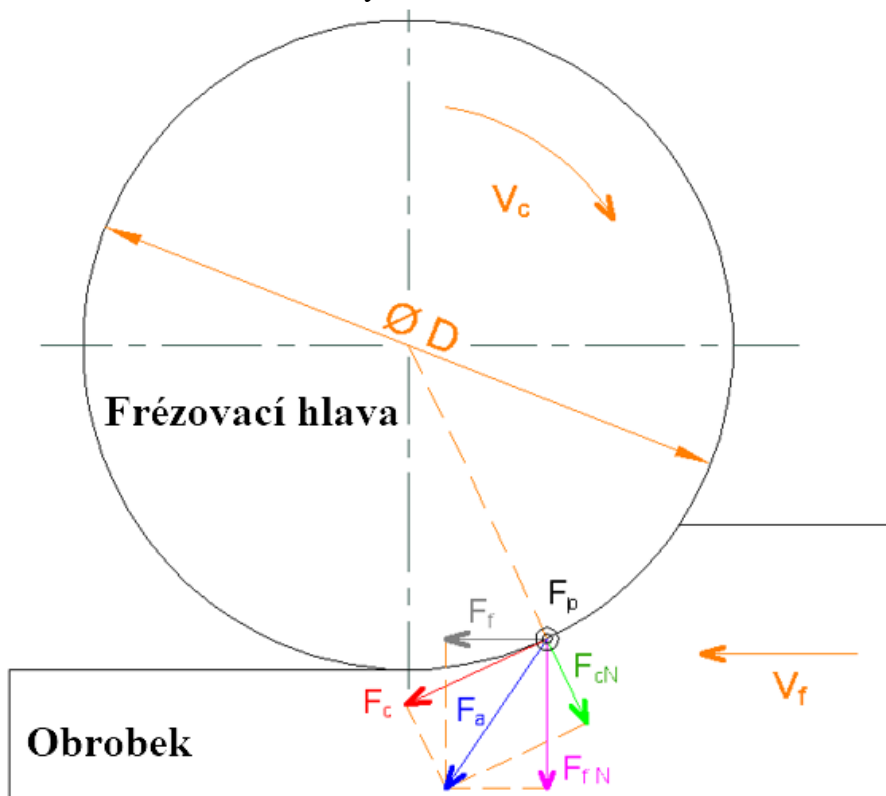
$$\sin\varphi_{max} = \frac{2}{D} \cdot \sqrt{D \cdot H - H^2} \quad (3.11)$$

### 3.2 Řezné síly při frézování

V obráběném materiálu vzniká při vnikání břitu řezného nástroje stav napjatosti, který v mezní situaci způsobuje jeho dělení, to je doprovázeno plastickými i elastickými deformacemi a také silovými jevy. Tyto silové jevy při obrábění materiálu nazýváme řeznými silami. Jejich znalost je velmi důležitá k vyváženému a správnému řezání, speciálně s ohledem na uspokojivý průběh obrábění, stabilitu a opotřebení břitu.[9]

Při určování složek síly frézování se vychází ze silových poměru na jednom břitu, který je pod úhlem  $\varphi_i$ . Pro válcové frézování frézou s přímými zuby je celková řezná síla  $F$  působící na obrobek (stejně síly opačného směru působí na břit frézy) rozložena na složky (Obr. 6): [9]

- $F_c$  [N] – řezná složka
- $F_{cN}$  [N] – kolmá řezná složka síly řezání
- $F_f$  [N] – posuvová složka síly řezání
- $F_{fN}$  [N] – kolmá posuvová složka síly řezání
- $F_p$  [N] – pasivní složka síly řezání
- $F_a$  [N] – aktivní složka síly řezání



Obr. 6 -- Rozklad řezné síly na zubu válcové frézy [12]

Dle obrázku platí, že síla aktivní se rozkládá na složky řeznou a posuvovou potažmo složky kolmou řeznou a kolmou posuvovou. [12] Můžeme ji tedy definovat jako:

$$F_a = \sqrt{F_c^2 + F_{cN}^2} = \sqrt{F_f^2 + F_{fN}^2} \quad (3.12)$$

Celková řezná síla je významnou veličinou v procesu řezání, musí totiž překonat řezný odpor, který klade obráběný materiál na břit nástroje. Při překonání tohoto odporu dochází k oddělení třísky od zbytku materiálu. [12] Celková řezná síla je definována vztahem:

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_p^2} = \sqrt{F_c^2 + F_{cN}^2 + F_p^2} = \sqrt{F_f^2 + F_{fN}^2 + F_p^2} \quad (3.13)$$

Mezi nejdůležitější síly z výše uvedených patří řezná síla ( $F_c$ ), jinak též nazývaná tangenciální. Základní popis pomocí Kienzleho vztahu je uveden níže, další způsoby vyjádření jsou uvedeny v kapitole 3.3 „Modely řezných sil při frézování“.

Řezná složka síly  $F_c$  [N] je definována vztahem:

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi \quad (3.14)$$

Kde  $k_c$  [MPa] je měrná řezná síla a pro válcové frézování je definována vztahem:

$$k_c = \frac{C_{Fc}}{h^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin\varphi)^{1-x}} \quad (3.15)$$

$C_{Fc}$  – konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu [-]

$x$  – exponent vlivu tloušťky třísky [-]

Po dosazení vztahů nabývá řezná síla  $F_c$  [N] pro válcové frézování hodnoty:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x\varphi \quad (3.16)$$

Měrná řezná síla  $k_c$  [MPa] je pro čelní frézování je definována vztahem:

$$k_c = \frac{C_{Fc}}{h^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin\kappa_r \cdot \sin\varphi)^{1-x}} \quad (3.17)$$

Po dosazení vztahů nabývá řezná síla  $F_c$  [N] pro čelní frézování hodnoty:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin\kappa_r^{x-1} \cdot \sin^x\varphi \quad (3.18)$$

[2]

### 3.3 Modely řezných sil při obrábění

Analytické modely řezných sil jsou vhodné pro predikci velikosti silových účinků při řezném procesu. V dnešní době existuje celá řada metod, principů modelování a predikce řezných sil. Následujících 5 modelů je založeno na výpočtu řezné síly přes součin měrné řezné síly ( $k_c$ ) a plochy třísky ( $A_D$ ), která je součinem její tloušťky ( $h$ ) a šířky ( $b$ ). [12] [20]

#### 3.3.1 Mechanistický model

Do výpočtu složek celkové řezné síly  $F$  [N] je připočítáván příspěvek činné délky řezné hrany [5], výsledné vztahy jsou poté definovány takto:

$$F_c = k_c \cdot A_D + k_{ce} \cdot b = (k_c \cdot h + k_{ce}) \cdot b \quad (3.19)$$

$$F_p = k_{pc} \cdot A_D + k_{pe} \cdot b = (k_{pc} \cdot h + k_{pe}) \cdot b \quad (3.20)$$

$$F_f = k_{fc} \cdot A_D + k_{fe} \cdot b = (k_{fc} \cdot h + k_{fe}) \cdot b \quad (3.21)$$

Měrná řezná síla  $k_c$  [MPa] bývá vypočtena na základě experimentálních dat získaných při ortogonálním řezání jako závisující na střížném napětí  $\tau_s$ , úhlu toku třísky  $\eta$ , úhlu sklonu ostří  $\lambda_s$ , normálového úhlu čela  $\gamma_n$ , stříhu  $\theta_n$ , tření  $\beta_n$ . [7] Pasivní a posuvová složka síly mají také své koeficienty měrných sil, jsou definovány vztahem:

$$k_c = \frac{\tau_s}{\sin \theta_n} \cdot \frac{\cos(\beta_n - \gamma_n) + \tan \lambda_s \cdot \tan \eta \cdot \sin \beta_n}{\sqrt{\cos^2(\theta_n + \beta_n - \gamma_n) + \tan^2 \eta \cdot \sin^2 \beta_n}} \quad (3.22)$$

$$k_{pc} = \frac{\tau_s}{\sin \theta_n \cdot \cos \lambda_s} \cdot \frac{\sin(\beta_n - \gamma_n)}{\sqrt{\cos^2(\theta_n + \beta_n - \gamma_n) + \tan^2 \eta \cdot \sin^2 \beta_n}} \quad (3.23)$$

$$k_{fc} = \frac{\tau_s}{\sin \theta_n} \cdot \frac{\cos(\beta_n - \gamma_n) \cdot \tan \lambda_s - \tan \eta \cdot \sin \beta_n}{\sqrt{\cos^2(\theta_n + \beta_n - \gamma_n) + \tan^2 \eta \cdot \sin^2 \beta_n}} \quad (3.24)$$

- $k_{ce}, k_{pe}, k_{fe}$  jsou koeficienty příspěvku řezné hrany a získávají se při experimentu z naměřených hodnot (pro nulovou tloušťku). [7] [12]

Využívá se k detailnějšímu popisu řezného procesu – například při simulaci virtuálního obrábění.

### 3.3.2 Semi-mechanistický model

Složky řezné síly [5] jsou definovány jako:

$$F_c = k_c \cdot A_D + k_{ce} \cdot b = (k_c \cdot h + k_{ce}) \cdot b \quad (3.25)$$

$$F_p = k_{pc} \cdot A_D + k_{pe} \cdot b = (k_{pc} \cdot h + k_{pe}) \cdot b \quad (3.26)$$

$$F_f = k_{fc} \cdot A_D + k_{fe} \cdot b = (k_{fc} \cdot h + k_{fe}) \cdot b \quad (3.27)$$

$$k_{ce} = k_{pe} = k_{fe} = 0 \quad (3.28)$$

Měrné síly narozdíl od mechanistického modelu závisí i na tlaku na čele  $p_n$  [MPa] či hřbetu  $p_f$  [MPa] nástroje při řezání, dle reference [7] jsou definovány jako:

$$k_c = p_n \cdot (\cos \gamma_n + p_f \cdot \cos \eta \cdot \sin \gamma_n + p_f \cdot \tan \lambda_s \cdot \sin \eta) \quad (3.29)$$

$$k_{pc} = p_n \cdot \left( -\frac{\sin \gamma_n}{\cos \lambda_s} + p_f \cdot \cos \gamma_n \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda_s} \right) \quad (3.30)$$

$$k_{fc} = p_n \cdot (\tan \lambda_s \cdot \cos \gamma_n - p_f \cdot \sin \eta \cdot \sin \gamma_n + p_f \cdot \tan \lambda_s \cdot \cos \eta \cdot \sin \gamma_n) \quad (3.31)$$

### 3.3.3 Bilineární model

Složky řezné síly dle reference [7] jsou definovány jako:

$$F_c = k_c \cdot A_D + k_{ce} \cdot b = (k_c \cdot h + k_{ce}) \cdot b \quad (3.32)$$

$$F_p = k_{pc} \cdot A_D + k_{pe} \cdot b = (k_{pc} \cdot h + k_{pe}) \cdot b \quad (3.33)$$

$$F_f = k_{fc} \cdot A_D + k_{fe} \cdot b = (k_{fc} \cdot h + k_{fe}) \cdot b \quad (3.34)$$

Měrné řezné síly dle reference [7] jsou definovány takto:

- Pokud je tloušťka třísky  $h$  menší než daná mezní tloušťka  $t$ , pak platí:

$$k_{ce} = k_{pe} = k_{fe} = 0 \quad (3.35)$$

$$k_c = k_{c1}; k_{pc} = k_{pc1}; k_{fc} = k_{fc1} \quad (3.36)$$

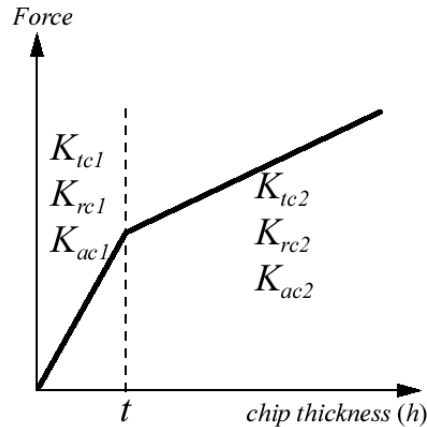
- Pokud je tloušťka třísky  $h$  větší než daná mezní tloušťka  $t$ , pak platí:

$$k_c = k_{c2}; k_{pc} = k_{pc2}; k_{fc} = k_{fc2} \quad (3.37)$$

$$k_{ce} = (k_{c1} - k_{c2}) \cdot t \quad (3.38)$$

$$k_{pe} = (k_{pc1} - k_{pc2}) \cdot t \quad (3.39)$$

$$k_{fe} = (k_{fc1} - k_{fc2}) \cdot t \quad (3.40)$$



Obr. 7 - Ukázka rozdělení koeficientů dle vybrané mezní tloušťky  $t$ . Koeficienty  $K_{tc}$ ,  $K_{rc}$ ,  $K_{ac}$  jsou v našem případě pojmenovány  $K_c$ ,  $K_{pc}$ ,  $K_{fc}$  ve stejném pořadí. [7]

### 3.3.4 Mocninný model/Kienzleho vztah

V tomto modelu je měrná řezná síla  $k_c$  [MPa] v základním tvaru funkcí tloušťky třísky ( $h$ ) v mocninném tvaru, toto vyjádření se taktéž nazývá Kienzleho vztah. [12] [20]

$$k_c = k_{c_{1.1}} \cdot h^{-m_c} \quad (3.41)$$

Poté můžeme řeznou sílu  $F_c$  [N] definovat vztahem:

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_{c_{1.1}} \cdot h^{1-m_c} \cdot b \quad (3.42)$$

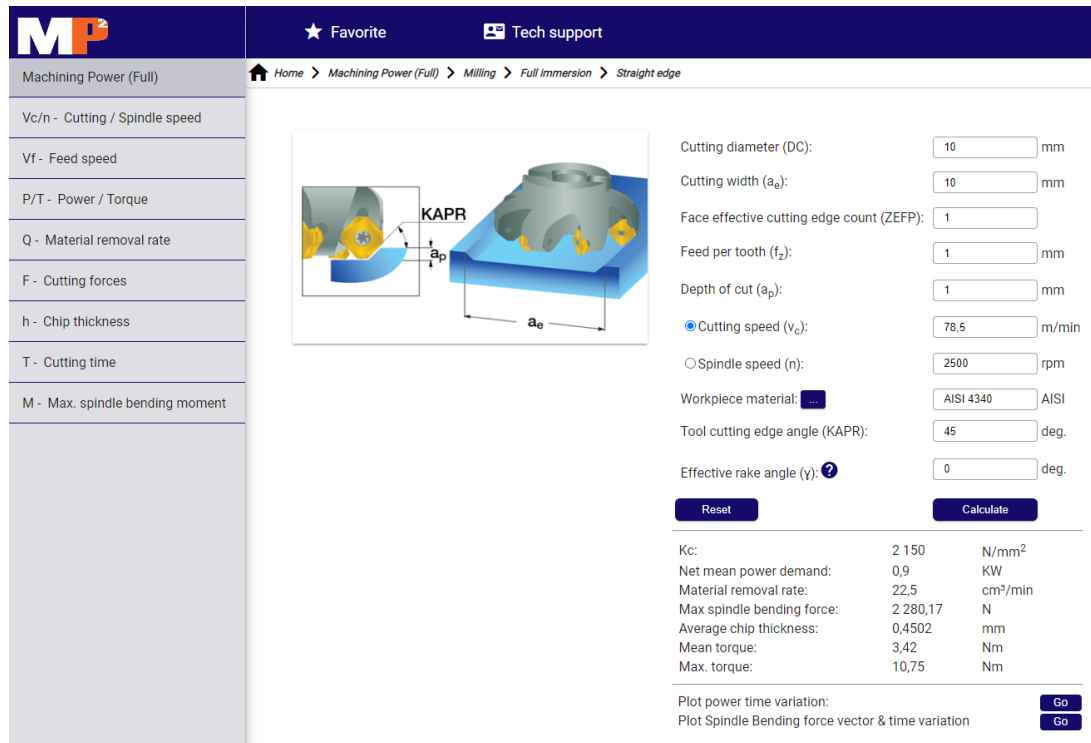
Pro pasivní  $F_p$  a posuvovou  $F_f$  složku síly jsou vztahy pro výpočet vyjádřeny jako:

$$F_p = k_{pc} \cdot A_D = k_p \cdot k_{c_{1.1}} \cdot h^{1-m_p} \cdot b \quad (3.43)$$

$$F_f = k_{fc} \cdot A_D = k_f \cdot k_{c_{1.1}} \cdot h^{1-m_f} \cdot b \quad (3.44)$$

Tento model se poměrně často využívá v praxi, a to díky existujícím databázím materiálových koeficientů  $k_{c_{1.1},p,f}$ ,  $m_{c,p,f}$ . Předpokládá se zde, že při nulovém průřezu třísky (začátek a konec záběru) je řezná síla také nulová. Často jej využívají výrobci nástrojů, kteří k němu uvádějí hodnoty již zmiňovaných koeficientů. Velkou výhodou této metody je také rychlost a univerzálnost výpočtu. [12] [20]

Na Kienzleho vztahu se taktéž zakládají softwarové aplikace pro výpočet řezné síly. Například aplikace Machining Power Calculator na Obr. 8 je od výrobce řezných nástrojů ISCAR.



**Machining Power (Full)**

Home > Machining Power (Full) > Milling > Full immersion > Straight edge

Cutting diameter (DC): 10 mm

Cutting width ( $a_e$ ): 10 mm

Face effective cutting edge count (ZEFP): 1

Feed per tooth ( $f_z$ ): 1 mm

Depth of cut ( $a_p$ ): 1 mm

Cutting speed ( $v_c$ ): 78.5 m/min

Spindle speed (n): 2500 rpm

Workpiece material: AISI 4340 AISI

Tool cutting edge angle (KAPR): 45 deg.

Effective rake angle ( $\gamma$ ): 0 deg.

Reset Calculate

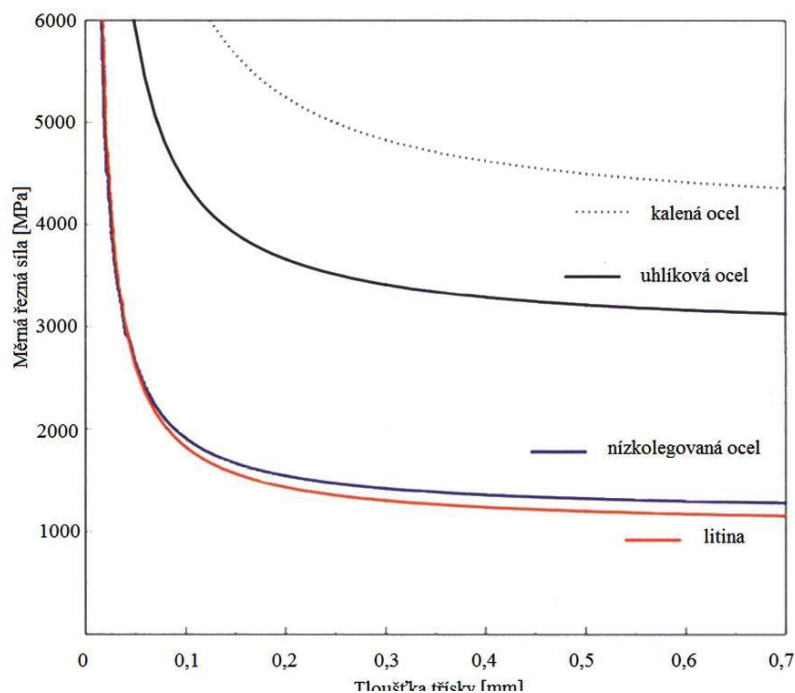
Kc:	2.150	N/mm <sup>2</sup>
Net mean power demand:	0,9	KW
Material removal rate:	22,5	cm <sup>3</sup> /min
Max spindle bending force:	2.280,17	N
Average chip thickness:	0,4502	mm
Mean torque:	3,42	Nm
Max. torque:	10,75	Nm

Plot power time variation: Go

Plot Spindle Bending force vector & time variation: Go

Obr. 8 - Machining Power calculator od firmy ISCAR [13]

Na Obr. 9 je zobrazena závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky pro různé materiály:



Obr. 9 - Závislost měrné řezné síly na tloušťce odřezávané vrstvy pro různé materiály [21]

### 3.3.5 Polynomiální model

Výpočet řezné síly je založen na základě polynomiálního modelu s vybraným stupněm polynomu. Nejmenší stupeň polynomu je 2, stupeň 1 by se rovnal lineárnímu/mechanistickému modelu. [7]

Obecný tvar pro výpočet řezné síly  $F_c$  [N] je definován vztahem:

$$F_c = F_p = F_f = (a_m \cdot h^m + a_{m-1} \cdot h^{m-1} + \dots + a_1 \cdot h + a_0) \cdot b \quad (3.45)$$

Pokud předchozí rovnici přepíšeme do základního tvaru součinu měrné řezné síly a plochy třísky, tak dostaneme vztah:

$$F_c = F_p = F_f = (a_m \cdot h^{m-1} + a_{m-1} \cdot h^{m-2} + \dots + a_1 + a_0 \cdot h^{-1}) \cdot h \cdot b \quad (3.46)$$

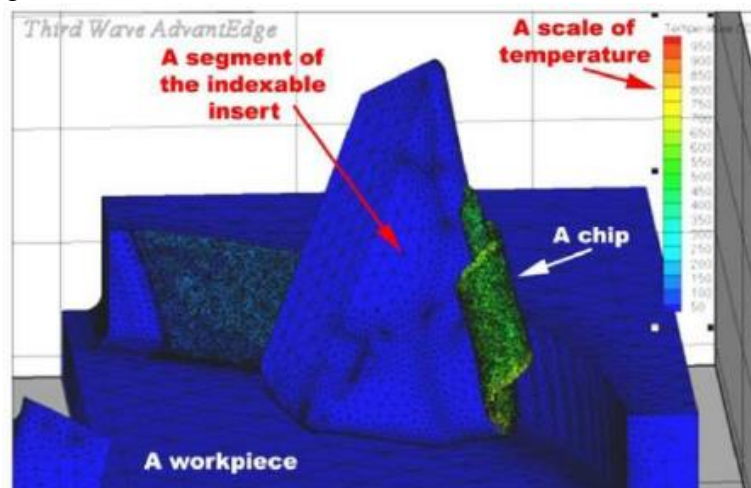
Z této rovnice můžeme získat vztah pro výpočet měrné řezné síly  $k_c$  [MPa]:

$$k_c = k_{pc} = k_{fc} = a_m \cdot h^{m-1} + a_{m-1} \cdot h^{m-2} + \dots + a_1 + a_0 \cdot h^{-1} \quad (3.47)$$

Stupeň polynomu se volí takový, aby co nejlépe a nej přesněji vystihl reálný průběh řezného procesu. Nevýhoda je ovšem taková, že pokud použijeme hodnoty řezných podmínek, které nejsou blízké hodnotám, které byly použity pro získání modelu, dostaneme nepřesné výsledky. Koeficienty  $a_m$ ,  $a_{m-1}$ ,  $a_1$ ,  $a_0$  jsou materiálové konstanty pro výpočet složek celkové řezné síly. [7] [12]

### 3.3.6 MKP model

Nejkomplexnějším a nejvíce propracovaným způsobem modelování řezných sil je modelování pomocí MKP metody (metoda konečných prvků). Tato metoda je zpracována do komerčních software aplikací, mezi nimiž je nejrozšířenější aplikace AdvantEdge FEM (Obr. 10).



Obr. 10 - Simulace frézování v programu AdvantEdge FEM [8]



V MKP modelování můžeme mimo řezné síly taktéž zjistit jaký vliv bude mít teplota či deformační zpevnění materiálu na průběh řezného procesu. Limitací MKP modelu jsou vysoké požadavky na výpočetní techniku a časová náročnost. Doba výpočtu se odvíjí od toho, jak výkonný počítač MKP model simuluje. Přesnost výsledků této metody závisí na přesnosti zadaných vstupních parametrů. Jedná se o různé materiálové konstanty, které mnohdy není lehké získat. Platí, že čím přesnější jsou zadané vstupní parametry a detailnější model, tím lepších výsledků můžeme dosáhnout, ale na druhou stranu tím déle budou výpočty a simulace trvat. [8]

### 3.4 Měření řezných sil při frézování

Měření sil při frézování se provádí za účelem analýzy řezného silového působení a optimalizace řezného procesu a jeho technologických podmínek. Měření je možno provádět dvěma způsoby, a těmi jsou měření přímé a nepřímé. [10]

Nepřímé měření spočívá v měření jiné veličiny než síly či momentu. Pomocí této veličiny se pak můžeme dopočítat k velikosti síly, potažmo momentu. Toto měření vychází nejčastěji z výkonu elektromotoru obráběcího stroje, v tomto případě frézky. Ze vztahu pro výpočet užitečného výkonu plyne, že lze dopočítat pouze tangenciální složku řezné síly. [10]

Vztah pro výpočet užitečného výkonu:

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \quad (3.48)$$

Z tohoto vztahu poté můžeme určit tangenciální složku řezné síly

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} \quad (3.49)$$

Uvedená metoda měření je velmi jednoduchá a nevyžaduje žádné speciální vybavení, nevýhodou ale je, že její přesnost je značně omezená. Na tom se podílí zejména zanedbání vlivu ostatních silových složek a také rozdílná účinnost stroje při zatížení a při chodu naprázdno. U moderních CNC strojů, které jsou vybaveny velmi citlivými pohony (elektrovřetenem, přímé pohony posuvů), ovšem mohou být nepřímou metodou zjišťovány i další složky řezné síly a měření je poté mnohem přesnější.

Citlivé pohony mohou být například prstencové elektromotory. [10] Tento typ elektromotoru, též známý jako momentový, je typem synchronního stroje s permanentními magnety a je klasifikován jako přímý pohon. Účel těchto motorů je, aby nahradily v obráběcích centrech pohony s převodovkami. Výhodou elektromotoru oproti pohonu s převodovkou je lepší účinnost, nižší moment setrvačnosti, větší přesnost, menší nároky na zástavbový prostor apod. [22] [5]

Přímé měření složek řezné síly a momentů vyžaduje upnutí nástroje nebo obrobku na snímací zařízení – dynamometr. Realizuje se pomocí měření deformací při obrábění v soustavě S-N-O (stroj-nástroj-obrobek). Deformace, která vzniká působením sil a momentů se může měřit mechanicky, hydraulicky, pneumaticky nebo elektricky. Základní požadavky, které jsou kladeny na dynamometry, jsou následovné: [11]

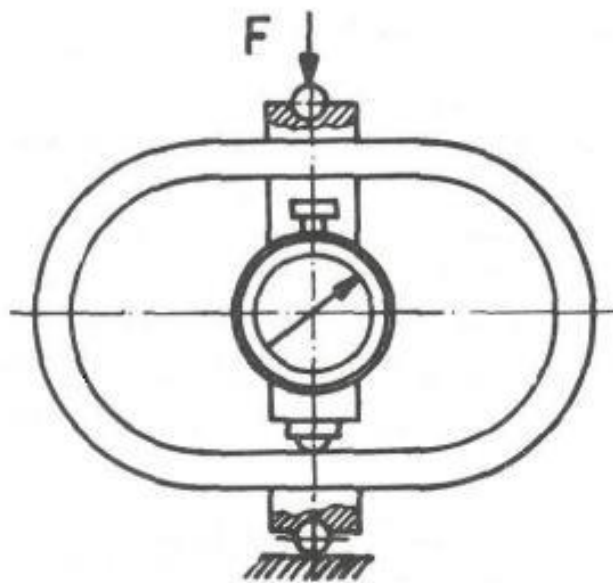
1. Tuhost dynamometrů – ta je dána konstrukcí a projevuje se velikostí deformace při určitém silovém zatížení. Velikost této deformace závisí na tvaru a provedení deformačního elementu – čidla, na celkovém konstrukčním provedení dynamometru i na použité měřicí metodě. U dynamického měření je dostatečná tuhost dynamometru zásadním požadavkem.
2. Citlivost dynamometrů – obecně souvisí s citlivostí použité měřicí metody. Od dynamometru je požadováno mít takovou citlivost, aby nejmenší odečítaná jednotka při dodržení požadované přesnosti odpovídala celkové hodnotě měřené veličiny.
3. Setrvačnost dynamometrů – závisí přímo úměrně na hmotnosti soustavy. Zejména u dynamických měření, kdy je nutné sledovat jak hodnoty měrné řezné síly, tak i jejich časový průběh, by měla být setrvačnost co možná nejmenší.
4. Konstrukce dynamometrů – ta by měla zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovali.

Základní rozdělení dynamometrů je následující: [11]

1. Podle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační.
  - a) Dynamometry s pružným členem:
    - Mechanický, pneumatický, indukční, kapacitní, tenzometrický
  - b) Dynamometry bez pružného členu:
    - Hydraulický, piezoelektrický
2. Podle počtu složek řezné síly, které měříme, pak jde o dynamometry jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a dynamometry pro měření kroutícího momentu.
3. Podle metody obrábění, pak to tedy můžou být dynamometry pro soustružení, frézování, broušení, vrtání atd., případně dynamometry univerzální.

### 3.4.1 Dynamometry mechanické

Podstatou mechanických dynamometrů, k vidění na Obr. 11 je měření deformace deformačního členu pomocí např. úchylkoměru nebo jiného měřícího zařízení. Deformační člen může být pružina, kroužek, třmen, nosník, membrána, případně materiál o známé tvrdosti, do kterého se vtlačí kulička a z hloubky vtlačení zjišťujeme sílu. Výhodou mechanických dynamometrů je jednoduchost, spolehlivost a stálá přesnost, naopak nevýhodou může být únava materiálu, závislost na změně teploty, malý rozsah a velká setrvačnost systému, která nedovoluje použití mechanického dynamometru pro dynamické měření. [11]



Obr. 11 - Mechanický dynamometr prstencový [11]

### 3.4.2 Dynamometry pneumatické

Podstatou je snímač deformace pneumatickým systémem klapka – tryska, který využívá dynamických vlastností vzduchu procházejícího štěrbinou. Zatěžující síla působí na jedné straně pístu či membrány z pružného materiálu a z druhé strany je vyrovnávána tlakem vzduchu. Tento tlak je snímán a je přímo úměrný zatěžující síle. Výhodou je snadná obsluha a údržba, spolehlivost a citlivost. Nevýhodou může být nevhodnost pro dynamické měření. [11]

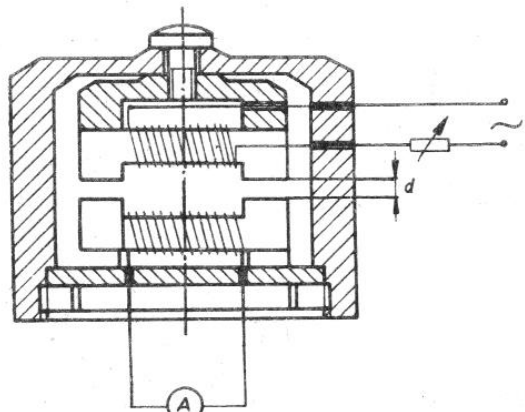
### 3.4.3 Dynamometry elektrické

Elektrické dynamometry patří mezi nejrozšířenější a nejvíce používané dynamometry v technické praxi. Do této skupiny dynamometrů byli zařazeni 3 hlavní zástupci: indukční, kapacitní a tenzometry. Mezi základní přednosti elektrických dynamometrů patří: [17]

- snadný přenos dálkového signálu s celou řadou možných úprav
- možnost snímání signálu při rotujících a pohybujících se součástech
- využití miniaturních měřicích elementů
- snadná dostupnost napájecích zdrojů a čistota provozu.

#### 3.4.3.1 Dynamometry indukční

U tohoto typu dynamometru se používají snímače pracující s malou vzduchovou mezerou. Působením zátěžné síly se mění šířka vzduchové mezery. Tím se mění impedance magnetického obvodu a v důsledku toho i indukčnost cívky. Změna indukčnosti cívky pak odpovídá danému silovému zatížení. Příklad indukčního dynamometru je ukázán na Obr. 12. [11] [17]



Obr. 12 - Indukční dynamometr [11]

### 3.4.3.2 Dynamometry kapacitní

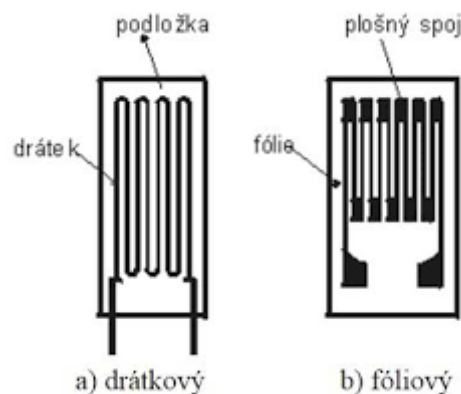
U těchto dynamometrů se pro měření velikosti deformace využívá změny kapacity snímačů. Nejjednodušším kapacitním snímačem je deskový kondenzátor, který je tvořen ze dvou proti sobě uložených, dielektrikem oddělených paralelních desek. Tyto desky jsou spojeny s elastickým elementem, jehož deformací dochází k přibližování nebo oddalování desek kondenzátoru. Tímto dochází ke změně kapacity, která odpovídá silovému zatížení. Výhodou je velká citlivost a malá hmotnost. Nevýhodou je velká citlivost na okolní vlivy, proto se tento typ dynamometrů používá zřídka. [11] [17]

### 3.4.3.3 Tenzometry

U tenzometrů se využívá pro měření velikosti deformace změny odporu snímačů. Změna odporu je způsobená deformací vodiče nebo polovodiče. Odporový tenzometr se deformuje spolu s deformačním elementem, neboť je s tímto elementem pevně spojen. Změna odporu vodiče je přímo úměrná deformaci, která vzniká na deformačním elementu v důsledku působení síly řezání (obrábění) nebo točivého (krouticího) momentu. Při deformaci vodiče dochází ke změně délky a průřezu vodiče, taktéž dochází ke změně měrného odporu materiálu vodiče. [11] [16] [17] Tenzometry se dělí na drátkové a fóliové, které můžeme vidět na Obr. 13, Obr. 14 a napařované.

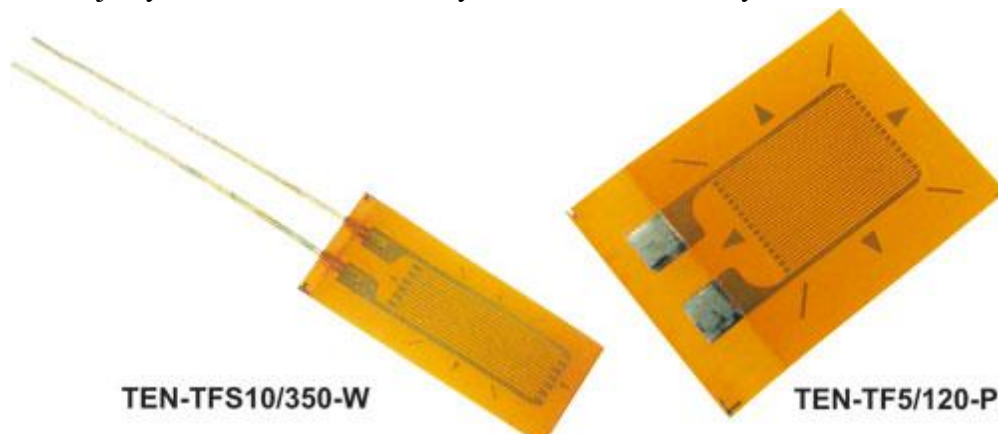
Drátkové tenzometry mají měřicí mřížku z odporového drátu o průměru 0,01 až 0,05 mm nalepenou na tenkou izolační podložku z papíru nebo pryskyřice.

Fóliové tenzometry se liší od drátkových tenzometrů technologií výroby. Měřicí mřížka je vytvořena z tenké fólie o tloušťce přibližně 0,012 až 0,015 mm. Požadovaný tvar měřicí mřížky je vyroben fotochemickou cestou. [23]



Obr. 13 - Schéma drátkového a fóliového tenzometru [23]

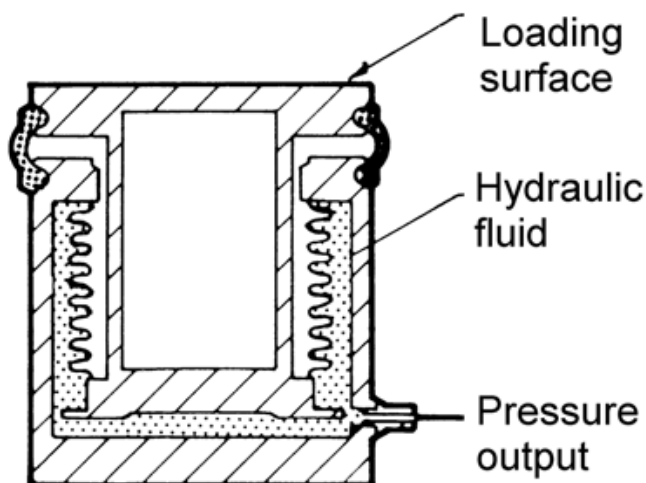
Napařovací tenzometry představují v odporové tenzometrii další vyšší vývojový stupeň. Podstatou napařovacích odporových tenzometrů je postupné napařování jednotlivých vrstev přímo na měřené místo deformačního elementu. Napařování umožňuje vyrobit snímač velmi malých rozměrů a tloušťky. [23]



Obr. 14 - Drátkový (vlevo) a fóliový (vpravo) tenzometr [23]

### 3.4.4 Dynamometry hydraulické

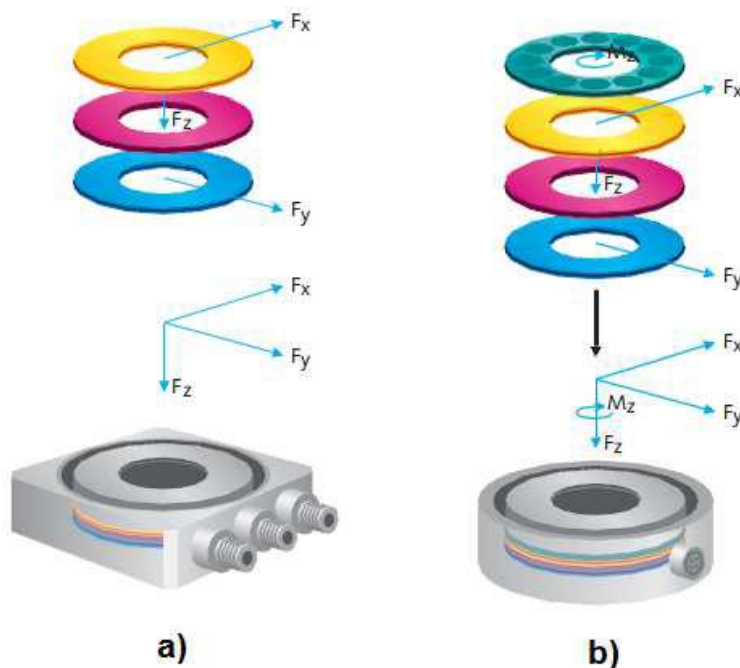
Podstata hydraulických dynamometrů, jejichž schéma je na Obr. 15, spočívá ve využití jednoduchého principu měření hydraulického tlaku manometrem. Zjišťovaná síla nebo moment působí na píst nebo membránu hydraulického obvodu, jejichž pohyb způsobuje změnu tlaku v kapalině. Tato změna je potom snímána pomocí manometru, nebo jiným přístrojem. Výhodou těchto dynamometrů je možnost měření bez přívodu elektrické energie, tudíž tyto dynamometry jsou soběstačné, nemusí k nim být připojeno externí napájení, dále jednoduchá konstrukce a možnost jednoduchého měření vícero složek síly. [11] [16]



Obr. 15 - Schéma hydraulického dynamometru [17]

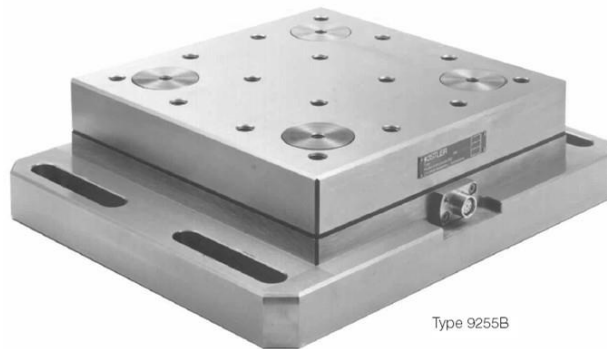
### 3.4.5 Dynamometry piezoelektrické

Piezoelektrické dynamometry patří mezi nejvyužívanější senzory pro měření síly nebo momentu díky jejich široké škále a spektru využití. Pro snímání deformace využívají piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení v určitém směru. Mezi nejužívanější piezoelektrické materiály patří především křemen, dále potom materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli apod. Konstrukční řešení (Obr. 16) pro tento typ dynamometru je korozivzdorný zásobník, do něhož jsou vkládány výbrusy piezoelektrických materiálů (nejčastěji krystaly křemene). Jednotlivé výbrusy snímají složky sil zvlášť, a to podle piezoelektrické orientace výbrusu. Dle množství výbrusů tedy můžeme měřit jednu složku síly – jednosložkové dynamometry nebo více složek síly – vícesložkové dynamometry. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při zatížení nulovém. Součástí zařízení je také nábojový zesilovač, aby mohla být na výstupu měřitelná hodnota. [11] [14] [17]



Obr. 16 - Piezoelektrický snímač [17]

Výhodou těchto dynamometrů je vysoká tuhost, dobrá přesnost a velký měřicí rozsah, nevýhodami ovšem mohou být nemožnost měřit statické síly či ovlivnitelnost teplotou. V současnosti jsou k dispozici moderní piezoelektrické dynamometry KISTLER, speciálně konstruované pro potřeby obrábění. Dynamometr určený přímo pro frézovací aplikaci je představen na Obr. 17. [17]



*Obr. 17 - Piezoelektrický dynamometr firmy KISTLER [15]*

### **3.5 Dostupné inprocesní monitorování řezného procesu**

Je to metoda měření řezných sil, která probíhá během standartního procesu výroby. Aby mohla být široce dostupná, je cílem nevyužívat v obráběcím stroji žádný externí/přídavný senzor, jako je např. dynamometr. V tomto případě je tedy možné konstatovat, že inprocesní monitorování řezného procesu je nepřímá metoda měření.

Cílem tohoto měření je zjištění velikosti řezných sil pouze za využití dat z řídicího systému obráběcího stroje, což jsou např.: proudy, momenty, výkony na vřetenech a pohonech lineárních a rotačních os.

K získání velikosti řezných sil se u moderních CNC strojů nejčastěji používá proud procházející elektromotorem, který pohání jednotlivé osy nebo vřetena a můžeme jej zjistit z řídicího systému obráběcího stroje skrze momentovou konstantu motorů. Zjištěný proud spolu s popsanou kinematikou stroje je poté možno uvést do vztahu pro zjištění výsledné síly. Tento vztah mezi silou, proudem a kinematikou stroje je popsán matematickým modelem (např. soustava maticových rovnic), existují ale i metody, které zpracovávají signály proudu a kinematiku stroje pomocí programů jako je Labview či Simulink a z nich je poté zjišťována výsledná síla. [25]



Takto získaná síla může být dále využita ještě v rozsáhlejších schématech nebo modelech pro získání dalších informací nebo upravování řezného procesu na základě vypočtených řezných sil. Často využívané bývají tzv. „fuzzy-logic controllers“ (FLC) pomocí kterých můžeme měnit podmínky řezného procesu, kupříkladu řeznou či posuvovou rychlost v závislosti na řezných silách. [26]

Další možností pro inprocesní měření sil je „artificial neural network“ (ANN), v překladu jako „umělá neuronová síť“. Tato metodika je využívána v mnoha oborech, mezi které patří taktéž strojírenství. Využívá se pro predikci silového zatížení při obrábění. Vstupními parametry pro tuto metodiku jsou proudy motorů a rychlosti posuvů servopohonů os, výstupními parametry pak jsou řezné síly v jednotlivých směrech. Smyslem této metodiky je automatické rozhodování na základě dějů, které se staly v minulosti a nachází se v paměti neuronové sítě. Díky tomuto je pak možné nejen měřit ale i predikovat silové působení na nástroj či obrobek a podle těchto údajů přizpůsobovat vhodně podmínky řezného procesu. V dnešní době se umělou neuronovou sítí zabývá řada programů, pomocí kterých lze predikovat výstupní hodnoty. Mezi známé zástupce patří Neural Designer, Neuroph. Možnost pracovat s umělou neuronovou sítí nabízí také výpočtové prostředí MATLAB s rozšířením „Neural Network“. [12] [27]

Tato řešení pro měření řezných sil bývají stále více využívána, ať už díky jejich nízké ceně v porovnání s dynamometry, nebo kvůli jejich neustálému zlepšování a vývoji. Na druhou stranu jsou zde stále nedostatky, které nelze přehlížet. Mezi hlavní se řadí to, že řezný proces ovlivňují desítky parametrů, které mohou být známé, ale taktéž nemusí, některé mohou být významné, jiné zase méně. Mnohdy stačí např. nepatrná změna chemického složení materiálu nebo jeho tepelného zpracování, a celý systém vedoucí ke zjištění sil může přestat fungovat tak, jak se od něj očekává.

Odlisný způsob inprocesního měření vůči předešlým uvedeným představuje měření pomocí inteligentních upínačů nástrojů (Obr. 18) společností Schunk a ProMicron. Tyto upínače mají podobné vnější obrysy jako konvenční upevnění nástrojů a využívají integrovaného procesního monitorování řezného procesu přímo v místě utvářené třísky.

Díky senzorům upínače zaznamenávají proces přímo na nástroji, a pomocí vysílací jednotky přenášejí získaná data bezdrátově do přijímací jednotky v elektrorozvaděči, a odtud pomocí kabelu do kontrolní a vyhodnocovací jednotky, kde se provádí zpracování dat. Systém senzorů upínače společnosti ProMicron zaznamenává hodnoty axiální složky řezné síly společně s kroučícím i ohybovým momentem a teplotou, kdežto upínač společnosti Schunk využívá akcelerometry k vyhodnocení vibrací nástroje. Díky těmto datům poté během použití průběžně kontroluje obráběcí proces. [28] [29]

Pokud software vyhodnotí negativní průběh obrábění, lze obráběcí proces bez zásahu operátora buďto zcela zastavit, nebo upravit řezné podmínky k navrácení do stabilního rozmezí.



*Obr. 18 - Inteligentní upínač nástrojů Smart iTENDO společnosti SCHUNK [28]*

### 3.6 Shrnutí rešerše

V rešerši byla popsána základní a potřebná teoretická témata k následnému zpracování praktické části této závěrečné práce. Prvním tématem byla technologie frézování, ve kterém bylo popsáno silové působení na jednom břitu frézy v záběru. Z tohoto silového působení poté vycházejí analytické modely řezných sil, které byly převzaty z prací Prof. Altintase. Z těchto modelů bude do praktické části práce převzat a využit „mechanistický model“. Zmíněny byly také MKP modely řezných sil. Další část rešerše byla věnována metodám měření řezných sil. Poznatky budou využity při návrhu a realizaci experimentu – měření řezných sil při frézování – v praktické části práce. Z rešerše vyplynulo, že nejvhodnější bude pro měření použit dynamometr piezoelektrický, a to pro jeho přesnost, tuhost a velký měřicí rozsah při měření dynamického děje. Poslední část rešerše byla věnována inprocesnímu monitorování řezného procesu, ve které jsou uvedeny různé aktuální možnosti a prostředky, jakož i využití této metody.

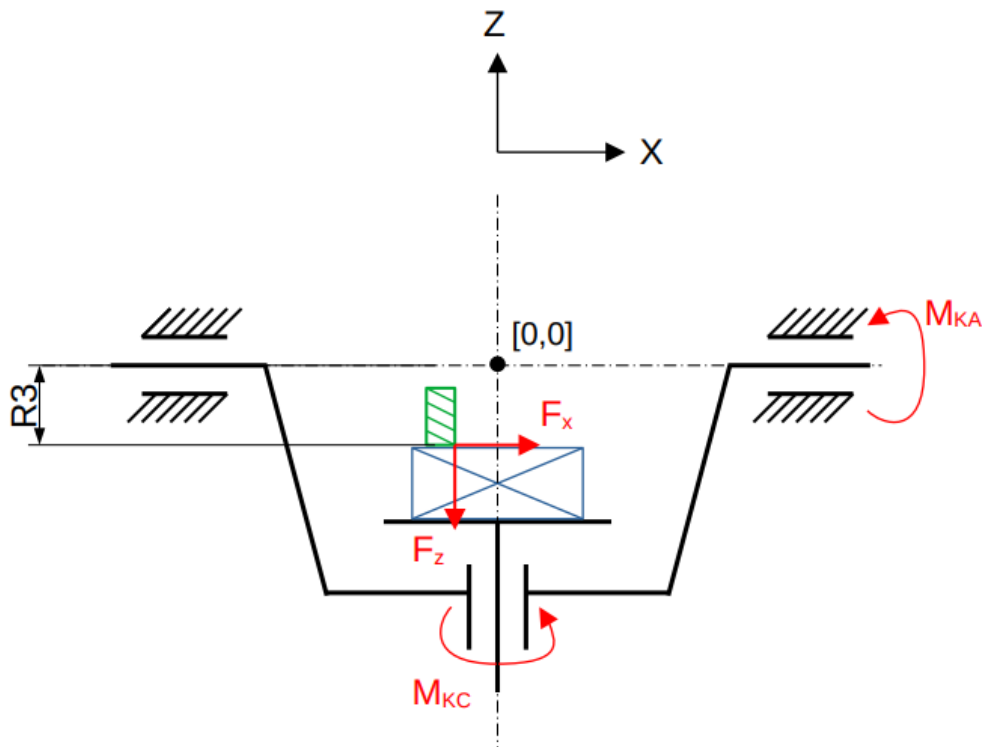
## 4 Vlastní řešení

V následujících kapitolách bude vysvětlen a postupně popsán návrh matematického modelu, kterým lze řešit problém inprocesního měření řezných sil, resp. inprocesní identifikace řezných koeficientů při obrábění. Řešení problému se bude skládat z několika částí, a to konkrétně: zjednodušeného rozboru kinematiky stroje a sil působících na stroji od obrábění, teoretického výpočtu reakcí v přímých pohonech stroje, návrhu uspořádání experimentu, provedení experimentu, zpracování dat a verifikace výsledků.

Jak již bylo zmíněno v rešeršní části, motivací pro řešení problému inprocesního měření řezných sil je mnoho, mezi nejvýznamnější patří zejm. mnohem větší dostupnost tohoto typu měření ve srovnání s měřením piezoelektrickým dynamometrem, možnost sledování průběhu opotřebení nástroje nebo také možnost rychlého a operativního měření na stroji s minimální přípravou za použití pouze dat ze samotného obráběcího stroje. Aby bylo možné predikovat řezné síly pouze za použití dat ze stroje, bude pro obráběcí stroj MCU 700 z firmy Kovosvit vytvořen model řezných sil ve výpočtovém prostředí MATLAB, který bude vycházet z matematických modelů řezných sil uvedených v publikaci prof. Altıntase (více v kapitole 4.2). Výsledky z tohoto modelu budou následně porovnány s daty, které byly experimentálně naměřeny s využitím dynamometrů přímo v obráběcím centru MCU 700 společnosti Kovosvit.

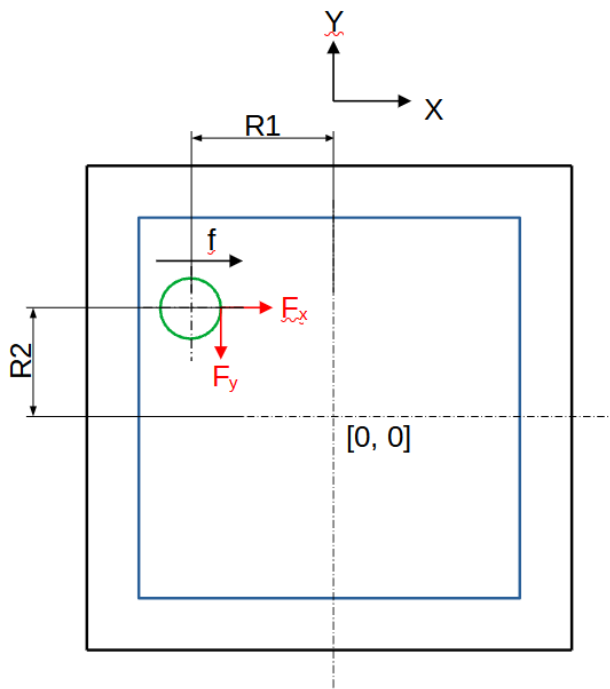
## 4.1 Rozbor kinematiky stroje a působících sil

V této části práce bude pomocí zjednodušených schémat nárysu a půdorysu otočně-sklopného stolu (Obr. 19, Obr. 20) obráběcího stroje MCU 700 popsáno působení řezných sil a reakčních momentů v pohonech osy A a osy C vyvozených řeznou silou působící mezi nástrojem a obrobkem.



Obr. 19 - Schéma otočně-sklopného stolu (nárys)

Složky řezné síly  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  působící na ramenech R1, R2, R3 vyvozují reakční momenty  $M_{kA}$ ,  $M_{kC}$ , které jsou zachyceny přímými pohony kolébky a stolu.



Obr. 20 - Schéma otočně-sklopného stolu (půdorys)

Teoretický výpočet reakčních momentů  $M_{kA}$ ,  $M_{kC}$  vychází ze schématických obrázků (Obr. 19, Obr. 20) pro rozbor kinematiky stroje a působících sil. Výsledné rovnice pro výše uvedené reakční momenty jsou následující:

$$M_{kA} = F_y R_3 - F_z R_2 \quad (4.1)$$

$$M_{kC} = F_y R_1 - F_x R_2 \quad (4.2)$$

Pro tuto bakalářskou práci byl zvolen zjednodušující předpoklad, a to takový, že identifikace koeficientů řezných sil bude řešena pouze v rovině XY. Díky tomuto předpokladu bude následující teoretický výpočet řešen pouze pro pohon osy C. Navíc výše uvedené vztahy platí pouze pokud bychom sílu uvažovali jako bodovou, působící ve středu nástroje. Proto je nutné následující výpočty a vztahy upravit do podoby, kdy síla bude působit na břitech nástroje.

## 4.2 Teoretický výpočet reakčního momentu v pohonu osy C

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole 4.1, identifikace řezných sil bude provedena pouze v rovině XY, tudíž teoretický výpočet a naměřená vstupní data z experimentu, která budou ve formě průběhů momentu, se budou vztahovat pouze k ose C.

Základem pro výpočet je model řezných sil prof. Altıntase. [6] Pro sousledné frézování (Obr. 21) jsou v tomto modelu řezné síly ve směrech X,Y,Z vyjádřeny následovně:

$$F_x(\Phi) = F_t \cos \Phi + F_r \sin \Phi \quad (4.3)$$

$$F_y(\Phi) = -F_t \sin \Phi + F_r \cos \Phi \quad (4.4)$$

$$F_z(\Phi) = F_a \quad (4.5)$$

$\Phi$  – úhel záběru [°]

kde  $F_t, F_r, F_a$  jsou složky řezné síly působící na břitu nástroje (Obr. 22) a lze je vyjádřit pomocí mechanistického modelu řezných sil:

$$F_t = k_{ct} h a_p + k_{et} a_p = (k_{ct} h + k_{et}) a_p \quad (4.6)$$

$$F_r = F_n = k_{cn} h a_p + k_{en} a_p = (k_{cn} h + k_{en}) a_p \quad (4.7)$$

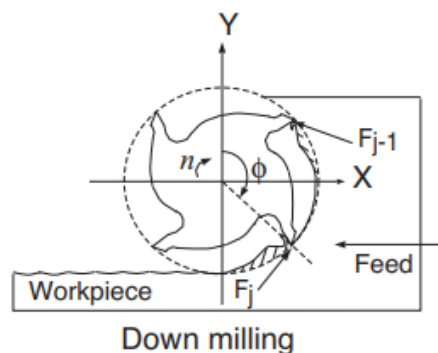
$$F_a = k_{cb} h b + k_{eb} b = (k_{cb} h + k_{eb}) a_p \quad (4.8)$$

kde tloušťka třísky  $h$  je vyjádřena jako:

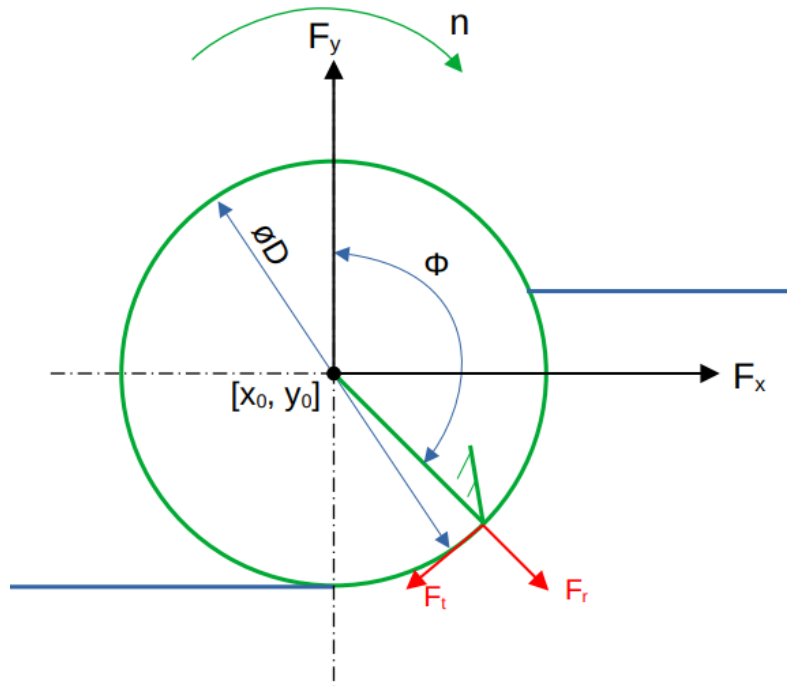
$$h = f_z \sin \phi \quad (4.9)$$

$k_{ct}, k_{cn}, k_{cb}$  – řezné koeficienty (tečný, normálový, binormálový) [MPa]

$k_{et}, k_{en}, k_{eb}$  – koeficienty řezné hrany (tečný, normálový, binormálový) [Nmm<sup>-1</sup>]



Obr. 21 - Sousledné frézování, naznačení úhlu záběru  $\Phi$  a sil působících na jednotlivé břity [6]



Obr. 22 - Rozložení sil na břitu nástroje v rovině XY

Z uvedených rovnic 4.3 až 4.8 je jako integrál vyjádřena střední hodnota síly za jednu otáčku:

$$\bar{\mathbf{F}} = \frac{a_p N}{2\pi} \int_{\pi - a_e/R}^{\pi} \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \left[ \begin{pmatrix} k_{et} \\ k_{en} \end{pmatrix} + f_z \sin \phi \begin{pmatrix} k_{ct} \\ k_{cn} \end{pmatrix} \right] d\phi \quad (4.10)$$

N – počet zubů v záběru [-]

R – poloměr nástroje [mm]

- Využití střední síly je z důvodu vyfiltrování nekvality signálu. Příčiny nekvalitního signálu mohou být např. jeho zatížení okolními vlivy, nedostatečnou vzorkovaností signálu nebo zachycení dynamiky v signálu.

Ze střední síly za otáčku je třeba vyjádřit střední moment za otáčku, proto je rovnice 4.10 násobena hodnotou aktuálního ramene „x“ vztaženého vůči středu otáčení stolu. Rameno „x“ představuje aktuální polohu břitu v souřadném systému umístěném ve středu stolu.

$$\mathbf{x} = (x_0 + R \sin \phi \quad y_0 + R \cos \phi \quad 0)$$

$[x_0, y_0]$  – aktuální poloha středu nástroje vůči středu stolu, viz Obr. 22



Střední moment za jednu otáčku je vyjádřen integrálem jako:

$$\overline{\mathbf{M}} = \frac{a_p N}{2\pi} \int_{\pi - a \cos\left(1 - \frac{a_e}{R}\right)}^{\pi} \mathbf{x} \times \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left[ \begin{pmatrix} k_{et} \\ k_{en} \\ k_{eb} \end{pmatrix} + f_z \sin \phi \begin{pmatrix} k_{ct} \\ k_{cn} \\ k_{cb} \end{pmatrix} \right] d\phi \quad (4.11)$$

Integrace vztahu 4.11 byla provedena symbolicky v programu Matematika, její výsledek poskytl výzkumný pracovník RCMT Mgr. Jiří Falta. S ohledem na předpoklad řešení v rovině XY byla využita pouze třetí složka vektoru  $\overline{\mathbf{M}}$ , tj. moment k ose Z.

Celkový střední kroutící moment působící na osu C ovšem není tvořen pouze třetí („z“) složkou středního momentu vyvolaného složkami řezné síly, jež působí v rovině XY, ale figuruje v něm ještě pasivní moment od pasivních odporů. Výsledný moment je tedy dán součtem parazitního třecího (pasivního) momentu  $M_{pas}$  a  $M_Z$ , což je již zmiňovaná třetí složka vektoru středního momentu vyjádřeného rovnicí 4.11. Vztah pro celkový střední kroutící moment na pohonu osy C je:

$$\overline{M_{kC}} = M_{pas} + M_Z \quad (4.12)$$

### 4.3 Identifikace řezných koeficientů z momentu na pohonu osy C

Členy algebraického výrazu získaného po integraci rovnice 4.11 jsou přepsány do tvaru funkční závislosti na  $x_0$  (x-ová souřadnice polohy středu nástroje). Střední kroutící moment  $\overline{M_{kC}}$  je následně vyjádřen pomocí této funkční závislosti ve tvaru:

$$\overline{M_{kC}} = (A_{M0} + A_{M1}x_0) \begin{pmatrix} M_{pas} \\ k_{et} \\ k_{en} \\ k_{ct} \\ k_{cn} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

kde  $A_{M0}$ ,  $A_{M1}$  jsou vektory získané z algebraického výrazu tak, že byly odděleny členy závislé a nezávislé na poloze  $x_0$ , a následně byly nalezeny faktory jednotlivých hledaných koeficientů. Jedná se pouze o formální přepis výrazu do požadovaného tvaru 4.13.

Pro každé provedené experimentální měření pak je identifikován průběh  $M_{kC}$  ve tvaru lineární funkce:

$$M_{kiC} = a_i x_0 + b_i \quad (4.14)$$

$i$  – číslo měření [-]

Porovnáním vztahů 4.13 a 4.14 dostáváme soustavu rovnic, která je řešena pomocí metody nejmenších čtverců (využití funkce pseudoinverze v MATLABU). Výsledná soustava rovnic je:

$$\begin{pmatrix} b_i \\ a_i \end{pmatrix}_{2i \times 1} = \begin{pmatrix} A_{M0i} \\ A_{M1i} \end{pmatrix}_{2i \times 5} \begin{pmatrix} M_{pas} \\ k_{et} \\ k_{en} \\ k_{ct} \\ k_{cn} \end{pmatrix}_{5 \times 1} \quad (4.15)$$

#### 4.4 Návrh uspořádání experimentu

Experimentální měření bylo provedeno v laboratořích RCMT na multifunkčním pětiosém obráběcím centru MCU 700 VT-5X RAPID (Obr. 23). Cílem experimentu bylo naměření a získání dat. Data, která jsou potřebná k identifikaci koeficientů řezných sil, byla získána z řídicího systému stroje pomocí softwaru TNC Scope. Data k následné verifikaci identifikovaných koeficientů byla získána pomocí stacionárního dynamometru. K vyhodnocení dat a tvorbě skriptu bylo využito výpočtové prostředí MATLAB.



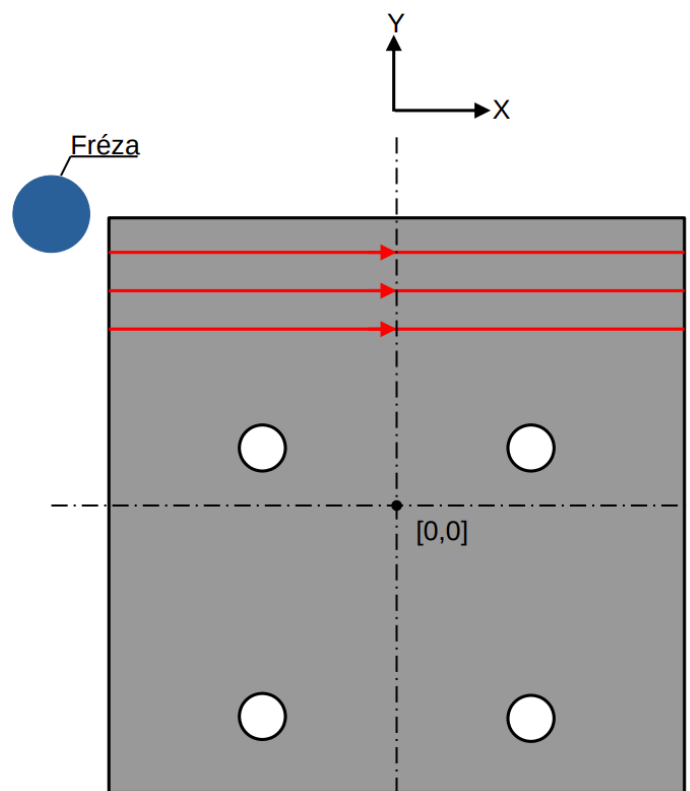
Obr. 23 - Obráběcí centrum MCU 700 VT-5X RAPID [30]

Data potřebná pro identifikaci a následnou verifikaci jsou: aktuální poloha nástroje, průběh aktuálního momentu z pohonu otočného stolu (osy C), složky řezné síly v rovině XY.

Řídicí systém Heidenhain TNC 640 a rovněž oba dynamometry zaznamenávaly taktéž spoustu dalších informací a dat nepotřebných k vyhodnocení experimentu, mezi něž patří např.: aktuální hodnoty polohy a momentů na pohonech všech os stroje, aktuální kroutící moment na vřetení, tři složky řezné síly ve stacionárním souřadném systému obrobku, tři složky řezné síly v rotačním souřadném systému nástroje a kroutící moment na nástroji.

Pro všechna experimentální měření byly dány stejné základní podmínky:

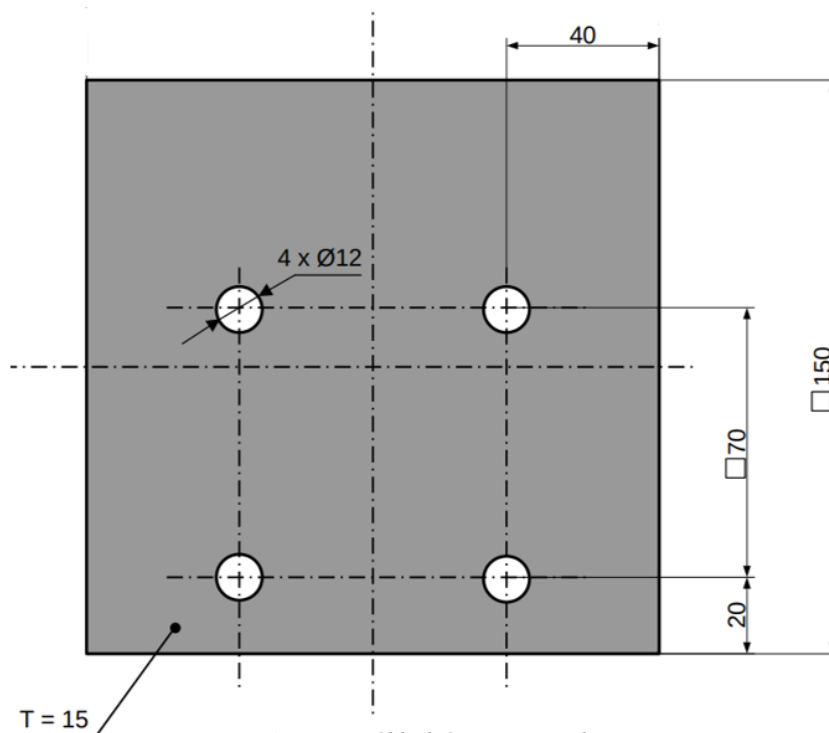
- Frézování bylo sousledné a bylo realizováno obvodem nástroje (válcové frézování)
- Obráběný materiál byl pro všechna měření shodný, byla jím ocel s označením C45
- Obrábění materiálu probíhalo v kladném směru osy X při různých posuvech a hloubkách řezu, na Obr. 24 lze vidět naznačená strategie obrábění



Obr. 24 - Strategie obrábění

#### 4.4.1 Polotovár k obrábění

Pro experimentální měření byl využit polotovár o rozměrech 150x150x15 mm. Rozměry polotovaru byly voleny co nejmenší, aby hmotnost obrobku příliš neovlivňovala průběh a vlastnosti měření stacionárním dynamometrem, a bylo tak docíleno co nejpřesnějších hodnot naměřených sil ve směrech X a Y pro následnou verifikaci výsledků. Jak již bylo zmíněno výše, zvolený materiál polotovaru byla ocel s označením C45 (12050.1). Základní rozměry polotovaru jsou naznačeny na Obr. 25. Mechanické vlastnosti vybrané oceli lze vidět v Tab. 1.



Obr. 25 - Základní rozměry polotovaru

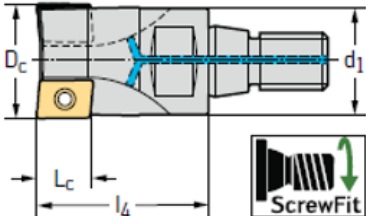
Tab. 1 - Základní mechanické vlastnosti oceli C45

			12 050.1
Mez kluzu	<b>R<sub>p0,2</sub></b>	MPa	min. 325
Mez pevnosti	<b>R<sub>m</sub></b>	MPa	min. 540
Tažnost	<b>A<sub>5</sub></b>	%	min 17
Tvrдость		HB	max 225
Kontrakce	<b>Z</b>	%	
Modul pružnosti v tahu	<b>E</b>	GPa	211
Modul pružnosti ve smyku	<b>G</b>	GPa	79

## 4.4.2 Nástroje

K obrábění byly využity 2 různé stopkové frézy. Jako první byla použita fréza společnosti Walter s označením F4042.T18.020.Z03.08 s vyměnitelnými břitovými destičkami (dále jen „VBD“) ze společnosti Walter s označením ADMT 080308R-F56 WKP35S. Tato fréza je běžně využívána v praxi pro hrubovací operace při obrábění, což znamená, že nemusí být velmi přesná (házení břitů může negativně ovlivnit výsledky měření, resp. identifikace). Specifikace tohoto nástroje s VBD z katalogu výrobce jsou uvedeny na Obr. 26, Obr. 27.

Designation	D <sub>c</sub> mm	d <sub>1</sub> mm	l <sub>4</sub> mm	L <sub>c</sub> mm	l <sub>1</sub> mm	Z
F4042.T18.020.Z03.08	20	T18	30	8		3



Obr. 26 - Specifikace Frézy Walter F4042.T18.020.Z03.08 [31]

	Designation	Radius	Face chamfer
	ADMT080308R-F56	mm	width
		0,8	mm
			1,2

Obr. 27 - Specifikace VBD Walter ADMT 080308-F56 WKP35S [31]

Řezné podmínky, při kterých bylo obráběno s frézou s VBD jsou následující:

$$a_p = \{2,5; 4; 5\} \text{ mm}$$

$$a_e = \{5; 15\} \text{ mm}$$

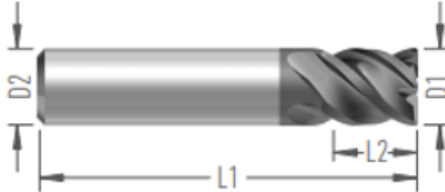
$$f_z = \{0,03; 0,06; 0,09; 0,12\} \text{ mm/zub}$$

Z katalogu výrobce byla převzata řezná rychlost a dopočítány otáčky:

$$v_{c1} = 215 \text{ m/min} \Rightarrow n_1 = 3422 \text{ ot/min}$$

Druhým nástrojem, který byl využit, byla monolitní karbidová fréza společnosti TGS s označením F8605.20.V20.80.21.Z4. Mezi výhody této frézy oproti předešlé s VBD patří to, že je přesně broušená, tudíž má menší házení břitů (tento fakt příznivě ovlivňuje kvalitu měření). Specifikace monolitní karbidové frézy z katalogu výrobce je uvedena na Obr. 28.

F8605.20.V20.80.21.Z4	Rozměry (mm)						
	D1	D2	D3	L1	L2	L3	Z
	20	20		80	21		4



Obr. 28 - Specifikace frézy TGS F8605.20.V20.80.21.Z4 [32]

Řezné podmínky, při kterých bylo obráběno s monolitní karbidovou frézou jsou následující:

$$a_p = \{2; 2,5; 4; 5\} \text{ mm}$$

$$a_e = \{5; 12,5; 15\} \text{ mm}$$

$$f_z = \{0,03; 0,06; 0,09; 0,12\} \text{ mm/zub}$$

Z katalogu výrobce byla převzata řezná rychlost a dopočítány otáčky:

$$v_{c1} = 100 \text{ m/min} \Rightarrow n_1 = 1591 \text{ ot/min}$$

### 4.4.3 Měřící aparatura

Měřící aparatura sloužila pro získání potřebných dat k identifikaci a následné verifikaci koeficientů řezných sil. Měření průběhů momentů a poloh nástroje k identifikaci koeficientů řezných sil bylo realizováno pomocí řídicího systému TNC 640. Záznam těchto dat byl zobrazen a uložen v softwaru TNC Scope na běžícím notebooku. Měření řezných sil a momentu na vřetení, pro verifikaci výsledků, zajišťovaly 2 piezoelektrické dynamometry (stacionární a rotační) s potřebným příslušenstvím. Stacionárním dynamometrem společnosti Kistler s označením 9255B (Obr. 30) byly měřeny složky řezné síly ve směrech X, Y a Z. Rotační dynamometr, taktéž od společnosti Kistler, s označením 9170A (Obr. 29) měřil složky síly v systému rotujícím s nástrojem - ve směrech X, Y, Z a moment na vřetení  $M_Z$ . Technické parametry obou těchto dynamometrů jsou uvedeny v příloze. Veškerá data měřená dynamometry byla zaznamenána měřicí ústřednou cDAQ a uložena v notebooku pomocí aplikace vytvořené v prostředí LabView.



Obr. 29 - Rotační dynamometr Kistler 9170A [33]



Obr. 30 - Stacionární dynamometr Kistler 9255B [34]

## 4.5 Provedení experimentu

Experimentální měření se konalo celkem třikrát a bylo vedeno vedoucím této bakalářské práce Ing. Petrem Fojtů, Ph.D. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.4, veškerá měření probíhala v laboratoři RCMT na multifunkčním pětiosém obráběcím centru MCU 700 VT-5X RAPID, které lze spolu s řídicím systémem Heidenhain TNC 640 vidět na Obr. 31.



*Obr. 31 - Obráběcí centrum MCU 700 VT-5X RAPID s řídicím systémem Heidenhain TNC 640*

Bližší pohled na pracovní prostor obráběcího stroje je vidět na Obr. 32 dále, kde jsou taktéž naznačeny souřadné systémy stroje (X, Y, Z) i dynamometru.

Obrábění probíhalo podle NC programu, který byl vytvořen pro zvolenou strategii obrábění (Obr. 24). Pro větší přesnost a dosažení co nejlepších výsledků při identifikaci rezných koeficientů bylo uskutečněno 40 experimentálních měření, z čehož 12 měření bylo s frézou s VBD společnosti Walter a zbylých 28 s monolitní karbidovou frézou společnosti TGS. Větší počet měření byl proveden taktéž z důvodu využití těchto měření pro další výzkumné práce. Všechna měření probíhala za stejných základních podmínek, uvedených v kapitole 4.4, ovšem jednotlivá měření probíhala za různých záběrových podmínek (kombinace dílčích hodnot pro  $a_p$ ,  $a_e$ ,  $f_z$  specifikovaných v kapitole 4.4.2). Příklad těchto měření i s jejich názvem je naznačen dále:

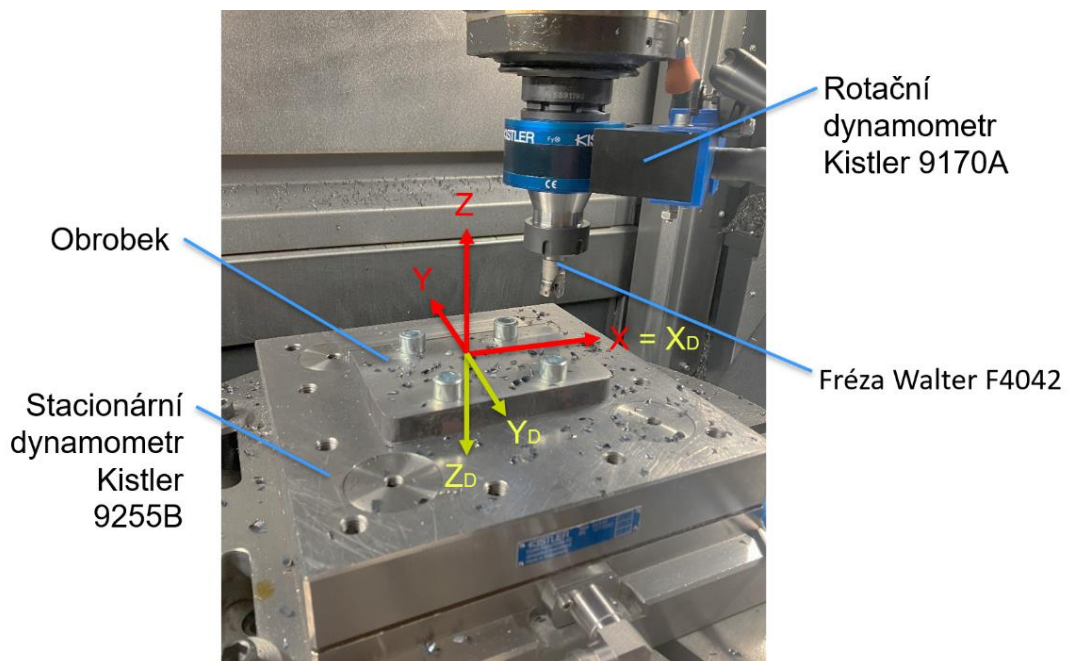


### Příklad měření s frézou s VBD

- Název měření: M36
- Řezné podmínky:  $a_p = 4 \text{ mm}$ ,  $a_e = 15 \text{ mm}$ ,  $f_z = 0,12 \text{ mm/zub}$
- Doplnující vstupní parametry:
  - Průměr nástroje  $D = 20 \text{ mm}$
  - Počet zubů nástroje  $N = 3$
  - „y“ hodnota délky ramena středu nástroje vůči středu stolu  $y_0$

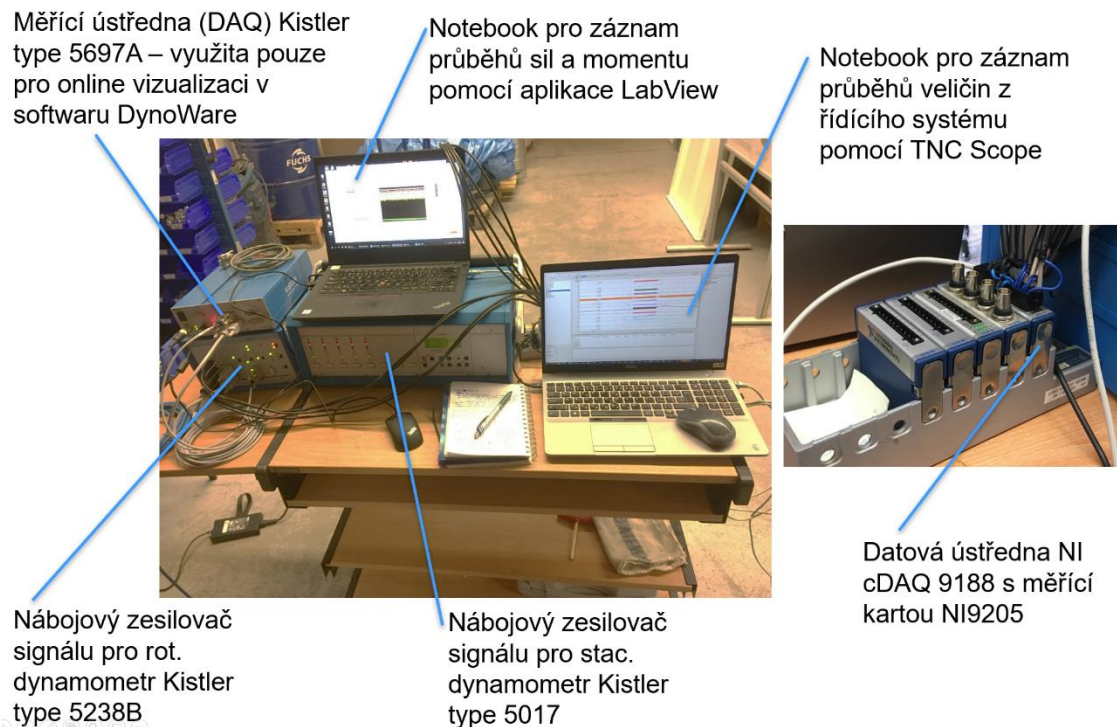
### Příklad měření s monolitní karbidovou frézou

- Název měření: M60
- Řezné podmínky:  $a_p = 2 \text{ mm}$ ,  $a_e = 12,5 \text{ mm}$ ,  $f_z = 0,06 \text{ mm/zub}$
- Doplnující vstupní parametry:
  - Průměr nástroje  $D = 20 \text{ mm}$
  - Počet zubů nástroje  $N = 4$
  - „y“ hodnota délky ramena středu nástroje vůči středu stolu  $y_0$



Obr. 32 - Pracovní prostor obráběcího stroje s obrobkem a dynamometry

Další nedílnou součástí experimentu byla příprava měřicí aparatury a její následné využití k získání dat pro identifikaci a verifikaci řezných koeficientů. Tato aparatura je i s popisem jednotlivých zařízení zobrazená na Obr. 33.



Obr. 33 - Měřicí aparatura

Pro zaznamenání posuvové rychlosti, otáček vřeten, polohy nástroje, 5 poloh strojních os a 5 momentů na pohonech strojních os sloužil řídicí systém obráběcího centra Heidenhain TNC 640. Následné zobrazení veškerých informací a dat zajistil software TNC Scope, který běžel na pracovním notebooku. Tato data, jak již bylo popsáno v kapitole 4.4, jsou vstupem do výpočtu řezných koeficientů. Signály byly vzorkovány s frekvencí 333,3 Hz.

K následné verifikaci vypočtených koeficientů bylo nutné naměřit průběhy řezných sil na dynamometrech. Pro měření sil ve směrech X, Y, Z byl použit stacionární piezoelektrický dynamometr typu 9255B, který byl upnut na otočně-sklopném stole (Obr. 32). Na tento dynamometr byl následně připevněn polotovar připravený k obrábění. K dynamometru byl připojen nábojový zesilovač typu 5017, který, jak již z názvu vyplývá, zesiluje velikost náboje vytvořeného na piezoelektrických výbrusech a vytváří výstupní signál ve formě napětí. Tento signál byl následně veden do dvou datových ústředěn. Jednou z těchto datových ústředěn je DAQ typu 5697. Tato ústředna sloužila pouze pro vizualizaci průběhů řezných sil při frézování polotovaru.

Měření sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  v rotujícím souřadném systému společně s momentem na vřetení  $M_z$  bylo realizováno pomocí rotačního piezoelektrického dynamometru typu 9170A. Dynamometr s nástrojem upnutým pomocí kleštiny byl upnut přes standardní nástrojové rozhraní HSK 63A do vřetene stroje (Obr. 32). Stacionární část rotačního dynamometru, přijímač, byl na stroji upnut pomocí magnetického stojánku. Přijímač byl připojen k nábojovému zesilovači 5238B. Výstupy obou zesilovačů byly zavedeny do druhé z datových ústředen, hlavní datové ústředny NIcDAQ9188, ve které byla vložena karta analogových vstupů NI9205. 5 kanálů této karty sbíralo data ze stacionárního dynamometru (4 kanály pro osy X, Y, 1 kanál pro osu Z) a další 4 kanály sbíraly data z rotačního dynamometru (kanály pro  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_z$ ). Pro zaručení správnosti měření bylo potřeba u všech měřidel nastavit jejich rozsahy a citlivosti (vztah mezi [V]→[N]). Získané průběhy všech měřených dat z dynamometrů (síly, moment) byly zobrazeny a uloženy v aplikaci LabView pro pozdější využití při porovnání modelu identifikovaných sil s výstupy měření. Signály byly vzorkovány s frekvencí 25,6 kHz.

## 4.6 Vyhodnocení experimentu

V této kapitole je popsáno „workflow“ (postup) zpracování naměřených dat, které směřuje k získání neznámých rezných koeficientů. Workflow se skládá z několika kroků a podkroků. Základem pro tento postup jsou teoretické výpočty z kapitol 4.2 a 4.3.

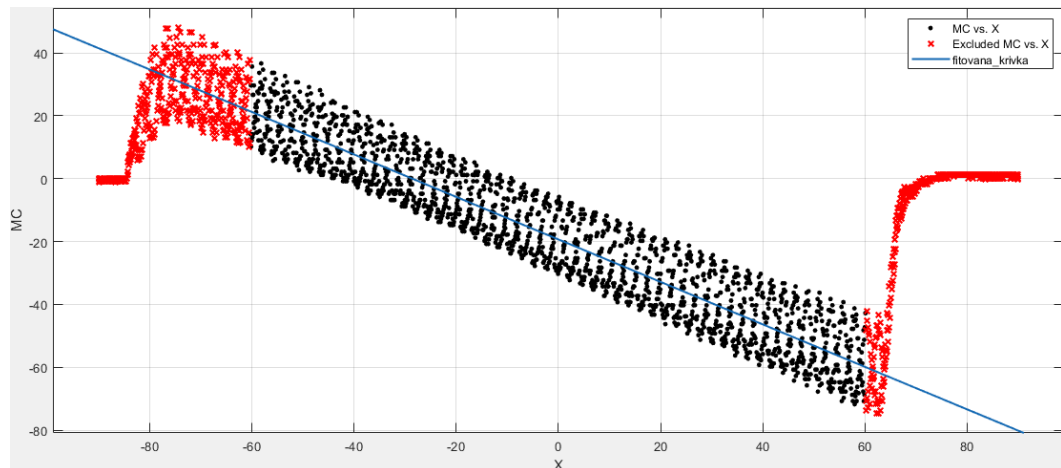
Po otevření skriptu uživatel zadá jednotlivá čísla měření, pro které se budou identifikovat rezné koeficienty. Měření jsou uložena v souborech „.sco“ s názvem odpovídajícím číslu měření, např.: M55.sco.

Po zadání čísel měření je potřeba doplnit parametry pro jednotlivá měření:  $a_p$ ,  $a_e$ ,  $f_z$ , průměr nástroje D, počet zubů nástroje N. Hodnoty pro  $a_p$ ,  $a_e$ , D jsou zadány v milimetrech,  $f_z$  je udáván v milimetrech na zub.

Jakmile jsou zadány všechny vstupní parametry, spustí se cyklus o několika krocích přes všechna zadaná čísla měření:

1. Načtení záznamu dat z měření ve formátu „.sco“ v aplikaci MATLAB pomocí funkce `scoreadfcn.m` (funkce byla poskytnuta vedoucím práce).

- Provedení korekce proudu, respektive momentu na pohonu osy C, odečtením střední hodnoty „nulového momentu“ při nezatíženém stavu od celkového vektoru momentu.
- Výběr relevantního úseku dat pro moment na pohonu osy C a aktuální polohu nástroje v osách X a Y z konkrétního měření (viz. Obr. 34) pomocí příkazu „find“ (černou barvou relevantní úsek dat)



Obr. 34 - Výběr relevantních dat s proloženou křivkou

- Proložení lineární funkce pro vybraný úsek dat pomocí „Curve Fitting“ v MATLABu a zjištění koeficientů „a, b“ z proložené přímky (modrou barvou na Obr. 34) v předpisu „ $y = ax + b$ “ (viz. Obr. 35) pro moment  $M_{kC}$

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1*x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -0.6753 \quad (-0.6857, -0.665)$$

$$p2 = -19.33 \quad (-19.69, -18.97)$$

Obr. 35 - Koeficienty a, b pro předpis přímky  $y = ax + b$  v "Curve Fitting"

- Zápis koeficientů „a, b“ do vektoru:

$$M_{kC} = \begin{pmatrix} b_i \\ a_i \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

- Vyčíslení vektorů  $A_{M0i}$  a  $A_{M1i}$  dosazením hodnot parametrů  $a_p$ ,  $a_e$ ,  $f_z$ ,  $D$ ,  $N$ ,  $y_0$  a dosazení do globální matice  $A_M$ :

$$A_M = \begin{pmatrix} A_{M0i} \\ A_{M1i} \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

- Zápis  $M_{kC}$  do globálního vektoru pravých stran

Posledním krokem je samotný výpočet vektoru neznámých koeficientů doplněného o složku parazitního třecího momentu  $M_{pas}$  viz. 4.18. Tento výpočet je proveden použitím příkazu „Pinv“ (pseudoinverze), což je obdoba metody nejmenších čtverců pro MATLAB.

$$\begin{pmatrix} M_{pas} \\ k_{et} \\ k_{en} \\ k_{ct} \\ k_{cn} \end{pmatrix} = A_M / M_{kC} \quad (4.18)$$

Tento postup zpracování dat byl aplikován na měření pro  $a_e = 12,5 \text{ mm}$  M55 až M62 s monolitní karbidovou frézou s řeznými podmínkami uvedenými v Tab. 2.

Tab. 2 - Řezné podmínky pro měření M55 - M62

$a_p$ [mm] \ $f_z$ [mm/zub]	ČÍSLO MĚŘENÍ			
	0,03	0,06	0,09	0,12
4	M55	M56	M57	M58
2	M59	M60	M61	M62

Výsledné řezné koeficienty jsou následující:

$$\begin{pmatrix} M_{pas} \\ k_{et} \\ k_{en} \\ k_{ct} \\ k_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1237,3 \\ 21,4 \\ 16,89 \\ 1562,4 \\ 411,63 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} Nmm \\ Nmm^{-1} \\ Nmm^{-1} \\ MPa \\ MPa \end{bmatrix}$$

Hodnoty těchto koeficientů budou dále využity při porovnávání modelu sil s naměřenými výstupy ze stacionárního dynamometru.

## 4.7 Verifikace výsledků

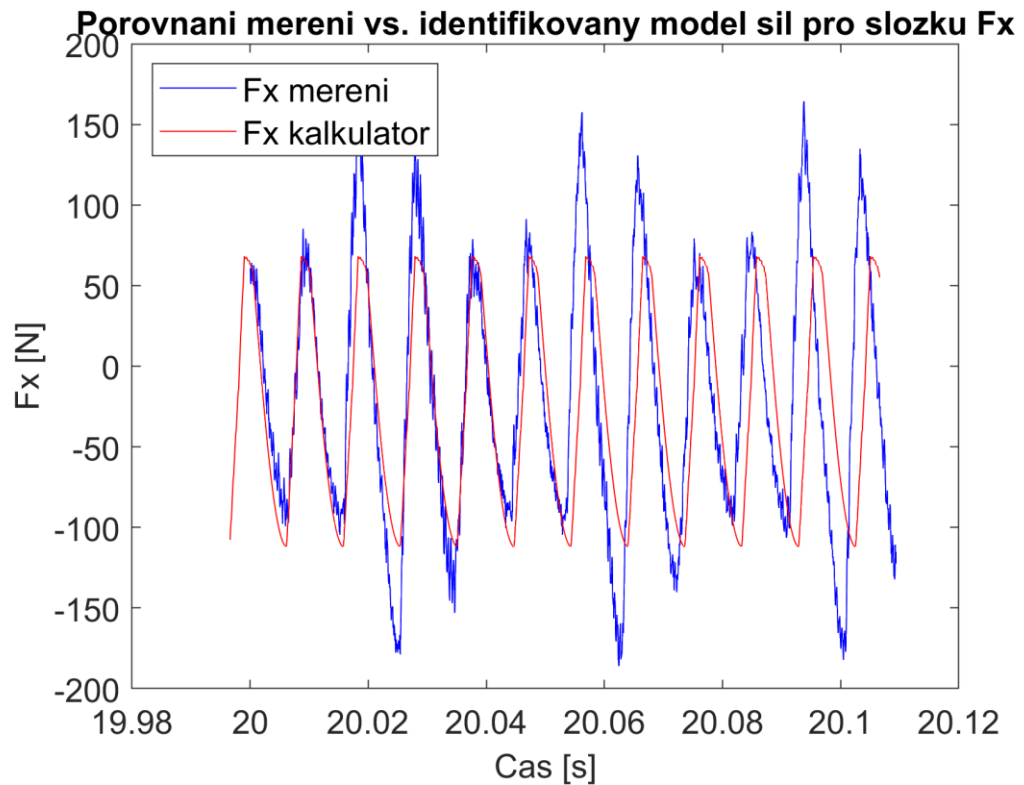
Tato kapitola obsahuje porovnání modelu sil s výstupy experimentálního měření. Cílem verifikace je kontrola, jestli bylo dosaženo při identifikaci řezných koeficientů dostatečně přesných výsledků.

Vypočtené hodnoty koeficientů  $k_{ct}$ ,  $k_{cn}$ ,  $k_{et}$ ,  $k_{en}$  byly spolu s řeznými podmínkami vloženy do „Technologické kalkulačky RCMT“, ze které byly získány průběhy složek řezné síly  $F_x$  a  $F_y$ . Tyto průběhy byly poskytnuty výzkumným pracovníkem RCMT Ing. Jaroslavem Kovalčíkem, Ph.D.

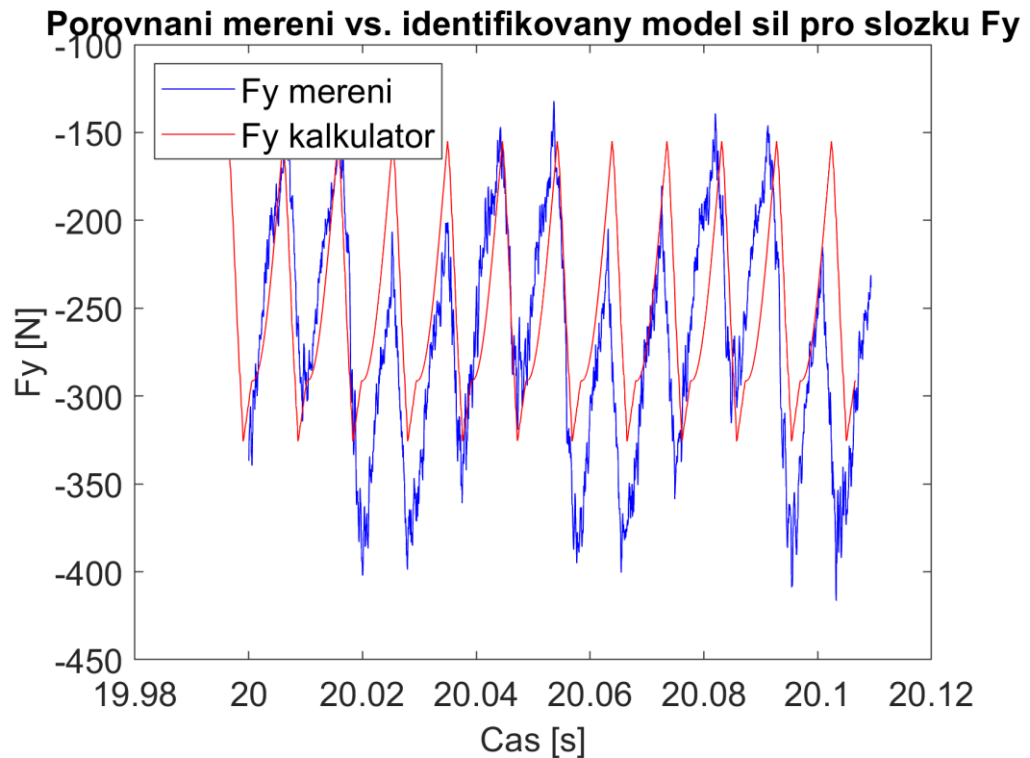
Verifikace proběhne porovnáním průběhů složek síly  $F_x$ ,  $F_y$  z technologické kalkulačky (v legendě grafů pod názvem  $F\_kalkulator$ ) a ze stacionárního dynamometru (v legendě grafů pod názvem  $F\_mereni$ ). Pro verifikaci byla vybrána stejná měření jako pro identifikaci řezných koeficientů, tj. 55 až 62. Záběrové podmínky těchto měření lze vidět v tabulce Tab. 2.

Následující obrázky Obr. 36 až Obr. 41 s grafy ukazují výsledné porovnání průběhů řezných sil ve směrech X, Y z technologické kalkulačky proti stacionárnímu dynamometru. Pro názornou ukázkou byla vybrána měření 55, 61, 62. Parametry řezných a záběrových podmínek jsou uvedeny v popiscích jednotlivých obrázků.

Měření 55

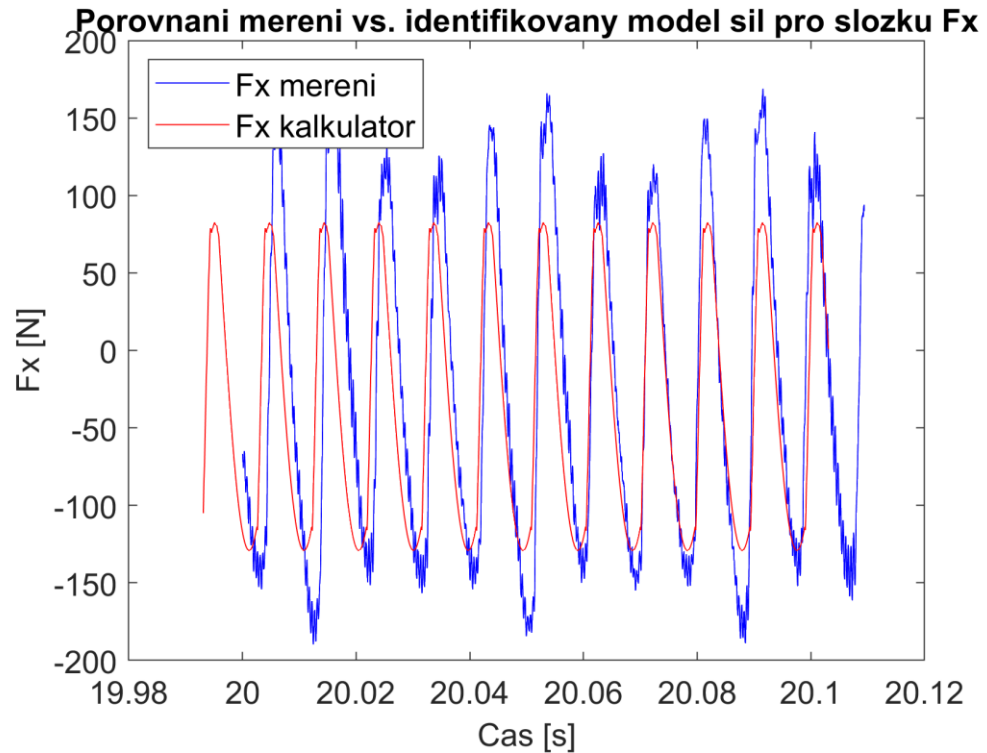


Obr. 37 - Verifikace výsledků měření 55 pro složku síly  $F_x$ ,  $a_e = 12,5$  mm;  
 $a_p = 4$  mm;  $f_z = 0,03$  mm/zub

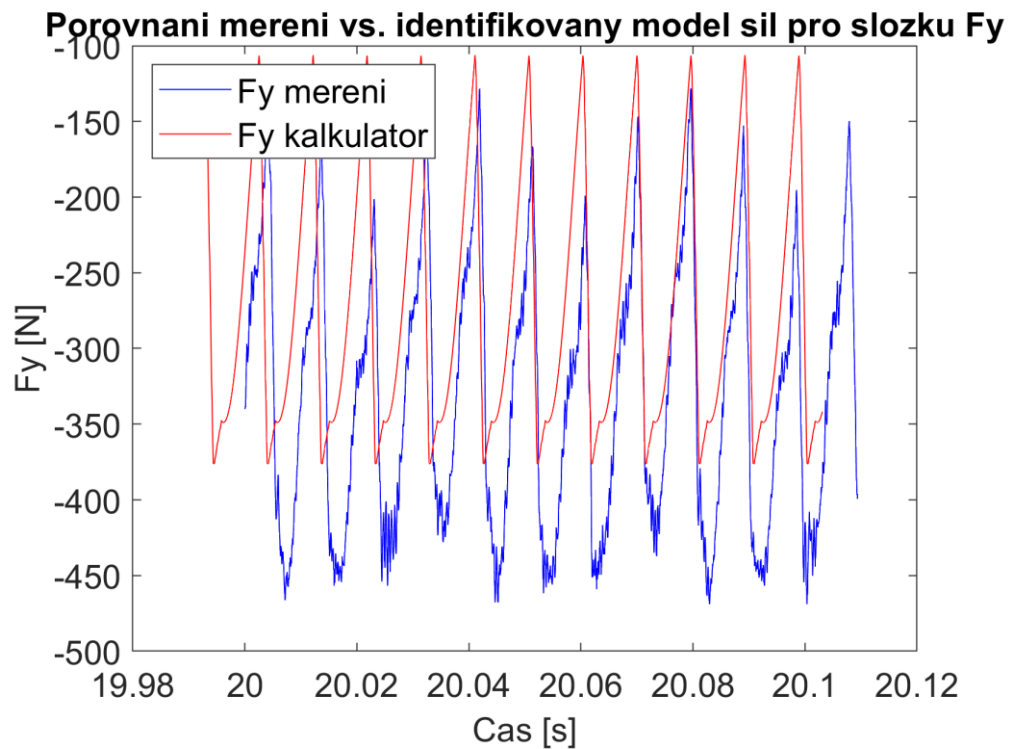


Obr. 36 - Verifikace výsledků měření 55 pro složku síly  $F_y$ ,  $a_e = 12,5$  mm;  
 $a_p = 4$  mm;  $f_z = 0,03$  mm/zub

## Měření M61



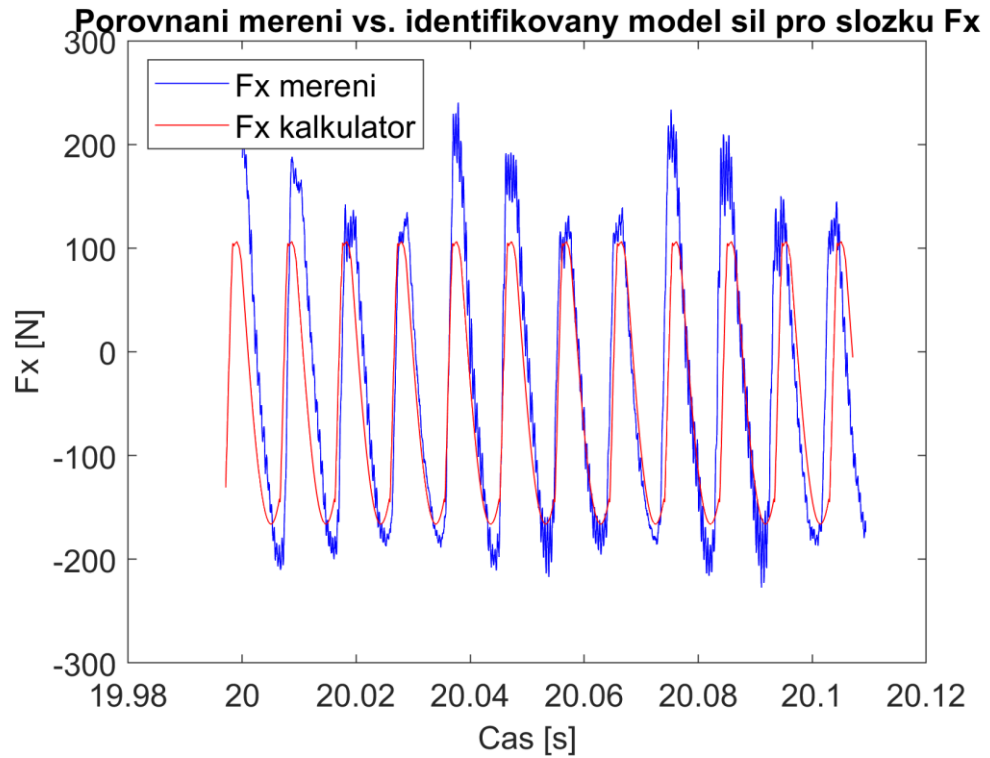
Obr. 39 - Verifikace výsledků měření 61 pro složku síly  $F_x$ ,  $a_e = 12,5$  mm;  
 $a_p = 2$  mm;  $f_z = 0,09$  mm/zub



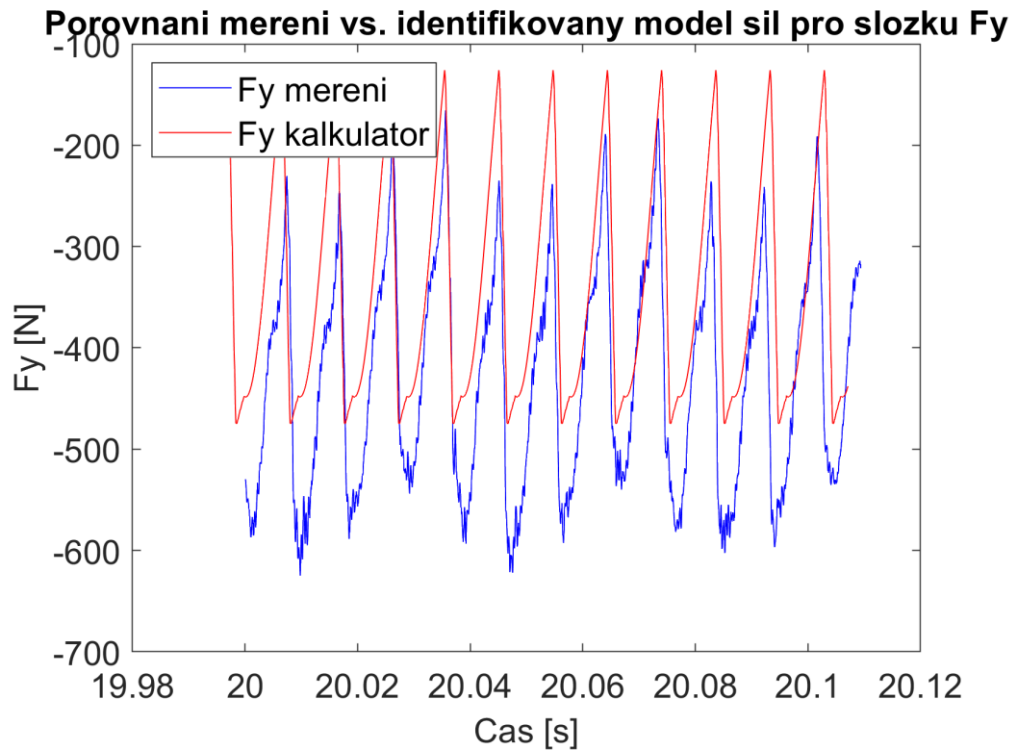
Obr. 38 - Verifikace výsledků měření 61 pro složku síly  $F_y$ ,  $a_e = 12,5$  mm;  
 $a_p = 2$  mm;  $f_z = 0,09$  mm/zub



## Měření M62



Obr. 41 - Verifikace výsledků měření 62 pro složku síly  $F_x$ ,  $a_e = 12,5$  mm;  
 $a_p = 2$  mm;  $f_z = 0,12$  mm/zub



Obr. 40 - Verifikace výsledků měření 62 pro složku síly  $F_y$ ,  $a_e = 12,5$  mm;  
 $a_p = 2$  mm;  $f_z = 0,12$  mm/zub

## 5 Diskuze výsledků

Prvotní výsledky, ve kterých byla vyhodnocena „surová“, resp. neupravená data, se nesešly s očekáváním. U výsledných hodnot (Tab. 3) řezných koeficientů neodpovídaly poměry mezi složkou tečnou  $k_{ct}$  a normálovou  $k_{cn}$ . Tyto poměry se obvykle pohybují v intervalu  $\langle 2, 3 \rangle : 1$  pro  $k_{ct} : k_{cn}$ . Typicky pro ocel se tečná složka pohybuje okolo 2300 MPa, tomu tedy odpovídá normálová složka v rozmezí  $\langle 750, 1150 \rangle$  MPa. Těchto hodnot a poměrů se v případě námi získaných koeficientů nepodařilo dosáhnout.

Tab. 3 - Hodnoty řezných koeficientů bez korekce proudu

$k_{et}$ [N/mm]	52,28
$k_{en}$ [N/mm]	33,66
$k_{ct}$ [MPa]	897,35
$k_{cn}$ [MPa]	191,82

Při hledání chyb, které by způsobovaly tento problém, bylo v prvním kroku při kontrole naměřených dat zjištěno, že na začátku experimentálního měření před začátkem obráběcího cyklu není proud (potažmo moment působící na osu C) procházející osou C nulový. Z tohoto důvodu proběhla korekce proudu, tedy i momentu. Při první korekci byla vypočtena hodnota mediánu „nulového“ momentu  $M_{kC}$  před začátkem obráběcího cyklu. Tato hodnota byla následně odečtena od vektoru  $M_{kC}$  a výsledný vektor dále pokračoval do výpočtu. V Tab. 4 lze vidět vypočtené hodnoty řezných koeficientů po první korekci proudu.

Tab. 4 - Hodnoty řezných koeficientů po první korekci proudu

$k_{et}$ [N/mm]	-12,29
$k_{en}$ [N/mm]	-1,89
$k_{ct}$ [MPa]	2308,6
$k_{cn}$ [MPa]	620,33

Ani tyto hodnoty ovšem nevyhovovaly, proto byla provedena druhá korekce proudu. Tato korekce proběhla ve stejném stylu jako ta první, ovšem s tím rozdílem, že nebyla vypočtena hodnota mediánu „nulového“ momentu  $M_{kC}$  před začátkem obráběcího cyklu, ale střední hodnota. Ta byla následně odečtena od vektoru  $M_{kC}$ . Tento vektor dále pokračoval do výpočtu. Výsledné hodnoty koeficientů jsou vypsané v Tab. 5.

*Tab. 5 - Hodnoty řezných koeficientů po druhé korekci proudu*

$k_{et}$ [N/mm]	21,4
$k_{en}$ [N/mm]	16,88
$k_{ct}$ [MPa]	1562,4
$k_{cn}$ [MPa]	411,63

Tyto hodnoty, přestože nejsou zcela uspokojivé, byly použity při porovnání modelu sil s hodnotami naměřenými na stacionárním dynamometru (Obr. 36 až Obr. 41). Ačkoliv se z grafů může zdát, že průběhy sil z identifikovaných řezných koeficientů jsou relativně dobré, zcela tomu tak není.

Jelikož se hodnoty obou korekcí poměrně dost lišily, lze konstatovat, že celý systém je velmi citlivý na nulovou hodnotu proudu (momentu). Jedním z řešení tohoto problému by mohlo být provedení citlivostní analýzy pro jednotlivé pohony strojních os. Tato analýza by mohla odpovědět na otázku, zda je vůbec možné měřit natolik přesně, aby tento model mohl lépe a přesněji fungovat. Druhou možností je změna záběrových podmínek, aby se citlivost systému neprojevovala v takové míře, jako tomu bylo doposud. Třetím možným řešením je modifikace dráhy obráběcího nástroje, tzn. že by fréza při obráběcím cyklu nejela rovným řezem v jedné ose. Tímto by se zamezilo tomu, aby výsledný moment neprocházel blízko nuly.

K získání ještě přesnějších výsledků by bylo dobré do modelu zakomponovat a identifikovat vliv házení břitů na hodnoty řezných koeficientů. Házení jednotlivých břitů je k vidění např. na Obr. 37, kde modrou barvou jsou naměřeny výstupy dynamometrů, a jednotlivé záběry patrné na této křivce naznačují házení v rámci čtyř břitů.

## 6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo ověření možnosti nepřímého měření jednotlivých složek řezné síly na pětiosém CNC stroji s otočně-sklopným stolem a přímými pohony.

V rešerši byla nejprve popsána technologie frézování společně s popisem řezných sil při frézování. Na toto téma navazoval popis analytických modelů řezných sil, které byly převzaty od prof. Altıntase a následně využity (konkrétně byl využit mechanistický model) ve vlastním řešení. Pro srovnání s analytickými modely byl v rešerši zmíněn také MKP model řezných sil. Další část rešerše se zabývala způsoby měření řezných sil. Byly uvedeny způsoby přímého i nepřímého měření, přičemž u měření přímého je uveden základní popis a rozdělení dynamometrů. V poslední části rešerše bylo popsáno inprocesní monitorování řezného procesu a spolu s tímto popisem byly uvedeny možnosti provedení tohoto monitorování.

Při vlastním řešení byl sestaven model silové a momentové rovnováhy na otočně-sklopném stole po jeho zatížení řeznou silou. Tato síla byla popsána mechanistickým modelem. Poté byl navržen a odvozen postup pro identifikaci řezných koeficientů. Nezbytnou součástí vlastního řešení bylo naměření dat, která budou vstupovat jak do teoretických výpočtů, tak do následné verifikace (validace). Tato data byla získána během experimentálních měření vedených vedoucím této práce Ing. Petrem Fojtů, Ph.D.

Experiment se uskutečnil v laboratořích RCMT na obráběcím centru MCU 700 společnosti Kovosvit. Pro zvolenou strategii obrábění byly vybrány a použity dva vhodné frézovací nástroje a zvoleny odpovídající řezné podmínky. Poté byl sepsán NC program, který respektoval zvolenou strategii obrábění. Obráběným materiálem byla ocel C45 (12050.1). K naměření dat sloužila měřicí aparatura, kterou tvořily: řídicí systém Heidenhain TNC 640, dva piezoelektrické dynamometry Kistler (stacionární, rotační), nábojové zesilovače, datové ústředny s kartou analogových vstupů NI a dva pracovní notebooky, které sloužily k uložení a zobrazení průběhů naměřených dat.

Navržený postup identifikace řezných koeficientů byl realizován v podobě skriptu v prostředí MATLAB, získané koeficienty byly posléze vloženy do technologické kalkulačky RCMT, ze které byly získány průběhy sil  $F_x$ ,  $F_y$ . Průběhy z technologické kalkulačky vycházející z vytvořeného modelu sil byly následně porovnány s průběhy naměřenými stacionárním dynamometrem.

Cíl bakalářské práce byl zcela splněn. Výsledný identifikovaný model sil je funkční, avšak výsledky nejsou zcela uspokojivé. To může být způsobeno citlivostí systému na nenulovou hodnotu proudu, která se v přímém pohonu nachází, ačkoliv se v daný moment ještě neobrábí materiál. Lepších výsledků by bylo možné dosáhnout např. po provedení citlivostní analýzy, nalezení vhodnějších záběrových podmínek a testovací dráhy nástroje nebo provedení analýzy pro zjištění velikosti vlivu tzv. „coggingu“ torque-motoru na přesnost měření.

Zjištění velikostí složek řezných sil pouze za pomoci dat z řídicího systému je velmi výhodný a dostupný způsob, jak zjistit informace např. o opotřebení břitu nástroje, což má velký vliv na výslednou kvalitu obrábění a ekonomické/ekologické využití řezných nástrojů. Výhodný způsob je to z hlediska toho, že nejsou potřeba žádné přídavné senzory ke zjišťování velikosti řezných sil. Dostupný způsob je to pak díky tomu, že jde pouze o zpracování dat z řídicího systému stroje, na kterém se obrábí. Z výše uvedených důvodů je proto důležité, aby tato problematika byla předmětem zájmu i v budoucnu a jednotlivé metody byly dále zdokonalovány a rozvíjeny.

# Seznamy

## Seznam použité literatury

- [1] MÁDL, Jan, Martin VRABEC, Jindřich KAFKA a Rudolf DVOŘÁK. *Technologie obrábění*. Dotisk. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. Brno: VUT Brno, 2003 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf)
- [3] AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [4] *ELUC* [online]. [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://eluc.krolomoucky.cz/verejne/lekce/1824>
- [5] SOUČEK, Pavel. *Servomechanismy ve výrobních strojích*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 210 s. ISBN 80-01-02902-6
- [6] ALTINTAS, Y.: *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, Cambridge University Press, 2000, ISBN 0 521 65973 6
- [7] ALTINTAS, Yusuf. *CutPro User Manual* [online]. 9. Vancouver, Canada: CutPro, 2003 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.malinc.com/>
- [8] ZEMAN, Pavel, Jaroslav KOVALČÍK a Martin VRABEC. *Principles of Cutting Process Modelling and New Algorithm Proposal*. ResearchGate [online]. Praha, 2014 [cit. 2021-11-26].

- Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Milling-simulation-in-the-software-AdvantEdge-FEM\\_fig1\\_270279219](https://www.researchgate.net/figure/Milling-simulation-in-the-software-AdvantEdge-FEM_fig1_270279219)
- [9] BRYCHTA, Jan, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Lenka PETŘKOVSKÁ a Jana NOVÁKOVÁ. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola Báňská, 2007 [cit. 2022-01-16]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf)
- [10] *Měření složek síly řezání* [online]. Ostrava, Vysoká škola Báňská, 2016 [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_08.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf).
- [11] *Přímé měření sil a momentů* [online]. Ostrava, Vysoká škola Báňská, 2016 [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_09.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf).
- [12] KOVALČÍK, Jaroslav. *Predikce silových parametrů řezného procesu při frézování*. ČVUT Praha, 2020. Disertační práce. České Vysoké Učení Technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. František Holešovský.
- [13] Machining Power [online]. [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://mpwr.iscar.com/>
- [14] Piezoelectric effect. KISTLER [online]. [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/glossary/term/piezoelectric-effect/>
- [15] KISTLER [online]. [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-9333a/>
- [16] HUNT, Andy. *Guide to the measurement of force*. London, 1998. ISBN 09-044-5728-1.

- [17] VAŠÍČEK, Jiří. *Silové zatížení řezných nástrojů při frézování*. VUT Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [18] HAVELKA, Oto. *Síla bude změřena* [online]. 2008 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sila-bude-zmerena>
- [19] FOREJT, Milan, Miroslav PÍŠKA *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [20] *Cesty ke zvýšení efektivity obráběcích strojů*. Technický týdeník [online]. 20016 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-obrabcich-stroju\\_35112.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-obrabcich-stroju_35112.html)
- [21] FIALA, Zdeněk. *Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie*. Brno, 2014. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí disertační práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [22] ŠPAČEK, Kryštof. *Princip a použití prstencových motorů v průmyslových aplikacích*. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Pavel Karlovský.
- [23] Fóliové tenzometry. *TME* [online]. [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/html/CZ/foliove-tenzometry/ramka\\_2261\\_CZ\\_pelny.html](https://www.tme.eu/html/CZ/foliove-tenzometry/ramka_2261_CZ_pelny.html)
- [24] *Měřený objekt, přístroje, snímače* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014 [cit. 2022-01-17]. Dostupné z:



<http://home.zcu.cz/~formanek/mmvvyuka/Data/silaazareni/uvod.htm>

- [25] LU, X., F. WANG, K. YANG, Y. FENG a S. Y. LIANG. *An indirect method for the measurement of micro-milling forces*. SCOPUS [online]. 2019 [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: doi:10.1115/MSEC2019-2769
- [26] DOHYUN, Kim. *Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors*. Precision Engineering [online]. 2011 [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635910001297>
- [27] TAE-YONG, Kim a Woo JOONGWON. *Indirect cutting force measurement in multi-axis simultaneous NC milling processes*. International Journal of Machine Tools and Manufacture [online]. 1999 [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695599000279>
- [28] *Inteligentní upínač nástrojů reguluje proces řezání kovu v reálném čase: Upínací technika* [online], 09.2018n. l.. SCHUNK [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: [https://schunk.com/cz\\_cs/novinky/highlights/tiskove-zpravy/article/4890-inteligentni-upinac-nastroju-reguluje-proces-rezani-kovu-v-realnem-case/](https://schunk.com/cz_cs/novinky/highlights/tiskove-zpravy/article/4890-inteligentni-upinac-nastroju-reguluje-proces-rezani-kovu-v-realnem-case/)
- [29] *Spike: sensory tool holder spike® - from a 100% monitoring system to a machine operator-assistant solution* [online]. ProMicron [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.pro-micron.de/spike/?lang=en>

- [30] MCU 700V[T]-5X. In: *Kovosvit MAS: Obráběcí stroje* [online]. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcu-700vt-5x/>
- [31] Walter. In: *Walter-tools: F4042.T18.020.Z03.08* [online]. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/cs-cz/search/pages/default.aspx/product/f4042.t18.020.z03.08>
- [32] TGS F8605.20.V20.80.21.Z4. In: *TGS: Nástroje* [online]. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.tgs.cz/nastroje/>
- [33] Dynamometer 9170A: Rotating Multi-Component Dynamometer up to 20000 1/min. In: *Kistler* [online]. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/ru/product/type-9170a/>
- [34] Dynamometer 9255B: Multi-Component Dynamometer up to 60 kN. In: *Kistler* [online]. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-9255c/>

## Seznam použitého softwaru

MATLAB

LabVIEW

DynoWare

TNC Scope

LibreOffice Draw

## Seznam obrázků

Obr. 1 - Čelní frézování [4] .....	13
Obr. 2 – Obvodové frézování sousledné a nesousledné [4] .....	13
Obr. 3 - Čelní frézování a) symetrické b) nesymetrické [2].....	14
Obr. 4 – Vliv úhlu nastavení hlavního ostří pro průřez třísky [3] a) $\kappa_r=90^\circ$ b) $\kappa_r < 90^\circ$	16
Obr. 5 - Průřez třísky při válcovém frézování [2] .....	17
Obr. 6 -- Rozklad řezné síly na zubu válcové frézy [12].....	18
Obr. 7 - Ukázka rozdělení koeficientů dle vybrané mezní tloušťky t. Koeficienty $K_{tc}$ , $K_{rc}$ , $K_{ac}$ jsou v našem případě pojmenovány $K_c$ , $K_{pc}$ , $K_{fc}$ ve stejném pořadí. [7]....	22
Obr. 8 - Machining Power calculator od firmy ISCAR [13].....	23
Obr. 9 - Závislost měrné řezné síly na tloušťce odřezávané vrstvy pro různé materiály [21] .....	23
Obr. 10 - Simulace frézování v programu AdvantEdge FEM [8] .....	24
Obr. 11 - Mechanický dynamometr prstencový [11] .....	27
Obr. 12 - Indukční dynamometr [11] .....	28
Obr. 13 - Schéma drátkového a fóliového tenzometru [23] .....	29
Obr. 14 - Drátkový (vlevo) a fóliový (vpravo) tenzometr [23] .....	30
Obr. 15 - Schéma hydraulického dynamometru [17] .....	30
Obr. 16 - Piezoelektrický snímač [17].....	31
Obr. 17 - Piezoelektrický dynamometr firmy KISTLER [15] .....	32
Obr. 18 - Inteligentní upínač nástrojů Smart iTENDO společnosti SCHUNK [28] ....	34
Obr. 19 - Schéma otočně-sklopného stolu (nárys) .....	37
Obr. 20 - Schéma otočně-sklopného stolu (půdorys) .....	38
Obr. 21 - Sousledné frézování, označení úhlu záběru $\Phi$ a sil působících na jednotlivé břity [6].....	39
Obr. 22 - Rozložení sil na břitu nástroje v rovině XY .....	40
Obr. 23 - Obráběcí centrum MCU 700 VT-5X RAPID [30] .....	42
Obr. 24 - Strategie obrábění .....	43
Obr. 25 - Základní rozměry polotovaru.....	44
Obr. 26 - Specifikace Frézy Walter F4042.T18.020.Z03.08 [31] .....	45
Obr. 27 - Specifikace VBD Walter ADMT 080308-F56 WKP35S [31] .....	45
Obr. 28 - Specifikace frézy TGS F8605.20.V20.80.21.Z4 [32].....	46

Obr. 29 - Rotační dynamometr Kistler 9170A [33] .....	47
Obr. 30 - Stacionární dynamometr Kistler 9255B [34].....	47
Obr. 31 - Obráběcí centrum MCU 700 VT-5X RAPID s řídicím systémem Heidenhain TNC 640 .....	48
Obr. 32 - Pracovní prostor obráběcího stroje s obrobkem a dynamometry.....	49
Obr. 33 - Měřicí aparatura .....	50
Obr. 34 - Výběr relevantních dat s proloženou křivkou.....	52
Obr. 35 - Koeficienty a, b pro předpis přímky $y = ax + b$ v "Curve Fitting" .....	52
Obr. 36 - Verifikace výsledků měření 55 pro složku síly $F_y$ , $a_e = 12,5$ mm; $a_p = 4$ mm; $f_z = 0,03$ mm/zub.....	55
Obr. 37 - Verifikace výsledků měření 55 pro složku síly $F_x$ , $a_e = 12,5$ mm; $a_p = 4$ mm; $f_z = 0,03$ mm/zub.....	55
Obr. 38 - Verifikace výsledků měření 61 pro složku síly $F_y$ , $a_e = 12,5$ mm; $a_p = 2$ mm; $f_z = 0,09$ mm/zub.....	56
Obr. 39 - Verifikace výsledků měření 61 pro složku síly $F_x$ , $a_e = 12,5$ mm; $a_p = 2$ mm; $f_z = 0,09$ mm/zub.....	56
Obr. 40 - Verifikace výsledků měření 62 pro složku síly $F_y$ , $a_e = 12,5$ mm; $a_p = 2$ mm; $f_z = 0,12$ mm/zub.....	57
Obr. 41 - Verifikace výsledků měření 62 pro složku síly $F_x$ , $a_e = 12,5$ mm; $a_p = 2$ mm; $f_z = 0,12$ mm/zub.....	57

## Seznam tabulek

Tab. 1 - Základní mechanické vlastnosti oceli C45 .....	44
Tab. 2 - Řezné podmínky pro měření M55 - M62 .....	53
Tab. 3 - Hodnoty řezných koeficientů bez korekce proudu .....	58
Tab. 4 - Hodnoty řezných koeficientů po první korekci proudu .....	58
Tab. 5 - Hodnoty řezných koeficientů po druhé korekci proudu .....	59

## Seznam příloh

### Textové přílohy

Skript pro zpracování měřených dat a identifikaci koeficientů složek řezné síly

Skript pro verifikaci metody porovnáním výsledků měření dynamometrem

NC program pro obrábění při experimentu

Technické specifikace dynamometru Kistler typ 9255B

Technické specifikace dynamometru Kistler typ 9170A

### Elektronické přílohy

Všechny použité programy a data jsou k nalezení ve složce:

*Inprocesni\_identifikace\_koeficientu\_Blazek\_BP*

Tato složka je rozdělena na 2 podsložky:

*Identifikace\_reznych\_koeficientu, Verifikace\_reznych\_koeficientu*

**Ve složce *Identifikace\_reznych\_koeficientu* se nachází:**

Skript pro zpracování měřených dat a identifikaci koeficientů složek řezné síly

*Identifikace\_reznych\_koeficientu.m*

Funkce pro nahrání dat ve formátu .sco do Matlabu

*scoreadfcn.m*

Data z experimentálních měření M55-M62

*M{55, 62}.sco*

**Ve složce *Verifikace\_reznych\_koeficientu* se nachází:**

Skript pro verifikaci metody porovnáním výsledků měření dynamometrem

*Verifikace\_reznych\_koeficientu.m*

---

## Skript pro zpracování měřených dat a identifikaci koeficientů složek řezné síly

```
clear all; close all;
% zadani cisel mereni a reznych podminek
mereni = [55 56 57 58 59 60 61 62];
fmereni = [0.03 0.06 0.09 0.12 0.03 0.06 0.09 0.12];
apmereni = [4 4 4 4 2 2 2 2];
aemereni = [12.5 12.5 12.5 12.5 12.5 12.5 12.5 12.5];
posuvy=[];
hloubky=[];
y0=[];
M=[];
% cyklus pres vsechna mereni
for i=1:size(mereni,2)
    % nacteni dat z ridiciho systemu
    name = ['M' num2str(mereni(i)) '.sco'];
    [time,X,Y,MA,MC,MS] = scoreadfcn(name,'time','P skute#ná/X','P skute#ná/
Y','M act/A','M act/S2','M act/S1');
    % korekce dat
    od_drift=find(X>-94,1,"first");
    do_drift=find(X<-86,1,"last");
    MA=(MA-mean(MA(od_drift:do_drift)))*1000;
    MC=(MC-mean(MC(od_drift:do_drift)))*(-1000);
    MS=MS.*1000;
    % nacteni grafu vstupnich dat (momentu na pohonech)
    figure
    set(gcf,'Units','normalized','OuterPosition',[0 0.03 1 0.97]);
    subplot(2,1,1);
    plot(X,MA,X,MC,X,MS);
    title('Experimentalni data momentu');
    xlabel('Poloha x [mm]');
    ylabel('Moment [Nmm]');
    legend('MA','MC','MS','Location','northwest');
    grid on; hold on;
    subplot(2,1,2)
    grid on;
    % vyber intervalu pro vyhodnoceni
    od=find(X>-60,1,"first");
    do=find(X<60,1,"last");
    X1 = (X(od:do));
    Y1 = (Y(od:do));
    M1 = (MC(od:do));
    % fitovani linearni funkce
    ft = fittype('poly1');
    opts = fitoptions('Method','LinearLeastSquares');
    [fitresult,gof] = fit(X1,M1,ft,opts);
    a=fitresult.p1;
    b=fitresult.p2;
    M=[M;b;a];
    y0=[y0 median(Y1)];
    posuvy = [posuvy fmereni(i)];
    hloubky = [hloubky apmereni(i)];
end
% zadani hodnot vstupu do vypoctu
```

```

f=posuvy;
y0=y0;
Nz=4;
ap=hloubky;
ae=aemereni;
D=20;
sousled=1;
AM= [];
for i=1:size(f,2)
    AMpom=TorqVec(ap(i),ae(i),f(i),Nz,D,1,y0(i))
    AM=[AM;AMpom];
end
% vypocet vektoru koeficientu z matice A a vektoru strednich momentu M
% pseudoinverzi
KcVec=AM\M;

```

priprava matice A pro fitovani, dodano vyzkumnym pracovníkem RCMT Mgr. Jirim Faltou

```

function AM=TorqVec(ap,ae,fz,Nz,D,sousled,y0)
% A... vektor pro vypocet momentu (N.mm) vzhledem k ose stolu aplikaci na
% vektor reznych koeficientu
% MsT=(AM0+AM1*x0)*[Mpassive;ket;ken;kct;kcn]
% ap...ax hloubka rezu (mm)
% ae...rad hloubka rezu (mm)
% ft...posuv na zub (mm)
% Nz...pocet zubu
% D...prumer nastroje (mm)
% frezovani...1-sousledne, 0-nesousledne
% [x0,y0] souradnice polohy stredu nastroje (mm)
R=D/2;

switch sousled
    case 1
        AM1=[0,(-1/2).*ae.*ap.*Nz.*pi.^(-1).*R.^(-1),
(-1/2).*ap.*Nz.*pi.^(-1).*((...
(-1).*ae.*(ae+(-2).*R).*R.^(-2)).^(1/2),
(1/4).*ap.*fz.*Nz.*pi.^(...
-1).*((-1).*ae.*(ae
+(-2).*R).*R.^(-2)).^(1/2)+(-1/4).*ae.*ap.*fz.*...
Nz.*pi.^(-1).*R.^(-1).*((ae.*R.^(-2).*((-1).*ae+2.*R)).^(1/2)+( ...
-1/4).*ap.*fz.*Nz.*pi.^(-1).*acos(1+(-1).*ae.*R.^(-1)),(1/4).*...

ae.^2.*ap.*fz.*Nz.*pi.^(-1).*R.^(-2)+(-1/2).*ae.*ap.*fz.*Nz.*pi.^(...
-1).*R.^(-1)];
        AM0=[1,(1/2).*ap.*Nz.*pi.^(-1).*((-1).*ae.*(ae
+(-2).*R).*R.^(-2)).^(1/2)...
.*y0+(-1/2).*ap.*Nz.*pi.^(-1).*R.*acos(1+(-1).*ae.*R.^(-1)),
(-1/2)...
.*ae.*ap.*Nz.*pi.^(-1).*R.^(-1).*y0,
(-1/2).*ae.*ap.*fz.*Nz.*pi.^(...

-1)+(-1/4).*ae.^2.*ap.*fz.*Nz.*pi.^(-1).*R.^(-2).*y0+(1/2).*ae.*...
ap.*fz.*Nz.*pi.^(-1).*R.^(-1).*y0,
(1/4).*ap.*fz.*Nz.*pi.^(-1).*((...
-1).*ae.*(ae

```

---

```

+(-2).*R).*R.^(-2)).^(1/2).*y0+(-1/4).*ae.*ap.*fz.* ...
      Nz.*pi.^(-1).*R.^(-1).*(ae.*R.^(-2).*((-1).*ae
+2.*R)).^(1/2).*y0+( ...
      -1/4).*ap.*fz.*Nz.*pi.^(-1).*y0.*acos(1+(-1).*ae.*R.^(-1))];
  case 0
    disp('radsi to obrob sousledne')
  otherwise
    disp('chybne zadana souslednost')
end
AM=[AM0;AM1];
end

```



---

## Skript pro verifikaci metody porovnáním výsledků měření dynamometrem

```
clear all;
close all;
% vyber mereni k nacteni dat
load('vM55.mat');
load('M_55.mat', 'data');
% vyber relevantního useku dat z identifikace
zacatek=find(Time>0,1,"first");
konec=zacatek+1050;
Time=(Time(zacatek:konec));
Fx=-(Fx(zacatek:konec));
Fy=-(Fy(zacatek:konec));
% nastaveni casoveho offsetu mezi jednotlivymi daty
Time=Time+19.997;
% vyber dat z mereni
cas = data(:,1);
Fx_mereni = data(:,2);
Fy_mereni = -data(:,3);
od=find(cas>20,1,"first");
do=od+2800;
% vyber relevantního useku dat z mereni
Fx_mereni = (Fx_mereni(od:do));
Fy_mereni = (Fy_mereni(od:do));
cas = (cas(od:do));
% vykresleni grafu pro porovnani slozky sily Fx
figure
plot(cas,Fx_mereni,'b',Time,Fx,'r')
title('Porovnani mereni vs. identifikovany model sil pro slozku Fx')
xlabel('Cas [s]')
ylabel('Fx [N]')
legend('Fx mereni','Fx kalkulator','Location','northwest')
set(findall(gcf,'-property','FontSize'),'FontSize',13)
print(gcf,'Fx','-dpng','-r300')
grid on
% vykresleni grafu pro porovnani slozky sily Fy
figure
plot(cas,Fy_mereni,'b',Time,Fy,'r')
title('Porovnani mereni vs. identifikovany model sil pro slozku Fy')
xlabel('Cas [s]')
ylabel('Fy [N]')
legend('Fy mereni','Fy kalkulator','Location','northwest')
set(findall(gcf,'-property','FontSize'),'FontSize',14)
print(gcf,'Fy','-dpng','-r300')
grid on
```

---

## NC program pro obrábění při experimentu

```
0 BEGIN PGM IDENTIFIKACESIL_2 MM
1 BLK FORM 0.1 Z X-75 Y-75 Z-17
2 BLK FORM 0.2 X+75 Y+75 Z+0
3 CYCL DEF 247 NASTAVIT REF. BOD ~
   Q339=+13 ;CISLO VZTAZNEHO BODU
4 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
5 CYCL DEF 7.1 Z+0
6 TOOL CALL 34 Z S3422
7 Q3 = 5 + 15 + 15 + 5
8 Q4 = 0.12
9 Q5 = Q4 * 3 * 3422
10 Q1 = 97 + 10 - Q3
11 Q2 = 75 + 10 + 5 ;s najezdem/vyjezdem
12 L A+0 C+0 F2000 M3 M61 M81
13 L X-Q2 Y+Q1 F2000
14 L Z+15
15 L Z-12 FQ5
16 M0
17 L X+Q2
18 M0
19 L Z+15
20 END PGM IDENTIFIKACESIL_2 MM
```

## Technické specifikace dynamometru Kistler typ 9255B



### Technical Data

Range	$F_x, F_y$	kN	-20 ... 20 <sup>1)</sup>
	$F_z$	kN	-10 ... 40 <sup>1)</sup>
Calibrated partial range	$F_x, F_y$	kN	0 ... 2
	$F_z$	kN	0 ... 4
Overload	$F_x, F_y$	kN	-24/24
	$F_z$	kN	-12/48
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	$F_x, F_y$	pC/N	≈-8
	$F_z$	pC/N	≈-3,7
Linearity, all ranges		%FSO	≤±1
Hysteresis, all ranges		%FSO	≤0,5
Cross talk		%	≤±2
Rigidity	$c_x, c_y$	kN/μm	>2
	$c_z$	kN/μm	>3
Natural frequency	$f_n (x, y, z)$	kHz	≈3
Natural frequency (mounted on flanges)	$f_n (x, y)$	kHz	≈1,7
	$f_n (z)$	kHz	≈2
Natural frequency (mounted on flanges and through top plate)	$f_n (x, y)$	kHz	≈2
	$f_n (z)$	kHz	≈3,3
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Temperature coefficient of sensitivity		%/°C	-0,02
Capacitance (of channel)		pF	≈500
Insulation resistance (20 °C)		Ω	>10 <sup>13</sup>
Ground insulation		Ω	>10 <sup>9</sup>
Protection class EN60529		-	IP67 <sup>2)</sup>
Weight		kg	52

<sup>1)</sup> Application of force inside and max. 100 mm above top plate area.

<sup>2)</sup> With connecting cable Types 1687B5, 1689B5, 1677A5, 1679A5

# Technické specifikace dynamometru Kistler typ 9170A

## Technical data

### Rotor Type 9170Axxx0

Speed, max.		min <sup>-1</sup>	20 000 <sup>1)</sup>
Measuring range 1, nominal	F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub>	N	-5 000 ... 5 000 <sup>2)</sup>
	F <sub>z</sub>	N	-20 000 ... 20 000 <sup>2)</sup>
	M <sub>z</sub>	N·m	-150 ... 150 <sup>2)</sup>
Measuring range 2, nominal	F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub>	N	-2 000 ... 2 000 <sup>2)</sup>
	F <sub>z</sub>	N	-5 000 ... 5 000 <sup>2)</sup>
	M <sub>z</sub>	N·m	-50 ... 50 <sup>2)</sup>
Measuring range 3, nominal	F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub>	N	-500 ... 500 <sup>2)</sup>
	F <sub>z</sub>	N	-2 000 ... 2 000 <sup>2)</sup>
	M <sub>z</sub>	N·m	-10 ... 10 <sup>2)</sup>
Sensitivity range 1	F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub>	mV/N	≈2
	F <sub>z</sub>	mV/N	≈0,5
	M <sub>z</sub>	mV/N·m	≈66
Sensitivity range 2	F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub>	mV/N	≈5
	F <sub>z</sub>	mV/N	≈2
	M <sub>z</sub>	mV/N·m	≈200
Sensitivity range 3	F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub>	mV/N	≈20
	F <sub>z</sub>	mV/N	≈5
	M <sub>z</sub>	mV/N·m	≈1 000
Linearity		%FSO	≤±1,0
Hysteresis		%FSO	≤1,0

<sup>1)</sup> Rotors with spindle adapter DIN 69871-AD50, MAS 403 BT 50 or ANSI B5.50-50 are limited to 12 000 min<sup>-1</sup>.

<sup>2)</sup> Small spindle adapters limit the useable force range of the RCD. The rotors are calibrated in accordance with limit values (see page 4).

Crosstalk	F <sub>x</sub> ↔ F <sub>y</sub>	%FSO	≤±2,0
	F <sub>x,y</sub> → F <sub>z</sub>	%FSO	≤±3,5
	F <sub>z</sub> → F <sub>x,y</sub>	%FSO	≤±1,0
	F <sub>z</sub> → M <sub>z</sub>	mN·m/N	≤±1
	M <sub>z</sub> → F <sub>z</sub>	N/N·m	≤±1
Natural frequency <sup>2)</sup>	f <sub>0, F<sub>x,y</sub></sub>	Hz	≈2 000
	f <sub>0, F<sub>z</sub></sub>	Hz	≈7 600
Low-pass (anti-aliasing)		kHz	3,0
Low-pass filter Type			6 pol., Butterworth
Sampling rate per channel		kHz	22,2
Resolution		bit	12
Operating temperature range		°C	0 ... 60
Degree of protection (IEC 60529)			IP67
Internal cutting fluid pressure, max.		bar	70
Balancing class		G	≤2,5
Weight (rotor only) <sup>2)</sup>		kg	1,6

<sup>2)</sup> Applies to Type 9170A131 (RCD with HSK-A63 spindle adapter, ER clamp adapter, without tool)