VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SIMULACE PRŮBĚHU ŘEZNÉ SÍLY PŘI OBVODOVÉM FRÉZOVÁNÍ VÁLCOVOU FRÉZOU S PŘÍMÝMI ZUBY

SIMULATION OF CUTTING FORCE DURING MILLING PROCESS WITH STRAIGHT TOOTH PLAIN MILLING CUTTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. TOMÁŠ ZEMČÍK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. OSKAR ZEMČÍK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2010

ABSTRAKT

Cílem této práce je provést simulaci průběhu řezných sil při frézování válcovou frézou. Úvodní část práce je věnována technologii frézování, nástrojům pro frézování a řezným materiálům. Další část práce je zaměřena na kinematiku řezného procesu, teoretický rozbor silových poměrů, možnosti měření silových účinků. Obecné informace o programovacím softwaru, teoretický model simulace, grafické prostředí vytvořené aplikace, jsou dalšími body této práce. Součástí práce je také vyhodnocení experimentálně naměřených hodnot a porovnání s hodnotami získanými z vytvořené aplikace.

Klíčová slova

Frézování, tříska, řezné síly, experimentální zařízení, programování, Delphi

ABSTRACT

To make a simulation of cutting force during milling process with cilindrical cutter is the aim of this diploma thesis. Preliminary part is devoted to technology of milling, milling cutters and cutting materials. The next section is aimed at kinematics of the cutting process, a theoretical analysis of power proportion, the possibility of measurement of force actions. General information about the programming software, a theoretical simulation model, graphical environment of created application, are the other points of this diploma thesis. The work also includes evaluation of the experimentally measured values and compared with values obtained from the created application.

Key words

Milling, chip, cutting forces, experimental machinery, programming, Delphi

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Zemčík, T. Simulace průběhu řezné síly při obvodovém frézování válcovou frézou s přímými zuby. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Simulace průběhu řezné síly při obvodovém frézování válcovou frézou s přímými zuby vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

17.5. 2010 .....

Tomáš Zemčík

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za rady a cenné podněty k této práci. Také bych rád poděkoval panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za odborné a věcné připomínky, za poskytnutí prostředků potřebných k provedení experimentálního měření. Rovněž bych rád poděkoval personálu dílen Ústavu strojírenské technologie za pomoc při experimentálním měření, konkrétně panu Milanu Rusiňákovi.

OBSAH

Abstrakt 3
Prohlášení 5
Poděkování 6
Obsah 7
Úvod 9
1 FRÉZOVÁNÍ 10
1.1 Nesousledné frézování 11
1.2 Sousledné frézování 12
2 FRÉZY 12
2.1 Druhy fréz 12
2.2 Řezné materiály 15
2.2.1 Rychlořezné oceli 16
2.2.2 Slinuté karbidy 17
2.2.3 Cermety 18
2.2.4 Řezná keramika 19
2.2.5 Kubický nitrid boru, diamant 19
2.3 Geometrie břitu 20
3 KINEMATIKA ŘEZNÉHO PROCESU 22
4 MECHANISMUS TVORBY TŘÍSKY 23
5 PRŮŘEZ TŘÍSKY PŘI FRÉZOVÁNÍ 24
5.1 Průřez třísky se zuby ve šroubovici 26
6 ŘEZNÉ SÍLY PŘI FRÉZOVÁNÍ 27
6.1 Specifická řezná síla 30
6.2 Experimentální zařízení pro měření řezných sil 34
7 NÁVRH VLASTNÍ APLIKACE 37
7.1 Řídící program aplikace 37
7.1.1 Delphi 37
7.1.1.1 Historie Delphi 37
7.2 Určení vytvořené aplikace a její výhody 40
7.3 Teoretický model aplikace 41
7.3.1 Přímé zuby 41
7.3.2 Zuby ve šroubovici 43
7.4 Prostředí aplikace 46
7.4.1 Grafické prostředí aplikace 46
7.4.2 Ovládání aplikace 47
7.5 Vstupní data 47
7.6 Výstupní data 50
8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 52
8.1 Použité zařízení 52
8.1.1 Stroj 52
8.1.2 Nástroj 53
8.1.3 Obrobek 54
8.1.4 Aparatura použitá pro měření silového zatížení řezných nástrojů 55
8.1.4.1 Dynamometr KISTLER 9257B 56
8.2 Plán experimentu 58

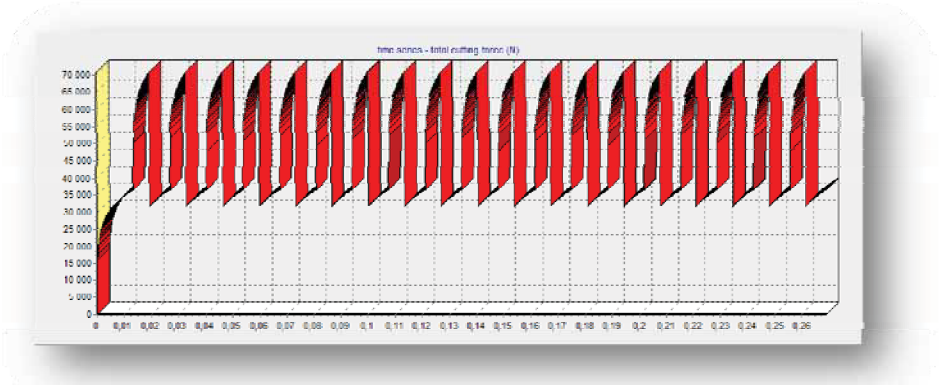
8.2.1 Popis experimentu 59
8.3 Vyhodnocení naměřených dat 60
9 PRŮBĚHY SIL VYTVOŘENÉ APLIKACÍ 66
10 DISKUSE 69
Závěr 72
Seznam použitých zdrojů 73
Seznam použitých zkratek a symbolů 75
Seznam příloh 77

ÚVOD

Frézování je výrobní proces, který zahrnuje všechny činnosti podílející se na výrobě daného předmětu. Tyto činnosti jsou reprezentovány jejich nositeli, ke kterým patří především člověk. Z tohoto hlediska můžeme model výrobního procesu vyjádřit jako vztah mezi člověkem, pracovními prostředky a objektem výroby. Vzájemný pohyb nástroje a obrobku je nazýván řezným pohybem. Obráběný předmět a nástroj mají při obrábění takový relativní pohyb, při kterém řezný klín vniká do obrobku a odděluje z něj třísky. Relativní pohyb je dán určitou rychlostí a dráhou, po které se nástroj vůči obrobku pohybuje. Při oddělování třísky dochází ke vzniku řezné síly, jež rozkládáme do dalších složek. Průběh a velikost těchto sil se můžeme pokusit nasimulovat.

Simulace je napodobení nějaké skutečné věci, stavu nebo procesu. Je důležitou součástí strojírenských systémů nebo jakýchkoliv systémů, které zahrnují více procesů. Simulace jsou jedním z nejefektivnějších nástrojů, které umožňují průběžné interaktivní ověřování výkladů a výuky pomocí simulátorů v mnoha oborech lidské činnosti. Hry a simulace umožňují lidem, aby se mohli učit a vzdělávat prostřednictvím hraní. Učební simulace mohou být zábavné, ale důležité je, že vždy vedou k určitému cíli, jsou smysluplné a účelné. Na prvním místě je naučit a až na druhém pobavit.

Simulaci můžeme tedy definovat jako numerickou metodu, která spočívá v experimentování se speciálním matematickým modelem reálných systémů na počítači. Simulace se v tomto pojetí chápe jako postup, s jehož pomocí se zkoumaný proces, resp. jeho kroky v čase generují na základě vlastností parametrů zobrazovaného systému.



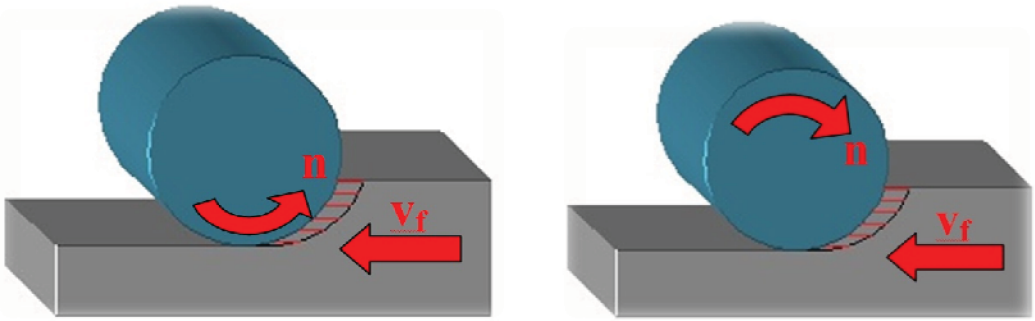
Obr.1. – ukázka průběhu řezné síly z vytvořené simulace

1 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je proces, při kterém se využívá vícebřitého nástroje k vytváření rovinných nebo zakřivených ploch. Odebírání materiálu je prováděno zuby nástroje otáčejícího se kolem pevné osy rotace. Vedlejší pohyb, tedy posuv, vykonává obrobek, který se pohybuje převážně v kolmém směru k ose rotace výrobního nástroje. Výrobní proces je přerušovaný a jednotlivé zuby frézy odebírají postupně krátké třísky s proměnnou tloušťkou.

Na základě způsobu záběru frézy do obrobku rozeznáváme dva základní druhy frézování:

- **frézování válcové** (frézování obvodem nástroje – obr. 1.1)
- ***frézování čelní*** (frézování čelem nástroje obr. 1.2)

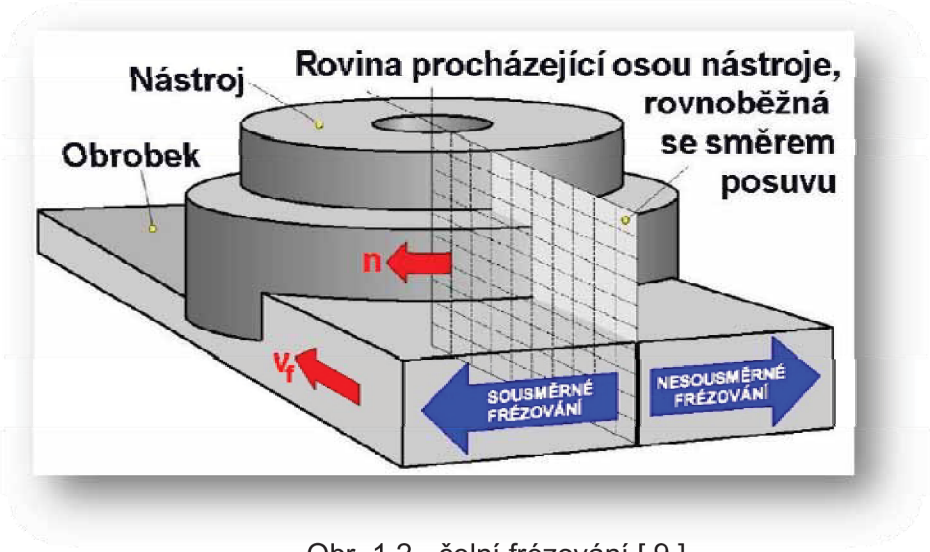


a) b)

Obr. 1.1- válcové frézování a) nesousledné, b) sousledné

Válcového frézování se využívá při vytváření rovinných povrchů. Řezná hrana zubu může být rovnoběžná nebo nakloněna vůči ose rotace, kdy řezná hrana vytváří po obvodě válce šroubovici. Osa rotace nástroje je rovnoběžná s rovinou obrobené plochy. Při procesu válcového frézování je tloušťka odebrané třísky proměnnou veličinou. Nedeformovaná tloušťka třísky je měřena v rovině rovnoběžné s osou rotace. Hloubka odebírané vrstvy se tedy nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu.

Čelní frézování lze také využít při obrábění rovinných ploch, ovšem na rozdíl od obvodového frézování, je osa rotace nástroje kolmá na obrobenou plochu. Tloušťka třísky se zvětšuje směrem ke středu tvořenému směrem pohybu osy otáčení nástroje.



Obr. 1.2 - čelní frézování [9]

1.1 Nesousledné frézování

V závislosti na kinematice obráběcího procesu rozlišujeme frézování *nesousledné* a *sousledné* viz obrázek 1.1. Při nesousledném frézování je smysl otáčení nástroje proti směru posuvu obrobku. Tloušťka třísky se mění od nulové hodnoty po maximální. K oddělení třísky nedochází v okamžiku její nulové hodnoty, ale po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Řezná síla při nesousledném frézování má složku, která působí směrem vzhůru od obrobku a odtahuje jej od stolu stroje.

Výhody nesousledného frézování:

- Není zapotřebí vymezení vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky.
- Trvanlivost frézy není závislá na okujích a kvalitě povrchu obrobku.
- Záběr zubů frézy při jejich vřezávání nezávisí na hloubce řezu.

1.2 Sousledné frézování

Při sousledném frézování je smysl otáčení nástroje ve směru posuvu obrobku viz obr. 1.1. Tloušťka třísky je u sousledného způsobu maximální při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří v okamžiku, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí zpravidla směrem dolů do obrobku, tedy proti stolu stroje. Tento způsob je náchylný na nestejnoměrný posuv, při němž může dojít i k poškození nástroje, proto se sousledné frézování může provádět pouze na strojích tomu přizpůsobených, tedy na strojích s vymezenou vůlí a předpětím mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky.

Výhody sousledného frézování:

- Vyšší trvanlivost břitů, možnost použití vyšších řezných rychlostí.
- Obrobek je přitlačován řeznou silnou ke stolu frézky, možnost použití jednodušších přípravků pro upínání obrobku.
- Potřeba menšího řezného výkonu.
- Menší sklon ke kmitání.
- Lepší kvalita obrobeného povrchu.

2 FRÉZY

Frézovací nástroj patří mezi nejdůležitější obráběcí nástroje. Fréza jako nástroj patří mezi složité rozměrové vícebřité nástroje, a proto je výrobně náročná a nákladná. Při samotné konstrukci fréz je nutno respektovat specifické otázky související s frézovacím procesem. Jedná se zejména o otázku mechaniky tvorby třísky, tření třísky atd. Obdobně je nutné zvažovat vliv geometrie břitu, vliv úhlu čela, hřbetu a šroubovice zubů frézy.

2.1 Druhy fréz

Frézy jsou rotační nástroje, kde na povrchu jsou vytvořeny zuby. Podle umístění zubů na povrchu rozeznáváme:

Frézy - válcové (viz Obr. 2.1) – zuby jsou rozloženy pouze po válcové ploše. Vhodné pro frézování rovinných ploch rovnoběžných s osou frézy.

Frézy - válcové čelní (viz Obr. 2.2) – zuby jsou rozloženy po válcové i čelní ploše. Využití při současném frézování dvou rovin na sebe kolmých.

Obr. 2.1– válcová fréza [10]

Obr. 2.2 – válcová čelní fréza [10]

Frézy - čelní (viz Obr. 2.3) – zuby jsou rozloženy na čelní rovině kolmé k ose frézy. Využití při frézování rovinných ploch.

Frézy - kotoučové (viz Obr. 2.4) – zuby jsou rozloženy na válcové ploše a na obou rovinách čelních. Využití zejména pro frézování drážek.

Obr. 2.3– čelní fréza [10]

Obr. 2.4– kotoučová fréza [10]

Frézy - úhlové jednostranné (viz Obr. 2.5) – zuby rozloženy na jedné kuželové ploše. Využití při frézování nakloněných rovin, srážení hran a podobně.

Frézy - úhlové oboustranné (viz Obr. 2.6) – zuby rozloženy na obou kuželových plochách. Využití je stejné jako u jednostranných.

Obr. 2.5 – úhlová jednostranná [10]

Obr. 2.6– úhlová oboustranná [10]

Frézy – tvarové (viz Obr. 2.7) – pro frézování tvarových ploch.

Obr. 2.7– tvarové frézy [10]

Podle **tvaru zubů** rozeznáváme frézy se zuby:

- frézovanými
- podtáčenými (hřbet tvořen Archimedovou spirálou)
- lité zuby (hřbetní plocha válcová)

Podle **průběhu ostří** je dělíme na frézy se zuby:

- přímými
- ve šroubovici (levé, pravé)

Dle **způsobu upnutí**:

- frézy s upínací stopkou (válcovou, kuželovou)
- frézy nástrčné

Podle **smyslu otáčení**:

- pravořezné
- levořezné

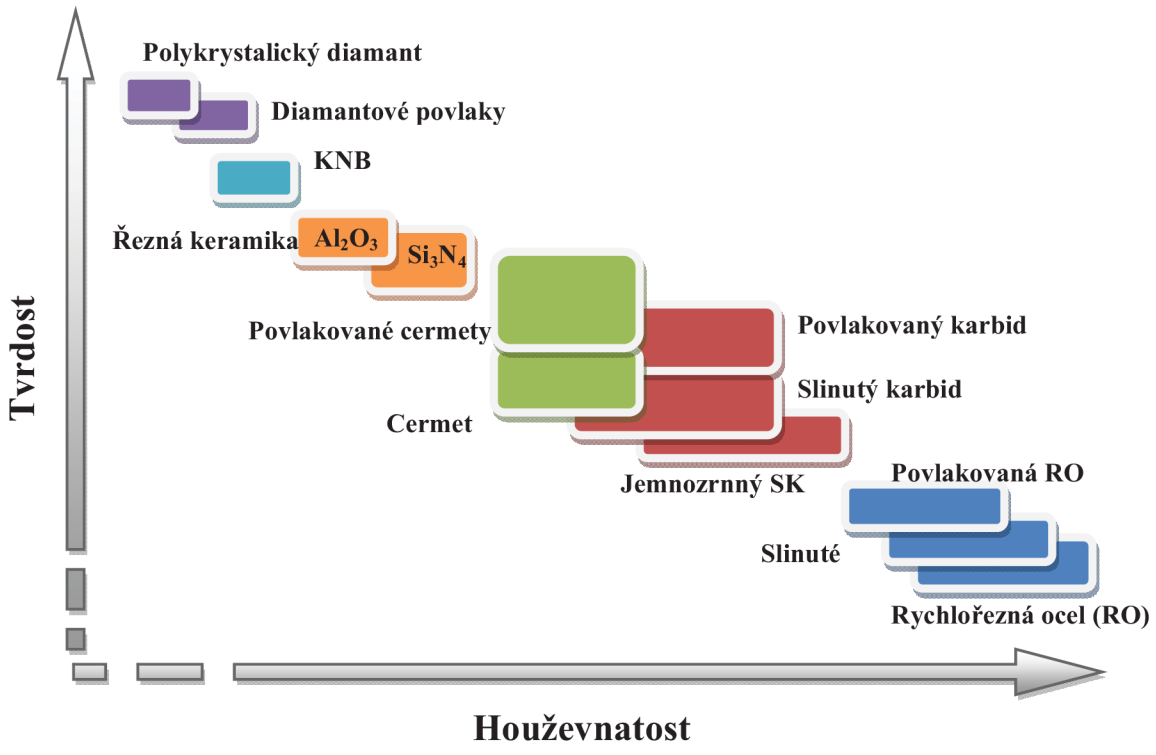
2.2 Řezné materiály

Na efektivnost obrábění kovových materiálů má podstatný vliv zejména výběr vhodného řezného nástroje. V současné době je možné vybírat z nepřeberného množství druhů nástrojových materiálů:

- rychlořezná ocel
- slinuté karbidy
- cermety
- řezná keramika
- diamant (PKD)
- kubický nitrid boru (KNB)

Mezi hlavní rozdíly patří odolnost těchto materiálů vůči vysokým teplotám, chemickým procesům a abrazivnímu otěru. Soudobý vývoj řezných materiálů není zaměřen na objevení zcela nového řezného materiálu, ale snahou výzkumných týmů a všech významných výrobců je především zdokonalování technologie výroby a specifikaci optimálního využití materiálů již známých, s přesným vymezením aplikačních oblastí.[8]

Na obrázku 2.8 je znázorněno porovnání tvrdosti a houževnatosti materiálů pro řezné nástroje.



Obr. 2.8– porovnání materiálů řezných nástrojů [7]

2.2.1 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli (RO) patří mezi nástrojové materiály, které mají z hlediska doby aplikace pro strojní obrábění nejdelší historii ze všech dnes stále využívaných nástrojů. V průběhu let prošel tento materiál jistými proměnami:

- rok 1910 - úprava poměru složek W:Cr:V (18:4:1)
- rok 1950 - ve Spojených státech byla představena rychlořezná ocel M2 HSS, která měla složení 0,8 % C, 4 % Cr, 2 % V, 6 % W, 5 % Mo, zbytek Fe, vyznačovala se vysokou stabilitou ostří i při teplotách vyšších než 650°C
- rok 1970 - byla představena metoda výroby RO práškovou metalurgií, která umožnila výrobu rychlořezné oceli s velice jemnými zrny karbidů 1-3 μm (oproti odlévaným HSS s více než 40 μm), dnes typická RO vyrobena práškovou metalurgií, která obsahuje 13 % W; 10 % Co; 6 % V; 4,75 % Cr; 2,15 % C.37 Vlastnosti tohoto druhu oceli lze též zlepšovat pomocí povlakování jedno, případně vícevrstvými povlaky.

Jednotlivé druhy rychlořezných ocelí se liší houževnatostí a tvrdostí, kde vyšší tvrdost lze chápat jako schopnost materiálu odolat vyšším řezným rychlostem (tepelné zatížení převládá nad mechanickým zatížením, tj. dokončovací obrábění) a houževnatost jako schopnost řezného materiálu odolat zatížení vyššími posuvovými rychlostmi (v důsledku většího průřezu třísky převládá mechanické zatížení nad tepelným, tj. hrubovací obrábění).[8]

V současné době patří mezi největší výhody řezných nástrojů z RO houževnatost tohoto materiálu, která se při ohybu či tahové zkoušce pohybuje v rozsahu mezi 2500 až 6000 MPa. Nespornou výhodou je také jejich cena, která je v porovnání s nástroji ze slinutých karbidů výrazně nižší. Na druhé straně mezi nevýhody RO je možné zařadit nedostatečnou tvrdost a odolnost vůči vysokým teplotám.

RO se využívají zejména při obrábění, kdy je použití slinutých karbidů neekonomické, případně by použití řezných nástrojů ze slinutých karbidů bylo neopodstatněné.

2.2.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (SK) jsou v dnešní době nejpoužívanějšími řeznými materiály. Slinuté karbidy (hard metals, cemented carbides) jsou využívány zejména pro jejich velmi dobré vlastnosti, především v podobě vyměnitelných břitových destiček, ale rovněž i ve formě monolitických nástrojů vybrušovaných do základního materiálu, případně jako nástroje s pájenými břity.[1]

Obecně lze rozlišit materiály ze slinutých karbidů na povlakované a nepovlakované. Povlaky mohou být jedno, případně vícevrstvé, přičemž na základní materiál je nanášen povlak s výhodnějšími vlastnostmi, než má základní materiál, zejména povlaky vykazující vyšší tvrdost a odolnost proti opotřebení.

Základním karbidem pro výrobu všech druhů slinutých karbidů určených pro obrábění (povlakovaných i nepovlakovaných) je karbid wolframu, pojícím kovem je kobalt. Dalšími používanými složkami jsou karbidy titanu, tantalu, niobu a chromu.

Z hlediska svého složení jsou nepovlakované SK označovány jako:

- jednokarbidové (K)
- dvojkarbidové (P)
- vícekarbidové (M)

V současné době prakticky všichni výrobci řezných nástrojů zařazují slinuté karbidy (případně i jiné materiály) do nových skupin podle ČSN ISO 513 (viz Tab.2.1).

Označení	Druh aplikace SK
P	pro obrábění železných kovů s dlouhou třískou
M	pro obrábění železných kovů s dlouhou nebo krátkou třískou a obrábění neželezných kovů
K	pro obrábění železných kovů s krátkou třískou, neželezných kovů a neželezných materiálů
N	pro obrábění neželezných slitin na bázi hliníku, hořčíku nebo mědi, obrábění plastů, kompozitů a dřeva
S	pro obrábění slitin titanu, žáropevných slitin na bázi niklu, kobaltu nebo železa
H	pro obrábění zušlechtěných a kalených ocelí a obrábění tvrzených litin

Tab. 2.1 - Rozdělení slinutých karbidů [7].

2.2.3 Cermety

Cermety na rozdíl od slinutých karbidů většinou neobsahují wolfram ani kobalt, proto jsou výjimečně označovány i jako bezwolframové slinuté karbidy. Tyto materiály pro řezné nástroje jsou založeny na bázi karbidu titanu, nitridu titanu a dalších složek. Materiál tohoto druhu je poněkud méně houževnatým než slinuté karbidy, přičemž nabízí možnost zatížení téměř shodnými řeznými rychlostmi jako slinuté karbidy. Cermety se dobře uplatňují i při obrábění korozivzdorných ocelí. Cermety se vyrábí jako povlakované a nepovlakované.

2.2.4 Řezná keramika

Řeznou keramiku lze v podstatě rozdělit na dvě skupiny:

- ŘK oxidová (na bázi Al_2O_3)
- ŘK nitridová (na bázi Si_3N_4).

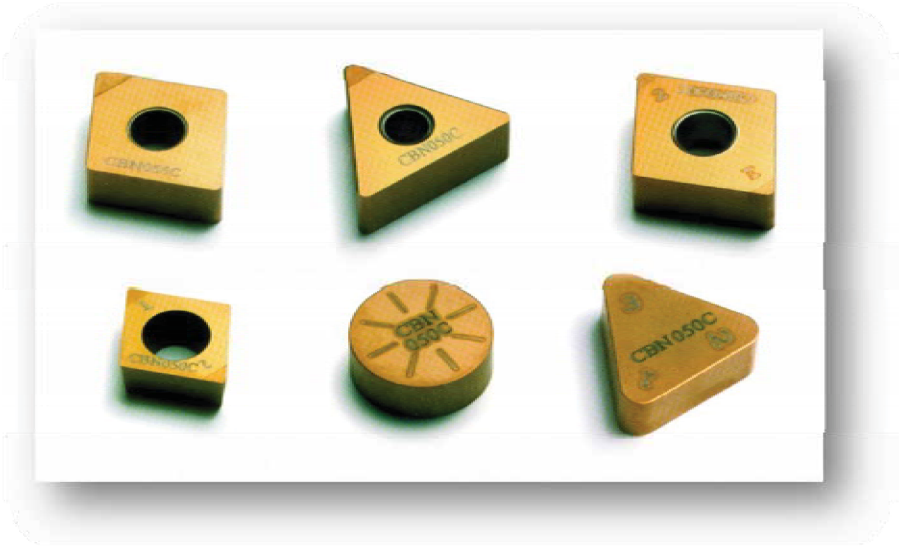
ŘK oxidová lze využít pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi, z důvodu její vysoké tvrdosti za tepla a vysoké termochemické stability. Nevýhodou tohoto druhu ŘK je nízká houževnatost, což znamená nutnost použití nízkých posuvových rychlostí.

ŘK nitridová má vyšší houževnatost, proto lze použít vyšší posuvové rychlosti než pro keramiku oxidovou.

ŘK je znamenitým nástrojovým materiálem pro obrábění šedých litin, ale není příliš vhodná pro obrábění ocelí a tvárných litin (s výjimkou směsných oxidových keramik typu Al_2O_3 + TiC), u kterých vykazuje rychlé opotřebení.[8]

2.2.5 Kubický nitrid boru, diamant

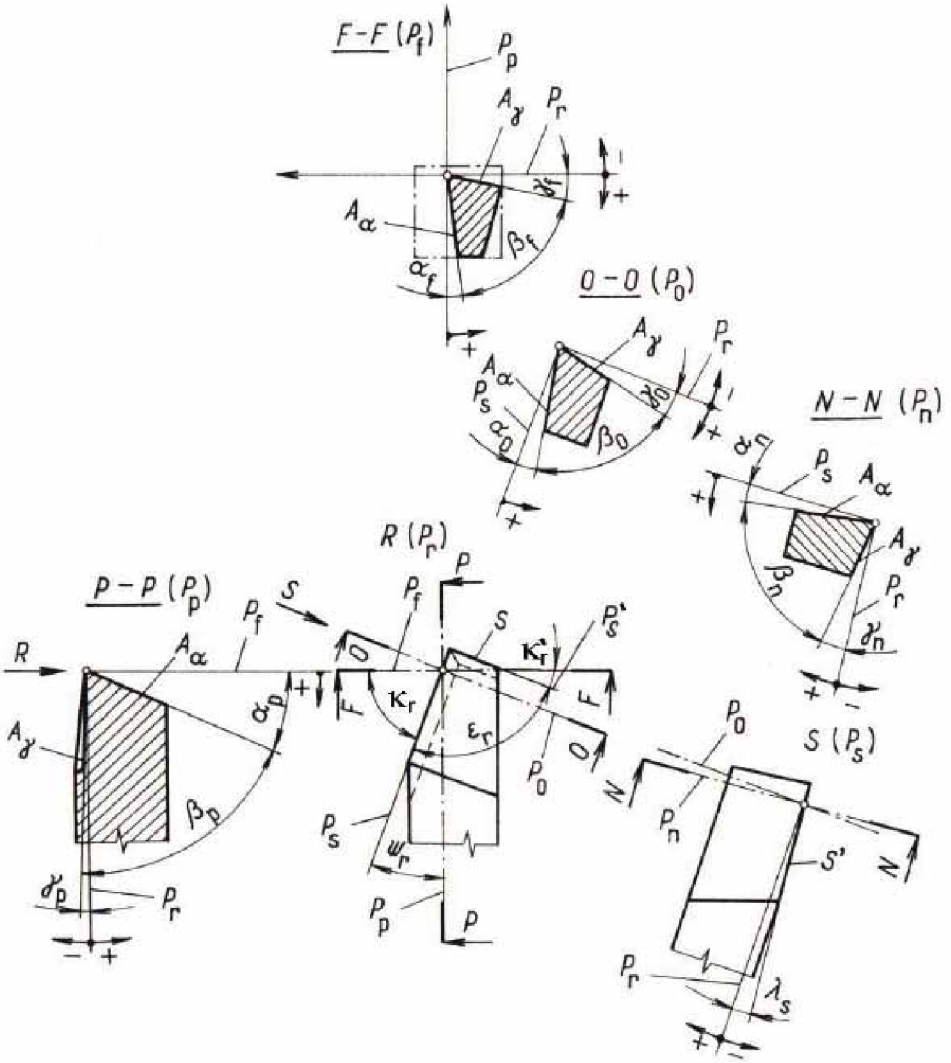
Kubický nitrid boru a diamant se pro strojní obrábění používá velmi výjimečně. Vlastnosti obou těchto materiálů se vyznačují vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení, ale vzhledem k ceně nástroje, malým možnostem změny jeho tvaru jsou jejich aplikace omezeny pouze na speciální případy obrábění. KNB je velmi dobrým nástrojovým materiálem pro obrábění superslitin, kalených ocelí a litin, lze jím obrábět i slinuté karbidy s vyšším obsahem kobaltu.[8]



Obr. 2.9 – povlakované vyměnitelné břitové destičky z kubického nitridu boru

2.3 Geometrie břitu

Při určování geometrie břitu fréz se postupuje podobně jako u soustružnických nožů. Na Obr. 2.10 jsou zobrazeny nástrojové úhly v jednotlivých rovinách.



Obr. 2.10 - Nástrojové úhly v rovinách Pr , Pf , Pp , Ps ,Po , Pn [8]

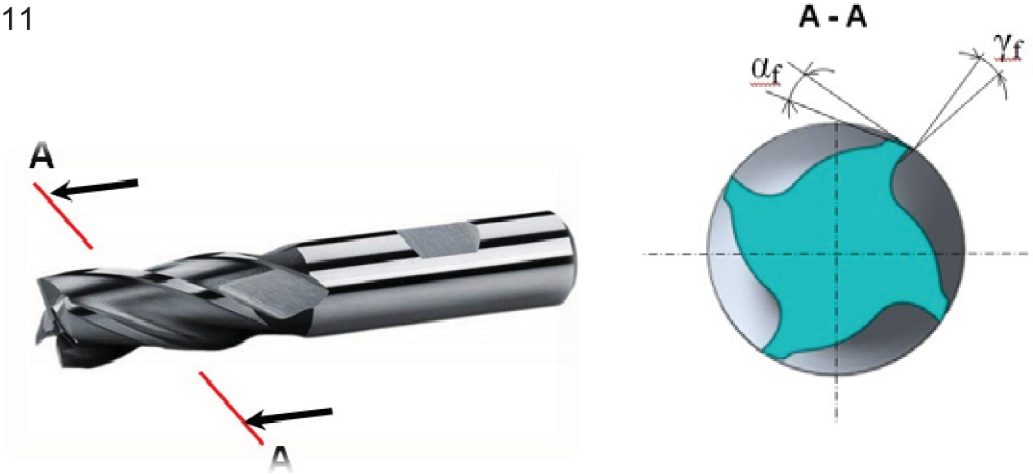
Základní geometrie břitu frézy je určena úhlem čela γ , hřbetu α , nastavení hlavního ostří κ_r , úhlem nastavení vedlejšího ostří κ_r' , úhlem sklonu šroubovice λ_s

Nástrojový ortogonální úhel čela γ_o – ovlivňuje zejména práci tvoření třísky, velikost řezných odporů, hodnotu úhlu smykové roviny. Hodnota se pohybuje od 5° do 30° (měřeno v rovině normálové viz Obr. 2.10 - rovina P_n) ,

přičemž vyšší hodnoty γ_o jsou předurčeny pro obrábění lehkých kovů, nižší hodnoty pro oceli.

Nástrojový ortogonální úhel hřbetu α_o – ovlivňuje podmínky tření na hřbetě nástroje a tuhost břitu. Hodnoty α_o se běžně pohybují v rozsahu 8° ÷ 12°, extrémně až v rozsahu 3° ÷ 25°. Větší hodnoty α_o jsou doporučovány pro pevnější obráběné materiály, malou tloušťku třísky, nízké posuvy a vyšší řezné rychlosti. Extrémně vysoké hodnoty α_o jsou určeny pro obrábění slitin hliníku.

Zakreslení úhlu čela γ_f a hřbetu α_f v boční rovině P_f je zobrazeno na Obr. 2.11



Obr. 2.11– Úhel hřbetu a čela v boční rovině P_f

Úhel sklonu šroubovice λ_s – vytváří příznivé podmínky pro tvorbu a odvod třísky z místa řezu. Frézy s hlavním ostřím ve šroubovici se vyznačují plynulejším záběrem, zmenšují chvění nástroje, zvyšují trvanlivost nástroje, zlepšují jakost obrobeného povrchu. Stoupání šroubovice se u válcových fréz volí λ_s = 15° - 60°

Úhel nastavení hlavního a vedlejšího ostří κ_r a κ_r' – ovlivňují zejména:

- tvar třísky (κ_r)
- strukturu povrchu obrobku (převážně κ_r')
- složky řezné síly

Uhel κ_r se pohybuje v rozsahu 0° až 90° (běžně se volí 45° - 90°), úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' se volí u fréz z rychlořezné oceli κ_r' = 2° až 3° , u fréz ze SK κ_r' = 5°. Zmenšováním úhlu κ_r' se zlepšuje jakost povrchu, vzniká ovšem také nebezpečí vibrací a tím poškození ostří.

3 KINEMATIKA ŘEZNÉHO PROCESU

Hlavní, rotační pohyb u všech druhů frézování koná nástroj, posuvový pohyb je většinou přímočarý a koná ho obrobek Obr. 3.1, u okružního a planetového frézování může být i rotační a konat ho může obrobek nebo nástroj. Hodnota řezné rychlosti $\mathbf{v_c}$ se vypočítá podle vztahu:[9]

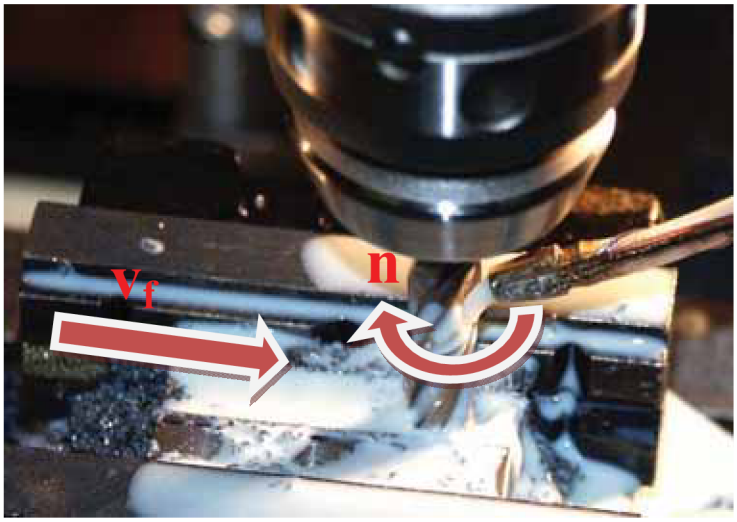
$$v_c = \frac{\pi \cdot \mathrm{D} \cdot n}{1000} \tag{3.1}$$

Délka dráhy, kterou urazí obrobek po dobu záběru zubu, se nazývá posuv na zub $\mathbf{f_Z}$. Z posuvu na zub lze vypočítat posuv na otáčku $\mathbf{f_n}$

$$f_n = f_z \cdot z \tag{3.2}$$

Posuvová rychlost $\mathbf{v_f}$ se vypočítá podle vztahu:

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \tag{3.3}$$

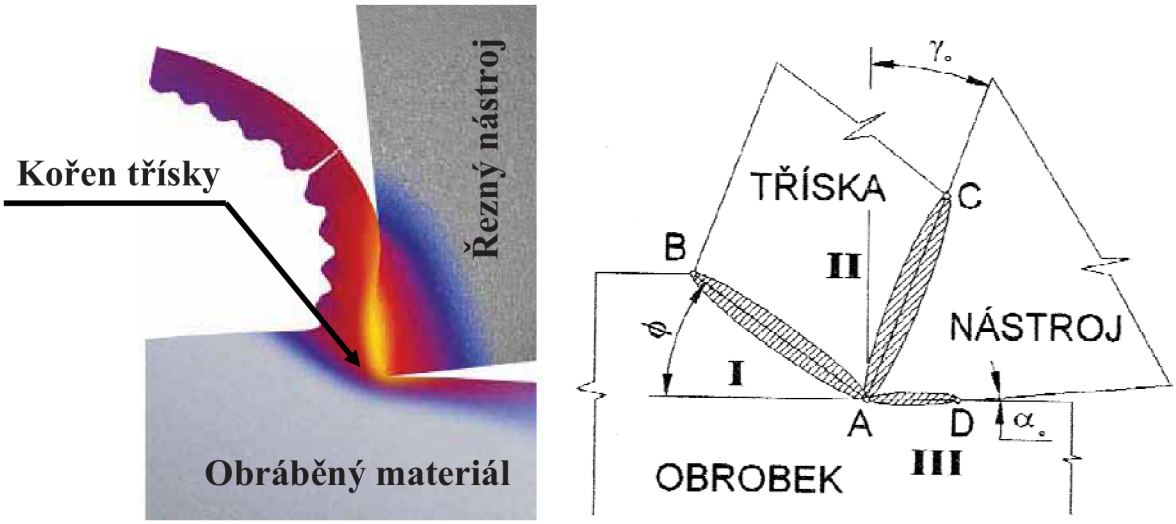


Obr. 3.1 – proces sousledného frézování

4 MECHANISMUS TVORBY TŘÍSKY

Oblast, ve které dochází účinkem řezného nástroje k jeho přetváření na třísku nazýváme kořen třísky obr. 4.1. Kořen třísky zahrnuje přibližně tři oblasti výrazné plastické deformace - obr. 4.1:[6]

- oblast **primární plastické deformace** I – v rovině maximálních smykových napětí (rovina $\overline{AB}$ skoněná pod úhlem střižné roviny Φ)
- oblast **sekundární plastické deformace** II – rovina $\overline{AC}$ – zachycuje tření třísky po čele nástroje
- oblast **terciální plastické deformace** III – rovina $\overline{AD}$ – zachycuje tření nástoje o obrobený povrch

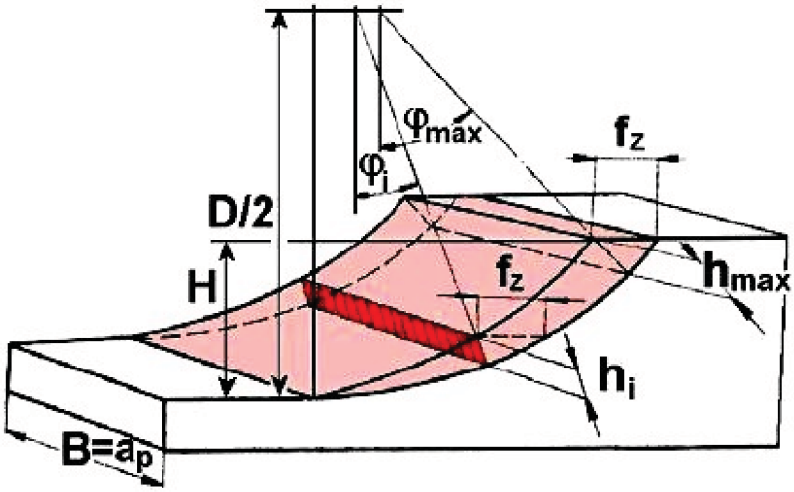


Obr. 4.1 – kořen třísky, oblasti plastických deformací v kořenu třísky [1,6]

Obecně platí, čím je vyšší úhel střižné roviny Φ, tím je štíhlejší tříska, proces je energeticky méně náročný a ovlivnění povrchových a podpovrchových vrstev je nižší. Dílčí průběhy a rozsahy plastických deformací záleží na schopnosti pohybu dislokací při působení smykového napětí. [6]

5 PRŮŘEZ TŘÍSKY PŘI FRÉZOVÁNÍ

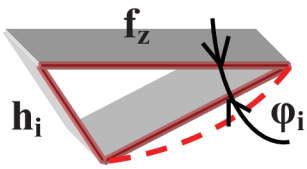
Při technologické operaci frézování odebírá materiál několik břitů nástroje současně a nástroj se otáčí. Jednotlivé břity mají v určitém okamžiku vůči obrobku různou polohu a odebírají tedy různou tloušťku třísky. U nesousledného způsobu frézování se tloušťka mění od nulové hodnoty po maximální hodnotu a od maximální hodnoty po minimální při sousledném způsobu frézování Obr. 5.1



Obr. 5.1 - změna průřezu třísky při válcovém frézování [8]

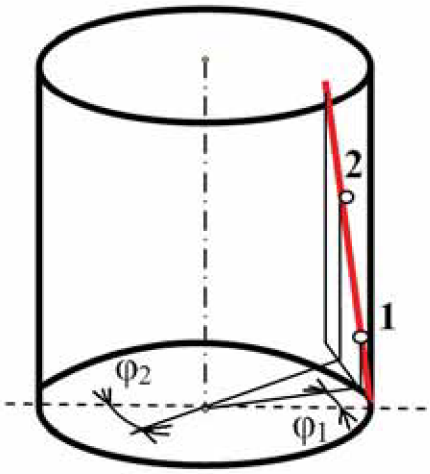
Jmenovitá tloušťka třísky $\mathbf{h_i}$ je funkcí postavení zubu vůči základní poloze neboli úhlu φ_i. Za zjednodušujícího předpokladu (kdy oblouk tvořený průměrem frézy nahradíme přímkou) Obr. 5.2 se může tato závislost vyjádřit vztahem

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \tag{5.1}$$



Obr. 5.2 – Zjednodušující předpoklad pro určení jmenovité tloušťky třísky

Úhel posuvového pohybu φ_i se mění nejen v závislosti na poloze právě řešeného zubu, ale u fréz se šikmými zuby nebo zuby ve šroubovici, také podél příslušného ostří jak je znázorněno úhly φ_1 a φ_2 na obrázku 5.3



Obr. 5.3 – změna úhlu φ vlivem šikmých zubů

Jmenovitý průřez třísky se na základě poměrů naznačených na obrázku 5.1 vyjádří:

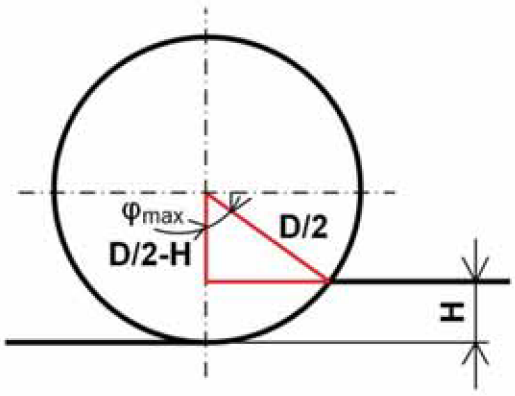
$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot sin\varphi_i \tag{5.2}$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky bude tedy při $\varphi_i = \varphi_{max}$

$$A_{Dmax} = a_p \cdot h_{\max} = a_p \cdot f_z \cdot sin\varphi_{\max} \tag{5.3}$$

Úhel φ_{max} vypočteme z rovnice, odvozené na základě Obr. 5.4

$$sin\varphi_{max} = \frac{2}{D} \cdot \sqrt{D \cdot H - H^2} \tag{5.4}$$



Obr. 5.4 – schéma pro výpočet úhlu φ_{max}

5.1 Průřez třísky se zuby ve šroubovici

Vyšetření plochy průřezu třísky odpovídá analýze šroubového konoidu a lze ji odvodit pro každý zub a jeho úhel záběru pomocí Obr. 5.5 Zub při frézování postupně prochází body 1-5 a průřez třísky se v každém bodu mění. V souvislosti s touto časovou změnou se mění i měrná řezná síla, celkové zatížení zubu frézy i řezný výkon. Dle náčrtu je poloha bodu **B** závislá na poloměru frézy **R** a úhlu **φ** podle vztahu:[6]

$$x = R \cdot cos\varphi \tag{5.5}$$

$$y = R \cdot sin\varphi \tag{5.6}$$

$$z = \frac{S_š}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi \tag{5.7}$$

Pro získání přírůstků v jednotlivých osách derivujeme podle přírůstku úhlu dφ, tzn.[6]

$$dx = R \cdot cos\varphi \cdot d\varphi \tag{5.8}$$

$$dy = R \cdot sin\varphi \cdot d\varphi \tag{5.9}$$

$$dz = \frac{S_š}{2 \cdot \pi} \cdot d\varphi \tag{5.10}$$

Hodnota elementu délky ostří $\mathbf{dl_s}$ je dána rovnicí

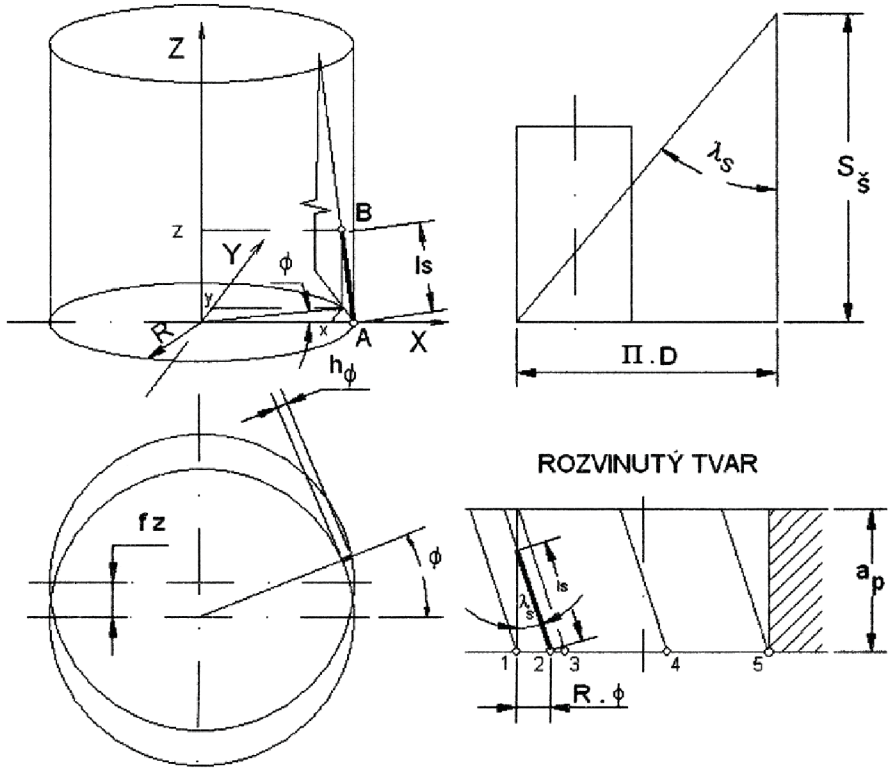
$$dl_s = \sqrt{{d_x}^2 + {d_y}^2 + {d_z}^2} \tag{5.11}$$

po dosazení a úpravě

$$dl_s = \sqrt{R^2 + \left(\frac{S_š}{2 \cdot \pi}\right)^2} \cdot d\varphi \tag{5.12}$$

Element průřezu třísky získáme jako součin délky ostří a odpovídající tloušťky třísky h_i pro úhel φ ve tvaru:[6]

$$dA_D = dl_s \cdot h_i = \sqrt{R^2 + \left(\frac{S_š}{2 \cdot \pi}\right)^2} \cdot d\varphi \cdot f_z \cdot sin\varphi \qquad (5.13)$$



Obr. 5.5 – analýza průřezu třísky při frézování se zuby ve šroubovici [6]

6 ŘEZNÉ SÍLY PŘI FRÉZOVÁNÍ

Určování řezných sil při frézování je podstatně složitější než například u vrtání, neboť jak už bylo zmíněno, při frézování dochází ke změně průřezu třísky. Velikost řezných sil závisí na počtu zubů v záběru a tedy celkové délce řezných hran v záběru. Výsledná řezná síla $\mathbf{F_{vi}}$ je součtem elementárních sil, kterými působí na obrobek jednotlivé zuby. Pokud se jedná o frézu s přímými zuby, tak těmito elementárními složkami jsou: Obr. 6.1a)

F_{ci}* – *tangenciální řezná síla, nejdůležitější složka výsledné řezné síly, vykonává práci při odebírání třísky. Podle ní se určuje efektivní výkon P_e a počítají se uzly mechanismu hlavního pohybu.

F_{cNi}* – *radiální řezná síla, působí tlakem na ložiska vřetene, vytváří doplňující moment tření. Přitom ohýbá trh frézy a je důležitým faktorem při výpočtech složeného namáhání (ohyb od radiální síly a krut od síly obvodové). Velikost složek řezné síly $\mathbf{F_{cNi}}$ určujeme obvykle z poměru[3]

$$K = \frac{F_{cNi}}{F_{ci}} \tag{6.1}$$

Hodnota **K** je zjištěna experimentálně a pohybuje se v rozmezí 0,6 až 0,8.

Výslednice těchto sil $\mathbf{F_i}$ se dále rozkládá na dvě složky:

F_{fi}* – *horizontální (posuvová) síla, zatěžuje mechanismus posuvu frézky. Podle její velikosti se dimenzují uzly posuvového mechanismu a elementy upínání obrobku a přípravků.

F_{fNi}* – *vertikální (kolmá posuvová) síla, namáhá konzolu frézy ohybem

Pokud má fréza šikmé ozubení, působí na zub v osovém směru ještě síla axiální $\mathbf{F_{ai}}$ **.** Její velikost je se určí: [4] Obr. 6.1 b)

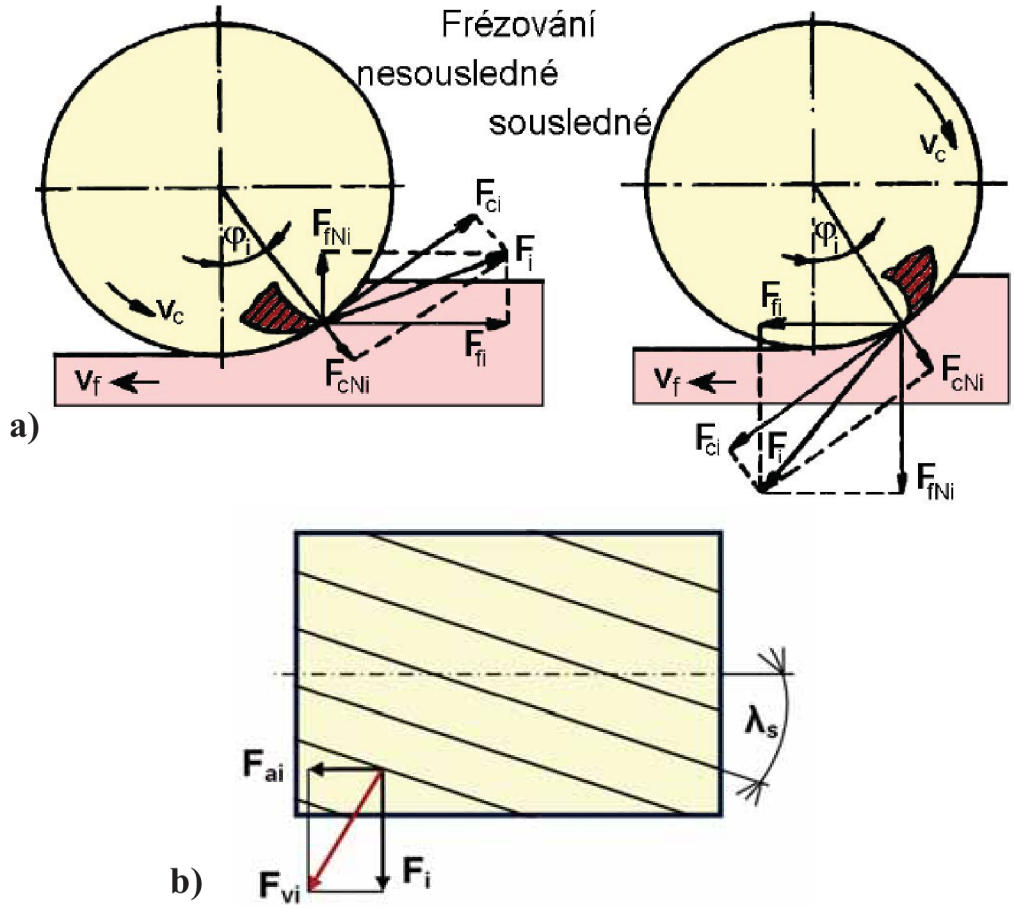
$$F_{ai} = F_{ci} \cdot tg\lambda_s \tag{6.2}$$

Vzhledem k tomu, že podél zubu působí třecí síla, která osovou sílu zmenšuje, se osová síla vypočítá podle experimentálně zjištěného vzorce[4]

$$F_{ai} = 0{,}28 \cdot F_{ci} \cdot tg\lambda_s \tag{6.3}$$

Výslednou řeznou sílu $\mathbf{F_{vi}}$ při frézování frézou se zuby ve šroubovici vypočítáme:

$$F_{vi} = \sqrt{F_{ai} + F_{ci} + F_{cNi}} \tag{6.4}$$



Obr. 6.1 - rozklad jednotkové řezné síly při válcovém frézování
a) všeobecný případ, b) fréza se šikmým ozubením [9]

Pro složky F_{fi} a F_{fNi} lze z grafického vyjádření odvodit:[3]

- **nesousledné frézování**

$$F_{fNi} = (F_{cNi} \cdot cos\varphi_i - F_{ci} \cdot sin\varphi_i) \tag{6.4}$$

$$F_{fi} = (F_{cNi} \cdot sin\varphi_i + F_{ci} \cdot cos\varphi_i) \tag{6.5}$$

- **sousledné frézování**

$$F_{fNi} = (F_{cNi} \cdot cos\varphi_i + F_{ci} \cdot sin\varphi_i) \tag{6.6}$$

$$F_{fi} = (F_{cNi} \cdot sin\varphi_i - F_{ci} \cdot cos\varphi_i) \tag{6.7}$$

Velikost tangenciální řezné síly $\mathbf{F_{ci}}$, někdy nazývané „výkonové“ síly, je závislá v první řadě na obráběném materiálu a působících podmínkách třískového obrábění (například geometrie břitu či tloušťka třísky).

Základní rovnice tangenciální řezné síly $\mathbf{F_{ci}}$ (pro každý břit) se vypočítá dle vztahu[6]

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_c = a_p \cdot h_i \cdot k_c \tag{6.9}$$

Známe-li řeznou sílu $\mathbf{F_c}$ a řeznou rychlost $\mathbf{v_c}$ můžeme vypočítat potřebný řezný výkon stroje $\mathbf{P_c}$ podle vzorce:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} \tag{6.10}$$

Potřebný řezný moment $\mathbf{M_c}$ se vypočítá:

$$M_c = \frac{F_c \cdot D}{2 \cdot 10^3} \tag{6.11}$$

Rychlost úběru materiálu **Q** se vypočítá:

$$Q = \frac{a_p \cdot H \cdot v_f}{1000} \tag{6.12}$$

6.1 Specifická řezná síla

Specifická řezná síla $\mathbf{k_c}$ je sice rozhodující měrou ovlivňována materiálem, ale je třeba s ní pracovat jako s čistě početní veličinou, nikoli jako parametrem materiálu. Na obrázku 6.2 je znázorněna závislost specifické řezné síly $\mathbf{k_c}$ na tloušťce třísky **h**

Důležitými ovlivňujícími faktory pro $\mathbf{k_c}$ jsou:

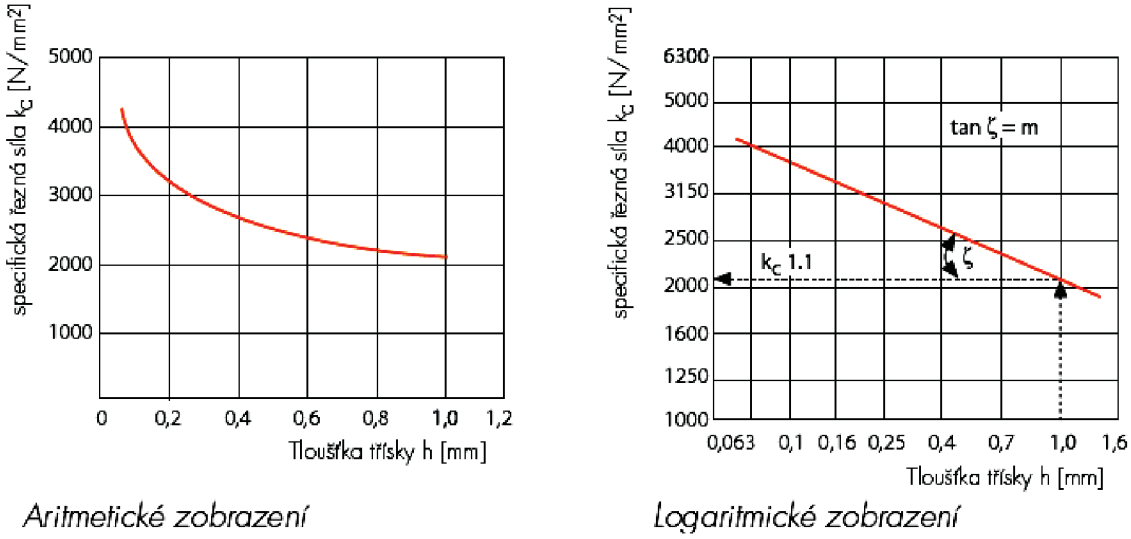
- pevnost a legující složky obráběného materiálu
- velikost průřezu třísky
- geometrie ostří nástroje
- řezné prostředí

Specifická řezná síla se vypočítá:[6]

$$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h^m} \tag{6.13}$$

$k_{c1.1}$ – hlavní hodnota specifické řezné síly při průřezu třísky $\mathbf{A_D = 1mm^2}$ (a_p= 1mm, h = 1mm)

m – nárůst tangenty úhlu strmosti ζ viz obrázek 6.2



Obr. 6.2 - závislost specifické řezné síly k_c na tloušťce třísky h [7]

Hlavní hodnota specifické řezné síly $\mathbf{k_{c1.1}}$ a nárůst **m** tangenty úhlu strmosti ζ jsou závislé na materiálu a byly zjištěny pro různé materiály na základě pokusů.

Zmenšuje-li se tloušťka třísky, zvětšuje se poměrná hodnota deformační práce, protože se zvětšuje stupeň zpevnění materiálu i podíl pasivních prací na tvorbu třísky.[6]

Řezná síla ovlivňuje velikost měrné řezné síly tím, že:[6]

- ovlivňuje velikost oblasti primární deformace
- má značný vliv na teplotu deformovaného materiálu
- určuje rychlost zatěžování materiálu obrobku
- ovlivňuje velikost součinitele tření na čele i hřbetě a vznik velikosti nárůstku

Ukázky hodnot specifické řezné síly **k_c**, které jsou součástí databáze importované do vytvořené aplikace, jsou zobrazeny v následující tabulce 6.1

Materiálová skupina		Pevnost [N/mm²]	Materiály				Specifická řezná síla kc [N/mm²] v závislosti na tloušťce třísky h [mm]									
			Č. materiálu	Označení materiálu podle normy DIN	kc1.1	m	0,05	0,06	0,1	0,16	0,3	0,4	0,5	0,8	1,6	2,5
1.0	Všeobecná konstr. ocel	do 500	1.0037	St 37-2	1.780	0,17	2.962	2.872	2.633	2.431	2.253	2.080	2.003	1.849	1.643	1.523
1.1	Všeobecná konstr. ocel	500–850	1.0050	St 50-2	1.990	0,26	4.336	4.136	3.621	3.205	2.854	2.525	2.383	2.109	1.761	1.568
			1.0060	St 60-2	2.110	0,17	3.511	3.404	3.121	2.881	2.671	2.466	2.374	2.192	1.948	1.806
			1.0070	St 70-2	2.260	0,30	5.552	5.256	4.509	3.916	3.426	2.975	2.782	2.416	1.963	1.717
2.0	Automatová ocel	do 850	1.0718	9SMnPb28	1200	0,18	1997	1.844	1.775	1.639	1.473	1.402	1.350	1.246	1.108	1.027
3.0	Neleg. ocel k zušlechtění	do 700	1.0402	C 22	1.800	0,16	2.907	2.823	2.602	2.413	2.247	2.084	2.011	1.865	1.670	1.555
			1.0501	C 35	1.516	0,27	3.404	3.240	2.823	2.486	2.204	1.942	1.828	1.610	1.335	1.184
3.1	Neleg. ocel k zušlechtění	700–850	1.0503	C 45	1.680	0,26	3.661	3.491	3.057	2.705	2.409	2.132	2.012	1.780	1.487	1.324
			1.1191	Ck 45	2.220	0,14	3.377	3.292	3.064	2.869	2.696	2.524	2.446	2.290	2.079	1.953
3.2	Neleg. ocel k zušlechtění	850–1000	1.1221	Ck 60	2.130	0,18	3.652	3.534	3.224	2.962	2.734	2.512	2.413	2.217	1.957	1.806
4.1	Legovaná ocel k zušlechtění	1000–1200	1.7218	25CrMo4	2.070	0,25	4.378	4.182	3.681	3.273	2.927	2.603	2.462	2.189	1.841	1.646
			1.7225	42CrMo4	2.500	0,26	5448	5195	4549	4026	3585	3173	2994	2649	2212	1970
5.0	Neleg. cementač. ocel	do 750	1.0401	C 15	1.820	0,22	3.518	3.380	3.020	2.724	2.469	2.226	2.120	1.912	1.641	1.488
6.0	Leg. cementační ocel	do 1000	1.5919	15CrNi6	1.380	0,30	3390	2.944	2.753	2.391	1.980	1.817	1.699	1.476	1.199	1.048
			1.7131	16MnCr5	2.100	0,26	4.576	4.364	3.821	3.382	3.011	2.665	2.515	2.225	1.858	1.655
6.1	Leg. cementační ocel	nad 1000	1.7147	20MnCr5	2.140	0,25	4.526	4.324	3.806	3.384	3.026	2.691	2.545	2.263	1.903	1.702
			1.7262	15CrMo5	2.290	0,17	3.811	3.694	3.387	3.127	2.899	2.676	2.576	2.379	2.114	1.960
7.0	Nitridační ocel	do 1000	1.8507	34CrAlMo5	1.740	0,26	3.792	3.616	3.166	2.802	2.495	2.208	2.084	1.844	1.540	1.371
8.0	Nástrojová ocel	do 850	1.1730	C45W	1.680	0,26	3.661	3.491	3.057	2.705	2.409	2.132	2.012	1.780	1.487	1.324
			1.2067	100Cr6	1.410	0,39	4.535	3.776	3.461	2.881	2.255	2.016	1.848	1.538	1.174	986
8.1	Nástrojová ocel	850–1100	1.2312	40CrMnMoS8-6	1.800	0,27	4.042	3.847	3.352	2.952	2.617	2.305	2.170	1.912	1.585	1.405
			1.2842	90MnCrV	2.300	0.21	4.315	4.153	3.730	3.380	3.077	2.788	2.660	2.410	2.084	1.897
8.2	Nástrojová ocel	nad 1100	1.2080	X210Cr12	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434

Tab. 6.1 – hodnoty specifické řezné síly **k_c** a **m** [7]

Hodnoty specifické řezné síly uvedené v tabulce 6.1 se vztahují k následujícím parametrům:[7]

- Řezný materiál: SK
- Řezná rychlost: v_c = 100m/min
- Úhel čela γ = 6°
- Úhel nastavení κ = 45°
- Pracovně ostrý břit

Při odchylkách od daných podmínek třískového obrábění je pro výpočet tangenciální řezné síly $\mathbf{F_c}$ zapotřebí korekčních faktorů:

To platí zejména pro následující parametry:

- oprava úhlu čela K_γ
- oprava opotřebení K_{Ver}

V následující tabulce jsou uvedeny korekční parametry, které jsou součástí výpočtů ve vytvořené aplikaci:[7]

Parametr	Výpočet / rozsah hodnot	Poznámka
$\mathbf{K_\gamma}$	$K_\gamma = 1 - \frac{\gamma - \gamma_k}{66{,}7°}$	γ …skutečný úhel čela γ_k… pro obrábění oceli 6° γ_k… pro obrábění litiny 2°
$\mathbf{K_{Ver}}$	1	Pracovně ostrý nástroj
	1,3 …1,5	Opotřebovaný nástroj

Tab. 6.2 - určení korekčních hodnot pro výpočet řezné síly

Řezná síla $\mathbf{F_{ci}}$ se při zahrnutí korekčních parametrů vypočítá:

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_c \cdot K_\gamma \cdot K_{Ver} = a_p \cdot h_i \cdot k_c \cdot K_\gamma \cdot K_{Ver} \qquad (6.14)$$

6.2 Experimentální zařízení pro měření řezných sil

V průběhu třískového obrábění dochází ke vzájemné interakci nástroje a obrobku, při které dochází ke vzniku tření a plastické deformace. Tyto mechanické jevy mají za následek tvorbu sil o vysokofrekvenční akustické emisi. Měření těchto sil, vzniklých důsledkem zmíněných mechanických procesů, se provádí pomocí snímače řezných sil (dynamometru), který detekuje změny velikostí silových složek v neměnných směrech kartézského souřadného systému. Souřadný systém dynamometru obsahuje složky *Fx, Fy, Fz*.

Měření silového zatížení může být realizováno buď měřením přímým, nebo nepřímým. Přímé měření sil je charakteristické tím, že dochází k upnutí obrobku/nástroje na snímač silového zatížení (dynamometr), který na toto zatížení reaguje vytvářením elektrických signálů, o velikosti odpovídající působící síle. Rovněž je možné určovat silové zatížení řezných nástrojů měřením dislokace vřetene (spindle displacement) v průběhu obrábění pomocí válcového kapacitního dislokačního senzoru připevněného na vřetenu frézovacího stroje (systém měření vyvinutý pro monitorování procesu obrábění stopkovými frézami).

Naproti tomu nepřímé měření silového zatížení vychází zejména z reakcí obráběcího stroje na proces obrábění. Růst silového zatížení se projeví například zvýšením příkonu obráběcího stroje, který může být například indikátorem opotřebení řezného nástroje (zvýší se zatížení vřetene, posuvových mechanismů atd.). NC a CNC stroje jsou obvykle vybaveny obzvláště citlivými pohony (vřetene, posuvových mechanismů), a umožňují monitorování příkonu buď externím měřícím zařízením připojeným na pohonných jednotkách stroje, nebo přímo v řídícím softwaru obráběcího stroje (pokud je monitor příkonu stroje součástí programového vybavení), proto je možné tímto způsobem determinovat aktivní složky silového zatížení. Nepřímé měření je méně přesné než měření přímé, nicméně přesnost nepřímého měření je dostačující pro kontrolní účely a z ekonomického hlediska není natolik finančně náročné, jako použití přímého měření.

Přímé měření řezných sil je tedy založeno na snímání tlakové složky působící na řezný nástroj. Požadavky na měřící aparaturu jsou citlivost a

přesnost. Vysoká citlivost zařízení je důležitá zejména tehdy, pokud je řezná síla snímána jako dynamický jev.

Jak dosahujeme přesnosti měřících aparatur:[4]

- Konstrukční řešení snímače musí být navrženo takovým způsobem, aby se velikost jednotlivých složek, na které se řezná síla rozkládá, navzájem neovlivňovaly.
- Deformace pružných členů nesmí být velká, aby nedocházelo ke zkreslení konstantních parametrů fixovaných při měření.
- Vlastní aparatura musí mít nízkou hmotnost, díky čemuž dosáhneme nízké setrvačnosti.
- Průběh kalibračních diagramů by měl lineární a nesmí vykazovat hysterezi.

Dalším požadavkem na měřící aparaturu je vysoká hodnota její vlastní frekvence, neboť jev, probíhající ve skutečnosti podle plné čáry, se zobrazí na odlišně na přístrojích, jejichž vlastní frekvence jsou různé. Vlastní frekvence může ovlivnit i velikost naměřené síly (zejména v dynamickém pojetí), protože v tomto případě je třeba počítat s rezonancí.

Hodnota vlastní frekvence by měla být alespoň 5000Hz, přičemž dobré měřící aparatury dosahují vlastní frekvence až okolo 20 000Hz.[4]

Podle toho jestli aparatura měří jednu nebo více složek řezné síly, rozeznáváme jednosložkové, dvousložkové a třísložkové dynamometry. Pro měření obvodové síly se používají přístroje na měření kroutícího momentu.

Aparatura pro měření řezných sil se zpravidla skládá z:[4]

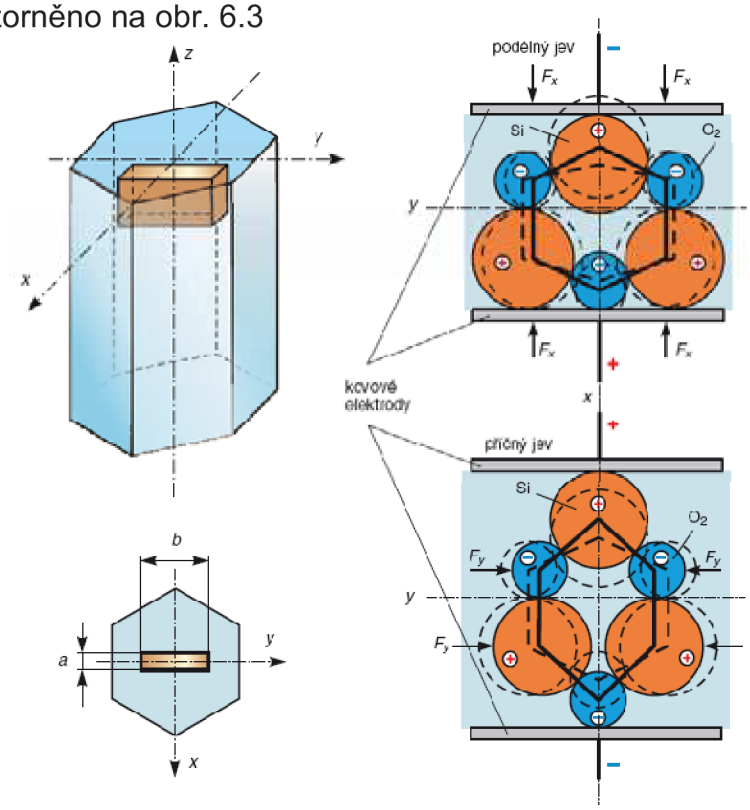
1. Pružný článek, přebírá vnější zatížení a pod jehož účinkem překonává určité změny jako například deformaci a změnu polohy.
2. Snímač, mění mechanickou veličinu změny pružného článku na odpovídající hodnotu analogického parametru měřící aparatury, například tlak.

3. Přijímač, zesiluje a zpracovává signál snímače a ukazuje, případně i zapisuje naměřené hodnoty.

Pružné články mohou být ve tvaru dutého válce, koule, pružných pák a desek, plochých pružin a podobně. Mezi nejpoužívanější konstrukce patří pružné desky, neboť se vyznačují kompaktností a při přebírání vnějšího zatížení lze lehce přizpůsobit jejich tvar.[4]

Mezi nejčastěji používané snímače patří snímače elektrické. Jejich princip je založen na elektroanalogickém měření mechanických veličin (posunutí, zvýšení tlaku) pružných článků. Snímače bývají tedy piezoelektrické, odporové, kapacitní, indukční, magnetické.

Piezoelektrická metoda měření je založena na vzniku piezoelektrického napětí, které vzniká deformací krystalu (křemen, turmalín) působením vnějších sil. Velikost náboje je úměrná působení řezné síly. Využití piezoelektrického jevu je znázorněno na obr. 6.3



Obr. 6.3 – piezoelektrický jev krystalu křemene [14]

Výhodou piezokrystalických snímačů je jejich malá setrvačnost. Umožňují měřit síly s frekvencí kmitů 30 až 50 kHz. Pružná deformace krystalů při zatížení je malá, zpravidla 1 až 3mm. Nedostatkem je jejich malá pevnost. Přípustný tlak je 1,0 až 1,5MPa.[4]

7 NÁVRH VLASTNÍ APLIKACE

7.1 Řídící program aplikace

Řídící program aplikace byl vytvořen v programovacím softwaru Delphi 7 od firmy Borland.

7.1.1 Delphi

Delphi je mocný nástroj určený pro rychlý vývoj aplikací (RAD - Rapid Application Development) firmy Borland, založený na jazyku Object Pascal pod operačním systémem Windows (dnes už i pod Linux jako Kylix). Prostředí, které Delphi nabízí, přináší možnost vytvoření vysoce kvalitní windowsovské aplikace za krátkou dobu. Object Pascal je objektově orientovaný jazyk podporující třídy, dědičnost, zapouzdření, polymorfismus, statické a virtuální metody, dynamické objekty a spoustu dalších vlastností. Vývoj aplikací RAD je založen na knihovně visuálních komponent (VCL - Visual Component Library) vlastní firmy Borland. Návrh grafického rozhraní aplikace je stejně snadný jako "drag and drop". Označí se komponenta v paletě komponent a přenese se na navrhovaný formulář. V okně Object Inspector lze přizpůsobit její další vlastnosti a také vytvořit proceduru, která bude volána při určité události vyvolané touto komponentou. Knihovna VCL obsahuje řádově desítky až stovky komponent s tím, že programátor může vytvořit své vlastní a vložit je do palety.[5]

7.1.1.1 *Historie Delphi*

Jazyk Pascal

Programovací jazyk Pascal byl navržen v roce 1969 s výstižně definovanou syntaxí reprezentující nový přístup strukturovaného programování. V historii programovacích jazyků se objevil relativně pozdě.

Pravděpodobně těžil také z Fortranu a Cobolu, které se objevily na začátku 60. let. Jeho autorem je profesor Niklaus Wirth z Vysoké školy technické v Curychu, který jej také prvně implementoval na sériovém počítači CDC 6000. Název jazyka byl zvolen na počest francouzského filosofa, matematika a fyzika Blaise Pascala. Autor sledoval návrhem jazyka dva cíle:

- vytvořit jazyk vhodný pro výuku programování, který by byl založen na omezeném počtu srozumitelných konstrukcí
- navrhnout strukturu jazyka tak, aby bylo snadné implementovat Pascal na většině tehdejších počítačů

První verze Pascalu byla publikována roku 1971. Využívání jazyka však odhalilo některé nedostatky, a proto byla v roce 1974 uveřejněna opravená definice jazyka, která se stala téměř normou v počátcích jeho existence. Wirth spolu s Kathleen Jensenovou vydávají v roce 1975 definitivní manuál, knihu *"Pascal User Manual and Report"*. O dva roky později Wirth opouští Pascal, aby pracoval na jazyku Modula - nástupci Pascalu.

V dalším období narůstala nutnost vytvořit skutečnou normu jazyka, která by umožňovala jednoduchý přenos programů zapsaných v Pascalu mezi počítači. V roce 1981 byla vydána norma ISO. Vedle toho vznikla řada komerčních implementací Pascalu, přesněji řečeno dialektů Pascalu, které se od standardního Pascalu dle normy ISO více či méně odchylovaly, zejména zavedením dalších konstrukcí zjednodušujících praktické programování.[5]

Turbo Pascal

V oblasti osobních počítačů dosáhla největšího úspěchu implementace firmy Borland [Společnost byla založena v roce 1983 a sídlí v Silicon Valley, Kalifornie, USA] pod názvem Turbo Pascal (pracující na počítačích řady x86 v systému DOS), která velkou reklamou prorazila v listopadu 1983. Posledním vývojovým prostředím Borlandu, které nepoužívalo knihovny Turbo Vision pro vlastní prostředí a podporu aplikací byl Turbo Pascal 5.5, jenž přesto vynikal na svou dobu kvalitní implementací objektů a bohatými možnostmi samotného jazyka. Turbo Pascal existoval ve dvou verzích. Běžné (ta je nyní zdarma) a pak ve verzi Professional, která obsahovala navíc Turbo Assembler a Turbo Debugger. Později následovaly verze 6.0 (podpora prostředí Turbo Vision) a

7.0 (k dispozici i pro Windows). Rok 1993 přiměl N. Wirtha k vydání knihy vzpomínek na Pascal "Recollections about the Development of Pascal".

Turbo Pascal hned od svých začátků vynikal svým rychlým kompilátorem, jehož autorem byl Anders Hejlsberg. Ten se časem stal hlavním tvůrcem týmu, který vytvořil nástupce Turbo Pascalu - Delphi. (Od roku 1996 pracuje A. Hejlsberg pro firmu Microsoft, kde byl nakonec také hlavním návrhářem jakyza C# a účastníkem při vytváření platformy .NET framework). [5]

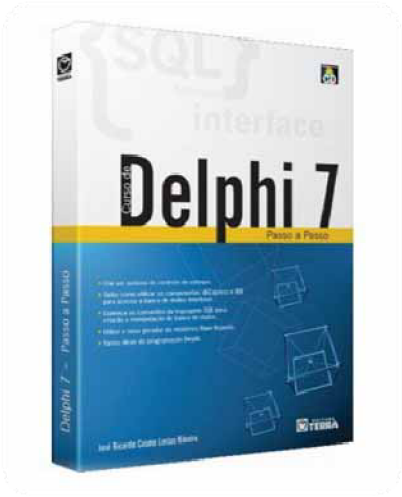
Delphi

Delphi se poprvé objevilo v roce 1995. Díky úspěchu, který přinesla myšlenka návrhu integrovaného vývojového prostředí (IDE - Integrated Development Environent) spolu s udržením rychlostí kompilace a spuštění, se riskovat určitě vyplatilo.

Mezi významné rysy jazyka patří:

- transparentní manipulace s objekty stejně jako s ukazateli
- vlastnosti (properties) jako část jazyka, které transparentně zapouzdřují přístup k položkám objektu, včetně pohodlného indexování umožňující přímý přístup k objektům pole a jejich vlastností
- vlastnosti (properties) jako část jazyka, které transparentně zapouzdřují přístup k položkám objektu (Položka může představovat i pole prvků, ke kterým se lze dostat pomocí celočíselného indexu. V objektu pak musí být definovány funkce pro čtení/zápis prvku v závislosti na indexu.)
- bezpečná práce s typováním tříd a metod
- přenesení implementace rozhraní do položky nebo vlastnosti třídy
- snadné zpracování systémových zpráv (metoda třídy, která má být volána v okamžiku, kdy třída obdrží danou zprávu, se jednoduše označí jménem této zprávy)
- komfortnější práce s integrovaným debuggerem (např. možnost nastavování breakpointů i za běhu aplikace včetně podmínkového omezení)

První verze byla ve srovnání s dnešním obrem poněkud omezená, ale přesto úspěšná. S každým dalším rokem přicházel Borland s novější verzí Delphi. Společně s šestou verzí byl zveřejněn Kylix, jakožto věrné dvojče Delphi, pracující pod operačním systémem Linux. Vytvořené aplikace by pak měly být mezi operačními systémy přenositelné, avšak ne tak úplně. Je potřeba dodržovat jistá pravidla. [5]



Obr. 7.1 – program Delphi 7

7.2 Určení vytvořené aplikace a její výhody

Vytvořená aplikace „**Milling simulator**“ slouží jako simulace průběhu řezných sil při frézování válcovou frézou s přímými zuby i se zuby ve šroubovici a to jak sousledným, tak i nesousledným způsobem. Na základě uživatelem zadaných vstupních hodnot a vybrání parametrů procesu frézování dojde k výpočtu a vykreslení teoretického průběhu sil, zejména: tangenciální řezné síly, radiální řezné síly, horizontální řezné síly, vertikální řezné síly. Tyto síly namáhají nástroj i stroj, zejména jeho posuvový mechanismus a znalost jejich hodnot je nezbytná pro konstrukci těchto částí stroje i fréz. Simulace také počítá zbylé parametry nutné k nastavení frézky před spuštěním operace, např. otáčky vřetene, posuv suportu. Součástí výstupu je i teoretický objem odebraných třísek za minutu, potřebný výkon stroje či točivý moment. Na základě výčtu těchto funkcí, může být aplikaci využita také jako nástroj pro průběžné, interaktivní ověřování výkladů a výuky.

7.3 Teoretický model aplikace

Zadáním této práce bylo vytvoření simulace průběhu řezných sil při frézování válcovou frézou s přímými zuby. V průběhu navrhování teoretického modelu však došlo k rozhodnutí, pokusit se rozšířit tento model a následně i výslednou aplikaci o složitější simulaci průběhu řezných sil při frézování se zuby ve šroubovici.

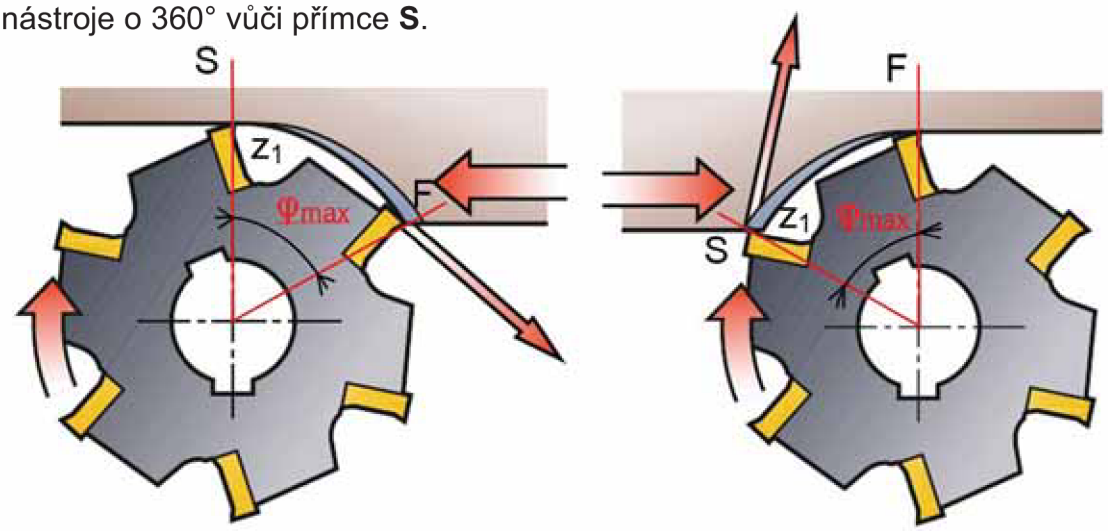
Nyní se pokusíme detailněji přiblížit postup návrhu vytvořeného modelu nejprve pro frézování se zuby přímými a následně pro frézování se zuby ve šroubovici.

V teoretickém modelu i vytvořené aplikaci využíváme poznatků a rovnic probraných v kapitolách:

3. kinematika řezného procesu
5. průřez třísky při frézování
6. řezné síly při frézování

7.3.1 Přímé zuby

Nejprve je důležité určit si okamžik počátku a dobu, po kterou budeme výpočet provádět. Jako počátek výpočtu byl zvolen teoretický okamžik, kdy se první zub frézy $\mathbf{z_1}$ nachází v bodě nulové jmenovité tloušťky třísky, v případě nesousledného způsobu frézování a v bodě maximální jmenovité tloušťky třísky při frézování sousledném, jak je naznačeno na Obr. 7.2 přímkou **S**. Výpočet končí v okamžiku dokončení jedné otočky nástroje, tedy po otočení nástroje o 360° vůči přímce **S**.



Obr. 7.2 – počátek výpočtu při sousledném a nesousledném způsobu frézování

Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o nasimulování reálného průběhu frézování, musíme určit skutečnou rychlost otáčení nástroje (změnu úhlu) v čase. K tomuto účelu poslouží inkrement času, v simulaci označen proměnou **pos.** Hodnota časového přírůstku **pos** činí **1/10 000** vteřiny. Nyní je zřejmé, že výpočet bude proveden každou 1/10 000 vteřiny a zbývá určit změnu úhlu natočení nástroje **φ** při daném časovém přírůstku. K tomu využijeme rovnice 7.1

$$\varphi = n \cdot pos \cdot 2 \cdot \pi \tag{7.1}$$

Další předpoklad využitý v simulaci je fakt, že každý zub frézy je v záběru pouze v rozmezí úhlu **0° <= φ <= φ_{max}**., a proto výpočet a vykreslování průběhů sil probíhá pouze v tomto rozmezí úhlů. Hodnota úhlu φ_{max} se vypočítá z rovnice 5.4.

Jak již bylo řečeno, simulace začíná okamžikem, kdy se pomyslně první zub frézy **z_1** nachází v úhlu **φ=0°** a končí po dosažení 360°, přičemž k zapisování a vykreslování hodnot dochází pouze do úhlu **φ_{max}**. Takto to platí pro každý zub frézy, jež se postupně dostávají do záběru. Jednotlivé zuby jsou vůči sobě pootočeny o úhel, v simulaci označen jako „**prevAngle**“, který se vypočítá na základě celkového počtu zubů **z** viz rovnice 7.2

$$prevAngle = \frac{2 \cdot \pi}{z} \tag{7.2}$$

Pokud má fréza například 4 zuby a první zub bude mít na počátku výpočtu úhel φ_1 = 0°, hodna prevAngle = 90° , druhý zub, který se dostane do záběru, je vůči prvnímu pootočen o úhel $\varphi_2 = \varphi_1$ – 1*prevAngle, třetí zub $\varphi_3 = \varphi_1$ – 2*prevAngle, poslední čtvrtý zub $\varphi_4 = \varphi_1$ – 3*prevAngle. Přičemž hodnota úhlu φ_1 se mění v čase od zmíněných 0° do 360°. Můžeme tedy odvodit posloupnost 7.3

$$\varphi_i = \varphi_1 - (i - 1) \cdot prevAngle \tag{7.3}$$

Kde **i** představuje pořadí konkrétního zubu.

Nyní máme jasnou představu o změně úhlu v čase pro jednotlivé zuby frézy a zbývá provést výpočet průběhu tangenciální řezné síly $\mathbf{F_{ci}}$ a zbylých složek, které jsou od této síly odvozeny.

Rozebereme si vzorec pro výpočet tangenciální řezné síly (6.14):

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_c \cdot K_\gamma \cdot K_{Ver} = a_p \cdot h_i \cdot k_c \cdot K_\gamma \cdot K_{Ver} \qquad (6.14)$$

Jedinou proměnou, která se mění s časem a tedy úhlem je jmenovitá tloušťka třísky $\mathbf{h_i}$, s kterou se počítá i při určení specifické řezné síly $\mathbf{k_c}$. Jmenovitá tloušťka třísky se vypočítá pomocí již známého vzorce (5.1)

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \qquad (5.1)$$

Posuv na zub $\mathbf{f_z}$ je také pouze vstupní konstantou, kterou zadáváme do výpočtu, proto jedinou proměnnou v čase zůstává sinus uhlu $\boldsymbol{\varphi}$.

Radiální řeznou sílu $\mathbf{F_{cNi}}$, axiální sílu $\mathbf{F_{ai}}$, horizontální sílu $\mathbf{F_{fi}}$, vertikální sílu $\mathbf{F_{fNi}}$ a výslednou sílu $\mathbf{F_{vi}}$ vypočítáme na základě experimentálně odvozených vztahů uvedených v kapitole 6.

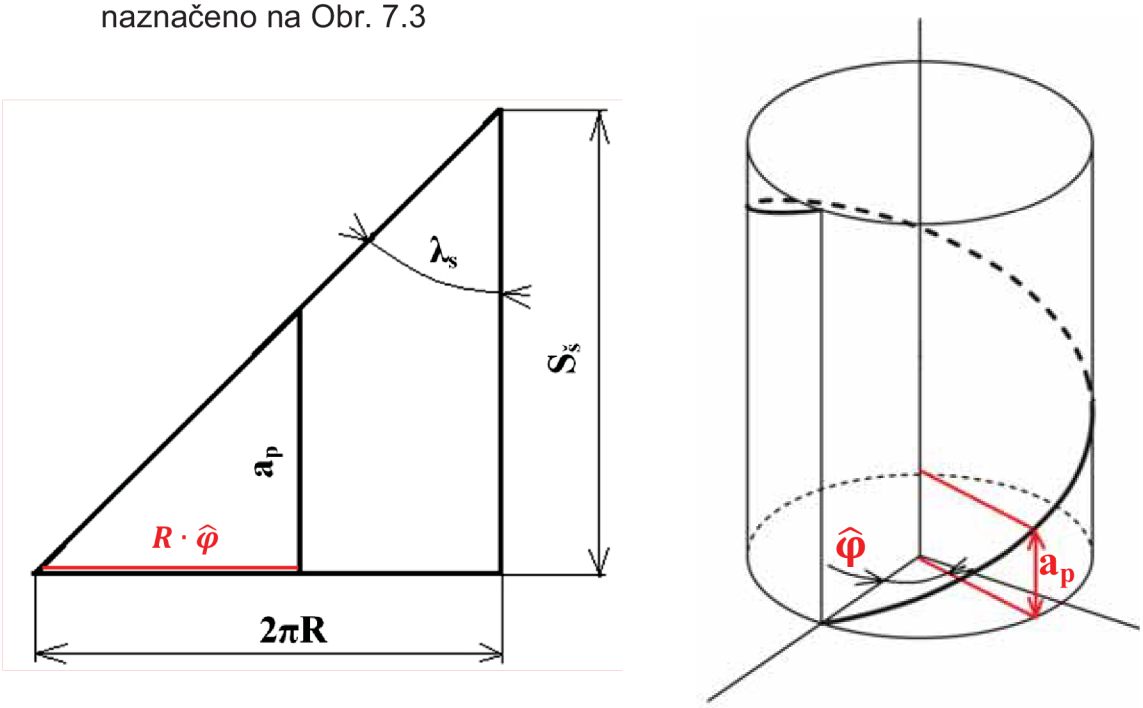
7.3.2 Zuby ve šroubovici

U fréz se šikmými zuby se úhel posuvového pohybu φ_i mění nejen v závislosti na poloze právě řešeného zubu, ale také podél příslušného ostří jak je znázorněno úhly φ_1 a φ_2 na obrázku 5.3. Teorie problematiky průřezu třísky již byla probrána v kapitole 5.1. Po prostudování dané problematiky však zůstává otázka, jak provést výpočet v simulaci, kde nebudeme využívat integrálního počtu. Jaký byl zvolen postup:?

1. Na základě úhlu stoupání šroubovice $\boldsymbol{\lambda_s}$ a obvodu frézy určíme odpovídající výšku stoupání šroubovice $\mathbf{S_š}$ jak je naznačeno na Obr. 7.3
2. Z podobnosti trojúhelníků zjistíme odpovídající délku oblouku $\boldsymbol{R \cdot \hat{\varphi}}$ a následně úhel $\boldsymbol{\varphi}$ v obloukové míře viz rovnice 7.4

$$\frac{S_š}{2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{a_p}{R \cdot \hat{\varphi}} \rightarrow \hat{\varphi} = \frac{a_p \cdot 2 \cdot \pi}{S_š} \tag{7.4}$$

3. Tento úhel, v simulaci označen jako „**maxang**“, představuje okamžik, kdy ostří zubu vlivem otočení nástroje dosáhne hloubky řezu $\mathbf{a_p}$, jak je naznačeno na Obr. 7.3



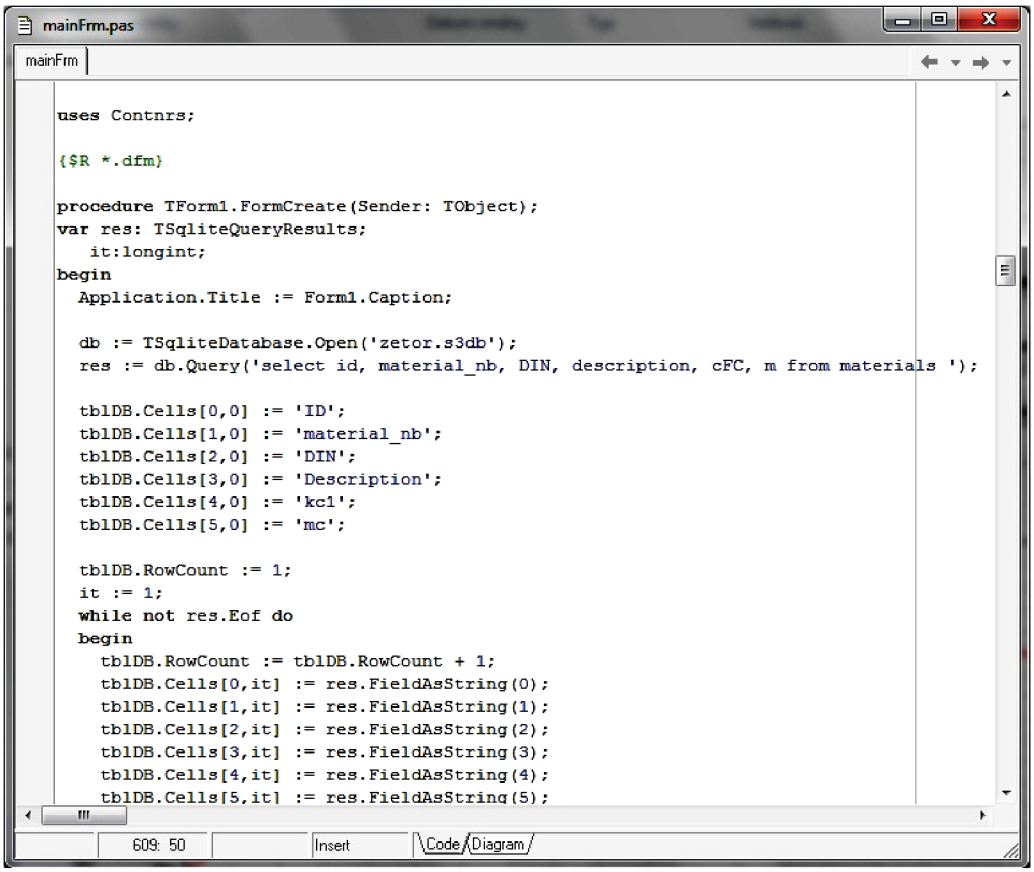
Obr. 7.3 – schéma pro analýzu délky ostří v záběru při frézování se zuby ve šroubovici

4. Vypočítaný úhel „**maxang**“ a hloubku řezu $\mathbf{a_p}$ rozdělíme na dostatečný počet elementů, v tomto případě bylo zvoleno 100 dílků. Neboli:

$$d\hat{\varphi} = \frac{\hat{\varphi}}{100} \qquad da_p = \frac{a_p}{100}$$

5. V posledním kroku provedeme obdobný výpočet průběhů sil jako u přímého ozubení avšak s rozdílem, že výpočet je proveden ve dvou naprogramovaných cyklech. V prvním cyklu se provádí výpočet pro jeden samostatný zub s využitím zjištěných přírůstků da_p a $d\hat{\varphi}$. Tento cyklus si lze zjednodušeně představit jako výpočet pro záběr 100 fréz s přímým ozubením s hloubkou záběru $a_p/100$ a vzájemně fázově pootočených o $\hat{\varphi}/100$. V druhém cyklu se počítá fréza se všemi zuby.

Postup při tvorbě teoretického modelu byl probrán, avšak jednotlivé detailní kroky a popis postupu při samotném programování aplikace není součástí této práce. **Přílohu č.1** této práce tvoří zdrojový kód programu, ukázka Obr. 7.4. Vytvořená aplikace „**MILLING SIMULATOR created by Tom (VUT BRNO)“ příloha č.2** je v elektronické podobě uložena na CD, které je také součástí této práce.




```
uses Contnrs;

{$R *.dfm}

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var res: TSqliteQueryResults;
   it:longint;
begin
  Application.Title := Form1.Caption;

  db := TSqliteDatabase.Open('zetor.s3db');
  res := db.Query('select id, material_nb, DIN, description, cFC, m from materials ');

  tblDB.Cells[0,0] := 'ID';
  tblDB.Cells[1,0] := 'material_nb';
  tblDB.Cells[2,0] := 'DIN';
  tblDB.Cells[3,0] := 'Description';
  tblDB.Cells[4,0] := 'kc1';
  tblDB.Cells[5,0] := 'mc';

  tblDB.RowCount := 1;
  it := 1;
  while not res.Eof do
  begin
    tblDB.RowCount := tblDB.RowCount + 1;
    tblDB.Cells[0,it] := res.FieldAsString(0);
    tblDB.Cells[1,it] := res.FieldAsString(1);
    tblDB.Cells[2,it] := res.FieldAsString(2);
    tblDB.Cells[3,it] := res.FieldAsString(3);
    tblDB.Cells[4,it] := res.FieldAsString(4);
    tblDB.Cells[5,it] := res.FieldAsString(5);
```

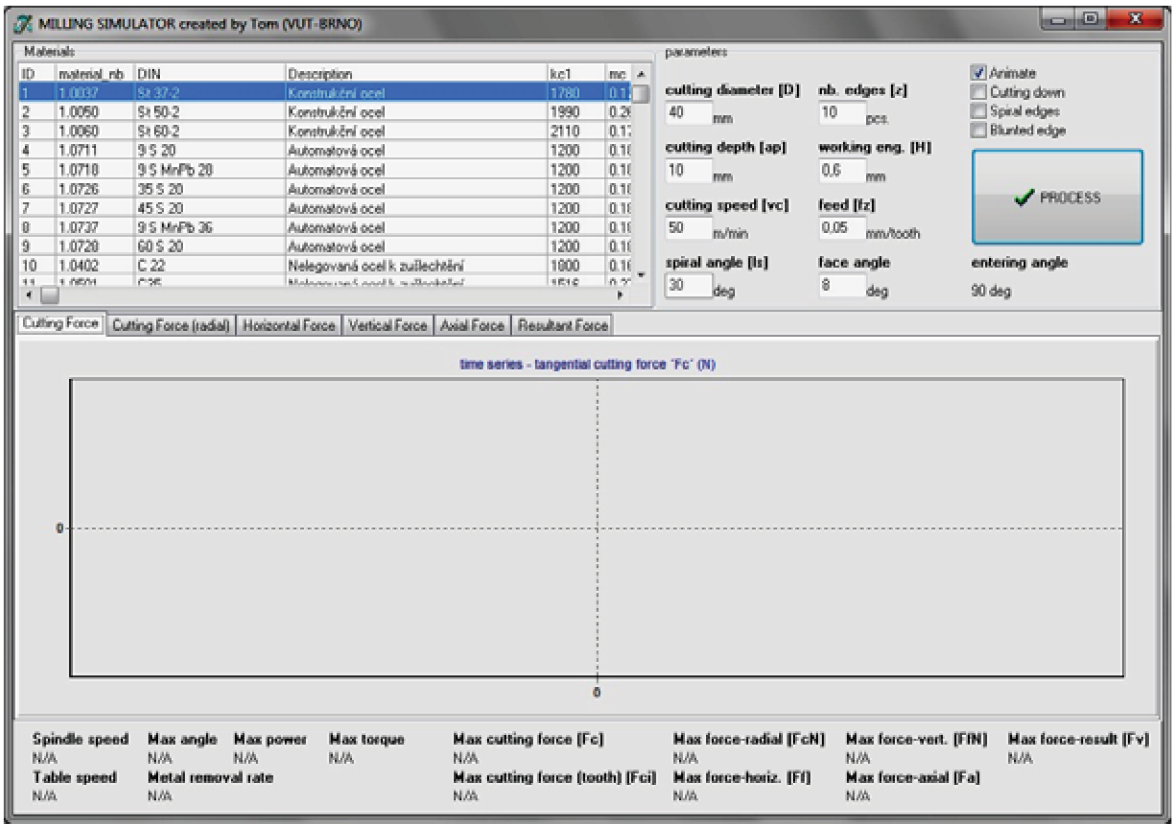
Obr. 7.4 – ukázka zdrojového kódu aplikace

7.4 Prostředí aplikace

Aplikace nese název „**MILLING SIMULATOR created by Tom (VUT BRNO)**“. Spustitelný soubor byl pojmenován **Milling simulator.exe** a tvoří elektronickou přílohu této práce.

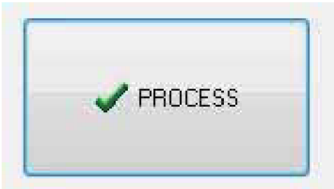
7.4.1 Grafické prostředí aplikace

Grafické prostředí aplikace nejlépe vystihuje obr. 7.5



Obr. 7.5 – okno vytvořené aplikace

Veškeré názvy editačních polí, popisů tlačítek jsou v anglickém jazyce. Horní část okna aplikace je určena pro vstupní data, které jsou rozděleny na oblast „materials“ a „parametrs“. Spodní část okna slouží pro výstupy z aplikace (grafy, výsledné hodnoty). Aplikace se spouští pomocí tlačítka **PROCESS** Obr. 7.6



Obr. 7.6 – tlačítko pro spuštění simulace

7.4.2 Ovládání aplikace

Aplikaci je možno ovládat standardním způsobem jako jsme zvyklí v běžných programech. Základními nástroji pro ovládání aplikace jsou:

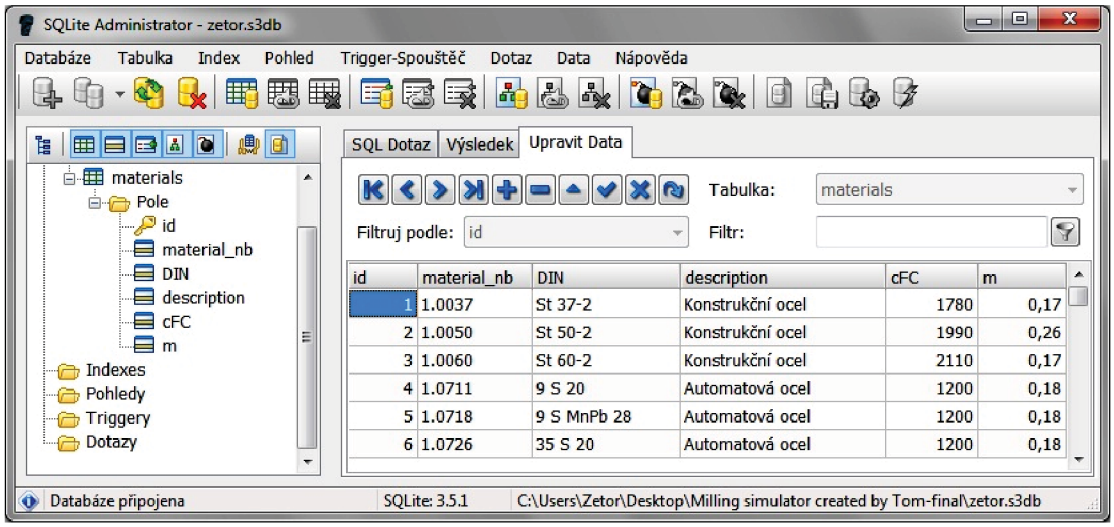
- počítačová myš - levé tlačítko je využito pro potvrzení volby, pravé tlačítko pro ukládání grafů
- počítačová klávesnice je potřebná pro vepisování vstupních hodnot
- tabelátor je upotřeben pro rychlý přechod mezi jednotlivými tlačítky a editačními poli
- šipek na klávesnici, případně kláves PageUp a PageDown je potřebné pro rychlé listování v databázi materiálů

7.5 Vstupní data

Data vstupující do výpočtu jsou materiálové charakteristiky a parametry frézovacího procesu. Nejprve se zaměříme na databázi materiálů.

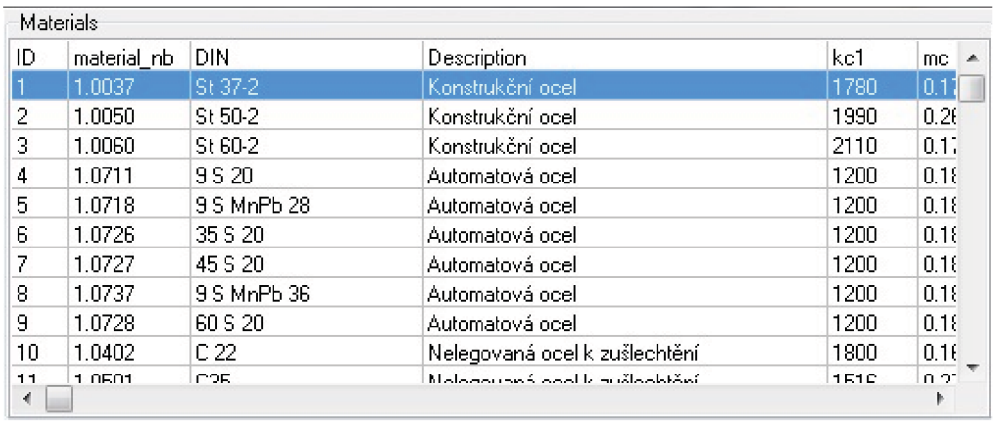
Pro výpočet specifické řezné síly $\mathbf{k_c}$ je nutné znát hodnotu specifické řezné síly $\mathbf{k_{c1.1}}$ (průřez třísky AD=1mm^2) a nárůst **m** tangenty úhlu strmosti ζ, které jsou závislé na materiálu a byly zjištěny pro různé materiály na základě pokusů. Hodnoty těchto materiálových charakteristik byly do aplikace převzaty z GARANT příručka obrábění viz zdroj 7.

Databáze byla vytvořena pomocí volně dostupného relačního databázového systému SQLite, je pouze jako malá knihovna, která se přilinkuje k aplikaci a pomocí jednoduchého rozhraní ji lze začít využívat. Každá databáze je uložena v samostatném souboru .dbm (Database Manager), kde se data ukládají za použití jednoduchého primárního klíče do stejně velkých bloků a používá hašovacích technik pro rychlý přístup k datům při vyhledávání podle klíče. Obr. 7.7



Obr. 7.7 – databázový systém SQLite

Materiálová tabulka importovaná do aplikace má 6 sloupců viz Obr. 7.8. První sloupec slouží pouze jako identifikátor. V druhém a třetím sloupci je označení materiálů dle normy DIN. Čtvrtý sloupec je určen pro popis materiálu. Pátý a šestý sloupec obsahuje hodnoty $\mathbf{k_{c1.1}}$ a **m** potřebné pro výpočet.



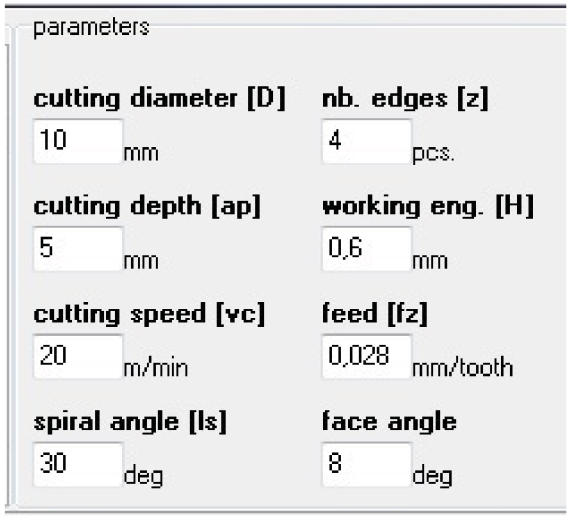
Materials

ID	material_nb	DIN	Description	kc1	mc
1	1.0037	St 37-2	Konstrukční ocel	1780	0.1
2	1.0050	St 50-2	Konstrukční ocel	1990	0.2
3	1.0060	St 60-2	Konstrukční ocel	2110	0.1
4	1.0711	9 S 20	Automatová ocel	1200	0.1
5	1.0718	9 S MnPb 28	Automatová ocel	1200	0.1
6	1.0726	35 S 20	Automatová ocel	1200	0.1
7	1.0727	45 S 20	Automatová ocel	1200	0.1
8	1.0737	9 S MnPb 36	Automatová ocel	1200	0.1
9	1.0728	60 S 20	Automatová ocel	1200	0.1
10	1.0402	C 22	Nelegovaná ocel k zušlechtění	1800	0.1

Obr. 7.8 – tabulka materiálů zobrazená v aplikaci

Druhou částí vstupních dat jsou parametry řezného procesu. Těmito parametry jsou: Obr. 7.9

1. Průměr frézy **D**
2. Počet zubů frézy **z**
3. Hloubka řezu $\mathbf{a_p}$
4. Pracovní záběr **H**
5. Řezná rychlost $\mathbf{v_c}$
6. Posuv na zub $\mathbf{f_z}$
7. Úhel stoupání šroubovice $\boldsymbol{\lambda_s}$
8. Úhel čela $\boldsymbol{\gamma}$



Obr. 7.9 – vstupní parametry

Zadaný úhel čela slouží pro výpočet korekčního parametru $\mathbf{K_\gamma}$, který se vypočítá podle vzorce uvedeného v tabulce 6.2.

Poslední část vstupních parametrů pro výpočet řezné síly při válcovém frézování tvoří zaškrtávací pole „checkboxes“ Obr.7.10

Prvním zaškrtávacím polem je „**Animate**“, toto pole slouží jako brzda výpočtu, aby bylo možné sledovat průběh vykreslení silových účinků, zpomalení se způsobí spuštěním náročného procesu uvnitř aplikace.

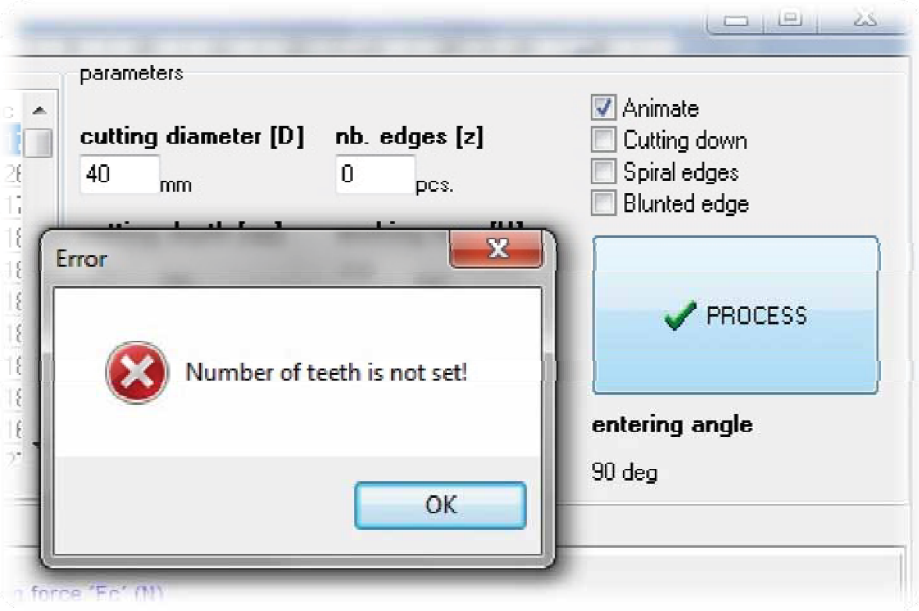
V pořadí druhé zaškrtávací pole „**Cutting down**“ přepíná mezi nesousledným a sousledným způsobem obrábění. Při zaškrtnutí tohoto pole se počítá sousledný způsob frézování.

Třetím polem je „**Spiral edges**“, při zatržení této volby se provádí výpočet pro frézu se zuby ve šroubovici. Současně se aktivuje pole pro zadávání vstupního parametru: úhel stoupání šroubovice (spiral angle [λs])

Posledním zatrhávacím polem je „**Blunted edge**“, zatržením tohoto pole vstupuje do výpočtu opravný koeficient K_{Ver}, který charakterizuje otupení ostří nástroje, jeho hodnota je 1,3.

Obr. 7.10 – Checkboxes

Editační pole pro zadávání hodnot průměru frézy, počtu zubů a řezné rychlosti jsou ošetřeny proti vložení čísla menšího a rovno nule. V případě, že se do těchto polí zadá špatné číslo a spustí se simulace, na obrazovce se objeví varovné okno, které upozorňuje, že hodnota nebyla zadána. Po potvrzení tlačítka „OK“ kurzor automaticky skočí do zmíněného pole a hodnotu je možno přepsat. Ukázka viz Obr.

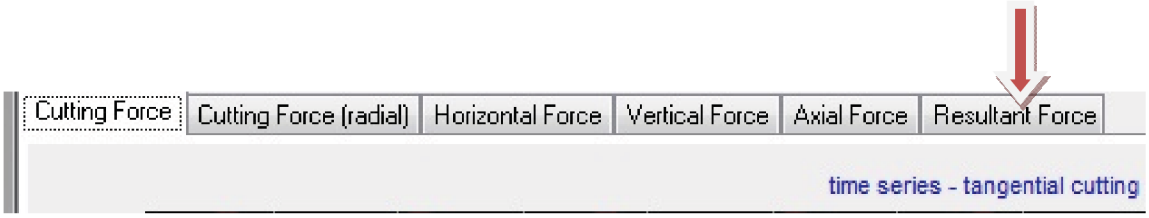


Obr. 7.11 – ukázka špatně zadané hodnoty počtu zubů

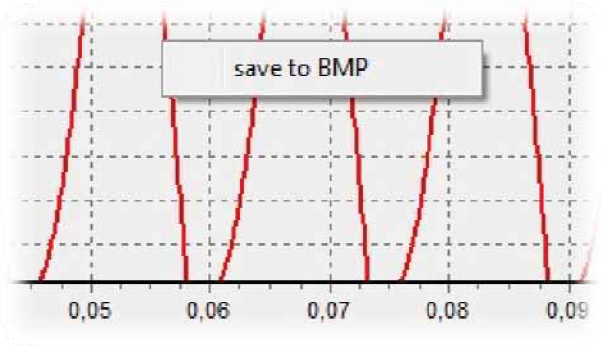
7.6 Výstupní data

Výstupní část aplikace tvoří výsledné průběhy sil a oblast zobrazující výsledky výpočtů.

Souřadný systém byl v aplikaci přizpůsoben experimentální části, viz obrázek 8.4. Jednotlivé grafy je možno zobrazit přepínáním záložek Obr. 7.12. V grafech je umožněno zvětšovat vybranou oblast, toho se docílí podržením levého tlačítka myši (levý horní bod vybrané části grafu) a současným pohybem myši do pravého dolního bodu cílené oblasti. Výsledné grafy lze také ukládat jako obrázek. Této funkce se dosáhne při kliknutí na pravé tlačítko myši. Kurzor ovšem muší ležet v oblasti grafu obr. 7.13



Obr. 7.12 – záložky grafů



Obr. 7.13 – ukládání grafů

Druhou část výstupu tvoří již zmíněné výsledné hodnoty. Všechny výpočty byly provedeny s využitím rovnic z předchozích kapitol. Výsledné hodnoty se zobrazí až po dokončení výpočtu a jsou v absolutních číslech. Těmito hodnotami jsou, viz tabulka 7.1

Název	**Označeno v aplikaci**	**Jednotky**
Otáčky vřetene	Spindle speed	ot/min
Hodnota úhlu φmax	Max angle	rad
Maximální řezný výkon P_c	Max power	kW
Maximální točivý moment M_c	Max torque	Nm
Posuv suportu	Table speed	mm/min
Rychlost úběru materiálu Q	Metal removal rate	cm^3/min
Maximální tangenciální řezná síla F_c	Max cutting force	N
Maximální tangenciální řezná síla na nejen zub F_{ci}	Max cutting force (tooth)	N
Maximální radiální řezná síla F_{cN}	Max force-radial	N
Maximální horizontální síla F_f	Max force-horiz.	N
Maximální vertikální síla F_c	Max force-vert.	N
Maximální axiální síla F_a	Max force-axial	N
Maximální výsledná síla F_v	Max force-result	N

Tab. 7.1 – výstupní data z aplikace

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Hlavním cílem experimentální části je pořízení záznamu silového zatížení stopkového řezného nástroje (válcové frézy) a porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými v simulační aplikaci.

8.1 Použité zařízení

Měření bylo prováděno v dílně Ústavu strojírenské technologie na Fakultě strojního inženýrství v Brně. Veškeré zařízení použité k provedení kompletního experimentu bylo poskytnuto Ústavem strojírenské technologie.

8.1.1 Stroj

Obrábění probíhalo na konzolové vertikální frézce FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530, výrobce O.S.O. spol. s r.o., Olomouc (Obr. 8.1). Podmínky obrábění jsou uvedeny v Tab.8.1

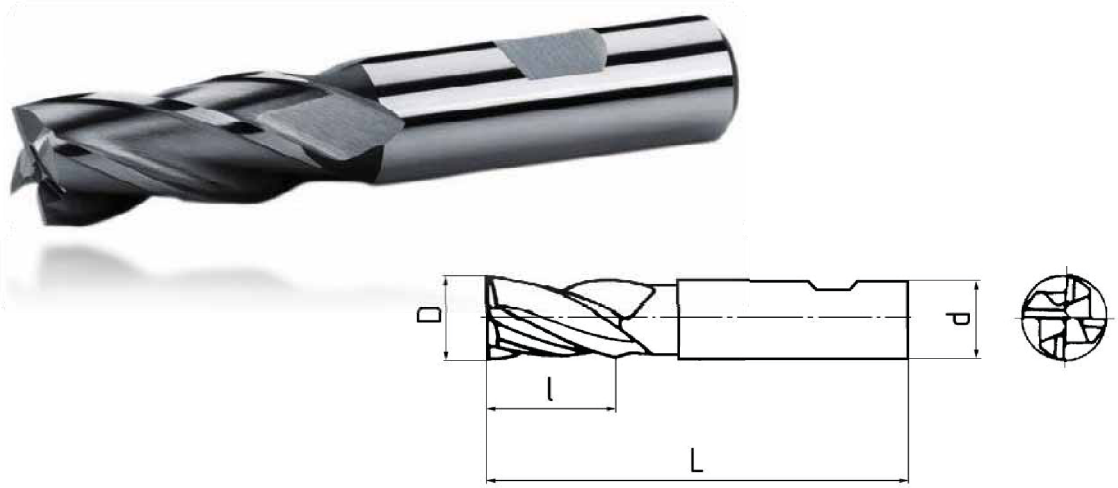
Obr. 8.1 – Frézka FV 25 CNC

Materiál	ocel ČSN 15 260.9
v_c	20 m/min
f_z	0,028 mm/z
a_p	5 mm
H	0,6 mm

Tab. 8.1 – podmínky obrábění

8.1.2 Nástroj

Pro obrábění byla použita fréza firmy ZPS FN kód: 120518, DIN 844, ISO 1641 obr.8.2, její parametry jsou uvedeny v Tab.8.2



Obr. 8.2 – fréza ZPS 120518

Válcová čelní fréza ZPS kód: 120518	
Průměr frézy D [mm]	10
Délka L [mm]	72
Délka břitu l1 [mm]	22
Počet zubů z [-]	4
Úhel šroubovice λs [°]	30
Úhel čela γo [°]	8
Materiál	HSS Co8
Povlak	ne

Tab. 8.2 – parametry frézy

8.1.3 Obrobek

Materiál obrobku obr.8.3 - ocel ČSN 41 5260, DIN 51CrV4

Chemické složení uvedeno v tabulce 8.3

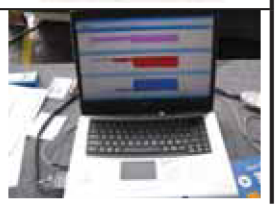
Chemický prvek	Obsah prvku [%]
C	0,47 - 0,55
Mn	0,8 – 1,10
Si	0,15 – 0,35
Cr	0,9 – 1,20
V	0,1 – 0,20
P	0,030
S	0,030

Tab. 8.3 – chemické složení materiálu obrobku

Obr. 8.3 – ukázka obrobku upnutého ve svěráku

8.1.4 Aparatura použitá pro měření silového zatížení řezných nástrojů

Kompletní měřicí aparatura pro měření silového zatížení řezných nástrojů se skládá z několika vzájemně propojených komponent. Základní komponenty jsou rozděleny a znázorněny v Tab.8.4

Název komponenty	Počet kusů	Obrázek
Dynamometr KISTLER typ 9272B	1	
Propojovací kabel (typ 1631C5)	1	
Prodlužovací kabel (typ 1688B5)	1	
Rozdělovací box s BNC konektory (typ 5407A)	1	
BNC – BNC kabel na vstup do zesilovače (typ 1601B2)	3	
Nábojový zesilovač 8-kanálový (typ 5070A11000)	1	
Propojovací kabel k A/D převodníkům (typ 1500A7)	1	
A/D převodník pro notebook (typ 2855A5)	1	
PC-CARD-DAS 16/16, 8 diferenčních vstupů 16 bitů, vzorkovací frekvence 100 kHz	1	
Notebook Acer s vyhodnocovacím softwarem DynoWare 2.4	1	

Tab. 8.4 – *komponenty měřící soustavy*

8.1.4.1 *Dynamometr KISTLER 9257B*

Dynamometr se skládá ze čtyř třísložkových silových snímačů umístěných s vysokým předpětím mezi základní desku a horní desku. Každý senzor obsahuje tři páry křemíkových desek, jedna citlivá na stlačení v ose z a zbylé dvě reagující na smykové složky v ose x a y. Složky řezné síly jsou prakticky měřeny bez posunutí.

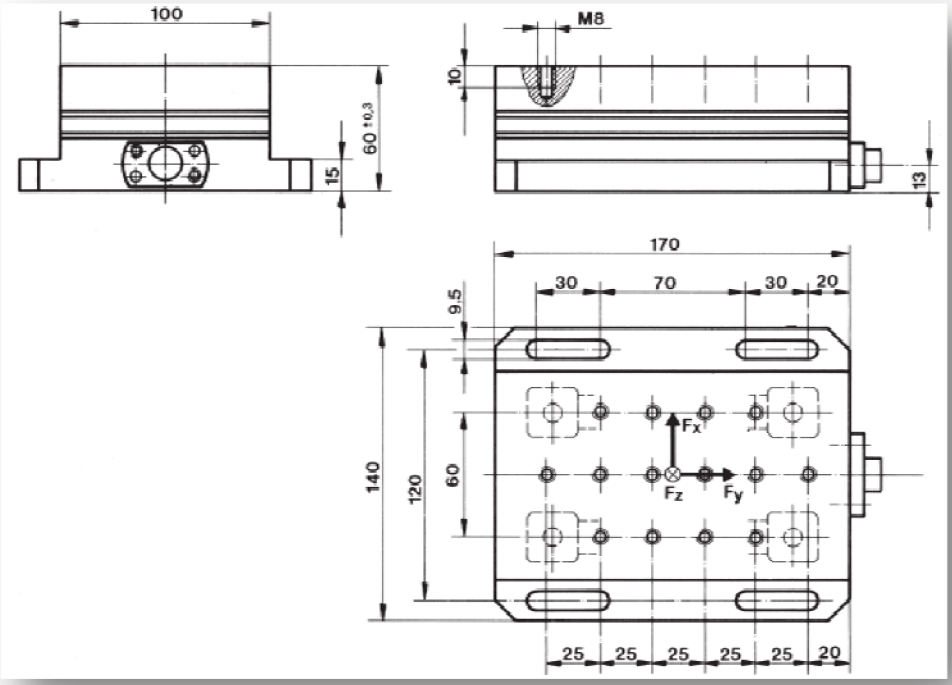
Výstupy ze zabudovaných silových snímačů jsou propojeny uvnitř dynamometru takovým způsobem, aby bylo možno měřit vícesložkové síly a momenty. Osm výstupních signálů je vyvedeno do 9-ti pinového konektoru. Na obrázku 8.4 jsou zobrazeny jednotlivé směry měřených sil, korespondujících s vytvořenou simulací.

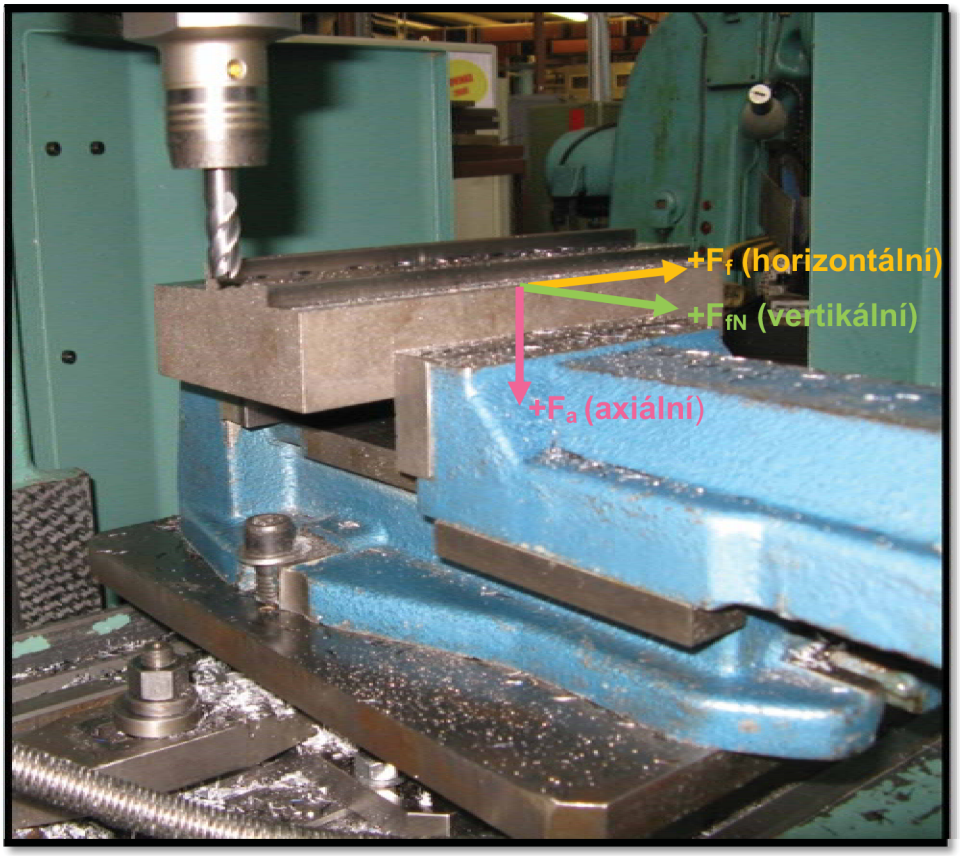
Technická data:

Range	F_x, F_y, F_z	kN	–5 ... 5[1]
F_z for F_x and $F_y \leq 0{,}5\ F_z$	F_z	kN	–5 ... 10[2]
Calibrated partial range 1	F_x, F_y	N	0 ... 500
	F_z	N	0 ... 1 000
Calibrated partial range 2	F_x, F_y	N	0 ... 50
	F_z	N	0 ... 100
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	–7,5/7,5
F_z for F_x and $F_y \leq 0{,}5\ F_z$	F_z	kN	–7,5/15
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈–7,5
	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	>1
	c_z	kN/µm	>2
Natural frequency	$f_n(x, y, z)$	kHz	≈3,5[4]
Natural frequency	$f_n(x, y)$	kHz	≈2,3[4]
(mounted on flanges)	$f_n(z)$	kHz	≈3,5[4]
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈220
Insulation resistance (20 °C)		Ω	$>10^{13}$
Ground insulation		Ω	$>10^{8}$
Protection class EN60529		–	IP67[3]
Weight		kg	7,3
Clamping area	mm	100x170	
Connection		Fischer flange, 9 pol. neg.	

[1] Application of force inside and max. 25 mm above top plate area
[2] Range for turning, application of force at point A
[3] With connecting cable Types 1687B5, 1689B5, 1677A5, 1679A5
[4] Without tool holder Type 9403

Rozměry dynamometru:

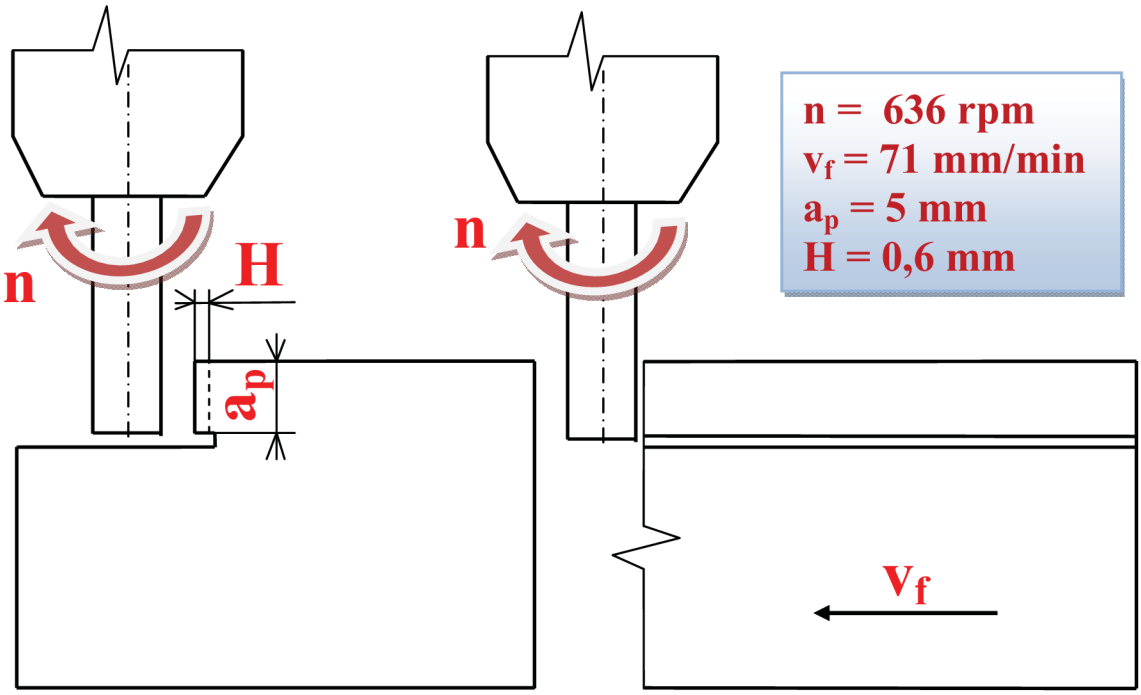




Obr. 8.4 – *směry jednotlivých sil při experimentálním měření*

8.2 Plán experimentu

Experimentální část byla naplánována takovým způsobem, aby bylo možné ověřit velikost silového zatížení nástroje a pozorovat tak proměny jednotlivých silových složek v závislosti na úhlu natočení nástroje v průběhu jedné otáčky nástroje, neboli v rozsahu úhlu {0, 2π} [rad]. Na obr.8.5 je znázorněno schéma procesu frézování.



Obr. 8.5 – *schéma frézovacího procesu*

Plán experimentu byl sestaven následovně:

- Vytvoření řídícího programu stroje Obr 8.6
- Nastavení řezných podmínek z rozsahu doporučeného výrobcem frézy
- Průchod nástroje obrobkem realizován sousledným způsobem a nesousledným způsobem
- Dvě měření za účelem zajištění opakovatelnosti

```
2  BLK FORM 0.2  X+200  Y+50  Z+0
3  TOOL CALL 1 Z S636
4  M3
5  L  X-15 IY+0,6  Z+5 FMAX
6  L  Z-5 F500
7  L  X+215 F71
8  L IY+0,6
9  L  X-15 F71
10 L  Z+5
11 M30
12 END PGM mat MM
```

Obr. 8.6 – *řídící program stroje*

8.2.1 Popis experimentu

Základní parametry experimentálního měření na konzolové vertikální frézce FV 25 CNC byly zvoleny následovně:

- Dynamometr KISTLER 9257B umístění a uchycený základní deskou na pracovní stůl stroje, obrobek upnutý do svěráku, který je uchycen na horní desce dynamometru
- Nastavení maximální vzorkovací frekvence záznamu **f = 6000Hz** , doba záznamu **t = 20s**
- Spuštění vytvořeného řídícího programu, nejprve pro nesousledný způsob frézování, následně pro sousledný způsob frézování, při zvolených řezných podmínkách
- 1 x opakování celého cyklu

ŘEZNÉ PODMÍNKY tab. 8.5

Veličina	Hodnota
Otáčky nástoje n	636 rpm
Řezná rychlost v_c	20 m/min
Posuv na zub f_z	0,028 mm
Posuv stolu v_f	71 mm/min
Hloubka záběru a_p	5 mm
Velikost třísky H	0,6 mm

Tab. 8.5 - řezné podmínky

8.3 Vyhodnocení naměřených dat

Naměřené data obsahující údaje o silovém zatížení řezného nástroje jsou poměrně rozsáhlé, 120 000 zaznamenaných hodnot pro každou osu, zahrnují i data, která jsou pro stanovení výsledného zatížení nadbytečná. Jedná se o data zaznamenaná v průběhu náběhů do materiálu obrobku, neboť neposkytují obraz o silovém zatížení v průběhu odebírání materiálu, ale nutno podotknout, že poskytují informace o zaznamenaném průběhu sil v nezatíženém stavu, které mohou sloužit ke korekci výsledných sil.

Velikost silového zatížení řezného nástroje se v čase mění dle aktuální polohy břitu. Pro komplexní rozbor a zejména pro porovnání hodnot získaných ze simulace je podstatná ta část, ve které zatížení dosahuje nejvyšších hodnot, neboli data odpovídající maximálním průřezům třísky H = 0,6 mm.

Cílem experimentu je analýza jedné otáčky nástroje, tj. zatížení jednotlivých břitů frézy. Přesnost analýzy silového zatížení jednotlivých břitů nástroje je značně ovlivněna nastavenou vzorkovací frekvencí dynamometru. Jen měření o vysoké hodnotě vzorkovací frekvence poskytuje možnost podrobnější analýzy průběhu silového zatížení břitů nástroje. Časový interval **T**, během něhož vykoná nástroj právě jednu otáčku (úhel 0 - 2π) a množství zaznamenaných hodnot o silovém průběhu **X** je možné odvodit ze známých

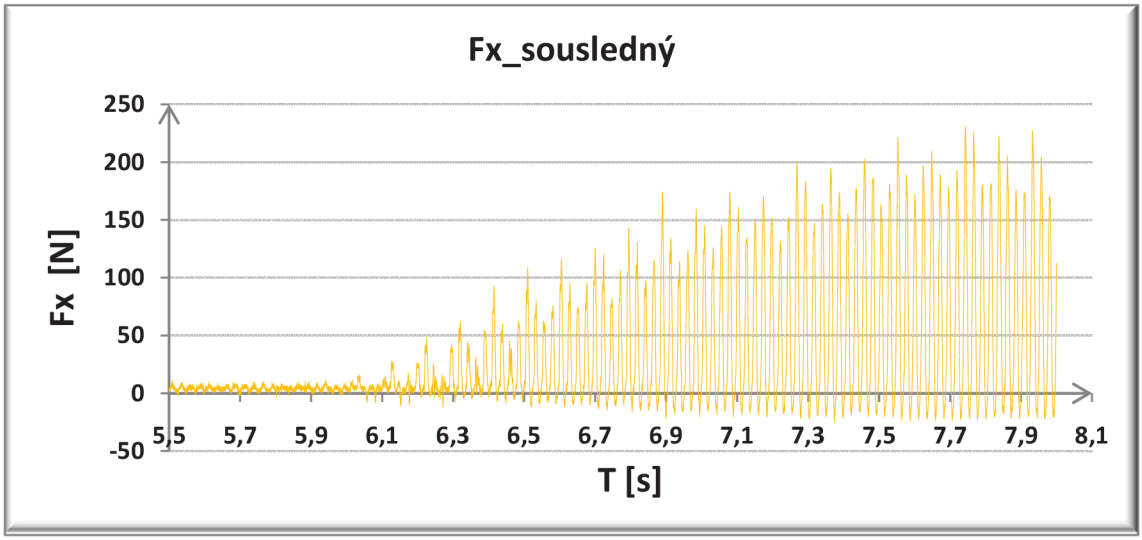
veličin, a to z již zmíněné vzorkovací frekvence a frekvence otáčení nástroje rovnice 8.1 a 8.2

$$T = \frac{60}{n} = \frac{60}{636} = 0{,}0943s \tag{8.1}$$

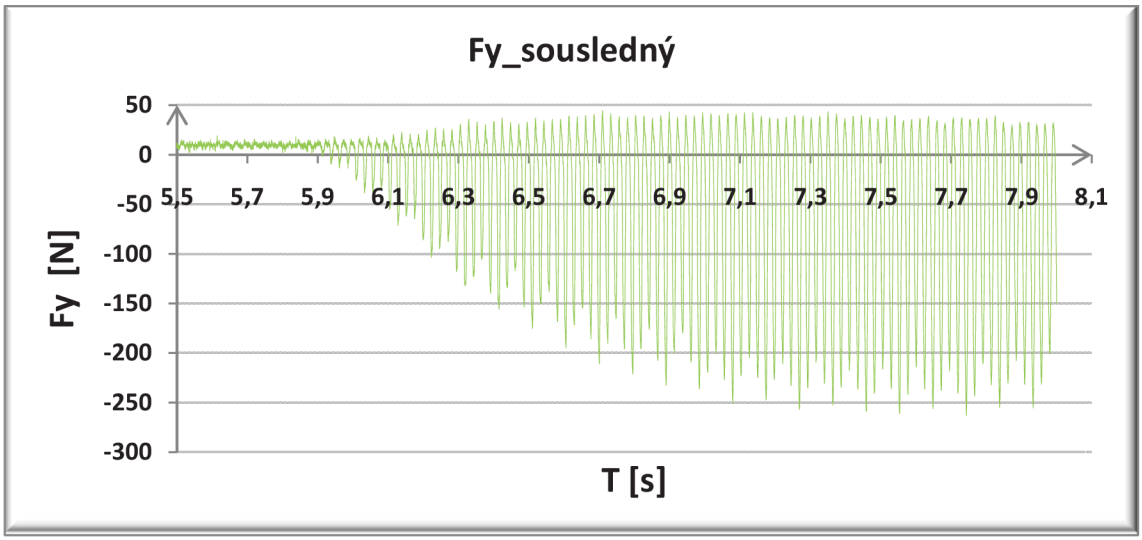
$$X = f \cdot T = 6000 \cdot 0{,}0943 = 566 \tag{8.2}$$

Můžeme konstatovat, že 566 zaznamenaných hodnot v průběhu jedné otáčky nástroje je dostatečné a poskytuje adekvátní informaci o skutečném průběhu. Použitým nástrojem byla čtyřbřitá čelní válcová fréza se zvolenou hloubkou řezu tak, aby byl v záběru vždy pouze jeden břit. V případě použití vícebřitého nástroje by nebyla analýza jedné otáčky nástroje tak jednoznačná, protože by mohlo být v záběru současně více břitů nástroje a došlo by k rozložení silového zatížení mezi současně zabírající břity.

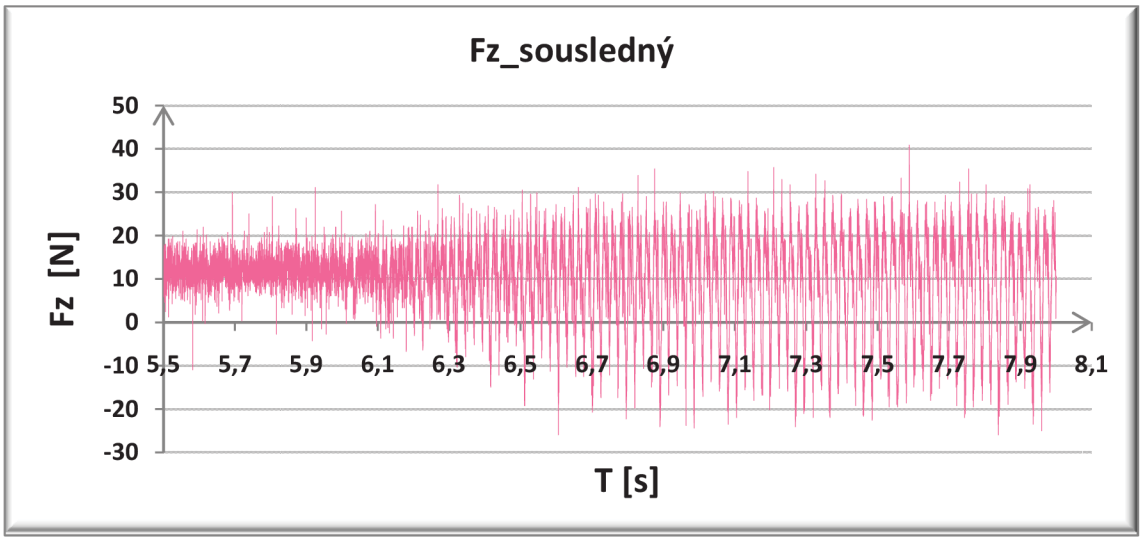
Grafická znázornění průběhů jednotlivých složek silového zatížení v intervalu náběhu frézy do materiálu při sousledném způsobu frézování, jsou zobrazena na Obr. 8.7 až Obr. 8.9



Obr. 8.7 – průběh horizontální silové složky v intervalu náběhu do materiálu



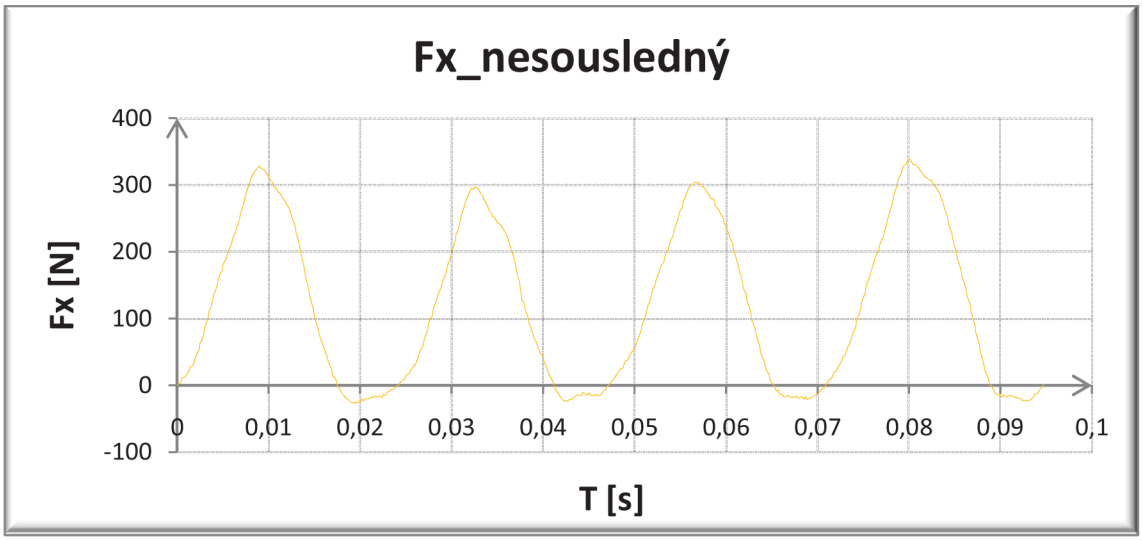
Obr. 8.8 – průběh vertikální silové složky v intervalu náběhu do materiálu



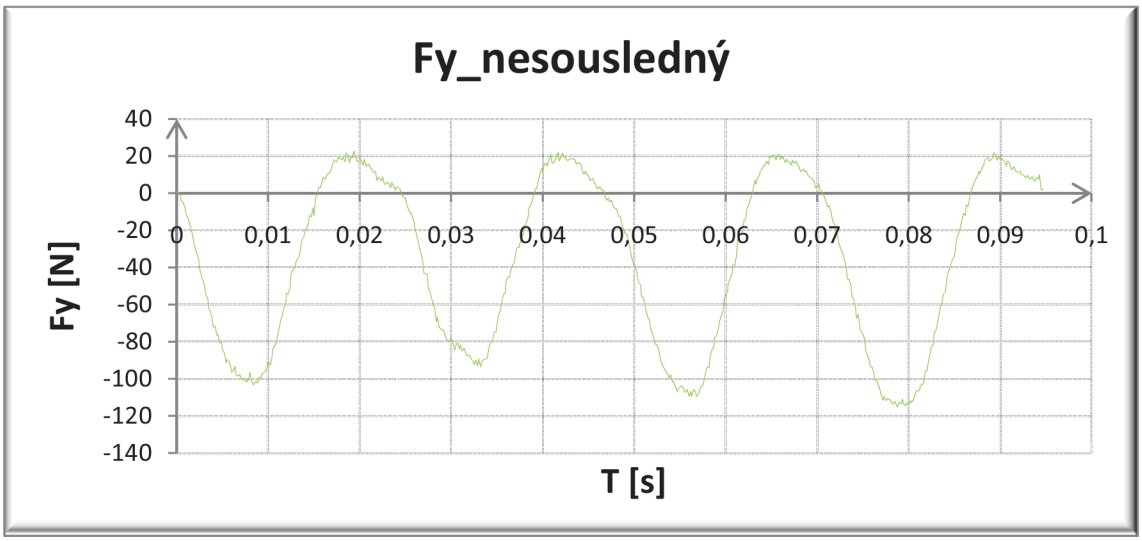
Obr. 8.9 – průběh axiální silové složky v intervalu náběhu do materiálu

Grafická znázornění průběhů jednotlivých složek silového zatížení v intervalu jedné otáčky nástroje při nesousledném i sousledném způsobu frézování jsou zobrazena na Obr. 8.10 až Obr. 8.19

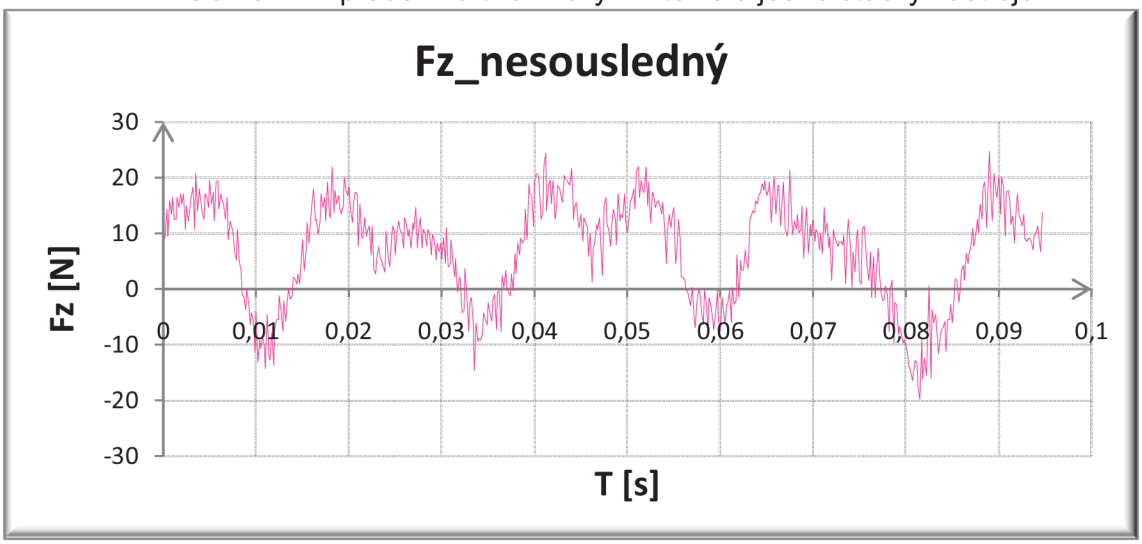
Byl zvolen časový úsek v rozsahu odpovídajícímu maximálnímu záběru třísky. Konkrétně: Počátek T_p = 10,0088s ; konec T_k = 10,1035. Poté byl počátek posunut do T = 0s. Tento krok byl proveden pro možnost lepšího srovnání naměřených a vypočtených silových průběhů.



Obr. 8.10 – průběh horizontální síly v intervalu jedné otáčky nástroje

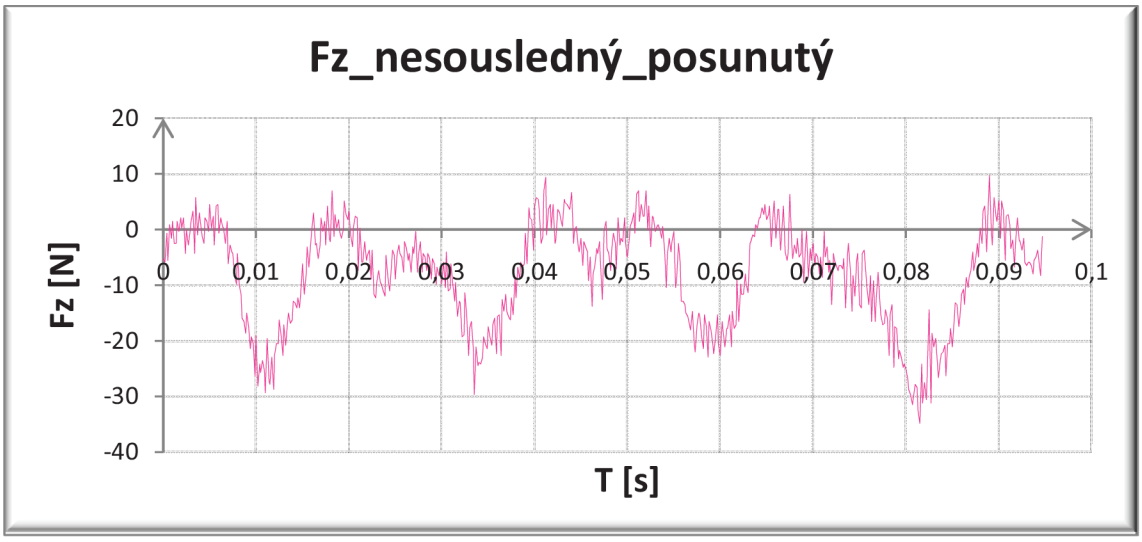


Obr. 8.11 – průběh vertikální síly v intervalu jedné otáčky nástroje

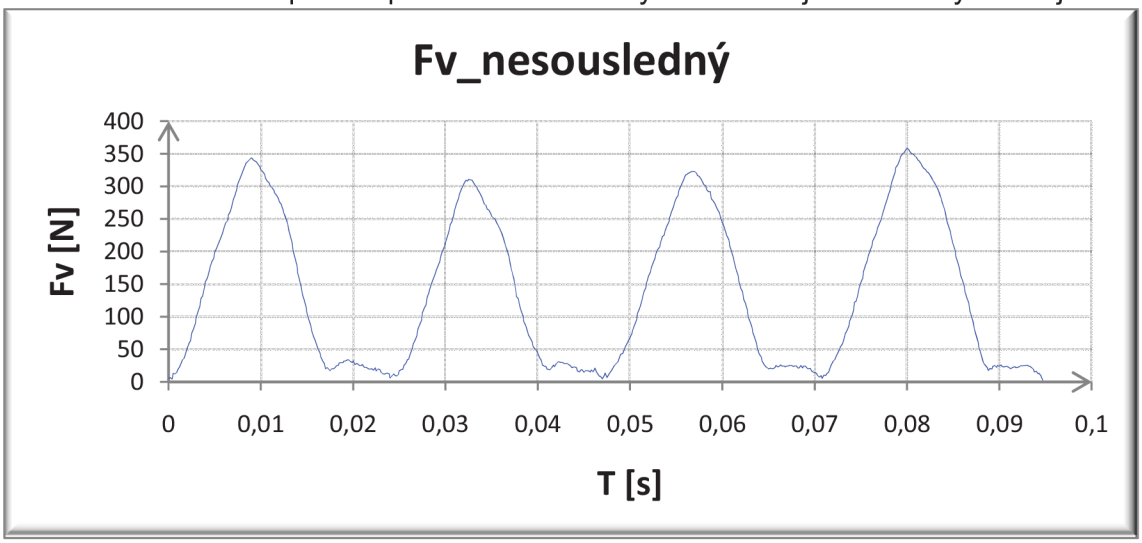


Obr. 8.12 - průběh axiální síly v intervalu jedné otáčky nástroje

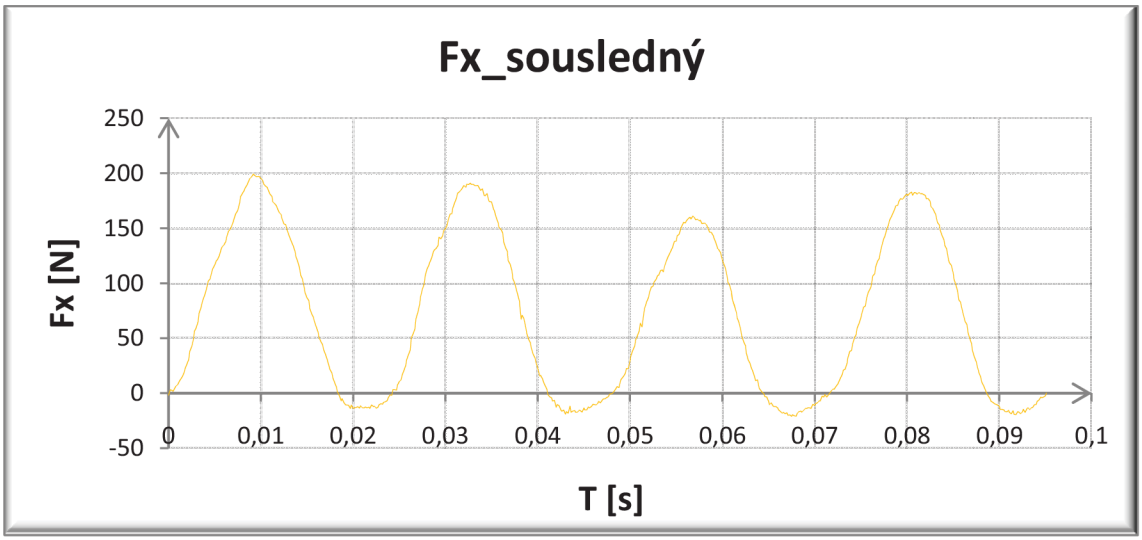
Na Obr. 8.9 je znázorněn průběh axiální síly, u dynamometru označeno jako síla Fz, v oblasti náběhu frézy do materiálu. Je zřejmé, že i v okamžiku, kdy se fréza nachází mimo obrobek, dynamometr zaznamenává hodnotu síly, jejíž střední hodnota se pohybuje kolem +15N, tedy ve směru gravitačního zrychlení. Tato skutečnost byla zřejmě zapříčiněna samotnou váhou svěráku s upnutým obrobkem, který byl připevněn na horní desce dynamometru, v součinnosti s vibracemi frézky. Obdobné situace si můžeme povšimnout i u ostatních složek, viz. Obr. 8.7 a Obr. 8.8. Vzhledem k tomu, že hodnota axiální síly nenabývá vysokých hodnot, byl její průběh posunut o -15N, abychom mohli provést lepší porovnání hodnot. Ostatní průběhy byly ponechány beze změn.



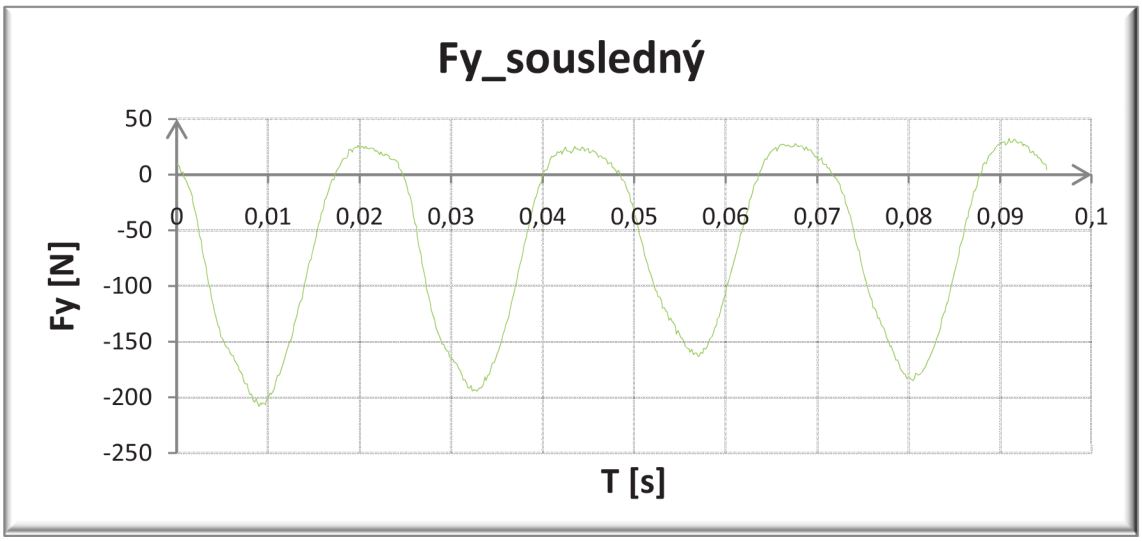
Obr. 8.13 - průběh posunuté axiální síly v intervalu jedné otáčky nástroje



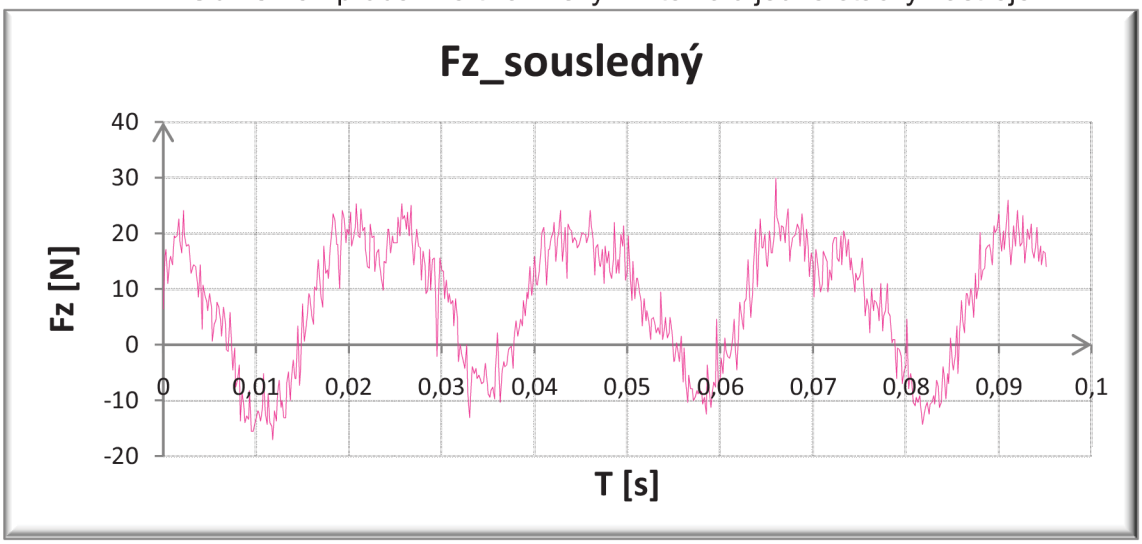
Obr. 8.14 - průběh výsledné síly v intervalu jedné otáčky nástroje



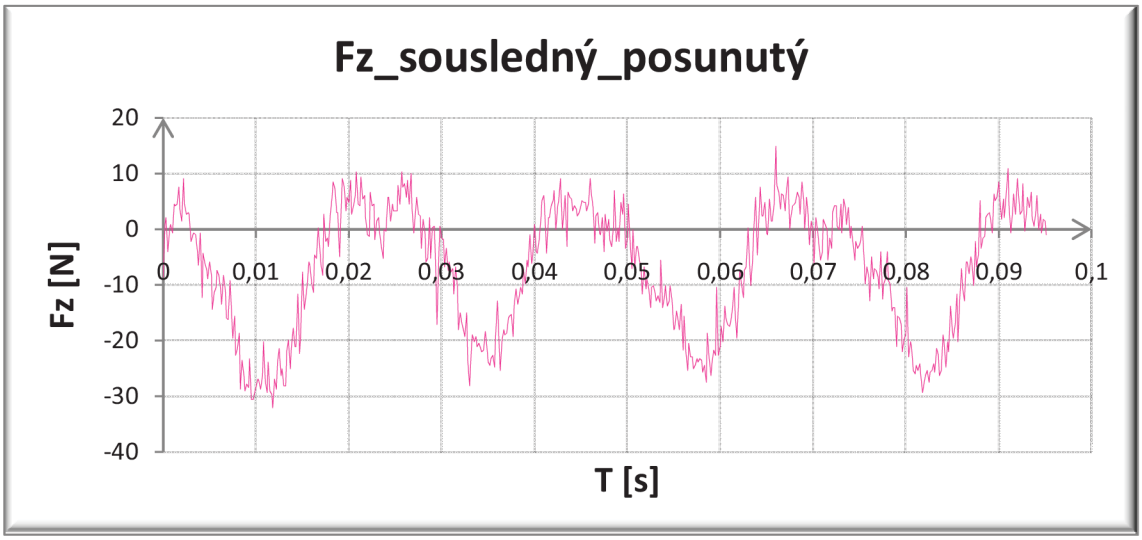
Obr. 8.15 - průběh horizontální síly v intervalu jedné otáčky nástroje



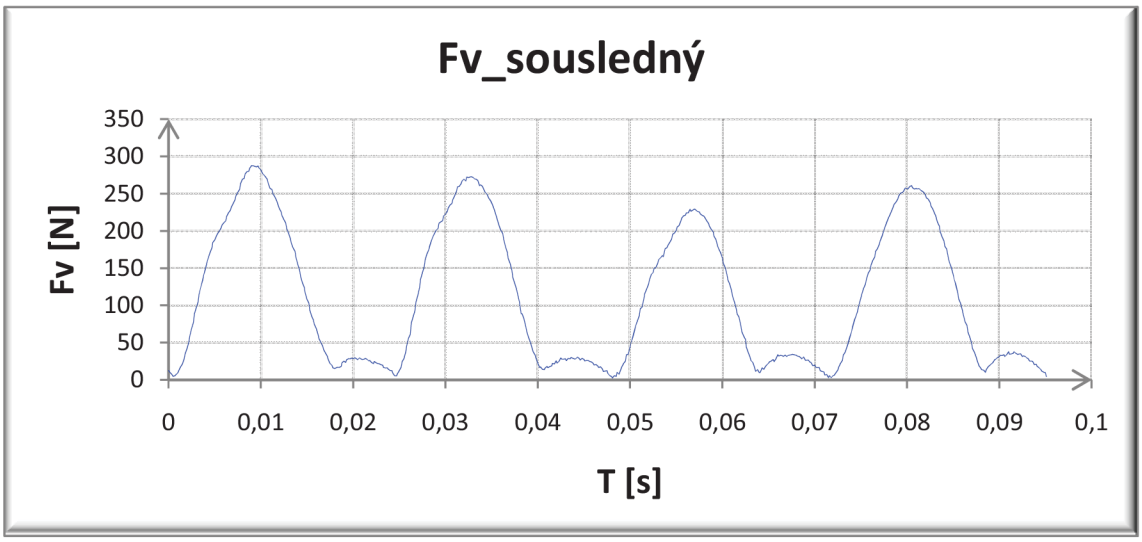
Obr. 8.16 - průběh vertikální síly v intervalu jedné otáčky nástroje



Obr. 8.17 - průběh axiální síly v intervalu jedné otáčky nástroje



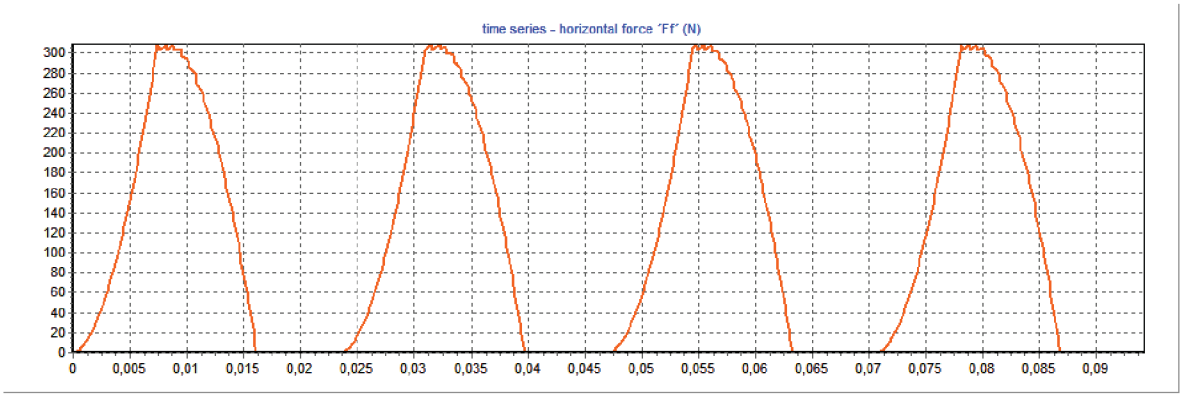
Obr. 8.18 - průběh posunuté axiální síly v intervalu jedné otáčky nástroje



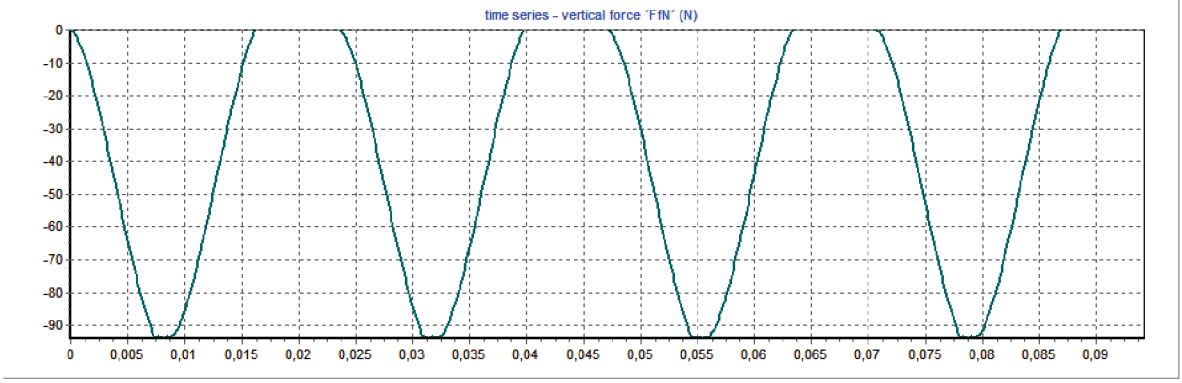
Obr. 8.19 - průběh výsledné síly v intervalu jedné otáčky nástroje

9 PRŮBĚHY SIL VYTVOŘENÉ APLIKACÍ

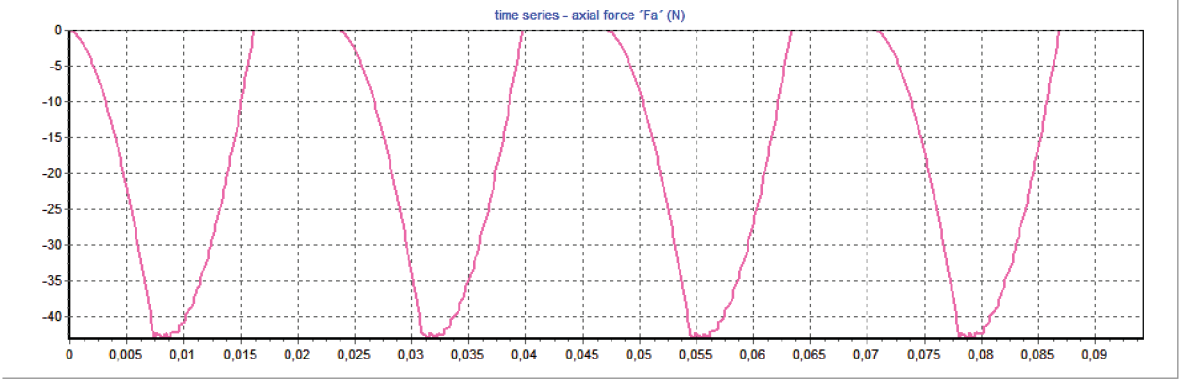
Pro porovnání dat získaných z experimentu s daty z vytvořené aplikace, jsou použity výstupní grafy pro jednotlivé silové složky. Vstupní parametry procesu zadané do aplikace byly totožné s parametry procesu při experimentu. Obr.7.9 Na obrázcích 9.1 až 9.4 jsou zobrazeny průběhy sil při nesousledném frézování, na obrázcích 9.5 až 9.8 při frézování sousledném.



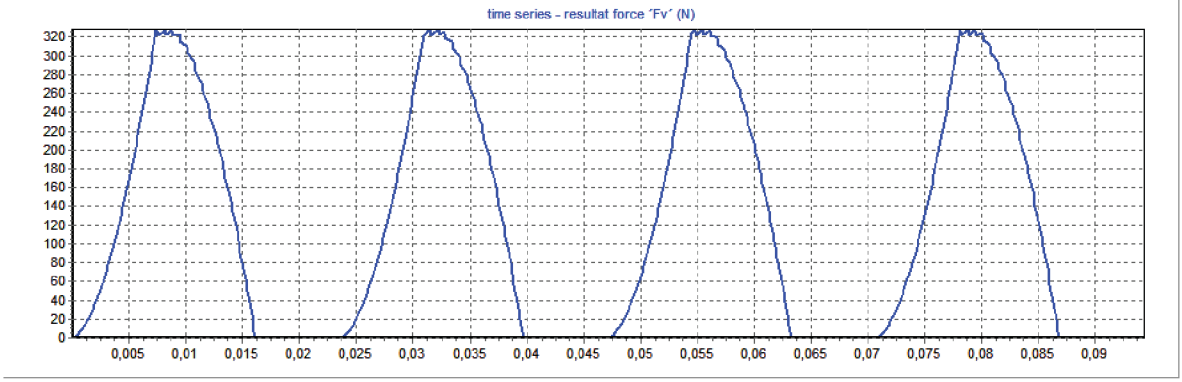
Obr. 9.1 – průběh horizontální síly z vytvořené aplikace-nesousledný způsob



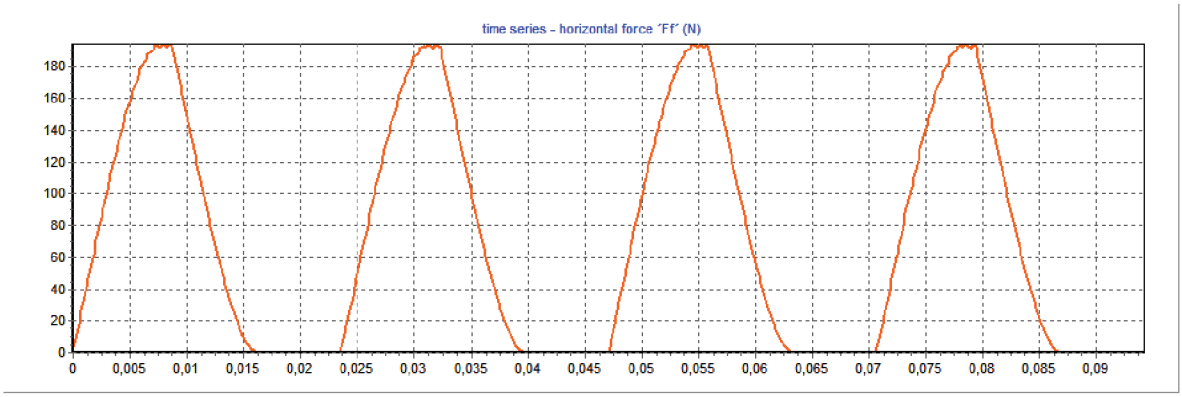
Obr. 9.2 - průběh vertikální síly z vytvořené aplikace-nesousledný způsob



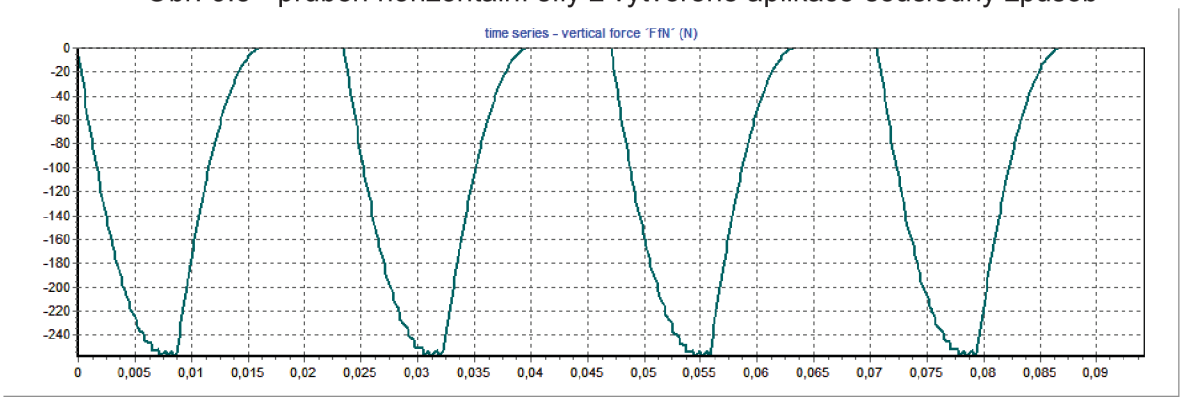
Obr. 9.3 - průběh axiální síly z vytvořené aplikace-nesousledný způsob



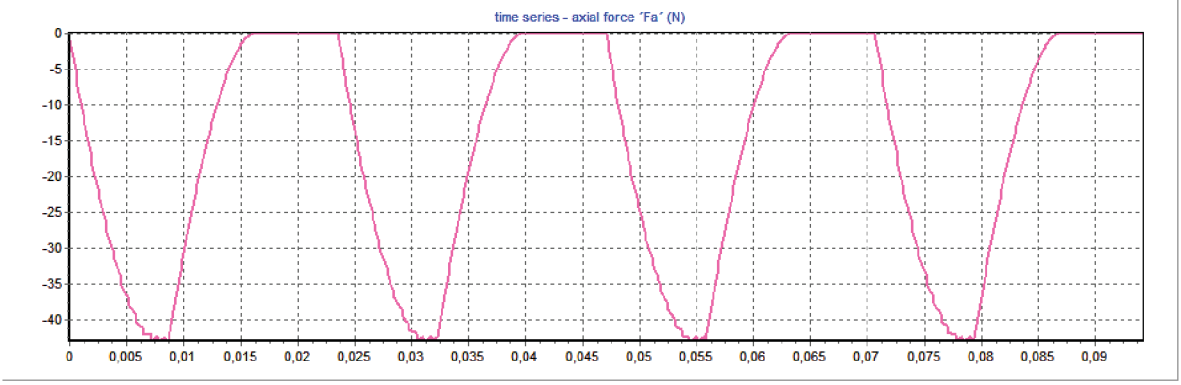
Obr. 9.4 - průběh výsledné síly z vytvořené aplikace-nesousledný způsob



Obr. 9.5 - průběh horizontální síly z vytvořené aplikace-sousledný způsob



Obr. 9.6 - průběh vertikální síly z vytvořené aplikace-sousledný způsob



Obr. 9.7 - průběh axiální síly z vytvořené aplikace-sousledný způsob

Obr. 9.8 - průběh výsledné síly z vytvořené aplikace-sousledný způsob

10 DISKUSE

Mechanismus tvorby třísky je velice složitá záležitost. K oddělení třísky dochází při vysoké rychlosti, kdy obráběný materiál prochází rychle mezním stavem pružné napjatosti a plastické deformace. Dílčí průběhy a rozsahy plastických deformací záleží na schopnosti skluzového pohybu dislokací při působení smykových napětí, které je ovlivněno zejména počtem skluzových systémů, obecné manévrovatelnosti dislokací. Dá se proto předpokládat, že se skutečný průběh experimentálně naměřených sil bude částečně odlišovat od teoretického modelu, který obsahuje řadu zjednodušujících předpokladů, například:

- materiál se při obrábění chová ideálně plasticky
- materiál se při deformaci nezpevňuje
- volný povrch třísky a obrobku není zatížen
- model je dokonale tuhý, aj.

Další možnou příčinou odlišností může být nerovnoměrnost rozložení normálného a smykového napětí na čele nástroje, vliv opotřebení frézy, který je nejvíce patrný právě u nástrojů s břity ve šroubovici, ale také vznik tepla při obrábění, které negativně působí na řezné vlastnosti nástroje a ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu, i tření na čele a hřbetě nástroje. Také bychom neměli zapomenout na vliv poloměru špičky nástroje a kmitání celé soustavy, které může vynucené, vlastní, případně samobuzené.

Ovlivňujících parametrů je značné množství, ale přesto se pokusme porovnat výsledné data.

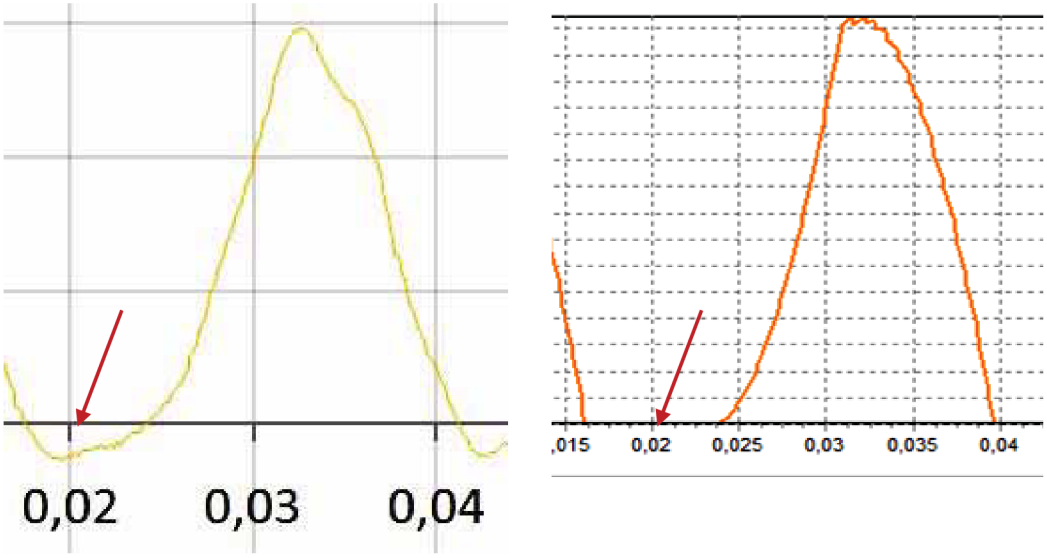
Jako první můžeme srovnat dobu, za kterou se nástroj jedenkrát otočí a dobu, po kterou je v záběru pouze jeden břit nástroje. K tomuto účelu porovnejme například graf na obrázku 8.10 s grafem na obrázku 9.1. Časy otočení nástroje o 360° jsou identické, jejich hodnota činí T = 0,094s. Také doba, po kterou je jeden břit v záběru, je téměř totožná, její hodnota činí T = 0,016s.

Nyní se zaměřme na samotné průběhy jednotlivých složek a jejich maximální hodnoty. V tabulce 10.1 jsou zapsány maximální absolutní hodnoty sil naměřených a vypočítaných.

	nesousledné frézování		sousledné frézování	
	experiment	aplikace	experiment	aplikace
horizontální síla F_f	316 N	310 N	182 N	194 N
vertikální síla F_{fN}	104 N	94 N	186 N	258 N
axiální síla F_a	30 N	43 N	28 N	43 N
výsledná síla F_v	331 N	328 N	260 N	328 N

Tab. 10.1 – tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

Po porovnání všech grafů můžeme konstatovat, že se tvary průběhů experimentálně naměřených silových složek částečně shodují s průběhy vytvořenými aplikací. Rozdíly nalezneme zejména v oblastech počátku záběru, kdy dle teoretického rozboru síly nabývají pouze nulových hodnot. Rozdíly jsou znázorněny na obrázku 10.1



Obr. 10.1 – porovnání oblasti náběhu zubu do materiálu:naměřený průběh, nasimulovaný průběh

Při porovnání hodnot maximálních sil uvedených v tabulce 10.1 lze říci, že u nesousledného způsobu obrábění jsme dosáhli rámcově shodných hodnot. U sousledného způsobu frézování se výrazněji odlišuje hodnota vertikální síly, tento rozdíl je s největší pravděpodobností způsoben méně energeticky náročným řezným procesem při souhlasném směru pohybu obrobku a nástroje. S touto skutečnosti nebylo v teoretickém modelu počítáno.

S přihlédnutím na zjednodušující předpoklady a problematiku mechanismu tvorby třísky, včetně vlivů působících při experimentálním měření, můžeme považovat vytvořenou aplikaci za věrohodnou a užitečnou.

Návrhy na pokračování v řešení dané problematiky:

- rozšíření databáze materiálů
- zahrnutí proměnlivého vlivu opotřebení nástroje s časem
- podrobnější analýza vlivu geometrie ostří nástroje
- simulaci průběhu celého řezného procesu včetně náběhu a přeběhu nástroje
- výpočet strojního času
- rozšíření o grafickou simulaci průběhu
- teoretická možnost využití metody konečných prvků
- rozšíření práce o další experimentální měření a na základě získaných poznatků upravení výpočtového modelu aplikace

ZÁVĚR

Cíle práce bylo dosaženo. Byla vytvořena aplikace, která simuluje průběh sil při frézování válcovou frézou. Po rozboru problematiky procesu frézování a tvorby třísky, byl vytvořen teoretický model aplikace. V průběhu tvorby tohoto modelu došlo k rozhodnutí, rozšířit simulaci o frézování nástrojem se zuby ve šroubovici. Po vytvoření modelu se přistoupilo k samotnému programování aplikace. K tomuto účelu bylo využito programovacího nástroje DELPHI 7.

Vstupní data vytvořené aplikace tvoří databáze 149 materiálů, značených dle normy DIN, která byla vytvořena pomocí relačního databázového systému SQLite. Dalšími vstupy do databáze jsou: průměr frézy, počet zubů, řezná hloubka, pracovní záběr, řezná rychlost, posuvu na zub, úhel stoupání šroubovice a úhel čela nástroje. Na základě vstupních údajů aplikace počítá průběhy sil, které vykresluje do grafů. Grafy je možno následně ukládat jako obrázek. Aplikace také vypisuje hodnoty: otáčky vřetene, potřebný výkon stroje, točivý moment, rychlost posuvu stolu, rychlost úběru materiálu a zejména maximální hodnoty všech silových složek.

Pro porovnání nasimulovaných hodnot bylo provedeno experimentální měření. Měření proběhlo na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně. Strojem byla konzolová vertikální frézka FV 25 CNC, nástroj - válcová fréza se zuby ve šroubovici od firmy ZPS o průměru 10 mm a úhlu stoupání šroubovice 30°, obrobek – ocel ČSN 41 5260 (DIN 51CrV4). K zaznamenání silových účinků byla využita měřící soustava, kde hlavní část tvoří dynamometr KISTLER 9272B.

Porovnáním naměřených a vypočítaných hodnot se došlo k závěru, že s přihlédnutím na danou problematiku a všem působícím vlivům, vytvořená aplikace podává výsledky, které se přibližují reálnému procesu. Aplikace proto vybízí k možnosti dalšího rozšiřování funkcí a korekci výsledků na základě dalších experimentálních měření.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

2. CANTÚ, M. *Myslíme v jazyku Delphi 7 kniha zkušeného programátora.* 1. vyd. PRAHA: Grada Publishing a.s., 2003. 580s. ISBN 80-247-0694-6

3. CHLADIL, J. a MOUKA, E. *Teorie obrábění. 3. vyd.* BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, 1989. 193s. ISBN 80-214-1008-6

4. ČILLIKOVÁ, M. a NESLUŠAN, M. *Teória obrábania.* 1. vyd. Žilina: Edis ŽU Žilana, 2007. 167s. ISBN 80-8073-586-7

5. Delphi - historie a vývoj. [online]. [cit. 2010-05-04]. URL:< http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003p/xskriva1.index.htm >

6. FOREJT, M. a PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje.* 1. vyd. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225s. ISBN 80-214-2374-9

7. GARANT Příručka pro třískové obrábění. [online]. Dostupné na World Wide Web: < http://www.hoffmann-group.com/webcontent.omeco?FOLDERID=567>

8. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM publishing, s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

9. HUMÁR, A. *Technologie I.* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia v oboru "Strojírenská technologie" VUT v Brne, Fakulta strojního inženýrství,2003. 138 s. URL: <http://www.ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory>.

10. Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland. *Force – FDM.* [online]. [cit. 8. května 2010]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.kistler.com/sk_sk-sk/13_Productfinder/3000.9257B.7/3-Component-Dynamometer-5-kN.html>

11. Medo Tools. [online]. [cit.2010-05-04]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.meedotools.com/millingcutters.html>

12. PÍSEK, S. *Delphi – praktické příklady podrobný průvodce začínajícího uživatele.* 1. vyd. PRAHA: Grada Publishing a.s., 2002. 220s. ISBN 80-247-0323-8

13. PÍŠKA, M.; ZOUHAR, J. Napjatostně-deformační analýza moderních HSS fréz, *MM – Průmyslové spektrum*, 3/2008, ISSN 1212-2572, s.64-66.

14. *Snímace tlaku.* [online]. [cit. 2010-05-04]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/automa/2007/au100723.pdf>.

15. ZEMČÍK, O. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. 1. vyd. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193s. ISBN 80-214-2336-6

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A_{Di}	mm	jmenovitý průřez třísky
A_{Dmax}	mm	maximální velikost jmenovitého průřezu třísky
a_p	mm	hloubka řezu
D	mm	průměr frézy
dl_s	mm	přírůstek délky ostří
d_x	mm	přírůstek v ose x
d_y	mm	přírůstek v ose y
d_z	mm	přírůstek v ose z
F	-	označení konce záběru
F	Hz	frekvence záznamu
F_{ai}	N	jmenovitá axiální síla
F_{ci}	N	jmenovitá tangenciální řezná síla
F_{cNi}	N	jmenovitá radiální řezná síla
F_{fi}	N	jmenovitá horizontální síla
F_{fNi}	N	jmenovitá vertikální síla
f_n	mm	posuv na otáčku
F_{vi}	N	jmenovitá výsledná řezná síla
f_z	mm	posuv na zub
H	mm	pracovní záběr
h_i	mm	jmenovitá tloušťka třísky
h_{max}	mm	maximální tloušťka třísky
h_{max}	mm	maximální tloušťka třísky
I	-	zub frézy (pořadí)
K	-	poměr mezi radiální a tangenciální řeznou silou
k_c	N/mm^2	měrná řezná síla
$k_{c1.1}$	N/mm^2	specifická řezná síla při průřezu třísky $1mm^2$
K_{Ver}	-	korekční parametr opotřebení
K_γ	-	korekční parametr úhlu čela
L	mm	délka frézy
l_1	mm	délka břitu frézy
M	-	nárůst tangenty uhlu strmosti
maxang	mm	úhel pootočení frézy do okamžiku, kdy ostří dosáhne hloubky řezu
N	min^{-1}	otáčky nástroje
P_f	-	boční rovina
Pos	-	hodnota přírůstku času ve vytvořené aplikaci
P_p	-	zadní rovina
P_r	-	základní rovina
prevAngle	-	vzájemné pootočení jednotlivých zubů
P_s	-	rovina hlavního ostří
P_s'	-	rovina vedlejšího ostří
R	mm	poloměr frézy
S	-	označení počátku záběru
SK	°	slinutý karbid
$S_š$	mm	stoupání šroubovice

T	s	doba záznamu
T	s	čas jedné otočky nástroje
v_c	m/min	řezná rychlost
X	-	množství zaznamenaných hodnot
Z	-	počet zubů (břitů) nástroje
α_f	°	boční úhel hřbetu
α_g	°	úhel největšího spádu břitu
α_n	°	normálný úhel hřbetu
α_o	°	ortogonální úhel hřbetu
α_p	°	zadní úhel hřbetu
β_f	°	boční úhel břitu
β_g	°	úhel největšího spádu břitu
β_n	°	normálný úhel břitu
β_o	°	ortogonální úhel břitu
β_p	°	zadní úhel břitu
γ_f	°	boční úhel čela
γ_g	°	úhel největšího spádu čela
γ_n	°	normálný úhel čela
γ_o	°	ortogonální úhel čela
γ_p	°	zadní úhel čela
ε_r	°	úhel špičky nástroje
κ_r	°	úhel nastavení hlavního ostří
κ_r'	°	úhel nastavení vedlejšího ostří
λ_s	°	úhel sklonu hlavního ostří
ψ_r	°	doplňkový úhel hlavního ostří
γ	°	úhel čela
φ_{max}		maximální úhel posuvového pohybu
φ_ι	°	úhel posuvového pohybu
ζ	°	úhel strmosti závislý na materiálu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 zdrojový kód vytvořené aplikace

Příloha č.2 aplikace Milling Simulator created by Tom (VUT BRNO) - CD