

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

**Zvýšení efektivity obrábění na CNC strojích**

2017

**Bc. Michal Stejskal**

# Prohlášení

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

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

V Praze dne do 10.7.2017

.....

podpis

## **Poděkování**

Úvodem bych rád poděkoval především svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Vavruškovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. za vedení, odborné konzultace a podnětné připomínky při jejím vypracování. Děkuji i zaměstnancům výzkumnému centra RCMT za odborné konzultace a cenné rady.

Chtěl bych také poděkovat svým rodičům a přítelkyni za podporu a trpělivost, se kterou mě podporovali při mém studiu.



## Anotace

Autor:	Bc. Michal Stejskal
Název DP:	Zvýšení efektivity obrábění na CNC strojích
Rozsah práce:	109 stránek, 80 obrázků, 8 tabulek, 10 příloh
Školní rok vyhotovení:	2017
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Výrobní stroje a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Konzultant DP:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Klíčová slova:	Optimalizace, NC kód, dokončovací obrábění, postprocessor, řízení otáček vřetene
Anotace:	<p>Tato práce mapuje současný stav optimalizací obráběcího procesu v oblastech CAM, nadstavbách CAM, řídicích systémech a odborných článcích se zaměřením na dodržování technologických parametrů. Na základě rešerše problematiky jsou navrženy vlastní optimalizační funkce pro dokončovací obrábění. Jsou provedeny návrhy možných variant umístění optimalizační funkce v řetězci CAM, postprocessor, řídicí systém. Následuje realizace optimalizační funkce pro tříosé a víceosé obrábění se začleněním funkce do postprocesoru. Závěrem je optimalizační funkce ověřena testem obrábění na CNC stroji.</p>



## **Annotation**

Autor:	Bc. Michal Stejskal
Title of thesis:	Increased machining efficiency on CNC machines
Extent:	109 pages, 80 figures, 8 tables, 10 attachments
Academic year:	2017
University:	CTU –Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Consultant:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU - Faculty of Mechanical Engineering
Key words:	Optimization, NC code, finishing machining, postprocessor, spindle speed control
Annotation:	<p>This thesis shows the current situation of optimization of CAM machining process, CAM extensions, control systems and scientific articles with focus on compliance with technological parameters. Based on the research, optimization functions for finishing machining are proposed. Designs of the proposed relevant variants of the optimization function are placed in chain: CAM, postprocessor, control system. Thereafter follows a realization of the optimization function for three-axis and multi-axis machining with the integration of the function to the postprocessor. Finally, the optimization function is verified by the machining on a CNC machine.</p>



# Obsah

<b>Přehled použitých veličin, jednotek a symbolů .....</b>	<b>8</b>
<b>Přehled použitých zkratk.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Úvod a cíl práce.....</b>	<b>13</b>
<b>2. Přehled optimalizací pro obráběcí operace .....</b>	<b>14</b>
2.1 Oblast zaměření.....	14
2.1.1 Optimalizace v CAM softwarech .....	14
2.1.2 Optimalizace v nadstavbě CAM softwaru.....	19
2.1.3 Optimalizační funkce v řídicím systému.....	22
2.2 Výzkum v oblasti optimalizací obráběcího procesu .....	26
2.3 Nastavení technologických parametrů v CAM softwarech .....	29
2.4 Zhodnocení rešerše.....	31
<b>3. Návrh vlastního řešení.....</b>	<b>33</b>
3.1 Návrh variant řešení .....	36
3.2 Výběr varianty řešení .....	41
<b>4. Optimalizační funkce operující s bodem dotyku .....</b>	<b>42</b>
4.1 Použitá aparatura – bod dotyku.....	43
4.1.1 MCFV 5050 LN (LM1).....	43
4.1.2 Siemens NX.....	44
4.1.3 Postbuilder.....	49
4.1.4 Sinumerik .....	52
4.2 První část optimalizačního modulu: JÁDRO .....	56
4.3 Druhá část optimalizačního modulu: CL .....	60
4.4 Třetí část optimalizačního modulu: TIME.....	61
<b>5. Optimalizační funkce operující s přídavkem z předchozí operace ....</b>	<b>63</b>
5.1 Použitá aparatura – přídavek materiálu.....	63
5.2 Výpočetní jádro .....	63
5.3 Vizualizace.....	71
<b>6. Testování optimalizační funkce při obrábění.....</b>	<b>73</b>
6.1 Měření os stroje pomocí Servo Trace .....	75
6.2 Měření na mikroskopu .....	76
6.3 Měření drsnosti povrchu .....	79
6.4 Měření spotřeby elektrické energie.....	81



<b>7. Diskuse výsledků a další vývoj.....</b>	<b>85</b>
<b>8. Závěr .....</b>	<b>89</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>91</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>94</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>97</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>98</b>



## Přehled použitých veličin, jednotek a symbolů

$a$	[m/s <sup>2</sup> ]	zrychlení
$A$	[-]	bod aktuální polohy nástroje
$A_x$	[mm]	souřadnice bodu A v ose X
$A_y$	[mm]	souřadnice bodu A v ose Y
$A_z$	[mm]	souřadnice bodu A v ose Z
$a_e$	[mm]	radiální hloubka řezu
$a_p$	[mm]	axiální hloubka řezu
$B$	[-]	bod následující polohy nástroje
$B_x$	[mm]	souřadnice bodu B v ose X
$B_y$	[mm]	souřadnice bodu B v ose Y
$B_z$	[mm]	souřadnice bodu B v ose Z
$\vec{c}$	[mm]	vektorový součin $\vec{e}$ a $\vec{u}$
$CC$	[-]	bod středu kulové plochy $\kappa$
$CC_x$	[mm]	souřadnice středu $\kappa$ v ose X
$CC_y$	[mm]	souřadnice středu $\kappa$ v ose Y
$CC_z$	[mm]	souřadnice středu $\kappa$ v ose Z
$\vec{cn}$	[1]	jednotkový vektor ve směru normály k bodu CP (funkce s přídatkem materiálu)
$CP$	[-]	kontaktní bod mezi nástrojem a obrobkem
$CP_x$	[mm]	souřadnice kontaktního bodu v ose X
$CP_y$	[mm]	souřadnice kontaktního bodu v ose Y
$CP_z$	[mm]	souřadnice kontaktního bodu v ose Z
$D$	[mm]	průměr nástroje
$d_1$	[mm]	konstanta roviny 1
$d_2$	[mm]	konstanta roviny 2
$d_3$	[mm]	konstanta roviny 3
$D_o$	[mm]	průměr plochy přídatku materiálu
$D_r$	[mm]	skutečný řezný průměr nástroje
$D_s$	[mm]	reálný geometrický průměr nástroje
$\vec{e}$	[1]	jednotkový vektor ve směru osy nástroje
$E_C$	[kW]	aktuální spotřeba elektrické energie





---

$E_s$	[kWh]	spotřeba elektrické energie za obráběcí cyklus
$F$	[mm/min]	adresa posuvová rychlosti v NC kódu
$F_C$	[-]	bod trojúhelníku $F_C$ , $S_C$ , $CP$
$F_{in}$	[mm/min]	posuvová rychlost vnitřního rádiusu
$F_N$	[N]	síla
$F_{out}$	[mm/min]	posuvová rychlost vnějšího rádiusu
$F_x$	[N]	řezná síla v ose X
$F_y$	[N]	řezná síla v ose Y
$F_z$	[N]	řezná síla v ose Z
$f_z$	[mm]	posuv na zub
$I$	[A]	proud
$\vec{k}$	[1]	jednotkový vektor ve směru osy Z
$M$	[mm]	bod určujícího velikost $a_p$ z $CP$
$M_x$	[mm]	souřadnice bodu $M$ v ose X
$M_y$	[mm]	souřadnice bodu $M$ v ose Y
$M_z$	[mm]	souřadnice bodu $M$ v ose Z
$n$	[ $\text{min}^{-1}$ ],[rpm]	otáčky vřetene
$\vec{n}$	[1]	jednotkový vektor ve směru normály k bodu $CP$ (funkce s bodem dotyku)
$n_z$	[ $\text{min}^{-1}$ ]	počet zubů frézy
$P$	[W]	příkon
$P_1$	[-]	rovnice křivky vzniklé průsečíkem $\gamma$ a $\rho_1$
$P_{1x}$	[mm]	souřadnice bodu $P_1$ v ose X
$P_{1y}$	[mm]	souřadnice bodu $P_1$ v ose Y
$P_{1z}$	[mm]	souřadnice bodu $P_1$ v ose Z
$P_2$	[-]	bod průsečíku $\rho_1$ , $\rho_2$ a kulové plochy
$P_{2x}$	[mm]	souřadnice bodu $P_2$ v ose X
$P_{2y}$	[mm]	souřadnice bodu $P_2$ v ose Y
$P_{2z}$	[mm]	souřadnice bodu $P_2$ v ose Z
$P_3$	[-]	bod průsečíku $\rho_1$ , $\rho_2$ a kulové plochy
$P_{3x}$	[mm]	souřadnice bodu $P_3$ v ose X
$P_{3y}$	[mm]	souřadnice bodu $P_3$ v ose Y

---



---

$P_{3z}$	[mm]	souřadnice bodu $P_3$ v ose Z
$P_4$	[-]	bod průsečíku $\rho_1, \rho_2$ a kulové plochy
$P_{4x}$	[mm]	souřadnice bodu $P_4$ v ose X
$P_{4y}$	[mm]	souřadnice bodu $P_4$ v ose Y
$P_{4z}$	[mm]	souřadnice bodu $P_4$ v ose Z
$P_5$	[-]	bod průsečíku $\rho_1, \rho_3$ a kulové plochy
$P_{5x}$	[mm]	souřadnice bodu $P_5$ v ose X
$P_{5y}$	[mm]	souřadnice bodu $P_5$ v ose Y
$P_{5z}$	[mm]	souřadnice bodu $P_5$ v ose Z
$P_P$	[-]	bod průsečíku $\vec{e}$ a $R_R$
$P_{Px}$	[mm]	souřadnice bodu $P_P$ v ose X
$P_{Py}$	[mm]	souřadnice bodu $P_P$ v ose Y
$P_{pz}$	[mm]	souřadnice bodu $P_P$ v ose Z
R	[mm]	poloměr nástroje
$R_1$	[mm]	řezný poloměr 1
$R_2$	[mm]	řezný poloměr 2
$R_3$	[mm]	řezný poloměr 3
$R_4$	[mm]	řezný poloměr 4
Ra	[ $\mu\text{m}$ ]	střední aritmetická úchylka profilu
RB	[-]	souřadnice referenčního bodu nástroje
$RB_x$	[mm]	souřadnice bodu RB v ose X
$RB_y$	[mm]	souřadnice bodu RB v ose Y
$RB_z$	[mm]	souřadnice bodu RB v ose Z
$R_R$	[mm]	skutečný řezný poloměr nástroje (3D)
$R_r$	[mm]	skutečný řezný poloměr nástroje (2D)
Ry	[ $\mu\text{m}$ ]	největší výška nerovnosti profilu
Rz	[ $\mu\text{m}$ ]	výška nerovnosti profilu
s	[mm]	dráha nástroje
S	[ $\text{min}^{-1}$ ],[rpm]	adresa otáček vřetene v NC kódu
Sm	[ $\mu\text{m}$ ]	střední rozteč nerovností profilu
$S_n$	[-]	bod středu profilu nástroje
t	[s]	čas
$\vec{u}$	[mm]	vektor směru pohybu nástroje

---



U	[V]	napětí
v	[m/s]	rychlost
$v_c$	[m/min]	řezná rychlost
$v_f$	[mm/min]	posuvová rychlost
$\alpha$	[°]	úhel mezi $\vec{k}$ a $\vec{e}$
$\alpha'$	[°]	doplňkový úhel k úhlu $\alpha$ do 180°
$\beta$	[°]	úhel vlečení
$\gamma$	[°]	úhel mezi $\vec{e}$ a $\vec{n}$
$\kappa$	[-]	rovnice kulové plochy
$\rho_1$	[-]	rovina 1
$\rho_2$	[-]	rovina 2
$\rho_3$	[-]	rovina 3
$\sigma$	[%]	Rozdíl mezi $\chi_1$ a $\chi_2$
$\chi_1$	[%]	Procentuální vyjádření rozdílu D a $D_S$
$\chi_2$	[%]	Procentuální vyjádření rozdílu D a $D_R$



## Přehled použitých zkratek

.exe	Executable
2,5D	Two and a half dimensional
2D	Two dimensional
AFC	Adaptive Feed Control
C #	Objektově orientovaný programovací jazyk C #
C++	Multiparadigmatický programovací jazyk C++
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer aided engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CL data	Cutter Location Data
CNC	Computer Numerical Control
ČSN	Česká Technická Norma
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
G funkce	Přípravná funkce
ISO	International Organization for Standardization
M funkce	Pomocná funkce
MD	Machine Data
mom	Manufacturing Output Manager
NC	Numerical Control
PLC	Programmable Logic Controller
PLM	Product Lifecycle Management
TCL	Tool Command Language



# 1. Úvod a cíl práce

Díky stálé potřebě zproduktivňovat výrobu na CNC (Computer numerical control) obráběcích strojích rostou nároky nejen na samotný stroj, ale i na zvolenou technologii a nástroj. Optimalizací výrobního procesu se dosahuje ke zkracování výrobních časů, snížení energetické náročnosti, snižování celkových nákladů, zlepšování přesnosti a jakosti povrchu vyráběných dílců.

Tato diplomová práce se proto zabývá optimalizacemi v oblasti CAM (Computer Aided Manufacturing) softwaru, postprocesingu a řídicího systému. Hlavním cílem této diplomové práce je navrhnout podpůrný korekční modul pro řešení úprav technologických podmínek při generování NC (Numerical Control) programů pro CNC obráběcí stroje pro zaručení správných technologických podmínek při obrábění, vedoucí k dosažení produktivního a efektivního obrábění. Dalším cílem je integrace optimalizační funkce do postprocesoru pro tříosé obrábění a následné rozšíření pro víceosé obrábění.

První část práce bude obsahovat rešerši dnešního stavu optimalizací týkajících se dodržování technologických parametrů při obrábění na frézovacích CNC obráběcích strojích, a následný návrh na možné zproduktivnění obráběcího procesu.

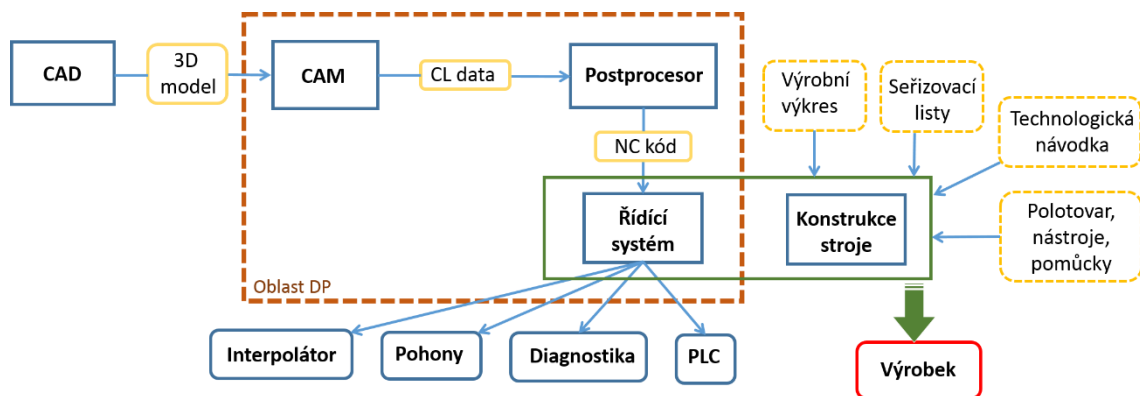
V druhé části práce bude vytvořen optimalizační modul na principu algoritmů v postprocesoru. Tento optimalizační modul se následně bude experimentálně ověřovat testem obrábění na CNC stroji. Dále se provede vyhodnocení provedených testů a stanoví se možné úpravy s případným rozšířením.

## 2. Přehled optimalizací pro obráběcí operace

Tato kapitola se zabývá současným stavem optimalizací obráběcího procesu se zaměřením na CAM softwary, nastavení CAM softwarů, řídicí systémy, ale také na výzkum v oblasti optimalizace obráběcího procesu. Přehled je zaměřen na optimalizace, vedoucí ke zproduktivnění či zefektivnění výroby. Například inteligentním kladením drah nástroje se dají zkrátit výrobní časy až o 80%, zvýšit několikanásobně životnost nástroje a zlepšit i výslednou jakost povrchu, viz např. lit [1].

### 2.1 Oblast zaměření

Diplomová práce je zaměřena na zefektivnění obráběcího procesu důsledkem dodržování předepsaných technologických parametrů. Na začátek je důležité zmínit oblast zaměření této práce. Tato práce se zaměřuje na řetězec mezi CAM softwarem a CNC frézovacím strojem. Stručné schematické zobrazení základního řetězce tj. CAM → Postprocesor → Řídicí systém je patrné na Obr. 1. Jednotlivé bloky se zaměřením na optimalizaci obráběcího procesu jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.



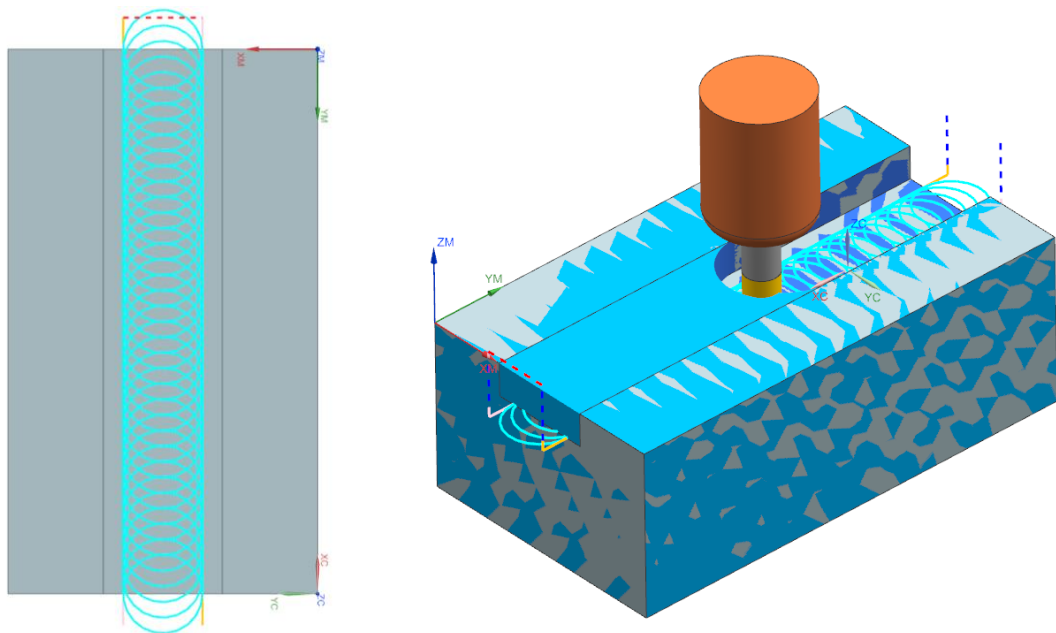
Obr. 1: Stručné schema zaměření diplomové práce

#### 2.1.1 Optimalizace v CAM softwarech

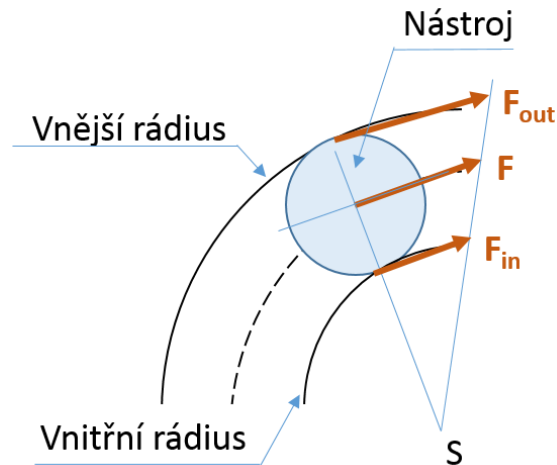
V této kapitole jsou popsány optimalizační funkce dostupné v CAM softwarech. Byly zvoleny reprezentativní CAM softwary, které patří mezi nejzajímavější z hlediska optimalizace drah nástroje a optimalizace velikosti posuvové rychlosti.

## Siemens NX

Siemens NX patří mezi nejrozšířenější CAD/CAM softwary. CAM software obsahuje mnoho strategií obrábění pro tříosé až víceosé operace. Z hlediska optimalizací je důležité zmínit strategii trochoidálního obrábění používaného pro vysokorychlostní hrubování s kontrolou na zatížení nástroje. Tato strategie je vhodná pro hrubovací obrábění drážek a kapes obrobku při výrazně větší hloubce záběru třísky oproti pracovnímu záběru, viz Obr. 2. Při samotném programování se primárně určuje šířka trochoidy „Trochoidal Width“ a krok trochoidy „Trochoidal Step Ahead“. Dále je k dispozici funkce omezující velikost pracovního posuvu v rádiu a tato funkce lze nastavit v dané operaci. Ve funkci je možné nastavit minimální kompenzační úhel rohu a maximální kompenzační úhel rohu, jak pro vnější rádius, tak i pro vnitřní rádius tj. interval, kde je aplikováno snížení velikosti posuvové rychlosti na hodnotu určenou technologem. Na Obr. 2 je znázorněn průřez frézy rádiusem s pracovním posuvem označeným  $F$ , avšak skutečná velikost posuvové rychlosti na vnějším rádiu s označením  $F_{out}$  je vyšší než předepsaný posuv  $F$ . Naopak je to v případě obrábění vnitřního rádiu, viz lit.[2].



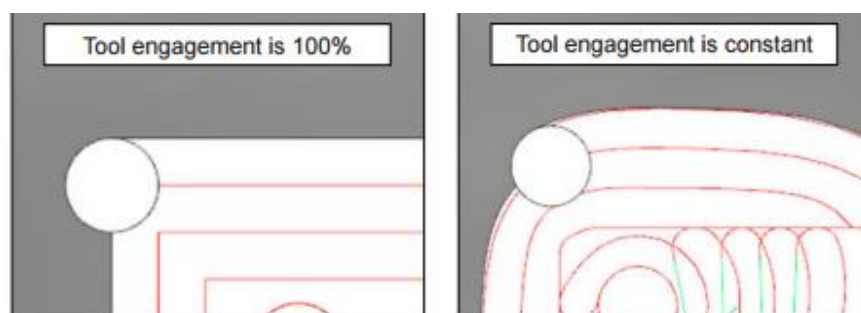
Obr. 2: Ukázka Trochoidálního obrábění v drážce (Siemens NX)



Obr. 3: Problematika kompenzace posuvové rychlosti v rádiu (Siemens NX)

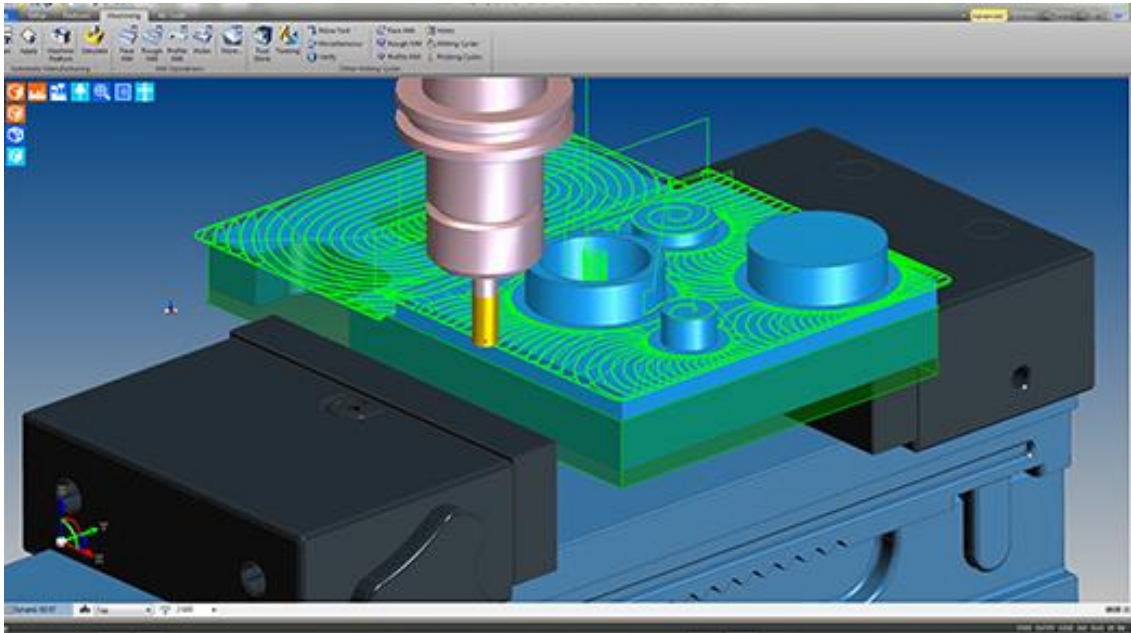
## SurfCAM

CAM software SurfCAM disponuje funkcí waveform, tato funkce je dodávaná v jednom balíčku SurfCAMu bez nutnosti dodatečného dokoupení, na rozdíl od funkce TrueMill. Waveform je funkce určená především pro hrubování tvarově složitých součástí, jako jsou například formy či tvarově složité zápustky. Tangenciálním navazováním drah nástroje je dosahováno celkově kratší doby obrábění, neboť pohony stroje nemusejí tak často akcelarovat a decelerovat v ostrých přechodech drah nástroje, jako tomu je v běžných obráběcích funkcích. Tato funkce také kontroluje velikost opásání nástroje. Dráhy nástroje jsou generovány s ohledem na dodržení konstantního zatížení nástroje a plynulosti obrábění. Porovnání funkce Waveform s běžným generováním drah nástroje je patrné na Obr. 4 a Obr. 5. Na Obr. 4 vlevo je zobrazeno běžné kapsování za použití čistě lineárních interpolací a vpravo zmiňované optimalizované kladení drah za použití funkce Waveform. U tohoto porovnání je klíčová velikost úhlu opásání nástroje a tudíž velikost silového zatížení nástroje, viz lit. [3].



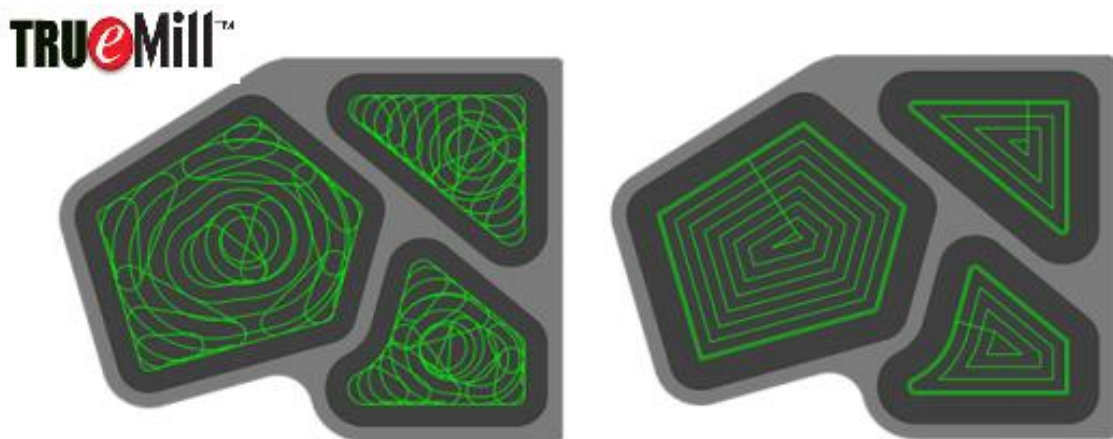
Obr. 4: Porovnání běžného obrábění (vlevo) s funkcí Waveform (vpravo), viz lit. [3]





Obr. 5: Ukázka prostředí SurfCAMu a použití funkce Waveform, převzato z lit. [3]

Další možností je dokoupení doplňkové funkce TrueMill. Jedná se o patentovanou technologii generování optimalizovaných drah nástroje tak, aby nástroj nepřekročil požadovanou hodnotu zatížení, viz Obr. 6. Tato funkce je doporučena pro hrubování ve velkých axiálních hloubkách řezu s maximálním dosažením časové úspory až 80%, viz lit. [1].

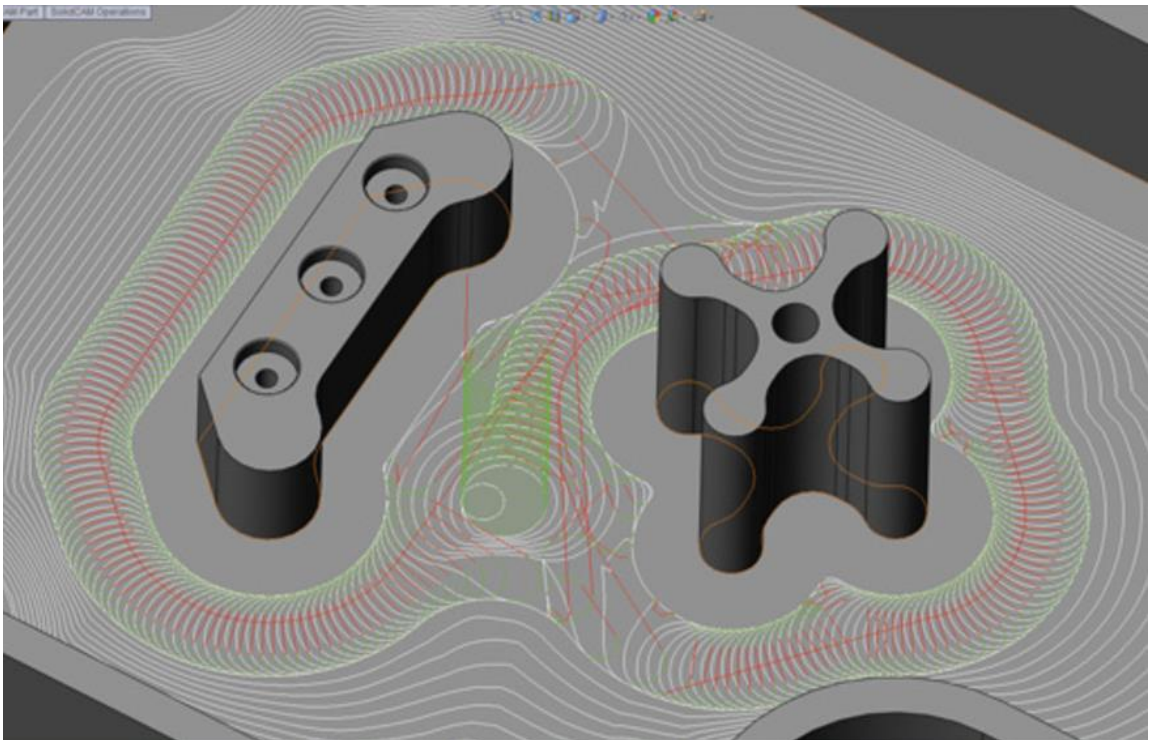


Obr. 6: (Vlevo) Optimalizované dráhy nástroje; (vpravo) konvenční generování drah nástroje, viz lit. [1]

## SolidCam

SolidCam obsahuje funkci iMachining. Funkce iMachining je určena pro 2,5D produktivní hrubování. Na základě zvolení obráběného materiálu a použitého nástroje jsou automaticky nabídnuty optimální řezné parametry, jako je například pracovní posuvová rychlost, otáčky vřetene a velikost bočního kroku. V závislosti na velikosti bočního kroku a složitosti obrobku jsou vygenerovány dráhy nástroje v podobě morfujících spirál, či kvazi trochoidálních drah nástroje. Morfující spirály umožňují přesné generování dle výsledné geometrie obrobku. Díky algoritmům analyzujících obrobek jsou dráhy nástroje také generovány s ohledem na maximální dobu nástroje v řezu

tj. minimální přejezdy nástroje naprázdno. Dále výpočetní algoritmus navrhne tzv. kanály. Kanály slouží k rozdělení složitých a velkých ploch na obrobku. Důvodem je zmenšení neefektivních přejezdů a rozdělení oblastí s použitím morfujících spirál, nebo kvazi trochoidálních drah nástroje. Následkem použití zmiňovaných algoritmů pro generování drah nástroje viz Obr. 7 je iMachining schopen výrazně snížit dobu obrábění až o 70%. Dále se výrazně prodlouží životnost nástroje, viz lit. [4].



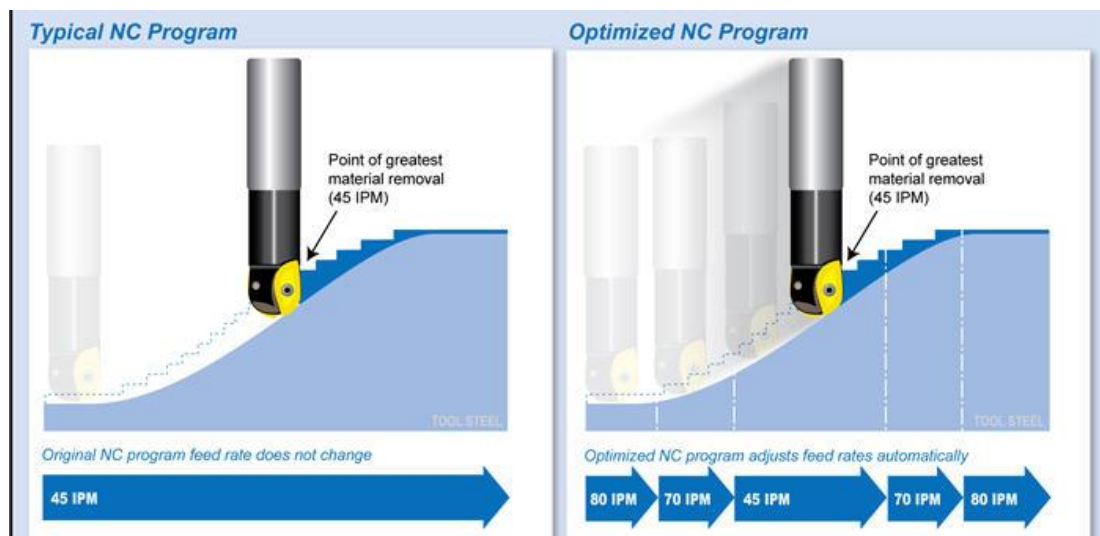
Obr. 7: Ukázka drah nástroje s kanály a morfujícími spirály, převzato z lit. [4]

## 2.1.2 Optimalizace v nastavbě CAM softwaru

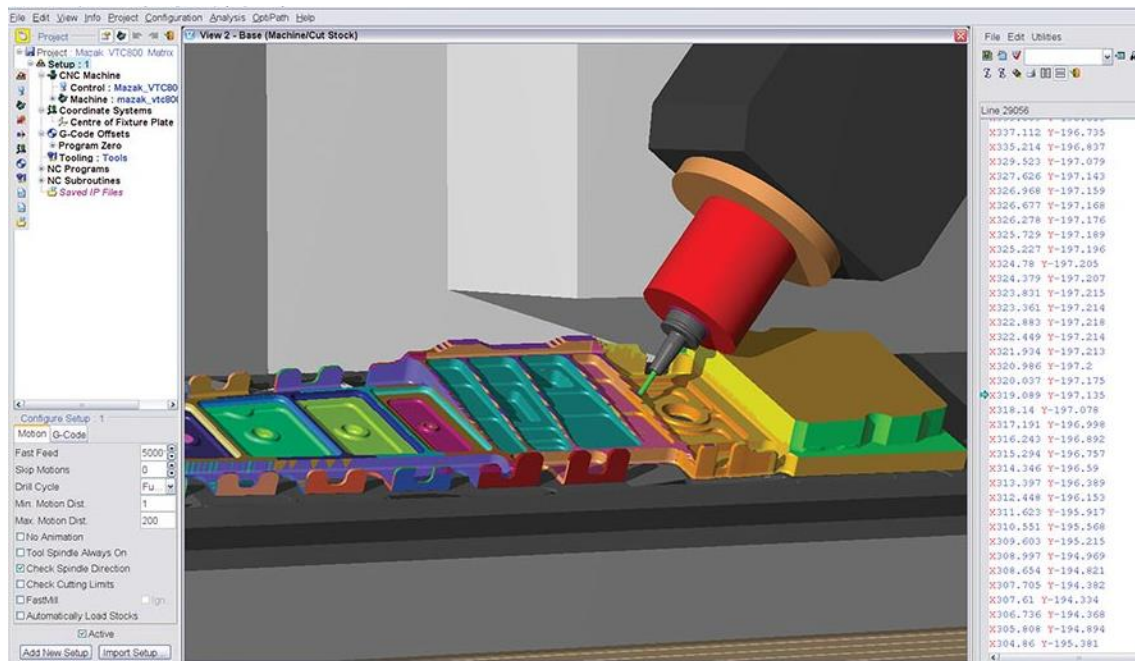
Optimalizace se převážně provádějí v samostatném softwaru pracujícím s výstupními daty z CAM, někdy i z CAD softwaru. Hlavními úkoly je vizualizace a optimalizace drah nástroje při obráběcím procesu. Vizualizace může probíhat v CAM softwaru, kdy se do něho importují nová optimalizovaná CL data (Cutting Location Data). Další používaná možnost je vizualizace v samostatném softwaru mimo CAM software.

### VERICUT

Společnost CGTech již třicet let vyvíjí modul pro optimalizaci a verifikaci obráběcího procesu VERICUT. Modul VERICUT optimalizuje velikost posuvové rychlosti z běžně vygenerovaného NC kódu a CAD modelu obrobku. VERICUT umožňuje rozdělovat jednotlivé lineární interpolace na více kratších lineárních interpolací s proměnlivou velikostí posuvové rychlosti na základě aktuálního zatížení nástroje. Zatížení nástroje se počítá z obráběného objemu materiálu. Velikost posuvové rychlosti je zvolena tak, aby byly dodrženy předepsané technologické parametry. Tím se výrazně prodlouží životnost nástroje, a zkrátí se čas obráběcího procesu. Příklad rozdělení jedné lineární interpolace více kratšími lineárními interpolacemi s proměnlivou velikostí posuvové rychlosti je zobrazen na Obr. 8. Ukázka pracovního prostředí softwaru VERICUT je na Obr. 9, převzato z lit. [5].



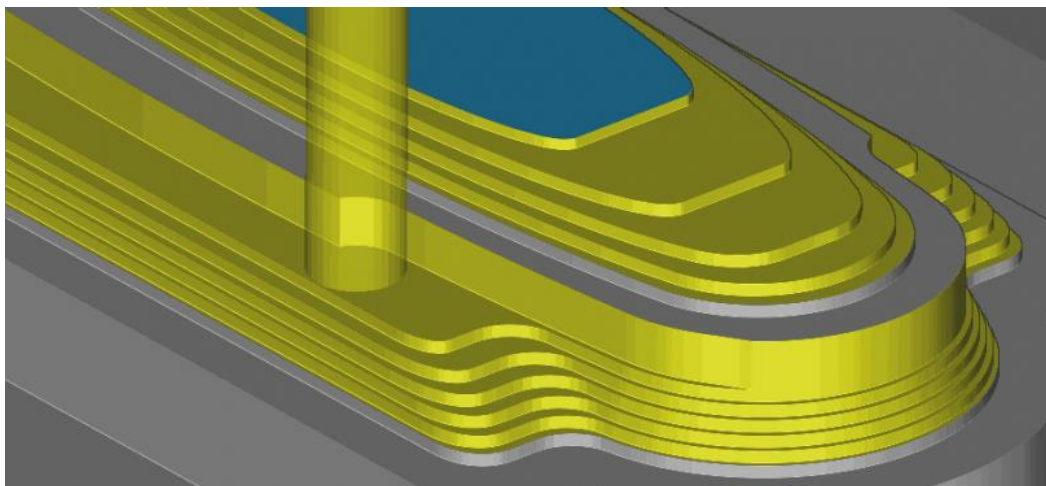
Obr. 8: Optimalizace velikosti posuvové rychlosti nástroje (VERICUT), převzato z lit. [5]



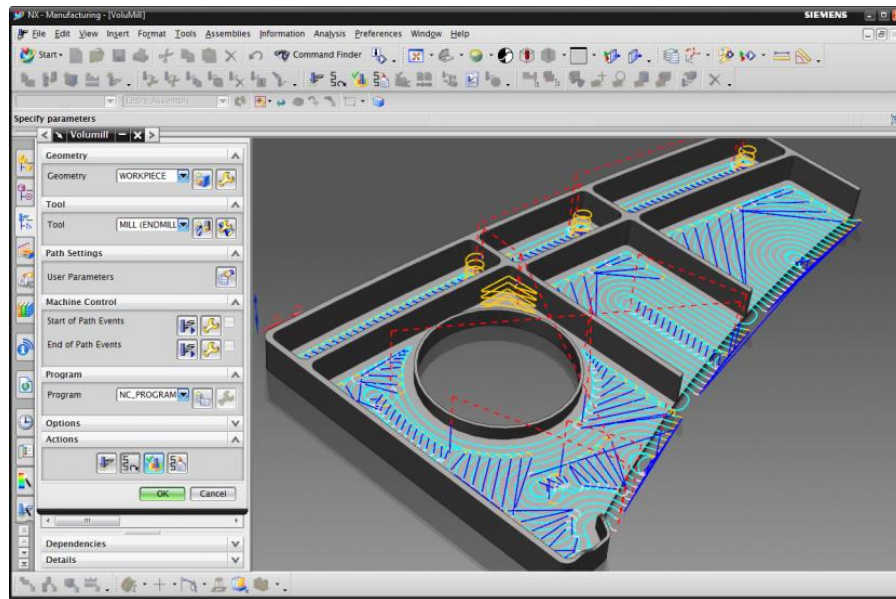
Obr. 9: Ukázka prostředí VERICUT na stroji MAZAK VTC800, převzato z lit. [5]

## Volumill

Volumill se zabývá přidáváním nových optimalizačních funkcí do standardních CAM softwarů. Jednou z funkcí je inteligentní obrábění pro Siemens NX. Tato funkce se plně integruje do CAM softwaru. Předností této optimalizace je inteligentní vygenerování drah nástroje tak, že nástroj nepřesáhne určené maximální zatížení. Na Obr. 11 je ukázka optimalizovaných drah v reprezentativním kapsovitém obrobku a na OBR je ukázka simulace obrábění s funkcí Volumill s předepsaným úhlem opásání, viz lit. [6].



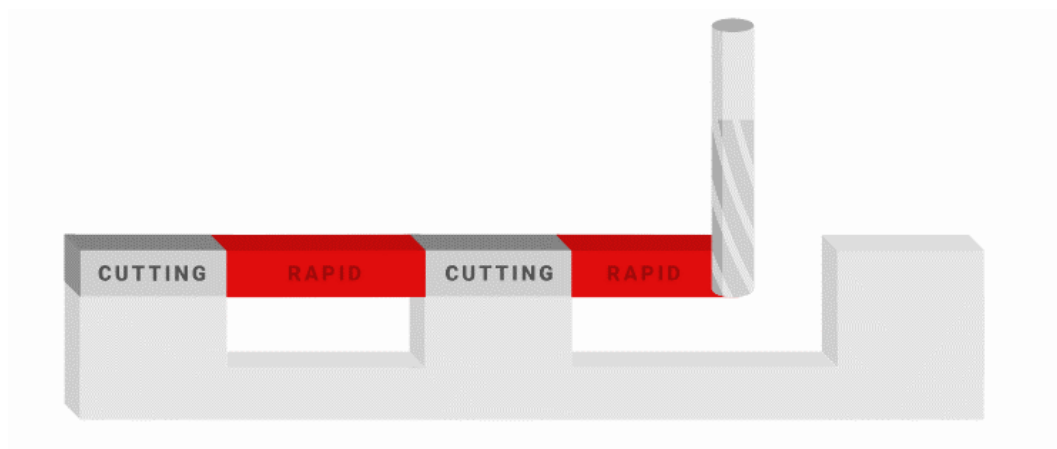
Obr. 10: Ukázka simulace obrábění s funkcí Volumill s předepsaným úhlem opásání, převzato z lit. [7]



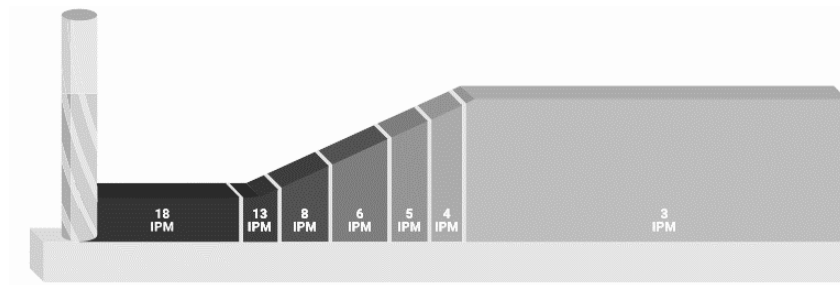
Obr. 11: Adaptivní obrábění integrované v Siemens NX (Volumill), převzato z lit. [7]

## ICAM

ICAM Technologies Corporation je mezinárodní společnost specializující na optimalizace obráběcího procesu. Mezi hlavní optimalizační funkce patří SmartCut a SmartFEED. Funkce SmartCut je zaměřena na zefektivnění neproduktivních drah nástroje, tedy tzv. přejezdů, resp. obrábění „ve vzduchu“. Tam, kde je to možné, funkce změni pracovní posuv na rychloposuv, viz Obr. 12, čímž je výrazně snížena doba obrábění. Funkce SmartFEED optimalizuje velikost pracovního posuvu dle znalosti o zatížení nástroje v řezu, viz Obr. 13, převzato z lit. [8].



Obr. 12: ICAM a funkce SmartCut, převzato z lit. [8]



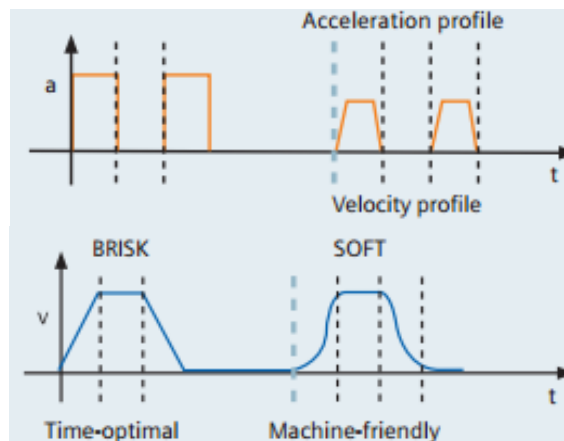
Obr. 13: ICAM a funkce SmartFEED, převzato z lit. [8]

### 2.1.3 Optimalizační funkce v řídicím systému

Přední výrobci řídicích systémů obráběcích CNC strojů neustále vyvíjejí optimalizační funkce pro zefektivnění obráběcího procesu. Důraz je kladen především na snížení obráběcího času, zvýšení jakosti povrchu, a prodloužení životnosti nástroje. V této kapitole jsou zmíněny vybrané optimalizační funkce dvou nejrozšířenějších výrobců řídicích systémů v Evropě. Jedná se o řídicí systém Sinumerik od firmy Siemens a řídicí systém iTNC od firmy Heidenhain.

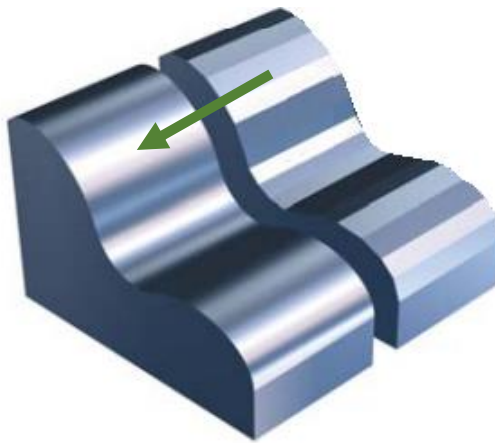
#### Sinumerik

Řídicí systém Sinumerik od firmy Siemens disponuje např. funkcemi BRISK a SOFT. Tyto funkce slouží k přenastavení parametrů pohonů os stroje. Při použití funkce BRISK osy stroje zrychlují maximálním zrychlením bez omezení jerku do dosažení požadované hodnoty rychlosti. Funkce SOFT využívá spojitého zrychlení os stroje s omezením jerku viz Obr. 14. Funkce se aktivují, případně deaktivují příkazem v NC kódu. Tyto funkce mají vliv na výsledný čas obrábění i na výslednou jakost povrchu, viz lit. [9]

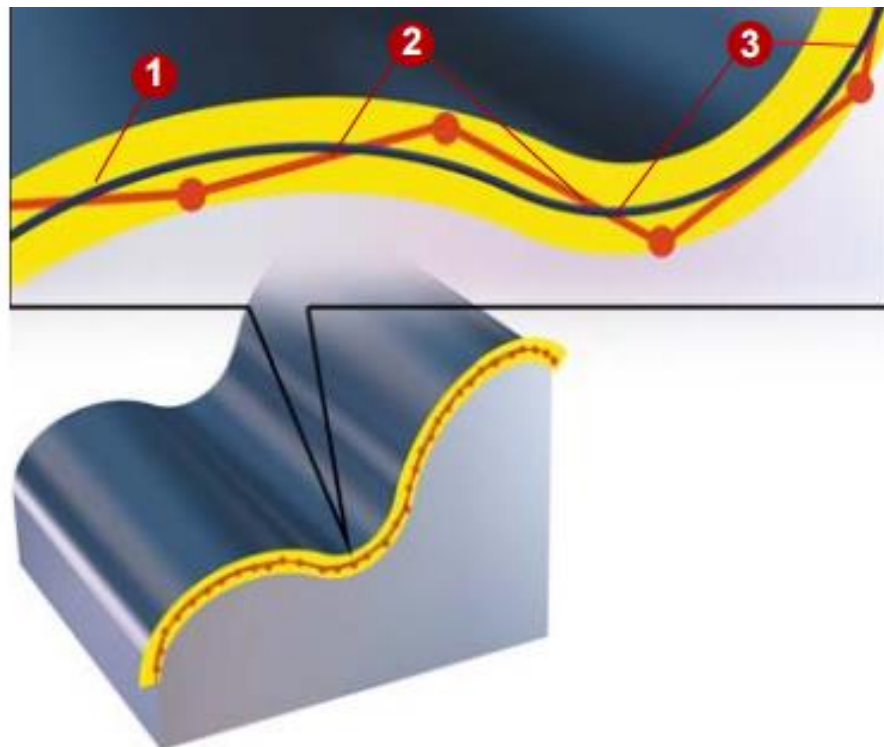


Obr. 14: Funkce BRISK a SOFT (Sinumerik), převzato z lit. [9]

Další optimalizační funkcí v řídicím systému Sinumerik je funkce COMPCAD. Funkce COMPCAD umožňuje kompresi NC bloků za účelem paměťové úspory, zkrácení času obrábění, nebo zlepšení jakosti povrchu viz Obr. 15. Principem je nahrazení lineárních úseků dráhy nástroje z NC kódu splinami. Spliny jsou definovány tolerancemi. Na Obr. 16 je ukázáno nahrazení lineárních úseků dráhy nástroje splinami. Funkce se aktivuje příkazem COMPCAD a deaktivuje příkazem COMPOF, tyto příkazy se zapisují do NC kódu. [9]



Obr. 15: Příklad vyhlazení plochy pomocí funkce COMPCAD, převzato z lit. [10]



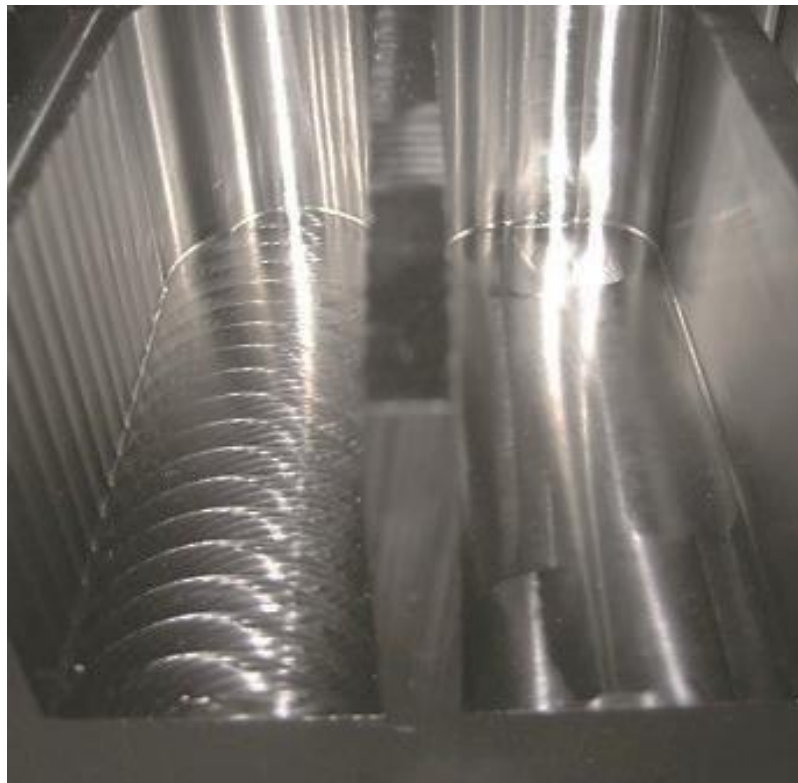
Obr. 16: Funkce COMPCAD (Sinumerik), převzato z lit. [10]



Funkce feedforward tj. předkorekce slouží k řízení rychlosti a zrychlení pohonů os stroje. Tato funkce je zapínána příkazem FFWON a vypínána příkazem FFWOF v NC kódu. Parametry funkce feedforward musí být nastaveny v řídicím systému a řádně odladěny. Například funkce velocity feedforward umožňuje snížení polohové odchylky při konstantní rychlosti. Funkce acceleration feedforward umožňuje potlačení polohové odchylky i při změnách rychlosti os stroje, viz lit. [9].

### **HEIDENHAIN (AFC)**

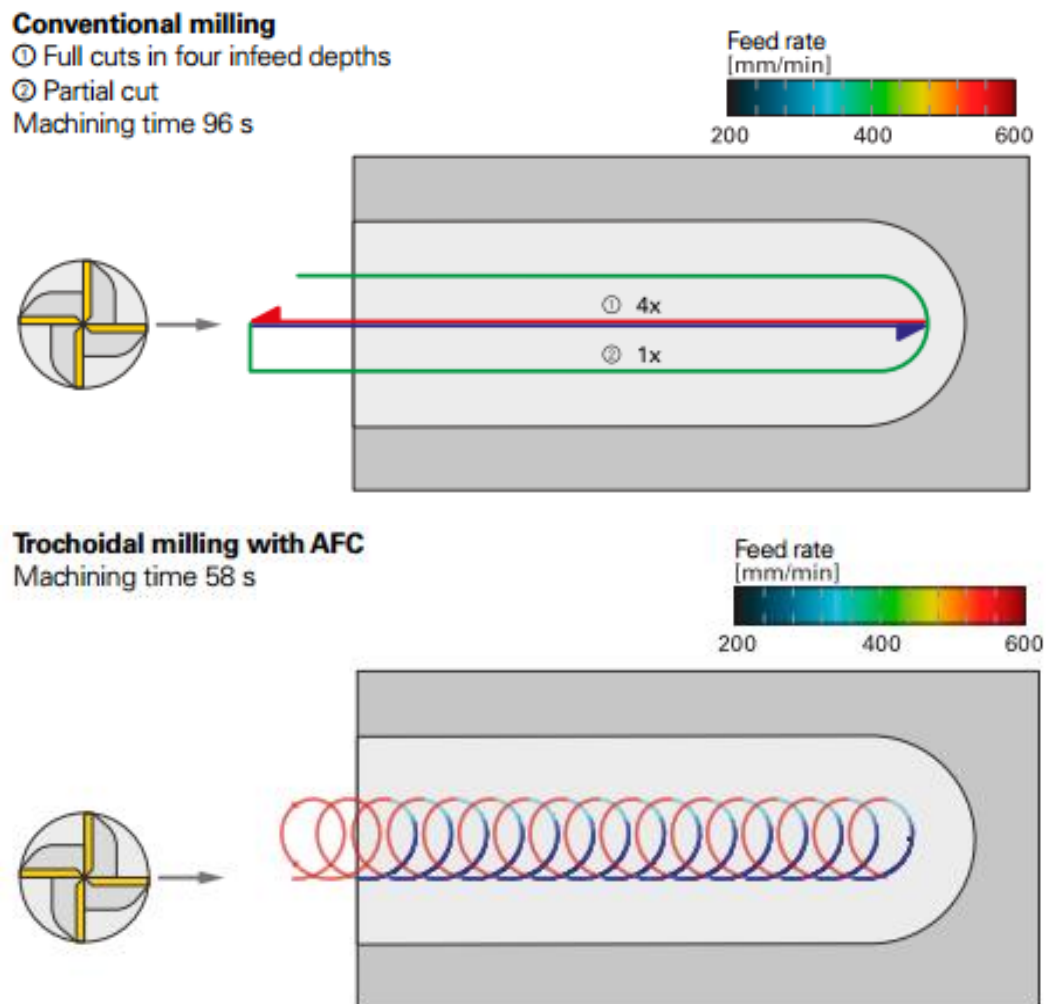
Německý výrobce řídicích systému Heidenhain v řadě systémů iTNC 530 disponuje funkcí AFC tj. Adaptive Feed Control. Tato funkce umožňuje plynulou změnu velikosti posuvové rychlosti v závislosti na spotřebě elektrické energie včetně a nezávisle na NC kódu. Uživatel v nastavení AFC funkce nastavuje maximální a minimální limity, kde se má hodnota velikosti posuvové rychlosti pohybovat. AFC funkce lze kombinovat s další funkcí Heidenhainu, a to funkcí trochoidálního obrábění. Kombinací funkce AFC a funkce trochoidálního obrábění je docíleno lepší jakosti obrobeneho povrchu a zkrácení doby obrábění. Rozdíly v jakosti povrchu jsou zobrazeny na Obr. 17, převzato z lit.[11].



Obr. 17: Porovnání povrchů po obrábění: vlevo bez AFC; vpravo s aktivovaným AFC spolu s trochoidálními dráhami, viz lit. [11]



Zmiňovaná kombinace funkce trochoidálního obrábění a funkce AFC s časovým uspořádáním je demonstrativně vyobrazena na Obr. 18. Na Obr. 18 je patrné, že při konvenčním drážkování je výsledná dráha nástroje vytvořena lineární interpolací. Z barevného spektra s označením Feed rate (velikost posuvové rychlosti) je patrné, že velikost posuvové rychlosti je minimální, neboť má nástroj v řezu maximální úhel opásání a působí na něj větší řezné síly nežli při použití funkce s trochoidálními dráhami. U vyobrazení funkce s trochoidálními dráhami a AFC je zrychlováno v úsecích v závislosti na úhlu opásání, a tím i na velikost řezných sil a výsledného zatížení vřetene, viz lit. [11].



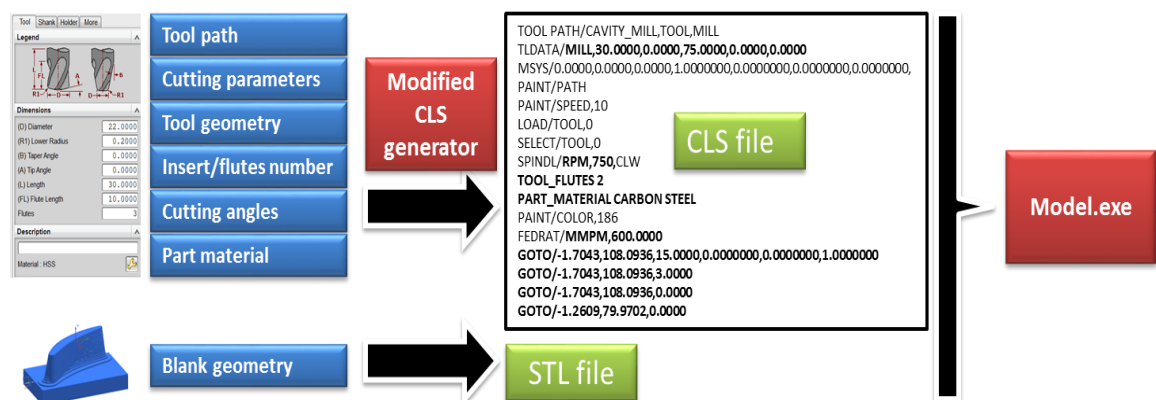
Obr. 18: Ukázka využití AFC společně s trochoidálním obráběním, převzato z lit. [12]

## 2.2 Výzkum v oblasti optimalizaci obráběcího procesu

Optimalizací obráběcího procesu se také zabývá spousta výzkumných center či universit. Existuje mnoho myšlenek i dílčích řešení, jak optimalizovat obrábění na CNC strojích, ať se jedná o soustružení, frézování, nebo vrtání. Tato kapitola je zaměřena na optimalizace obráběcího procesu především na CNC frézovacích strojích.

### IK4 tekniker

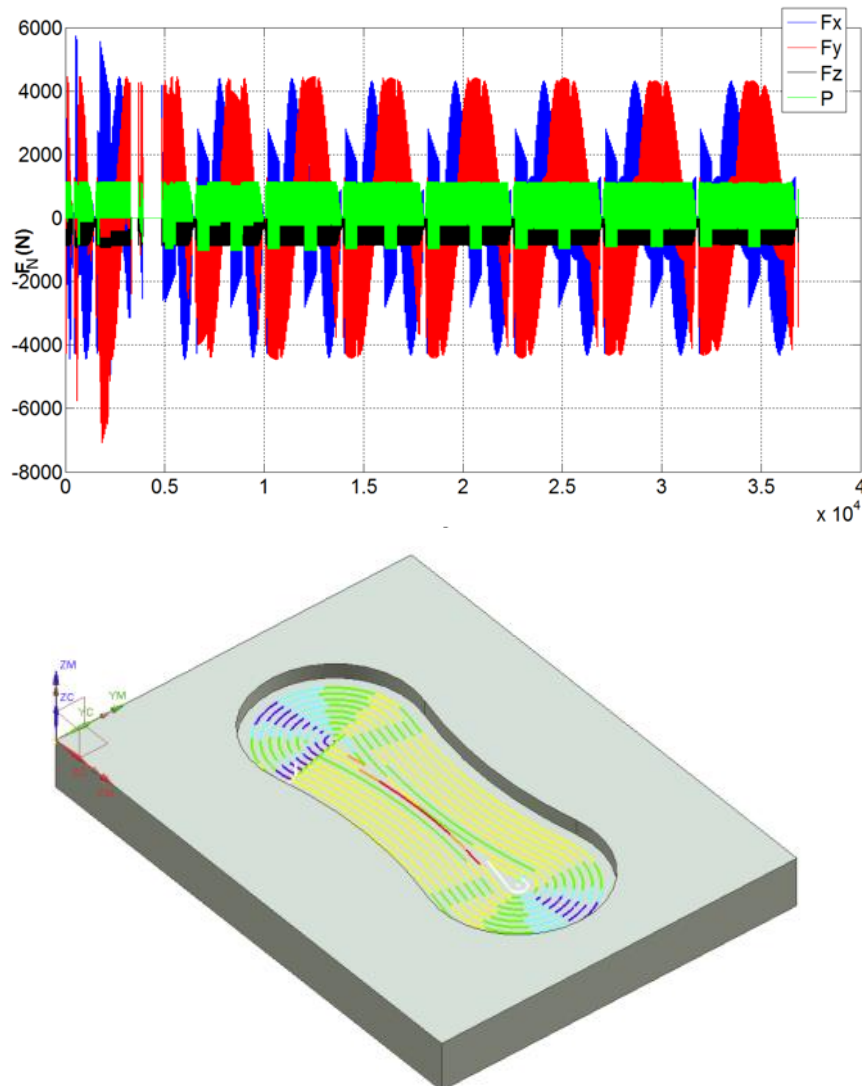
Výzkumná organizace IK4 tekniker ze Španělska se prezentuje softwarem pracujícím společně s CAD/CAM softwarem Siemens NX. Tento software umožňuje optimalizovat velikost posuvové rychlosti na stávajících dráhách generovaných NX CAM na principu znalosti zatížení nástroje v řezu. Dále je možné vizualizovat optimalizované dráhy nástroje. Tím se zefektivní také příprava NC kódů. Úseky drah nástroje jsou barevně zvýrazněny dle velikosti posuvové rychlosti. Tento optimalizační a i diagnostický software načítá data z CAM softwaru v podobě CL dat. Informace o obrobku jsou získány z CAD softwaru z stl souboru a informace o mezioperačním zbytkovém materiálu z CAM softwaru. Následně jsou údaje zpracovány v samostatném softwaru a pomocí integrovaného postprocesoru je vygenerován příslušný NC kód. Společně s NC kódem se vygenerují upravené soubory CL dat. Tato nova CL data slouží k následnému nahrání do CAM software Siemens NX, viz Obr. 19.



Obr. 19: Schéma struktury softwaru, převzato z lit. [13]

Příklad následného vykreslení jednotlivých silových složek do grafu spolu s vizualizací drah nástroje v barevném spektru dle silového zatížení během řezu je patrný na Obr. 20.

Autoři neuvádějí jednotky na ose X v grafu umístěném na Obr. 20 (nahore), je předpokládáno, že se jedná o ms.



Obr. 20: Ukázka silového zatížení nástroje (nahore); barevná vizualizace drah nástroje (dole), viz lit. [13]

### Odborné články zabývající se optimalizací

Byla provedena rešerše odborných článků zabývajících se optimalizací obrábění se zaměřením na dodržování technologických parametrů. Články byly rozděleny do tří skupin dle odborného zaměření. První skupina se zabývá vizualizacemi sil působících na nástroj, nebo vizualizacemi stability řezného procesu. Druhá skupina se věnuje úpravám velikosti posuvové rychlosti na základě geometrie nástroje, sil působících na nástroj, nebo také zrychlení a jerku jednotlivých pohybových os stroje. Do poslední skupiny spadají články, kde autoři řeší optimalizace i na úrovni interpolátoru a vyšších matematických



funkcí pro generování NC kódů. V následujícím odstavci jsou stručně popsány vybrané články.

Disertační práce W. B. S. FERRY z University of British Columbia se zabývá problematikou pětiosého obrábění lopatkových kol. V práci jsou navrženy algoritmy zahrnující predikci řezných sil, je zde řešena i stabilita řezu pro různé typy nástrojů. Ze zmíněných algoritmů je zjišťována a využívána maximální možná posuvová rychlost na daném úseku. Hlavním zefektivněním je zkrácení výrobního času potřebného k obrobení jednoho lopatkového kola, více v lit. [14].

Článek autora Lutfi Taner Tunc ad. se věnuje zlepšení obráběcího procesu v oblastech snížení řezných sil působících na nástroj, stability řezu a pohybu os stroje (především rotačních os A a C) s vazbou na dráhu nástroje. Výsledkem je zproduktivnění výroby obráběním až o 30% času a zlepšení celkové jakosti povrchu (odzkoušeno na testovacích vzorcích), více v lit. [15].

Autoři článku z Carolina State University se zabývají úběrem materiálu nástroje při lineární, nebo kruhové interpolaci. Je rozpracováno řešení různých geometrií nástroje (válcový, kulový, toroidní, kuželový). Je zkoumána závislost mezi úběrem materiálu a velikostí posuvové rychlosti. Výsledkem je návod na algoritmus dodržující zatížení nástroje na stávajících drahách změnou velikosti posuvové rychlosti. U tohoto článku je hlavním zproduktivněním možnost zkrácení výrobního času, a prodloužení životnosti nástroje, více viz lit. [16].

Článek skupiny vědců z University of Waterloo, Koc University a z Cambridge university se zabývá optimalizací řezného procesu. Lineární úseky dráhy nástroje jsou nahrazovány splinami, které se následně upravují do kubických polynomů. Kubické polynomy jsou lépe zpracovatelné interpolátorem. Dále se počítá silové zatížení nástroje v jednotlivých úsecích dráhy nástroje. Dle algoritmu a informací o zrychlení a jerku pohybových os stroje se vygeneruje finální optimalizovaný NC kód. Zefektivnění spočívá v možnosti zrychlení výroby obráběním na CNC strojích a zlepšení jakosti povrchu součásti, viz lit. [17].



Další článek autorů z ČVUT a University of Sheffield se věnuje vizualizaci stability řezu na stávající dráze nástroje. Spolu s možným řešením stability řezného procesu se zjišťují potřebné silové složky působící na nástroj v řezném procesu. Pomocí této pokročilé vizualizace je možné zproduktivnit samotnou výrobu součástí už i ve fázi přípravy NC kódu, viz lit. [18].

Poslední zmíněný článek autorů z Koc University se zabývá optimalizací posuvové rychlosti na základě fyzikálních vlastností řezného procesu. Jedná se pouze o matematický model pracující se zatížením kulového nástroje. Výsledná posuvová rychlost je počítána ze silového zatížení nástroje v řezu. Hlavním zefektivněním výroby je možnost zkrácení celkového výrobního času důsledkem optimalizace posuvové rychlosti, více viz lit.[19].

### **Výzkum na ústavu výrobních strojů a zařízení na korekci dráhy nástroje u víceosých operací**

Na ústavu výrobních strojů a zařízení byl realizován výzkum na korekci dráhy nástroje při víceosém obrábění Ing. Petrem Vavruškou, Ph.D. Byl navrhnut algoritmus v postprocesoru na výpočet skutečné odchylky nástroje od požadované dráhy nástroje. Tyto odchylky vznikají důsledkem složitostí a rozmanitostí kinematických struktur víceosých obráběcích strojů. Odchylky od požadované dráhy nástroje mají za následek viditelné vady na povrchu obrobenej součásti. Samotný algoritmus kontroluje bloky NC kódu a počítá se aktuální odchylka, která se porovnává s nastavenou tolerancí. Pokud odchylka přesahuje nastavenou toleranci, dle algoritmu se vygenerují nové interpolační body tj. nové bloky NC kódu. Výsledkem této optimalizační funkce v postprocesoru je dosažení požadovaných jakostí povrchu, které navrhnul technolog, viz lit. [20].

### **2.3 Nastavení technologických parametrů v CAM softwarech**

Obrábění na frézovacím CNC stroji je proces odebrání materiálu z obrobku nástrojem, kdy hlavní práci koná nástroj. Hlavními technologickými parametry při programování frézovacího CNC stroje jsou veličiny popsány v následujícím odstavci s vazbou na použitý nástroj v dané operaci.

### Technologické parametry

Otáčky vřetene ( $n$ ) tj. otáčky nástroje, se v NC kódu zadávají pod adresou S. Otáčky jsou vypočteny z řezné rychlosti ( $v_c$ ). Řezná rychlost je relativní rychlost mezi nástrojem a obrobkem. Hodnota řezné rychlosti je udávána výrobcem nástroje. Výpočet otáček vřetene proběhne na základě vzorce (1), viz lit. [21].

Výpočet velikosti otáček:

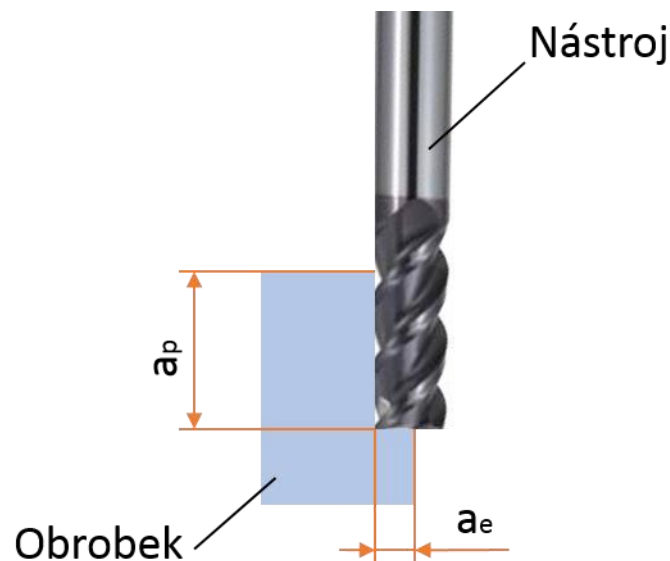
$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (1)$$

Velikost posuvové rychlosti ( $v_f$ ), v NC kódu je zadávána adresou F. Posuvová rychlost je součin posuvu na zub  $f_z$ , (značně ovlivňuje jakost výsledného povrchu), počtu zubů frézy ( $n_z$ ) a otáček vřetene ( $n$ ). Výpočet velikosti posuvu proběhne na základě vzorce (2), viz lit. [21].

Výpočet velikosti posuvové rychlosti:

$$v_f = f_z \cdot n_z \cdot n \quad \left[ \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \quad (2)$$

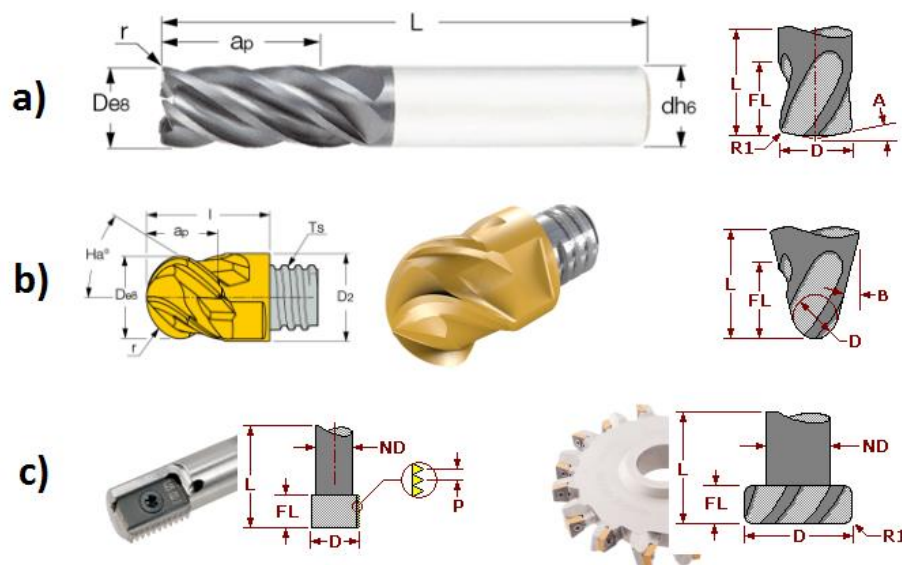
Dále mezi hlavní technologické parametry při programování frézovacích CNC strojů patří axiální hloubka řezu  $a_p$  a radiální hloubka řezu  $a_e$  viz Obr. 21.



Obr. 21: Axiální a radiální hloubka řezu

### Základní typy frézovacích nástrojů

Následující rozdělení nástrojů je branné z pohledu CAM softwaru, kde jsou důležité pouze vnější rozměry nástroje. Naopak úhly břitů, sklon šroubovice, typ utvařeče, materiál nástroje a další parametry jsou z pohledu geometrie tj. generování dráhy nástroje nepodstatné, ale musí je do přípravy dráhy zahrnout technolog dle svého uvážení. Základní rozdělení lze provést na frézy válcové, úkosové, kuželové, toroidní a speciální. Na Obr. 22 jsou zobrazeny reprezentativní zástupci některých zmiňovaných fréz. Na pravé straně je vždy ukázka charakteristických kótovaných rozměrů fréz zadávaných do CAM softwaru, konkrétně: a) válcová monolitní fréza b) kulová fréza (výměnná hlavička) c) speciální frézy – závitovací a kotoučová fréza



Obr. 22: Typy nástrojů pro programování v CAM softwaru, převzato z lit. [22]

### 2.4 Zhodnocení řešerše

Z řešerše bylo zjištěno, že hlavní optimalizační zásah do obráběcího procesu z důvodu dodržování technologických parametrů je proměnná velikost posuvové rychlosti ( $v_f$ ) spolu s inteligentním generováním drah nástroje. Dráhy nástroje jsou generovány tak, aby se nástroj v řezu nepřetěžoval velkým aktuálním úběrem materiálu. Dále některé pokročilé funkce upravují dráhy nástroje s ohledem na maximální dobu nástroje v řezu, tj. s minimálními přejezdy naprázdno. Dráhy nástroje z důvodu dodržení konstantního úhlu opásání jsou generovány jako různé úpravy trochoid, nebo jako morfující spirály. Při těchto drahách nástroje se obrábí s výrazně větší hloubkou záběru třísky oproti



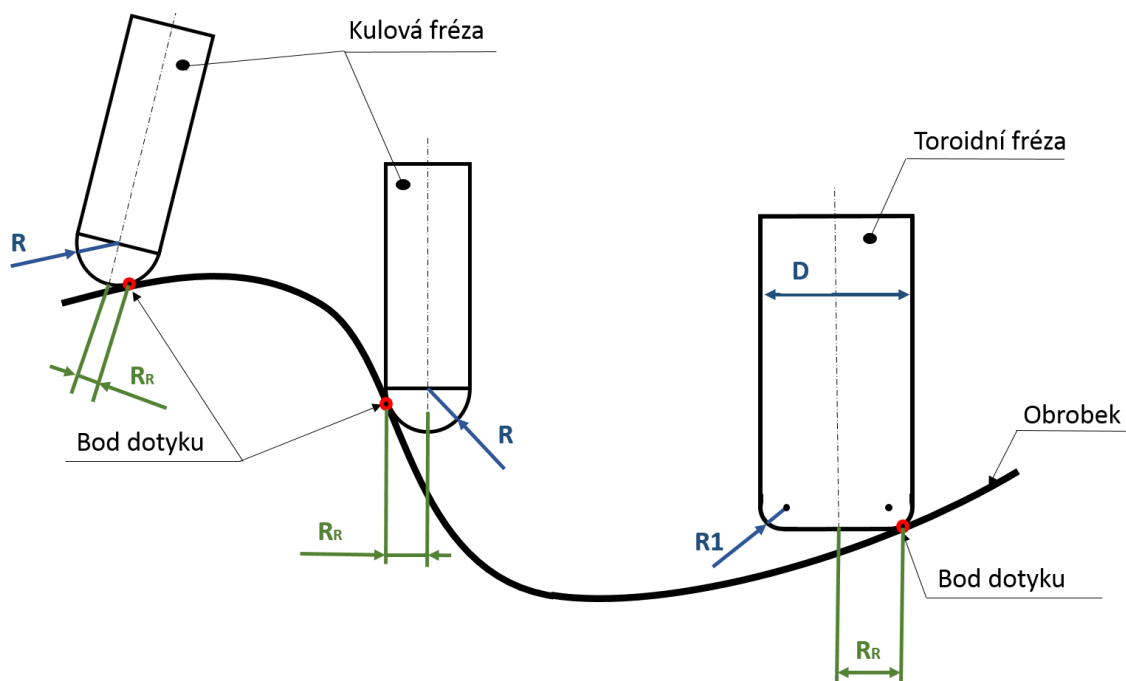
pracovnímu záběru tj.  $a_p \gg a_e$ . Tento poměr platí hlavně u těžkoobrobitelných materiálů, či u součástí, kde jde především o přesnost výroby se snahou minimalizovat vnitřní pnutí po obrobení. Obecně optimalizační funkce v CAM softwarech mají bohužel spoustu nedostatků, jako je například zanedbání tvaru nástroje nebo možnosti použití jen na 2,5D hrubování. Optimalizačními obráběcími funkcemi se zabývá i mnoho společností a vědeckých pracovníků po celém světě. Vzniklo mnoho metod, algoritmů, i softwarů se zaměřením na různé možnosti optimalizace. Je důležité podotknout, že málokteré optimalizace jsou běžně použitelné v současných možnostech přípravy NC programu. Důvodem bývá složitost obsluhy nadstavbových optimalizačních funkcí, ale také problematická implementace do výrobního prostředí.

Dále nebylo nalezeno řešení, které by se věnovalo úpravě technologických podmínek při obrábění nástroji s kruhovou řeznou hranou. Zejména při dokončovacím obrábění tvarových ploch, kde dochází ke změně skutečného řezného průměru v důsledku dotyku kruhové řezné části nástroje s obráběnou plochou. Bod dotyku se plynule mění v rámci kruhové řezné části nástroje, a tím se mění poloměr rotace vektoru řezné rychlosti, tedy vzdálenost mezi bodem dotyku a osou nástroje. Vlivem změny poloměru rotace vektoru řezné rychlosti tj. skutečného řezného průměru nástroje, je nutné zvyšovat hodnotu otáček vřetene kvůli dodržení řezné rychlosti a velikost posuvové rychlosti kvůli dodržení posuvu na zub frézy. Obdobný princip optimalizace je běžně využíván u soustružnických operací při tzv. soustružení s konstantní řeznou rychlostí, kdy při pohybu nástroje směrem ke středu rotace obrobku se otáčky soustružnického vřetene zvyšují, čímž zůstává zachována konstantní řezná rychlost.



### 3. Návrh vlastního řešení

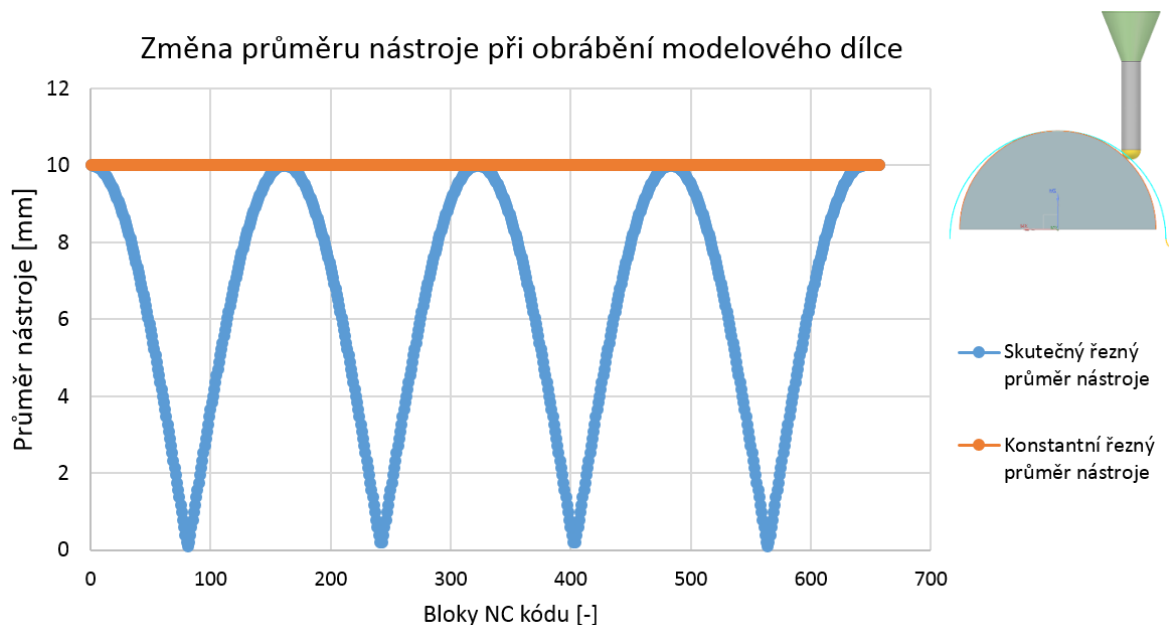
Jak vyplynulo z provedené rešerše, neexistuje optimalizační funkce zabývající se obecně obráběním nástroji s kulovou řeznou plochou tvarových ploch s proměnlivou velikostí otáček a posuvové rychlosti pro dodržení technologických parametrů. Při obrábění těmito nástroji, zejména při dokončovacích operacích, kdy úběr materiálu je minimální, tj. protíná kulovou řeznou část nástroje, dochází ke změně skutečného průměru na nástroji. Běžně při programování je zadáván maximální průměr řezné části frézovacího nástroje. Tím nejsou dodrženy technologem předepsané řezné parametry (řezný průměr nástroje se mění).



Obr. 23: Řešená problematika bodu dotyku nástroje s obrobkem

Na Obr. 23 je znázorněna řešená problematika pomocí schématu pro kulové a toroidní nástroje. Červeně znázorněné body určují bod dotyku nástroje s obrobkem, od kterého se dále určuje skutečný řezný poloměr  $R_R$ . Z obrázku je patrné, že skutečný poloměr  $R_R$  se nerovná poloměru nástroje  $R$ . S proměnným průměrem nástroje viz vzorec (1) se stává z hodnoty velikosti otáček vřetene také proměnná hodnota. Tato hodnota byla vždy u programování frézovacích CNC strojů uvažována jako konstanta. Dále s proměnnými otáčkami, viz vzorec (2), se i z hodnoty velikosti posuvové rychlosti stává proměnná hodnota. Změnou zavedených konstant pro velikost posuvové rychlosti a pro velikost

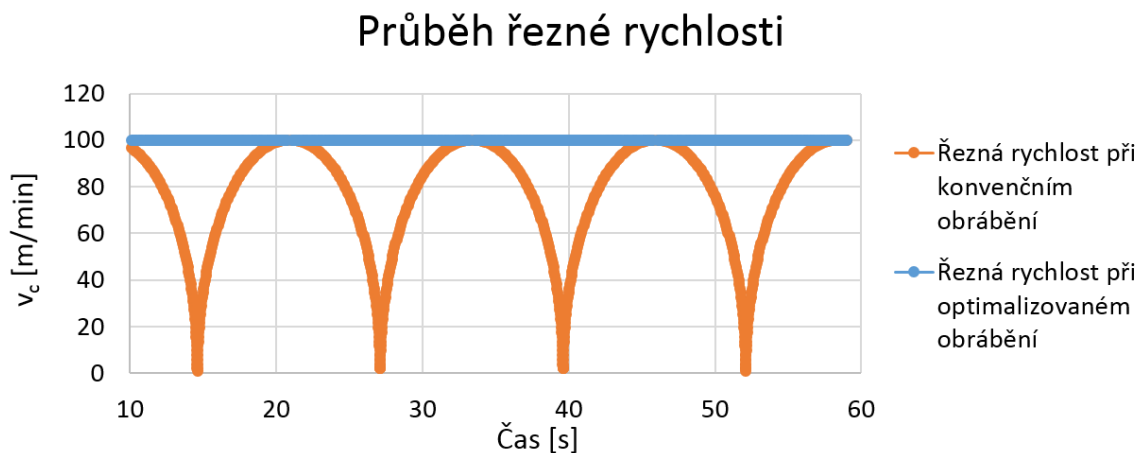
otáček na hodnoty proměnné docílíme přesnější dodržení předepsaných technologických parametrů během dokončovacího obrábění nástroji s kruhovou řeznou hranou. Doposud nebylo nalezeno žádné řešení, které by se věnovalo úpravě technologických parametrů při dokončovacím obrábění nástroji s kruhovou řeznou hranou. Avšak tato optimalizace je podmíněna nutností znalosti informací ohledně bodu dotyku nástroje s obrobkem již z CAM softwaru nejlépe v CL datech. Na Obr. 24 je znázorněn průběh změny průměru nástroje při obrábění modelového dílce vlivem změny kontaktního bodu mezi nástrojem a obrobkem. Jako modelový případ byl zvolen válcovitý obrobek o průměru 100 mm. Bylo provedeno šest průjezdů nástroje metodou řádkováním Zig-Zag při tříosém obrábění. Jako nástroj byla zvolena kulová fréza s průměrem 10mm. Z grafického vyjádření změny skutečného průměru nástroje je patrná nutnost korigovat právě velikost otáček vřetene i velikost posuvové rychlosti. Obdobné řešení se běžně vyskytuje u soustružnických operací při programování na konstantní řeznou rychlost. Aby se dosáhlo konstantní řezné rychlosti, je nutné měnit programově velikost otáček obrobku.



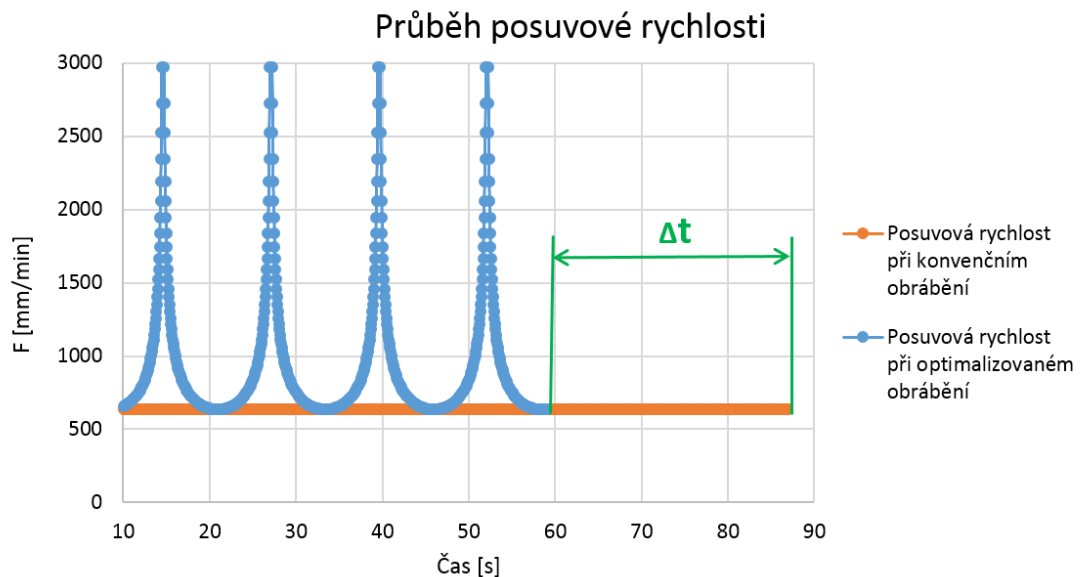
Obr. 24: Průběh změny průměru nástroje při obrábění modelového dílce

Dodržení předepsaných technologických podmínek při obrábění tvarových ploch nástroji s kruhovou řeznou hranou by bylo docíleno řízením hodnoty otáček vřetene a řízením velikosti posuvové rychlosti. Na Obr. 25 je ukázáno porovnání průběhu řezné rychlosti při obrábění modelového dílce konvenčním způsobem a optimalizovaným způsobem.

U optimalizovaného průběhu řezné rychlosti je dosaženo žádaného konstantního průběhu řezné rychlosti. Na Obr. 26 je zobrazen graf průběhu posuvové rychlosti. Z grafu vyplývá i důsledek zkrácení výrobního času (označený jako  $\Delta t$ ) díky dodržení technologických podmínek. Použitím optimalizační funkce je možné dosáhnout zkrácení výrobního času o přibližně 47%, viz  $\Delta t$  na Obr. 26.



Obr. 25: Průběh řezné rychlosti při obrábění modelového dílce



Obr. 26: Průběh posuvové rychlosti při obrábění modelového dílce

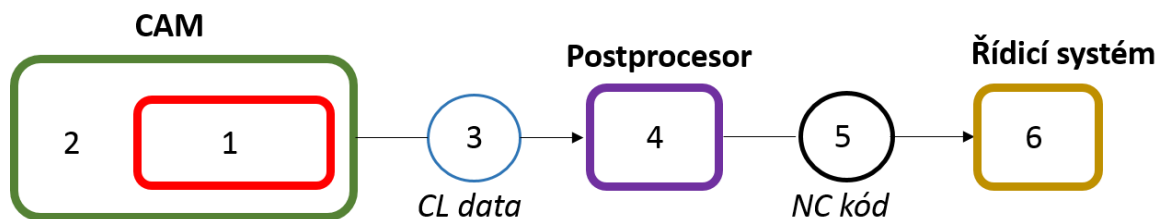
### 3.1 Návrh variant řešení

Před samotným řešením optimalizačního modulu je důležité rozhodnout, kde v řetězci (CAM → postprocesor → řídicí systém) bude daný optimalizační modul realizován.

#### A) Varianta s optimalizačním modulem integrovaným v CAM softwaru

Tato varianta integruje optimalizační modul přímo do prostředí CAM softwaru. Tím by se docílilo uživatelsky přívětivého prostředí a jednoduššího provádění vizualizací potřebných údajů o obráběcím procesu. Hlavní nevýhodou je obtížná integrace optimalizačního modulu do CAM softwaru, jak z hlediska právních záležitostí, tak i z hlediska náročnějšího programování v jazycích podporujících NX Siemens (C++, C#, Visual Basic). Další nevýhodou obtížnější řešení ochrany, jak plynule měnit otáčky vřetena pomocí NC kódu.

Na Obr. 27 je schematicky zobrazen řetězec CAM software → postprocesor → řídicí systém. Jednotlivé bloky jsou označeny číslicemi 1 až 6 (1 – Optimalizační modul, 2 – CAM software, 3 – CL data, 4 – Postprocesor, 5 – NC kód, 6 – Řídicí systém)



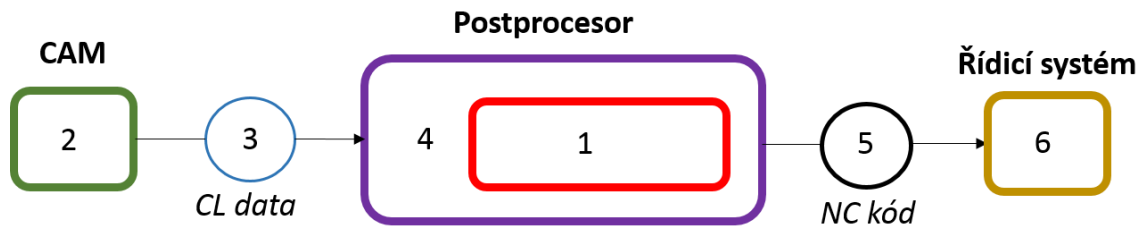
Obr. 27: Varianta s umístěním optimalizačního modulu do CAM softwaru

#### B) Varianta s optimalizačním modulem integrovaným v postprocesoru

U varianty B je optimalizační modul integrován do postprocesoru. Výhodami tohoto umístění je jednodušší vývoj samotného modulu z důvodu otevřenosti postprocesorů. Otevřenost postprocesoru (postbuilderu) je i nevýhodou z důvodu možného zásahu do výpočetního jádra optimalizačního modulu ne-programátorem. Další nevýhodou je obtížná, či nemožná možnost ochrany vlastního programovaného řešení, jak plynule řídit otáčky vřetena pomocí NC kódu. Optimalizační modul je programován v jazyce postprocesoru, u postbuilderu se jedná o programovací jazyk TCL. U této varianty je

možné optimalizační funkci v postprocesoru spouštět příkazem v CAM softwaru u výběru strategie obrábění, nebo volit speciální postprocessor s optimalizačním modulem.

Na Obr. 28 je schematicky zobrazen řetězec CAM software → postprocesor → řídicí systém. Jednotlivé bloky jsou označeny číslicemi 1 až 6 (1 – Optimalizační modul, 2 – CAM software, 3 – CL data, 4 – Postprocesor, 5 – NC kód, 6 – Řídicí systém)

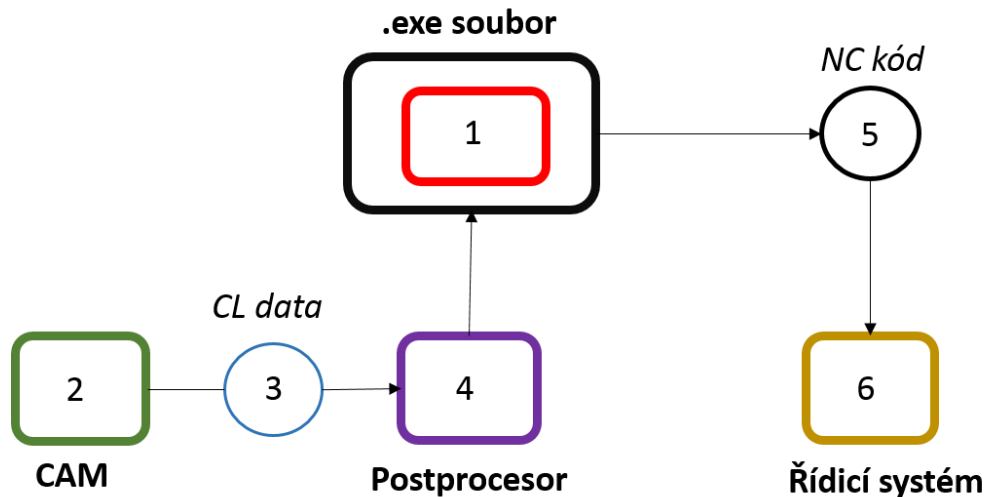


Obr. 28: Varianta s umístěním optimalizačního modulu do postprocesoru

### C) Varianta s optimalizačním modulem integrovaným v samostatném sériově zapojeném softwaru

Tato varianta disponuje samostatným softwarem sériově umístěným mezi postprocesorem a řídicím systémem. Tento samostatný software načítá potřebné parametry z postprocesoru, uvnitř souboru probíhají optimalizační výpočty a výstupem je optimalizovaný NC kód. Hlavní výhodou tohoto řešení je možnost použití matematických softwarů jako například Matlabu. Při výpočtech objemných a výpočtově náročných matematických operací je programování a vývoj optimalizačního modulu snazší. Dále je zde možnost využití vizualizačních funkcí softwaru pro následné grafické zobrazení informací o obráběcím procesu. Nevýhodou této varianty je naopak nutnost zapojení dalšího softwaru do řetězce CAM→postprocesor→řídicí systém. Další nevýhodou je horší obtížnější možnost zamezení přístupu k realizovanému řešení, jak plynule měnit otáčky vřetena pomocí NC kódu. V této variantě slouží postprocesor pouze jako generátor předem určených hodnot z CL dat. Tyto hodnoty mohou být zapsané například do textového souboru (.txt).

Na Obr. 29 je schematicky zobrazen řetězec CAM software → postprocesor → řídicí systém. Jednotlivé bloky jsou označeny číslicemi 1 až 6 (1 – Optimalizační modul, 2 – CAM software, 3 – CL data, 4 – Postprocesor, 5 – NC kód, 6 – Řídicí systém)

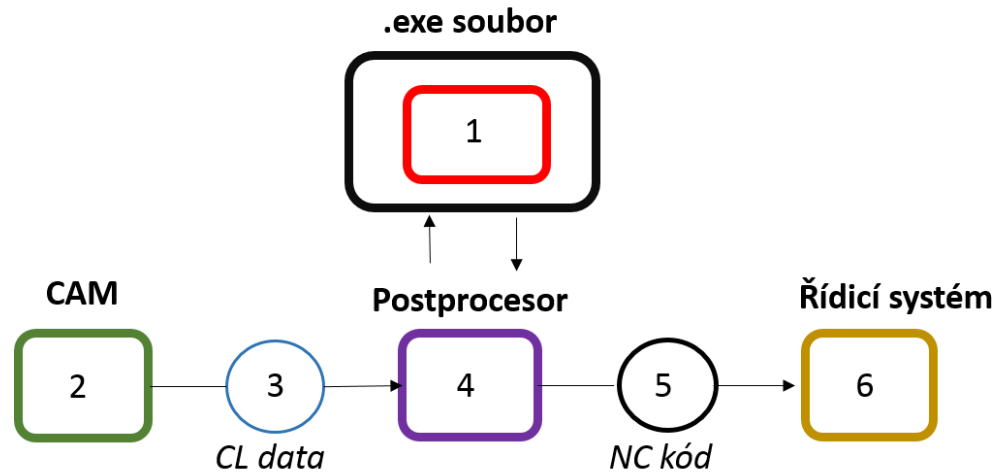


Obr. 29: Varianta s optimalizačním modulem integrovaným v samostatném sériově zapojeném souboru

#### D) Varianta s optimalizačním modulem integrovaným v samostatném paralelně zapojeném souboru

Další varianta pracuje s možností vytvoření nového softwaru (.exe), který by komunikoval s postprocesorem. V novém softwaru by byl naprogramován optimalizační modul. Postprocesor, v případě potřeby, by odeslal potřebné hodnoty do softwaru, který by vrátil korekční hodnoty. Samotné výpočetní jádro optimalizační funkce je uzamčeno v softwaru a není možné jej bez oprávnění přeprogramovat. Řídicím členem v tomto řetězci je postprocesor, který určuje, jaké bloky NC kódu budou odeslány do samostatného softwaru k následné optimalizaci. I v této variantě je nevýhodou možné porušení vlastnických práv k postupu, jak plynule měnit otáčky vřetena pomocí NC kódu. Další nevýhodou je zařazení dalšího výpočetního členu do řetězce CAM→postprocesor→řídicí systém.

Na Obr. 30 je schematicky zobrazen řetězec CAM software → postprocesor → řídicí systém. Jednotlivé bloky jsou označeny číslicemi 1 až 6 (1 – Optimalizační modul, 2 – CAM software, 3 – CL data, 4 – Postprocesor, 5 – NC kód, 6 – Řídicí systém)



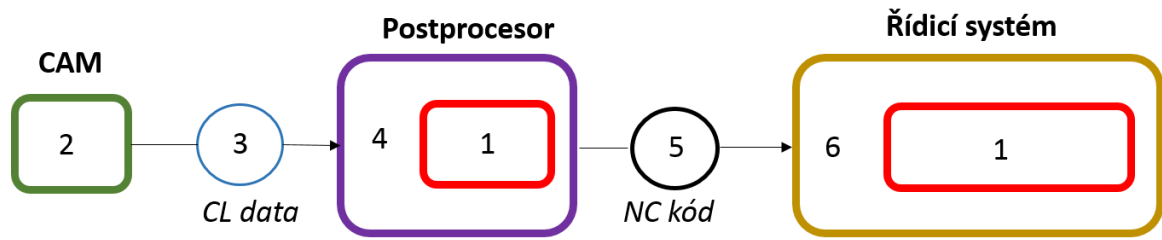
Obr. 30: Varianta s optimalizačním modulem integrovaným v samostatném softwaru

### E) Varianta s optimalizačním modulem integrovaným v řídicím systému

Tato varianta představuje integrování části optimalizačního modulu do řídicího systému. Optimalizační funkce je spouštěna během obráběcího procesu příkazy z NC kódu v podobě například pomocných M funkcí. V postprocesoru je zařazena výpočetní část optimalizačního modulu, která do NC kódu generuje například příslušné pomocné M funkce pro jednotlivé velikosti otáček a posuvů.

Integrace do řídicího systému stroje řeší problém možnosti omezení přístupu k realizovanému programovému řešení plynulé změny otáček během obráběcího procesu. Výpočetní jádro optimalizačního modulu je umístěno v postprocesoru a to přináší výhody a nevýhody jako řešení ve variantě B. Výhodou zařazení části optimalizačního modulu do řídicího systému je bezpečnost proti neodbornému zásahu do optimalizační funkce či nastavení nadřazených bezpečnostních kontrol pro kolizní stavy. Nevýhodou je složitost integrace optimalizační funkce do řídicího systému z hlediska nutnosti zásahu do životně důležitých programů v například v PLC (pro plynulou změnu otáček za pohybu os). Další nevýhodou je složitý vývoj optimalizační funkce.

Na Obr. 31 je schematicky zobrazen řetězec CAM software → postprocesor → řídicí systém. Jednotlivé bloky jsou označeny číslicemi 1 až 6 (1 – Optimalizační modul, 2 – CAM software, 3 – CL data, 4 – Postprocesor, 5 – NC kód, 6 – Řídicí systém)

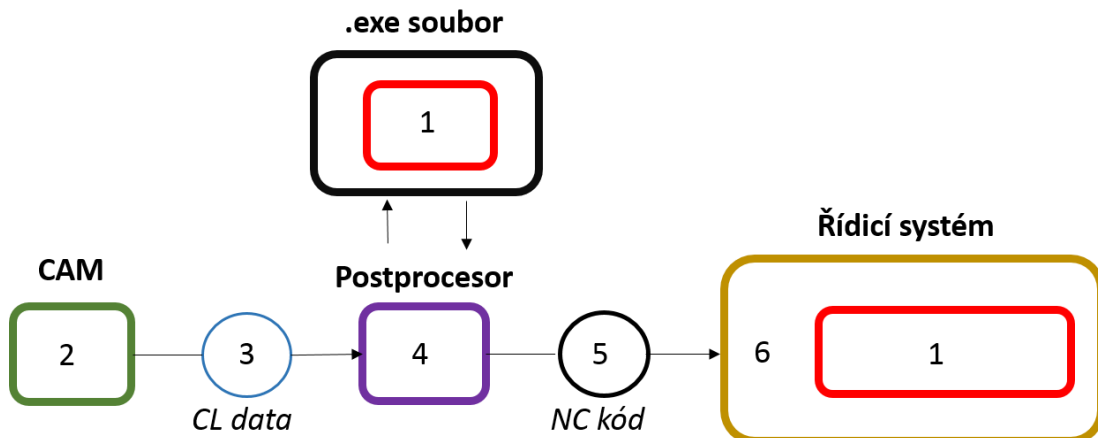


Obr. 31: Varianta s umístěním optimalizačního modulu do řídicího systému a postprocesoru

#### F) Varianta s optimalizačním modulem integrovaným kombinovaně v samostatném softwaru a v řídicím systému

Další možností je sloučení varianty C a D, kdy hlavní výpočetní jádro optimalizačního modulu je umístěno v samostatném „uzamčeném“ souboru, který je vyvoláván postprocesorem. Tento samostatný soubor generuje do NC kódu příkazy například v podobě pomocných M funkcí, které se v řídicím systému transformují do požadovaných hodnot velikosti otáček, a popřípadě i velikosti posuvové rychlosti. Toto řešení přináší výhodu v podobě vysoké míry ochrany vlastnických práv, v bezpečnosti tj. zamezení vstupu ne-programátora a další výhody popsané u varianty C a D. Hlavní nevýhodou je složitost programování optimalizační funkce do řídicího systému, popřípadě PLC.

Na Obr. 32 je schematicky zobrazen řetězec CAM software → postprocesor → řídicí systém. Jednotlivé bloky jsou označeny číslicemi 1 až 6 (1 – Optimalizační modul, 2 – CAM software, 3 – CL data, 4 – Postprocesor, 5 – NC kód, 6 – Řídicí systém)



Obr. 32: Varianta s částečným umístěním optimalizačního modulu do samostatného softwaru a do řídicího systému





### 3.2 Výběr varianty řešení

Jednotlivé výše uvedené varianty A-F byly porovnány na základě těchto parametrů: bezpečnost proti zásahům ne-programátora, ochrana vlastnických práv, uživatelská přívětivost, jednoduchost realizace a výpočetní možnosti dané varianty. Jednotlivé parametry byly hodnoceny dle stupnice nula bodů až tři body. Dle hodnocení variant vychází jako nejvhodnější varianta s označením F (Varianta s optimalizačním modulem integrovaným kombinovaně v samostatném softwaru a v řídicím systému), avšak pro vývoj je nevhodná, jelikož při implementaci optimalizační funkce do varianty F je nutný zásah do struktury programu v PLC (Programmable Logic Controller) stroje. PLC zajišťuje životně důležité funkce obráběcího CNC stroje, ale hlavně zajišťuje bezpečnost. Proto jakýkoliv zásah do PLC je obtížně realizovatelný. Nejvyšší váhy při vývoji optimalizační funkce mají Jednoduchost realizace a Výpočetní možnosti. Pro vývoj a testování nové optimalizační funkce je tedy nejvhodnější varianta s označením B (Varianta s optimalizačním modulem integrovaným v postprocesoru) a C (Varianta s optimalizačním modulem integrovaným v samostatném sériově zapojeném softwaru), kdy pro jednodušší matematické a výpočetní operace je vhodnější varianta s označením B a pro složitější matematické a výpočetní operace je vhodnější varianta s označením C. Váhy kritérií byly voleny především s ohledem na vývoj optimalizační funkce.

Tab. 1: Výběr variant

Váha	1	1	1	10	5	Pořadí variant
Kritérium Varianta	Bezpečnost proti zásahům neprogramátora	Ochrana vlastnických práv	Uživatelská přívětivost	Jednoduchost realizace	Výpočetní možnosti	
A	+	-	+++	-	+	4.
B	-	-	+	+++	-	1.
C	+	-	+	++	++	1.
D	+	-	+	+	++	2.
E	+	++	+	-	-	5.
F	++	+++	+	-	++	3.

Body	Symbol
0	-
1	+
2	++
3	+++



## 4. Optimalizační funkce operující s bodem dotyku

Optimalizační funkce pracuje s bodem dotyku bez uvažování materiálu po před-dokončovacích operacích. Předpokladem je tedy malý přídavek na dokončovací obrábění, který bývá v řádu desetin milimetru. Dodržení řezných podmínek v místě bodu dotyku nástroje s obrobkem má nejvyšší vliv na výslednou jakost povrchu po obrobení. Proto se uvažuje tento bod jako zásadní pro určování průměru nástroje, tedy řezných podmínek. Optimalizační funkce je realizována v rámci tří modulů naprogramovaných v postprocesoru pomocí softwaru postbuilder, pro jednoduchou orientaci označené jako JÁDRO, CL a TIME, viz varianta s označením A. První modul generuje optimalizovaný NC kód, na jednotlivých blocích je určována velikost posuvové rychlosti a velikost otáček vřetene. Druhý modul generuje na základě prvního modulu nová CL data. Tato nová CL data slouží pro možnost barevné vizualizace vybraných údajů na drahách nástroje zpět v CAM softwaru, například změnu skutečného řezného průměru. Vizualizace má podobu obarvených drah nástroje tj. referenčního bodu nástroje dle předepsané škály barev. Třetí modul slouží pro možnost diagnostiky otáček vřetena pomocí laserové sondy. Jelikož dosud není běžné měnit otáčky vřetene během frézování, tak nejsou k dispozici informace o chování použitých vřeten ve vazbě na změny otáček v závislosti na čase (např. časové charakteristiky-otáčky/čas). Dále řídicí systémy Sinumerik pro frézovací centra standardně neumožňují provádět plynulou změnu otáček během obráběcího procesu. Proto je nezbytné před implementací optimalizační funkce znát možnosti vřetene – podrobněji v následujících kapitolách. Při měření otáček laserovou sondou je důležité mít vřeteno ve statické poloze vůči souřadnému systému stroje, proto zjednodušeně třetí optimalizační modul generuje NC kód, kdy nahrazuje lineární interpolace časovými prodlevami. Tím je možné simulovat obráběcí proces s vřetenem ve statické poloze. Tato optimalizační funkce je v diplomové práci především realizována pro válcové nástroje s kulovým koncem, kde jsou nejlépe prokazatelné vlastnosti optimalizační funkce, avšak funkce zahrnuje i práci s toroidními nástroji.



## 4.1 Použitá aparatura – bod dotyku

K realizaci optimalizační funkce je použit CAD/CAM/CAE software NX od společnosti Siemens, konkrétně vývojové prostředí na tvorbu postprocesoru Postbuilder. Výhodou softwaru Postbuilder je kompatibilita s výstupními daty ze Siemens NX CAM. Dále je pro tvorbu a ověřování optimalizační funkce použit tříosý CNC frézovací stroj s řídicím systémem Sinumerik 840D od společnosti Siemens. Následujících kapitoly obsahují bližší popis použité aparatury.

### 4.1.1 MCFV 5050 LN (LM1)

Pro implementaci a testování optimalizačních modulů byl použit tříosý frézovací stroj s označením MCFV 5050 LN (LM1), viz Obr. 33. Stroj LM1 byl vyvinut ve spolupráci firmy ZPS – TAJMAC s Výzkumným centrem pro strojírenskou výrobní techniku a technologii. Stroj je vybaven lineárními motory na pohybových osách X a Y. Maximální rychlení stroje je  $20 \text{ m/s}^2$  a pracovními posuvy dosahují rychlostí 80 m/min. Pracovní prostor stroje je 500 x 400 x 400 mm (X x Y x Z). Stroj je osazen vřetenem CyTec o výkonu 18 kW a maximálních otáčkách  $15\,000 \text{ min}^{-1}$ . Upínací kužel vřetene je SK 40. CNC řídicí systém stroje je Sinumerik 840D.

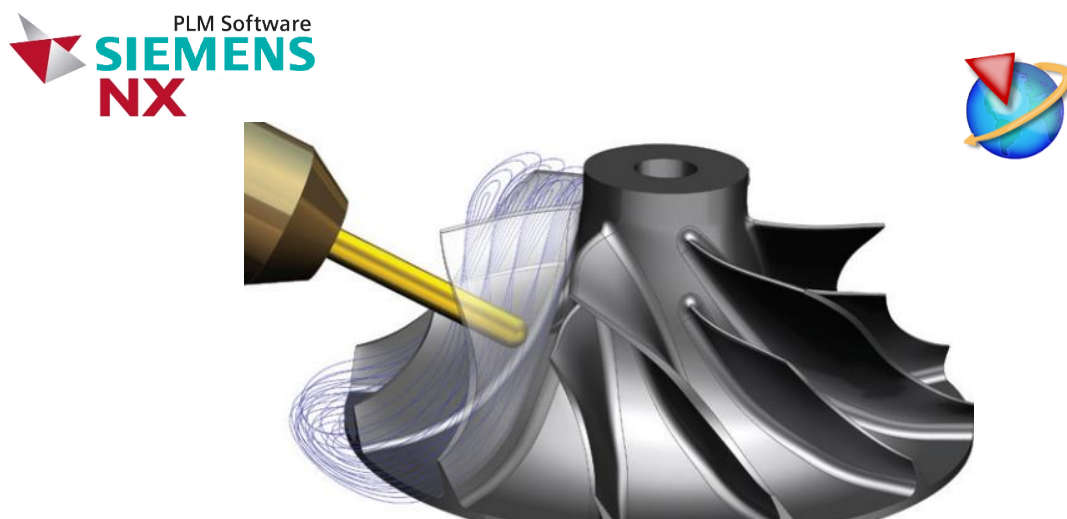


Obr. 33: CNC stroj MCFV 5050 LN (LM1)

### 4.1.2 Siemens NX

Pro realizaci optimalizační funkce byl zvolen dostupný CAM software na ústavu výrobních strojů a zařízení Ú12135, kterým je Siemens NX. NX je PLM software, obsahující mimo jiné moduly CAD a CAM.

NX CAM umožňuje programování drah nástroje v několika kategoriích. Zmíněny jsou zejména frézovací operace. Kategorie jsou dva a půl osé frézování, tříosé frézování, vysokorychlostní frézování, pětiosé frézování, multi-function obrábění a turbomachinery milling. Zmiňované operace mají možnost hrubovacích, semi-finishovacích a dokončovacích metod.

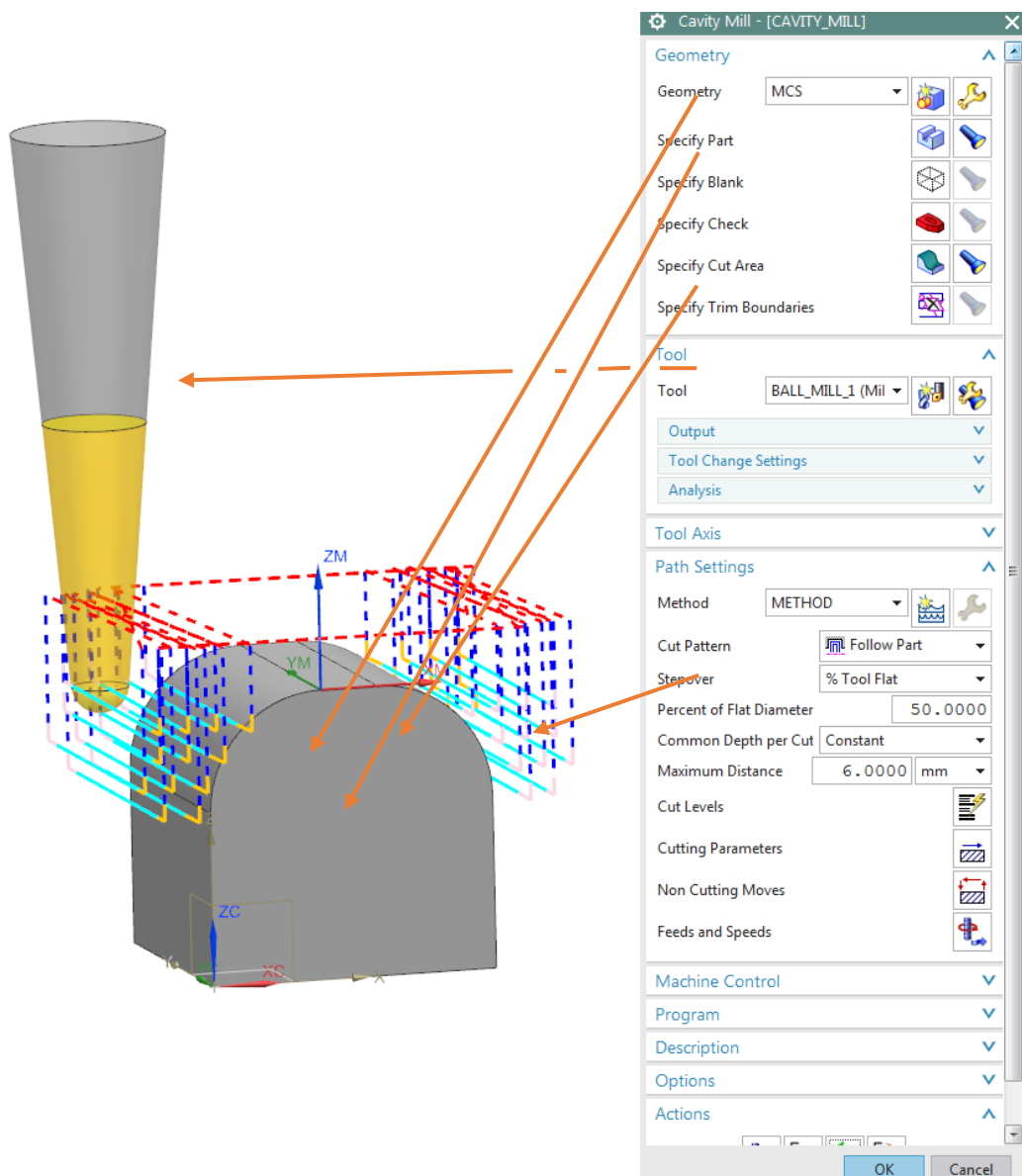


Obr. 34: Ukázka operace turbomachinery milling (Siemens NX), převzato z lit. [12]

Samotné naprogramování drah spočívá v načtení modelu z CAD softwaru do NX CAM v podporovaném formátu, jako je například step, stl, stp, prt apod. Prvním krokem je vytvoření geometrie obrobku „Create Geometry“ a tím uživatel určí souřadný systém obrobku, určí se model obrobku „Specify Part“, polotovár „Specify Blank“ a v případě nutnosti je zde možnost zahrnutí upínek a jiných předmětů, se kterými hrozí kolize v obráběcím prostoru stroje. Druhým krokem je zvolení operace. Jednotlivé operace zahrnují způsob obráběcí strategie. Při zvolení vybrané operace se navolí požadované obráběné plochy na obrobku, z nabídky se vybere typ nástroje a určí se rozměry. V případě víceosého obrábění je možnost určit naklopení nástroje „Tool Axis“. Dále se

určí technologické parametry např.  $a_p$ ,  $a_e$ ,  $v_f$ , otáčky vřetena apod. Po vyplnění zmiňovaných náležitostí je možné vygenerovat dráhy nástroje.

Po vygenerování drah nástroje je možné vizualizovat obráběcí proces přes ikonu Verify. Vizualizovat je možné samotné dráhy nástroje s obrobkem a nástrojem, viz Obr. 35, nebo dráhy nástroje i s polotovarem, kde lze kontrolovat výsledný tvar obrobku po operaci.



Obr. 35: Vizualizované dráhy nástroje se základním nastavením operace



## CL data

Prvním krokem bylo nutné nalézt parametry důležité pro realizaci optimalizační funkce v Siemens NX. Obecně hledání potřebných údajů z CL dat je obtížné, neboť často neexistuje žádná příručka ani popis, které proměnné z CL dat co vyjadřují. Dalším problémem je, že množství typů generovaných proměnných z CL dat se odvíjí od nastavení operací a nastavení pomocných funkcí v CAM softwaru. Tím se hledání potřebných CL dat značně komplikuje, a nastává časově náročné hledání a dešifrování potřebných proměnných ze zmiňovaných CL dat. Ukázka jedné z metod hledání potřebných proměnných je patrná na Obr. 36 (nalevo posloupnost událostí v obráběcí operaci a napravo příslušné globální proměnné) k hledání byl použit nástroj Post Review Tool. Další použitou metodou bylo vypisování proměnných do textového souboru při generování NC kódu. Ověření nalezených proměnných bylo realizováno pomocí 2D výkresů obrobku a nástroje konstruovaných ze známých údajů z vybraného bloku v NC kódu pomocí CAD softwaru. Proměnné z CL dat v Siemens NX jsou deklarovány jako mom\_(název proměnné) v jazyce TCL viz kapitola Tool Command Language. Tyto proměnné jsou výchozím bodem pro programování jak samotných postprocesorů, tak i optimalizační funkce v postprocesoru.

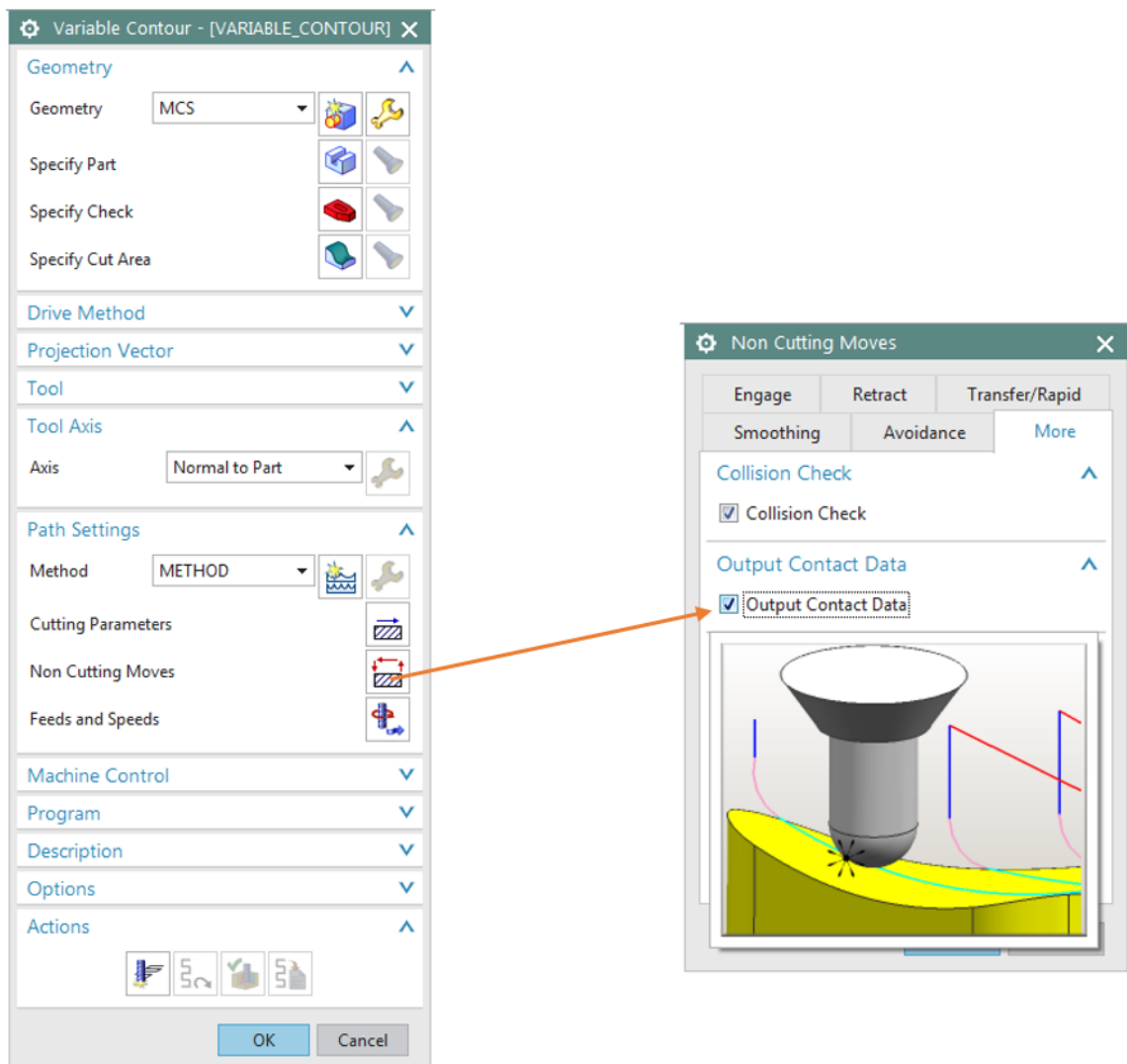
```
74 NX/Post Review Tool -
Var: =
MOM__part_attributes 0 +
MOM_start_of_program 1 +
MOM_machine_mode 2 +
MOM_ball_center_output 3 NO
MOM_start_of_path 4 +
MOM_set_csys 5 +
MOM_first_tool 6 +
MOM_msys 7 +
MOM_initial_move 8 +
MOM_rapid_move 9 +
MOM_linear_move 10 +
MOM_linear_move 11 +
MOM_linear_move 12 +
MOM_linear_move 13 +
MOM_linear_move 14 +
MOM_linear_move 15 +
MOM_linear_move 16 +
MOM_linear_move 17 +
MOM_linear_move 18 +
MOM_linear_move 19 +
MOM_linear_move 20 +
MOM_linear_move 21 +
MOM_linear_move 22 +
MOM_linear_move 23 +
MOM_linear_move 24 +
MOM_linear_move 25 +
MOM_linear_move 26 +
MOM_linear_move 27 +
MOM_linear_move 28 +
MOM_linear_move 29 +
MOM_linear_move 30 +

Event : MOM_linear_move 42
EVENT : MOM_linear_move 42 +
Address: N = 530
Address: N = 535
Address: X = 22.315
Address: Z = 74.893
V: mom_alt_pos[0] = 22.31533055658401600
V: mom_alt_pos[1] = 0.00000000090424124
V: mom_alt_pos[2] = 74.89255400242022600
V: mom_alt_pos[3] = 0.00000000000000000
V: mom_alt_pos[4] = 0.00000000000000000
V: mom_ball_center[0] = 22.31533055334238800
V: mom_ball_center[1] = 0.00000000090424102
V: mom_ball_center[2] = 74.89255396760459900
V: mom_contact_center[0] = 22.31533055334238800
V: mom_contact_center[1] = 0.00000000090424102
V: mom_contact_center[2] = 74.89255396760459900
V: mom_contact_normal[0] = 0.09258967097187781
V: mom_contact_normal[1] = 0.00000000000000000
V: mom_contact_normal[2] = 0.99570435011067382
V: mom_contact_point[0] = 21.85179341943774400
V: mom_contact_point[1] = 0.00000000632634212
V: mom_contact_point[2] = 69.91408700221339200
V: mom_contact_status = ON
V: mom_current_motion = linear_move
V: mom_cutting_time = 0.01306116444434216
V: mom_event_error =
V: mom_event_error =
V: mom_event_error =
V: mom_event_error =
V: mom_event_number = 41
V: mom_event_time = 0.00068741284593768
```

Obr. 36: Ukázka hledání proměnných z CL dat pomocí nástroje Post Review Tool

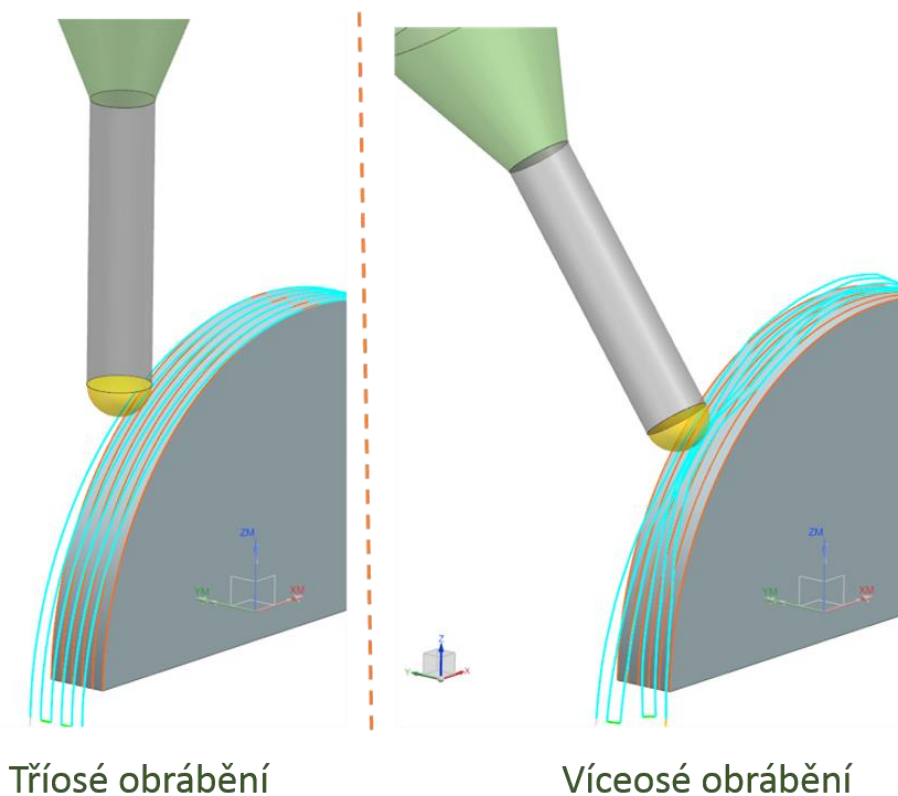


Pro funkčnost optimalizačního modulu pracujícího s bodem dotyku je nutné zvolit správnou operaci pro obrábění, a také ji správně nastavit. Jedná se o funkci využitelnou u řádkovacích operací v NX. Tato operace umožňuje mnoho nastavení strategií drah nástroje jak pro tříosé operace, tak i pro víceosé operace. Řádkovací operace se téměř výhradně využívá na dokončovací obrábění tvarových ploch. Dále je nutné ve zmiňované funkci v záložce Non Cutting Moves následně v podzáložce More potvrdit možnost Output Contact Data. Tímto potvrzením zapínáme vypisování informací o kontaktním bodu dotyku v CL datech. Nastavení je patrné na Obr. 37.



Obr. 37: Nastavení operace v NX Siemens

K funkčnosti optimalizačního modulu je nutné správně zadat požadované řezné parametry v záložce Feeds and Speeds, tyto parametry jsou brány jako požadované technologem. Dle požadovaných řezných parametrů se následně upraví NC kód (změna velikosti otáček a posuvu) tak, aby byly dodrženy předepsané řezné podmínky v místě dotyku nástroje a obrobku.



Obr. 38: Modelové případy drah nástroje pro tříosé obrábění (nalevo) a pro víceosé obrábění (napravo)

Na Obr. 38 je ukázán modelový případ drah nástroje pro tříosé obrábění a pro víceosé obrábění. Kdy světle modrou barvou je vykreslena dráha referenčního bodu nástroje a červenou barvou je vykreslena dráha kontaktního bodu mezi nástrojem a obrobkem. Dráha kontaktního bodu je u obou případů totožná. Jedná se o dokončovací strategii řádkováním. Po nastavení řezných parametrů následuje vygenerování NC programu vybraným postprocesorem.



### 4.1.3 Postbuilder

Postbuilder je vývojové prostředí pro tvorbu postprocesorů. Hlavním programovacím jazykem je jazyk TCL.

Při vytváření postprocesoru jsou k dispozici předvolby výstupu pro řídicí systémy Siemens s řadou Sinumerik, HEIDENHAIN, FANUC, HAAS aj. Možnost volby jednotek v milimetrech nebo palcích, typu obráběcího stroje (frézka, soustruh, drátořez) a počet pohybových os stroje, viz Obr. 39.

The screenshot shows the Postbuilder configuration window. At the top, there is a 'Post Name' field containing 'new\_post' and a 'Description' text area with the text 'This is a 5-Axis Milling Machine With Dual Rotary Tables.' Below these are two radio buttons: 'Main Post' (selected) and 'Units Only Subpost'. Underneath is a 'Post Output Unit' section with radio buttons for 'Inches' and 'Millimeters', and checkboxes for 'Enable UDE Editor' and 'Include Virtual NC Controller'. A 'Machine Tool' section contains a list of machine types: 'Mill', 'Lathe', 'Wire EDM', and a dropdown menu currently showing '5-Axis with Dual Rotary Tables'. The dropdown menu is open, listing options: '3-Axis', '3-Axis Mill-Turn (XZC)', '4-Axis with Rotary Table', '4-Axis with Rotary Head', '5-Axis with Dual Rotary Heads', '5-Axis with Dual Rotary Tables', and '5-Axis with Rotary Head and Table'. To the right of the machine tool list is a 3D rendering of a 5-axis CNC machine. At the bottom of the window are 'OK' and 'Cancel' buttons.

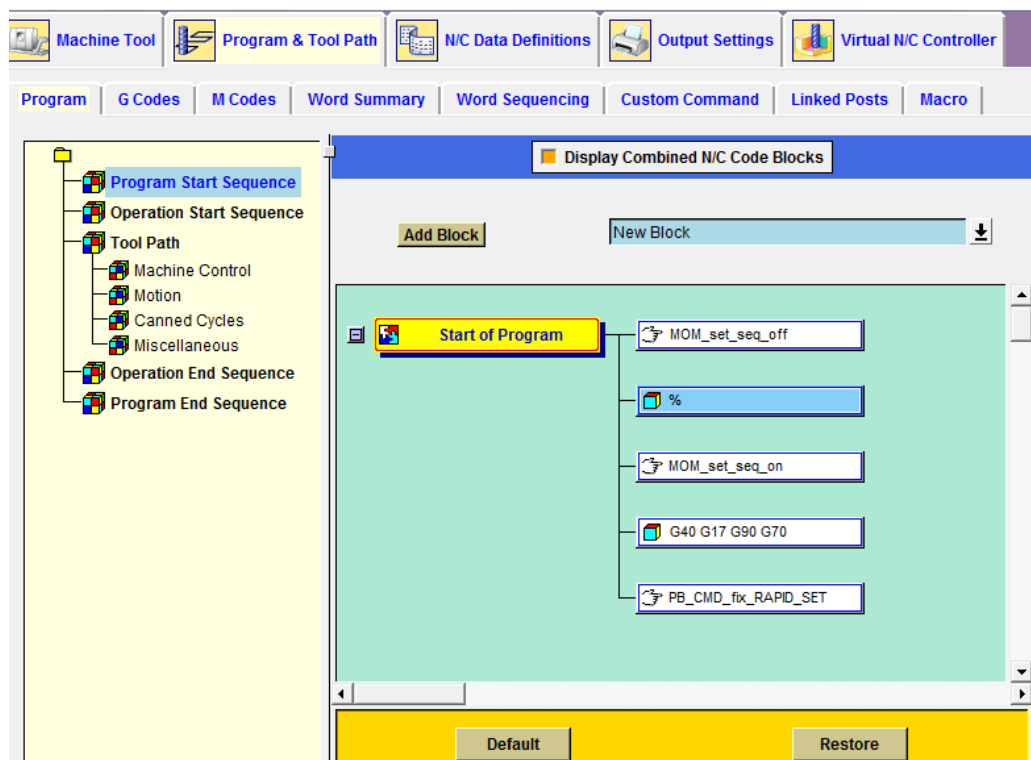
Obr. 39: Vytváření postprocesoru (Postbuilder)

V záložce Program and ToolPath je možnost přímo zasahovat do tvorby postprocesoru. Podzáložka Word Sequencing nabízí nastavení pořadí v zapisování G funkcí, polohových



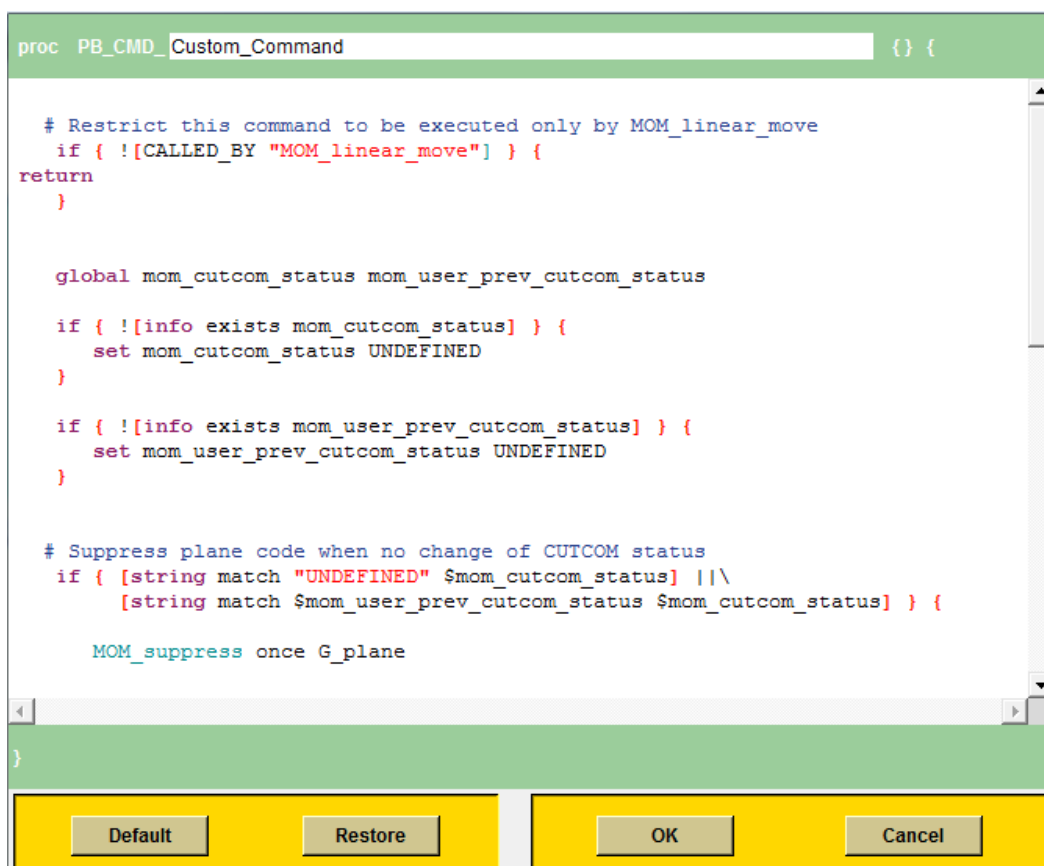
adres, pomocných funkcí apod. V podzáložce Program se nachází nabídky Program Start Sequence, Operation Start Sequence, ToolPath, Operation End Sequence a Program End Sequence.

V Program Start Sequence se nastavují náležitosti provedené vždy při provedení postprocessingu např. vypsání názvu stroje, data a času, G funkcí atd. Nastavení výměny nástrojů, domovské pozice, prvních předoperačních pohybů a jiných potřebných úkonů se programuje v Operation Start Sequence. V ToolPath v sekci Motion je umožněno nastavovat a programovat algoritmy posléze určující bloky NC kódu při pohybu os stroje. ToolPath také obsahuje sekce Machine Control, Canned Cycles a Miscellaneous. Operation End Sequence a Program End Sequence umožňují zápis příkazů na konci operace a celého programu, viz Obr. 40.



Obr. 40: Program and ToolPath (Postbuilder)

Zmiňované podzáložky umožňují vytvářet Custom Command příkazová okna. Do příkazových oken je možné programovat vlastní algoritmy s využitím proměnných generovaných NX CAM, viz Obr. 41.



```
proc PB_CMD Custom_Command {} {  
  
    # Restrict this command to be executed only by MOM_linear_move  
    if { ![CALLED_BY "MOM_linear_move"] } {  
return  
    }  
  
    global mom_cutcom_status mom_user_prev_cutcom_status  
  
    if { ![info exists mom_cutcom_status] } {  
        set mom_cutcom_status UNDEFINED  
    }  
  
    if { ![info exists mom_user_prev_cutcom_status] } {  
        set mom_user_prev_cutcom_status UNDEFINED  
    }  
  
    # Suppress plane code when no change of CUTCOM status  
    if { [string match "UNDEFINED" $mom_cutcom_status] ||\  
        [string match $mom_user_prev_cutcom_status $mom_cutcom_status] } {  
  
        MOM_suppress once G_plane  
  
    }  
  
}
```

Obr. 41: Okno Custom Command v Postbuilderu

### Tool Command Language

Tool Command Language zkráceně TCL je interpretovaný programovací jazyk. Tento programovací jazyk se vyznačuje jednoduchostí a dynamičností. V následujícím odstavci jsou uvedeny základní příkazy a znaky používané v jazyku TCL.

Přiřazení hodnoty do proměnné se provádí napsáním příkazu **set** názvu proměnné a hodnoty. Příkazem **puts** lze vypsát do souboru hodnotu proměnné. Zápisem příkazu **expr** se dají provádět matematické operace. Funkce se vytvářejí pomocí příkazu **proc**. Podmíněné příkazy tj. podmínky jsou zapisovány příkazy typu **if**, **then**, **else** a cykly příkazem **for**, **while**. Poslední zmiňované příkazy mají stejný význam, jako v programovacím jazyku C. Poznámky se zapisují znakem **#**. Znakem **\$** se značí substituce proměnných.



#### 4.1.4 Sinumerik

Firma Siemens je výrobcem řídicích systémů Sinumerik. Nejvíce funkcí je integrováno do verze Sinumerik 840D, viz Obr. 42 a jde tak o řídicí systémy pro nejnáročnější aplikace. Sinumerik 840D umožňuje řízení až 31 pohybových os. Například verze Sinumerik 802D je určen pro méně náročné aplikace pro soustružnické a frézovací stroje.



Obr. 42: Ovládací panel s řídicím systémem Sinumerik 840D, převzato z lit. [9]

#### ISO-kód

Programovací jazyk NC kódu pro Sinumerik se nazývá G-kód (ISO-kód), tento jazyk byl vyvinut společností EIA počátkem šedesátých let dvacátého století. ISO-kód zahrnuje pomocné M kódy, přípravné G kódy, polohu osy, volbu tabulek korekcí, adresy rychlostí atd. Na Obr. 44 je zobrazen NC kód pro obrábění v jazyce ISO-kód (modře je označena hlavička NC kódu a zeleně jsou vyznačeny příkazy k lineární interpolaci).

```
N165 ; (=====)
N170 ; (VYMENA NASTROJE)
N175 ; (PRUMER: 10.00MM, RADIUS: 5.00MM)
N180 ; (=====)
N185 T00 D00
N190 G55
N195 G01 X-30.161 Y0.0 Z-29.832
N200 M08
N205 X-29.183 Z-29.768
N210 X-28.236 Z-29.515
N215 X-27.357 Z-29.081
```

Obr. 43: Ukázka NC kódu (ISO-kód)



### Řízení otáček v řídicím systému Sinumerik

Jak již bylo zmiňováno v předchozích kapitolách je pro optimalizační modul zásadní měnit plynule otáčky vřetene během obráběcího procesu. To dodnes nebylo běžně možné, neboť řídicí systémy neumožňují plynulou změnu otáček během interpolace pohybových os stroje. Například při odbavení úseku NC kódu z Obr. 44 (zeleně jsou vyznačeny příkazy k lineární interpolaci) bude stroj po dosažení otáček vřetena o hodnotu 4000 ot/min interpolovat ve dvou pohybových osách, než dosáhne hodnot v bloku označeném N102. Poté jsou pohybové osy zastaveny a jsou nuceny čekat, než velikost otáček dosáhne hodnoty 7000 ot/min. Až poté stroj přejde k další lineární interpolaci opět v osách X a Y a pohyb tedy není plynulý. Časová prodleva mezi bloky pro dosažení požadovaných otáček však není přípustná, zvláště u dokončovacích operací.

```
N100 M3 S4000
N102 G01 X22 Y1
N104 M3 S7000
N106 G01 X19 Y93
```

Obr. 44: Příklad změny otáček (zeleně vyznačené příkazy k lineární interpolaci)

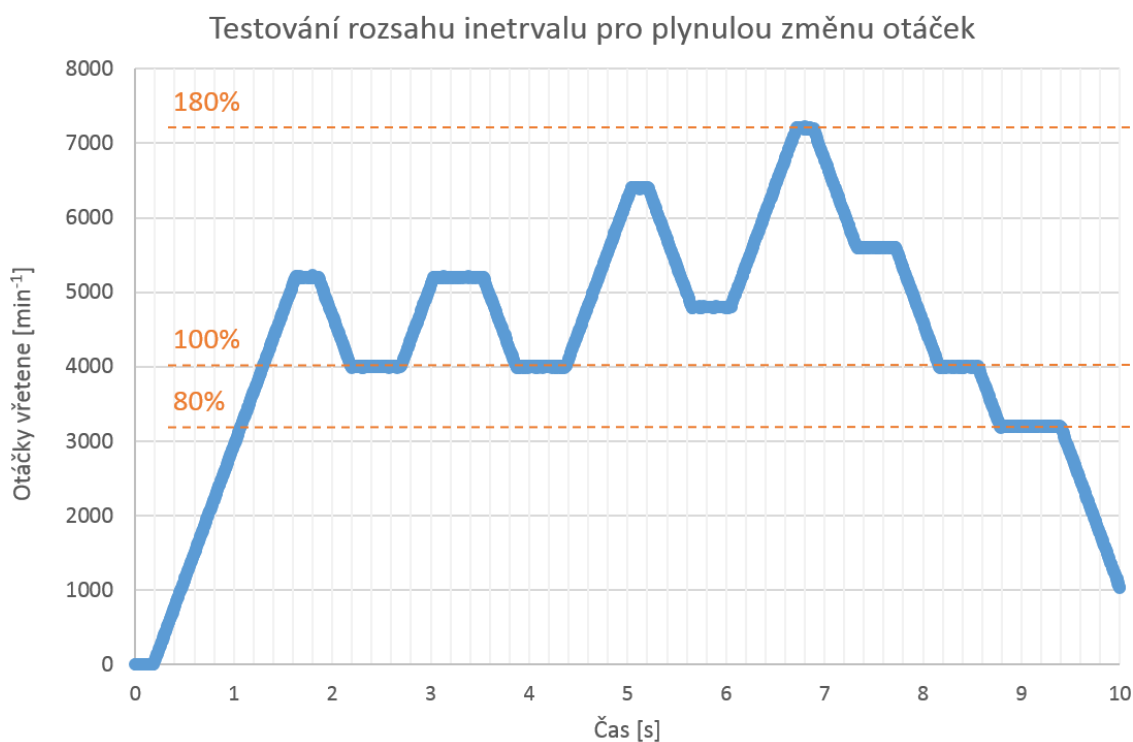
Byly tedy provedeny testy nastavení řídicího systému tak, aby bylo možno provádět plynulé změny otáček současně s plynulým pohybem v pohybových osách. Pro možnost plynulé změny otáček během obráběcího procesu bylo nalezeno řešení v podobě využití tzv. synchronních akcí. Synchronní akce jsou nadstavbou klasického konvenčního programování. Díky těmto akcím lze docílit adaptivní reakce stroje v reálném čase při obráběcím procesu. Synchronní akce fungují na principu podmínek, kdy jejich platnost během obráběcího procesu dokáže ovlivňovat chod programu. Celý proces probíhá v taktu interpolace. Pro plynulou změnu otáček byl použit příkaz \$aa\_ovr[S1] = x. Tento příkaz imituje otáčkový override a požadovaná hodnota se zadává v procentech. Příkaz ovr nijak neomezuje, ani nemění hodnotu klasického „manuálního“ overridu na CNC frézovacím stroji.

```
N100 M3 S4000
N102 G01 X22 Y1
N104 do $aa_ovr[S1]=105
N106 G01 X19 Y93
```

Obr. 45: Synchronní akce (zeleně vyznačené příkazy k lineární interpolaci)



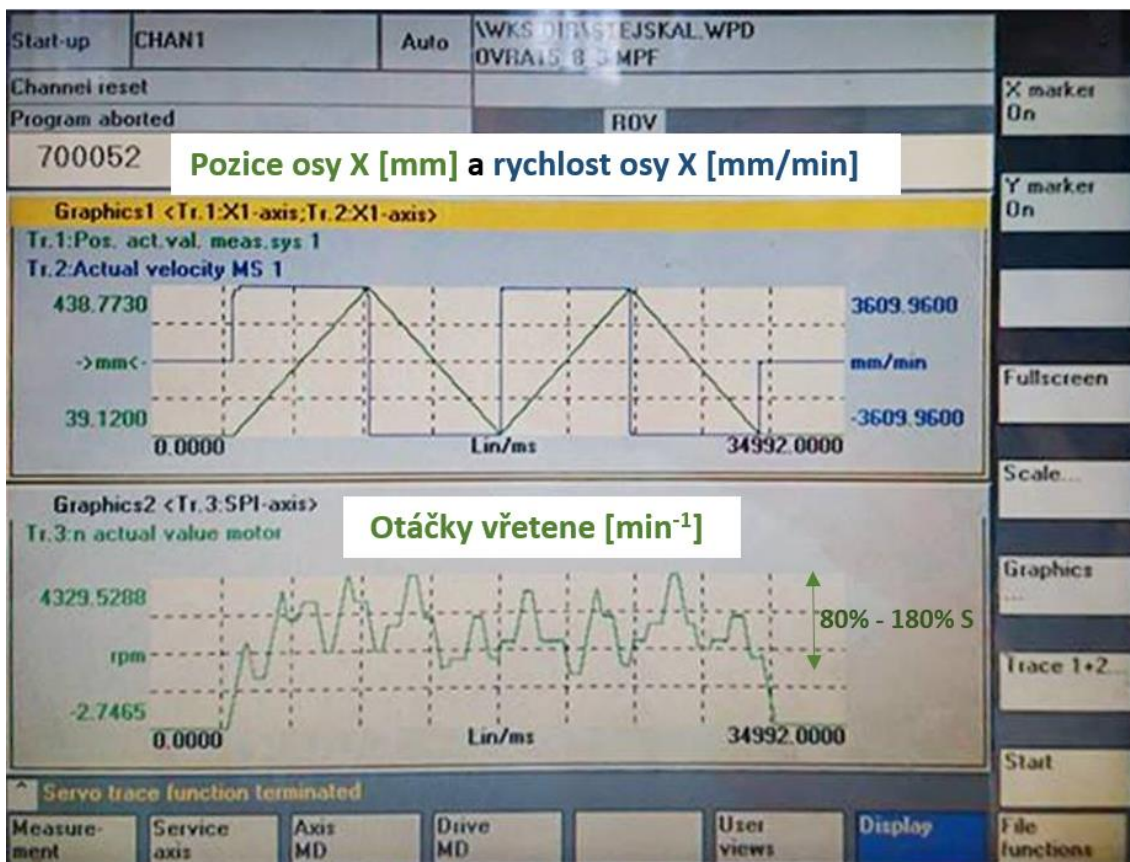
V případě zápisu NC kódu ukázaného na Obr. 46 (zeleně jsou vyznačeny příkazy k lineární interpolaci) osy stroje na rozdíl od minulého případu nebudou čekat na dosažení požadované změny hodnoty otáček, ale plynule jich dosáhnou během následujících interpolací pohybových os stroje. V klasickém nastavení stroje lze měnit otáčky pouze v rozmezí deseti procent od prvotní nastavené hodnoty na bloku s označením N100. Tato hodnota je brána jako 100%, tedy měnit otáčky je možné v intervalu 90% až 110%. Tento interval umožňující plynulou změnu otáček je nedostatečný pro plné využití optimalizace dodržování konstantních řezných podmínek. Proto je nezbytné přenastavit strojní konstantu v řídicím systému pod názvem MD 35150. Tato konstanta určuje povolený interval pro změnu otáček vřetene. Po nastavení konstanty je dosaženo rozšíření intervalu na použitelné hodnoty mezi 80% a 180% nastavených otáček. Rozsah intervalu otáček ovládaných přes synchronní akce byl ověřen pomocí funkce řídicího systému Servo Trace. Jako testovací vstupní program byl použit program s příkazy na změnu velikosti otáček s časovou prodlevou programovanou přes příkaz G04 F2, tj. prodleva v čase dvou sekund. Provedeným testem byla ověřena použitelnost synchronních akcí pro změnu otáček při statické poloze pohybových os stroje, viz Obr. 46.



Obr. 46: Testování rozsahu otáček při použití funkce ovr



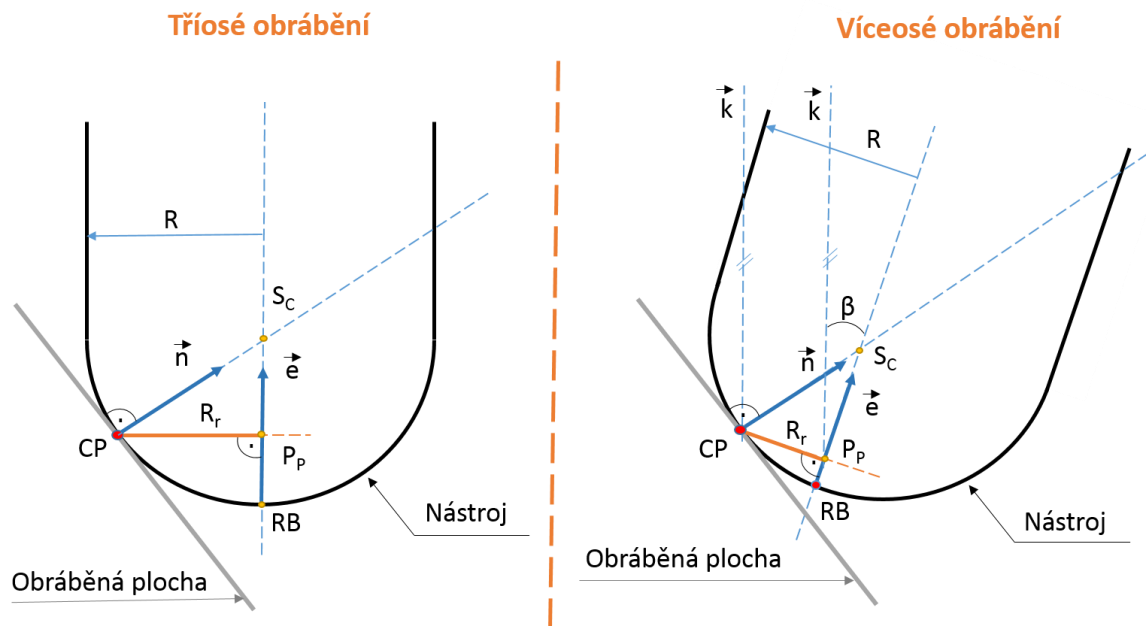
Na Obr. 46 byly dokázány možnosti pro plynulou změnu otáček pomocí synchronních akcí. Tento test byl ověřen při statické poloze pohybových os stroje. Pro možnost použití synchronních akcí pro optimalizační funkci je však nutné, aby plynulá změna otáček probíhala zároveň při interpolaci pohybových os stroje, jak již bylo zmiňováno. Pro ověření byl vytvořen testovací NC kód, kdy v průběhu interpolování osy X byla měněna velikost hodnoty otáček vřetene. Ověření plynulé změny otáček bylo zaznamenáno pomocí měřící funkce Servo Trace v řídicím systému Sinumerik. Pomocí funkce Servo Trace lze zaznamenávat aktuální hodnoty například polohy, rychlosti a zrychlení pohybových os stroje. Na Obr. 47 je v horní části graficky zaznamenána rychlost a pozice osy X. V dolní části obrázku je zaznamenána velikost otáček vřetene, která byla dle NC kódu neustále měněna. Tyto dva grafy dokazují možnost použití synchronních akcí spolu se změnou zmiňované strojní konstanty pro plynulou změnu otáček během obrábění, aniž by pohybové osy stroje zastavovaly. Při běžném použití příkazu M3 S... by byly zaznamenány v horním grafu skoky rychlosti v závislosti na požadavku změny otáček.



Obr. 47: Plynulá změna otáček vřetene za pohybu osy X (Servo Trace)

## 4.2 První část optimalizačního modulu: JÁDRO

První modul slouží ke generování optimalizovaného NC kódu. Pro správnou funkčnost optimalizačního modulu je nutné správné nastavení operací v NX CAM dle podkapitoly CL data. Při běžném postprocessingu se využívá především referenčního bodu nástroje a při víceosém obrábění i vektor osy nástroje. Tyto dvě základní informace nejsou však postačující pro realizaci optimalizačního modulu pracujícím s bodem dotyku. K realizaci bylo nutné nalézt další rozšiřující informace ohledně obráběcího procesu v CAM softwaru z CL dat. Po testování a modelování obráběcího procesu, přesněji nástroje a obrobku v CAD softwaru byly nalezeny údaje o kontaktním bodě nástroje s obrobkem a směrové kosiny kontaktního bodu nástroje s obrobkem. Z těchto zmiňovaných hodnot lze matematickými operacemi vypočítat skutečný průměr nástroje, jak při tříosém obrábění, tak i víceosém obrábění pro jednotlivé bloky NC kódu. Při klasickém tříosém obrábění má směr vektoru nástroje stejný smysl jako základní vektor  $\vec{k}$  kartézského systému pro osu Z, tedy nabývá hodnoty (0, 0, 1).

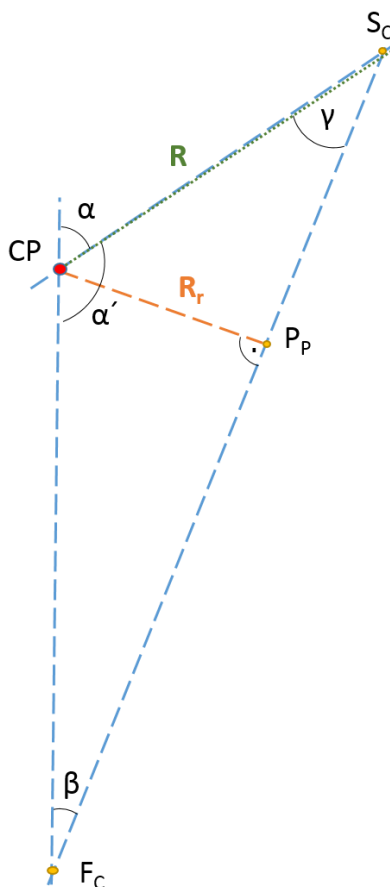


Obr. 48: Výpočet skutečného průměru nástroje z bodu dotyku nástroje s obrobkem

Na Obr. 48 je znázorněn případ tříosého obrábění (vlevo) a víceosého obrábění (vpravo). U obou dvou případů se vychází z pomocného trojúhelníku s vrcholy v kontaktním bodě CP, středu kulového nástroje  $S_c$  a bodu  $P_p$  konstruovaného průsečíkem směru vektoru osy nástroje a normálovým vektorem k ose nástroje procházejícím kontaktním bodem



CP. Vzdálenost úsečky mezi bodem  $S_C$  a CP je vždy rovna poloměru kulového nástroje. Vzdálenost úsečky mezi bodem CP a  $P_P$  je aktuální poloměr rotace  $R_r$ , na kterém se nachází vektor řezné rychlosti a jde tedy o skutečný řezný poloměr nástroje dále jen skutečný řezný poloměr. Úhel  $\beta$ , který svírá osa nástroje  $\vec{e}$  a základní vektor  $\vec{k}$  se nazývá úhel vlečení.



Obr. 49: Pomocný trojúhelník pro výpočet skutečného průměru nástroje

Na Obr. 49 je separovaný trojúhelník s vrcholy  $F_C$ ,  $S_C$ , CP sloužící k výpočtu potřebného úhlu  $\gamma$  pro následný výpočet skutečného řezného poloměru resp. průměru. Úhel  $\alpha$  je získán z CL dat jako odklon směru vektoru normály obráběné plochy (v kontaktním bodě) od osy Z, tedy od základního vektoru  $\vec{k}$ . Stejným způsobem je získán úhel  $\beta$ , odklon směru vektoru osy nástroje opět od osy Z. Následně úhel  $\gamma$  je dopočet třetího úhlu trojúhelníku ze dvou známých úhlů  $\alpha$  a  $\beta$ . Skutečný průměr nástroje je vypočten na základě vlastností



pravoúhlého trojúhelníku  $P_P$ ,  $S_C$ ,  $CP$ . Výsledný vzorec pro skutečného výpočet skutečného průměru  $D_r$  je uveden ve vzorci (3).

Aktuální řezný průměr nástroje:

$$D_r = 2 * R_r = 2 * \sin(\gamma) * R \quad [\text{mm}], \quad (3)$$

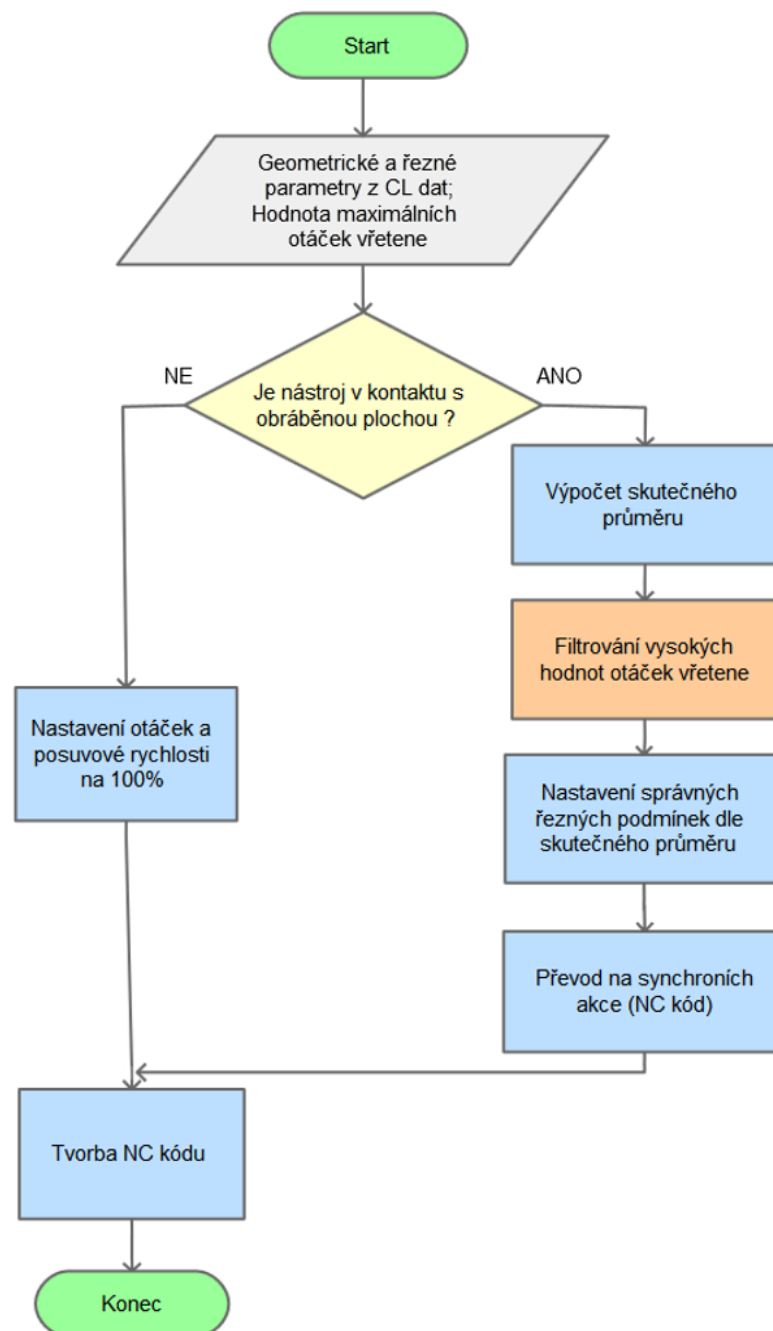
$$\text{kde } \gamma = (180 - (180 - |\alpha|) - |\beta|) \quad [^\circ]$$

Tímto výpočtem je získán skutečný řezný průměr nástroje v každém bloku NC kódu, pouze pokud je nástroj v kontaktu s obráběnou plochou obrobku. Dále je nutné zavést omezení týkající se stavů, kdy velikost řezné rychlosti se blíží nulové hodnotě z důvodu malého až nulového skutečného řezného průměru nástroje. V takových případech nastává požadavek na nekonečně vysoké hodnoty otáčky vřetene, které nejsou reálně dosažitelné. Proto je nutné zavést tzv. „otáčkový filtr“ na odfiltrování vysokých hodnot otáček vřetene. Obdobná funkce pro filtrování vysokých otáček z důvodu malé řezné rychlosti existuje v soustružnických centrech při tzv. programování na konstantní řeznou rychlost. V řídicích systémech Sinumerik se tato funkce vyvolává příkazem LIMS. Tato funkce je uživatelsky přístupná a dává volbu uživateli nastavit hodnotu maximálních otáček vřetene dle uvážení. I tato hodnota musí být zavedena v optimalizačním modulu. Další nutné omezení maximálních otáček plyne z kapitoly **Změna otáček v řídicím systému Sinumerik**, neboť použitelný interval rozsahu otáček je od 80% do 180% od nastavené hodnoty velikosti otáček vřetene. Toto druhé omezení musí být řešeno filtrem pro otáčky přesahující 180%. Tento filtr není v optimalizační funkci uživatelsky přístupný, tj. je pevný.

Následujícím krokem je výpočet skutečné velikosti posuvové rychlosti dle vzorce (2), kdy s rostoucími otáčkami vřetene roste požadavek na velikost posuvové rychlosti pro zachování posuvu na zub. Skutečná velikost posuvové rychlosti je v NC kódu určována standardním příkazem ve vybraných blocích adresou F a určitou hodnotou. Velikost posuvové rychlosti je počítána z velikosti otáček vřetene, tedy nepřímo podléhá filtrům použitých na velikost otáček vřetene dle předchozího odstavce.



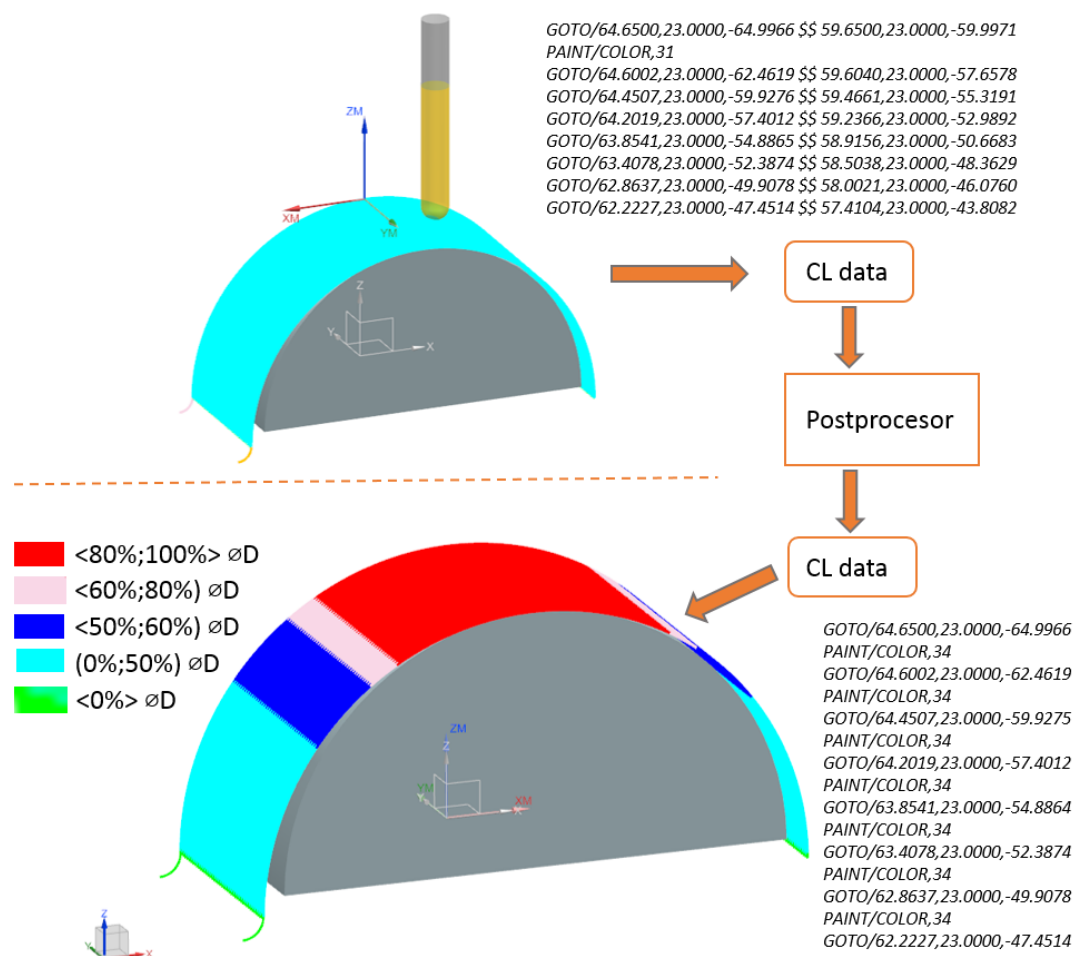
Pro určování změny otáček během obráběcího procesu byly použity synchronní akce. Pro plné využití použitelného intervalu otáček vřetene je uměle přepočítána 100% žádaná velikost otáček vřetene na hodnotu 80% v NC kódu, například příkaz S1000 M3 do parametru řídicího systému do\_\$aa\_ovr[S1]=80. Dále je vypočtená skutečná hodnota otáček vřetene přepočítávána na procentuální hodnotu a zapisována ve zmiňovaných příkazech do vybraných bloků NC kódu, ukázka NC kódu je obsažena v příloze 8. Stručný vývojový diagram optimalizačního modulu JÁDRO je zobrazen na Obr. 50.



Obr. 50: Stručný vývojový diagram prvního optimalizačního modulu

### 4.3 Druhá část optimalizačního modulu: CL

Nadstavba první části optimalizačního modulu je určena pro uživatele k možnosti vizualizaci stávajících či optimalizovaných technologických parametrů (podmínek) přímo v NX CAM na obráběném modelu. Modul je rovněž integrován do postprocesoru. Modul-CL vytváří zpětně CL datový soubor. Tento nový CL datový soubor je zařazen v první části optimalizačního modulu a tím může pracovat s veškerými vypočtenými údaji. Tento modul lze modifikovat na barevnou vizualizaci libovolných proměnných na dráze nástroje. Na Obr. 51 je v horní polovině zobrazeno klasické konvenční vykreslování dráhy nástroje, kdy výpočtový průměr nástroje je konstantní. V dolní polovině je již barevná vizualizace změny skutečného řezného průměru nástroje v závislosti na bodě dotyku nástroje s obrobkem. Jednotlivé barevné oblasti značí interval procent změny skutečného průměru vůči maximálnímu průměru nástroje dle připojené legendy. Ukázka souboru z CL daty je obsažena v textové příloze 9.



Obr. 51: Barevná vizualizace změny průměru nástroje v průběhu obrábění v CAM



#### 4.4 Třetí část optimalizačního modulu: TIME

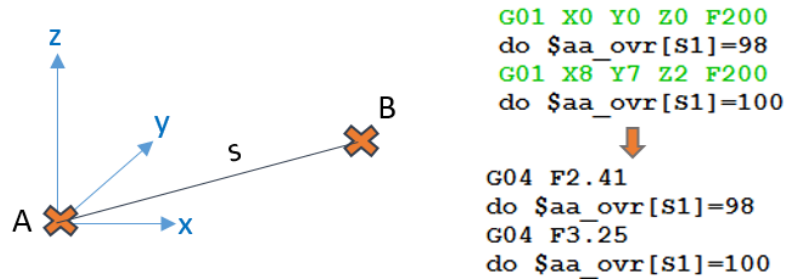
Jelikož plynulé řízení změna hodnoty otáček vřetene během obrábění frézováním není běžně používáno, je před implementací optimalizace (například na nový typ stroje) nutno mít možnost simulovat obrábění se změnou otáček a zároveň odměřovat laserovou sondou skutečné otáčky v závislosti na čase z důvodu zjištění stavu dynamiky vřetene (jak dokáže plynule reagovat na změny otáček). Laserovou sondu lze uchytit na vřeteno stroje, a tím je možné měřit otáčky za provozu. Značné nevýhody laserové sondy umístěné na vřeteno stroje je náchylnost na vibrace, na čistotu, nutnost prostoru na vřeteni stroje pro upnutí a problémy s přívodem kabelů sondy. Ze zmiňovaných důvodů vychází jako nejvhodnější metodika měření používat laserovou sondu z vnějšku obráběcího stroje, například ze stativu. Při kontinuálním dokončovacím obrábění ve třech a více osách zároveň není možné zaměřit laserovou sondou umístěnou mimo stroj vřeteno stroje po celou dobu obráběcího procesu. Proto byl vytvořen modul-TIME. Tento modul nahrazuje bloky lineární interpolace bloky s časovou prodlevou vypočítanou dle vzorce (4) z velikosti posuvové rychlosti a vzdálenosti bodů po sobě jdoucích v NC kódu (bod A je aktuální poloha nástroje a bod B je následující poloha nástroje), viz Obr. 52, kde v ukázce NC kódu (vpravo nahoře) jsou zeleně označeny bloky lineární interpolace, které se následně nahrazují časovými prodlevami. Výsledná prodleva je počítána dle vzorce (5) z velikosti posuvové rychlosti  $F$  [mm/min] a dráhy  $s$  [mm]. Tento způsob výpočtu je zjednodušení o zanedbání například ramp rychlosti pohybových os či nastavení regulace pohonů. Další zjednodušení spočívá v zanedbání řezných sil, které jsou při dokončování v tomto případě zanedbatelné. Tato zjednodušení nemají vliv na výsledný závěr z měření, zda vřeteno vyhovuje pro dané dráhy nástroje při daných řezných podmínkách.

Vzdálenost dráhy nástroje mezi dvěma body interpolace:

$$s = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

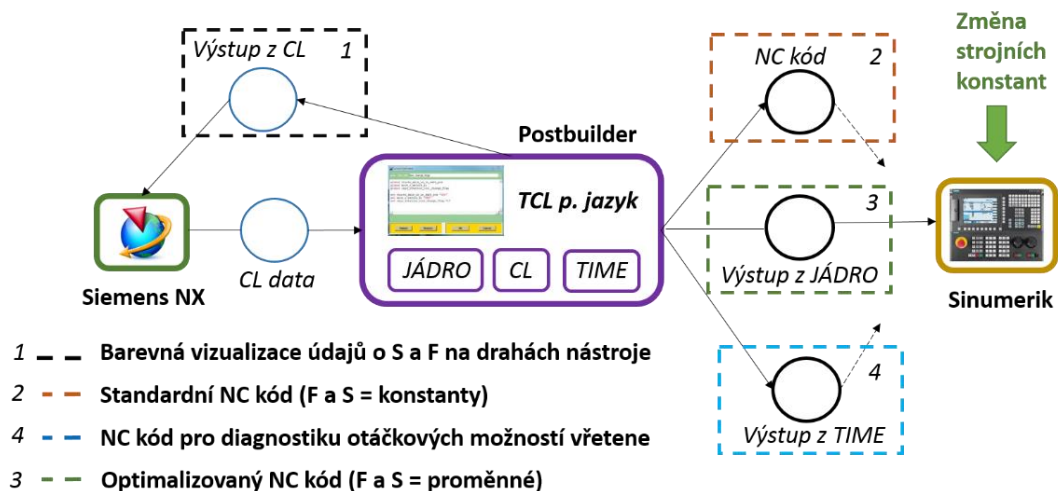
Hodnota časové prodlevy:

$$t = \frac{s}{F} * 60 \quad [\text{s}] \quad (5)$$



Obr. 52: (Vlevo) body dráhy nástroje po sobě jdoucích v NC kódu; (vpravo) nahrazení lineárních interpolací časovými prodlevami

Kompletní optimalizační funkce operující s bodem dotyku je realizována tak, jak je zjednodušeně znázorněno na Obr. 53. Funkce je tvořena třemi optimalizačními moduly (JÁDRO, CL, TIME), které jsou integrovány do postprocesoru pomocí naprogramovaných sekcí zdrojového kódu v jazyce TCL a zařazeny jsou do příslušných sekvencí zpracování technologických operací tak, aby nebylo narušeno standardní generování funkcí do NC programu. V optimalizační funkci byl vytvořen modul s označením JÁDRO, který generuje optimalizovaný NC kód s příkazy na změnu hodnoty otáček vřetene a velikosti posuvové rychlosti, viz příloha 8. Dále byly vytvořeny dva podpůrné moduly CL a TIME. Modul CL slouží k následné barevné vizualizaci hodnoty skutečného řezného průměru na stávající dráze nástroje, viz příloha 9. Poslední modul TIME generuje upravený NC kód, který je možné využít k měření otáček vřetene pomocí laserové sondy v průběhu obráběcího cyklu. Modul TIME nahrazuje lineární interpolace odpovídajícími časovými prodlevami, viz příloha 10. Konkrétní příklad využití bude uveden v kapitole 6. Testování optimalizační funkce při obrábění.



Obr. 53: Optimalizační funkce operující s bodem dotyku nástroje s obrobkem



## 5. Optimalizační funkce operující s přídavkem z předchozí operace

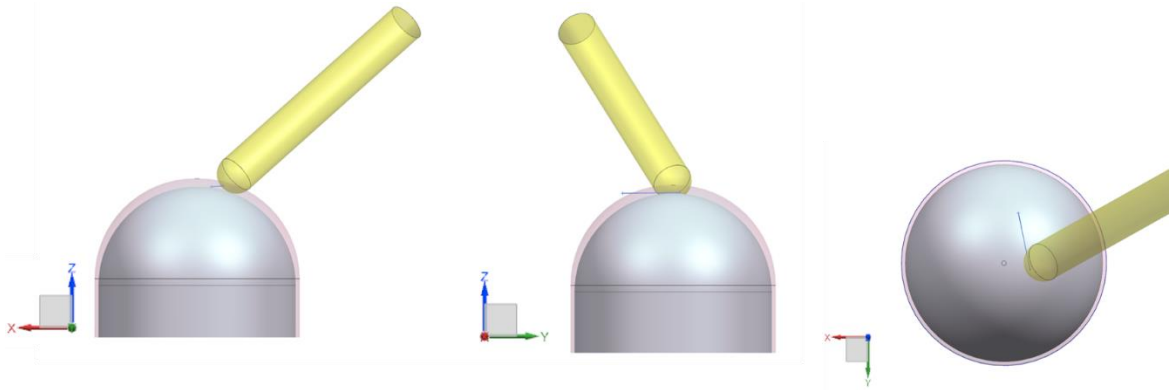
Funkce operující s přídavkem z předchozí operace je určená pro dokončovací obrábění s již „přibližně“ konstantním přídavkem na dokončení, kdy předchozí operace bylo předdokončení. Funkce neoperuje pouze s bodem dotyku, ale s průnikem těles obrobku a nástroje. Touto funkcí je hledán největší skutečný řezný průměr nástroje. Optimalizační funkce operující s přídavkem z předchozí operace byla naprogramována z důvodu složitých matematických operací v softwaru MATLAB. Na Obr. 29. je zobrazeno schema optimalizační funkce operující s přídavkem z předchozí operace.

### 5.1 Použitá aparatura – přídavek materiálu

Použitá aparatura byla stejná jako u optimalizační funkce operující s bodem dotyku, pouze byl přidán software Matlab. Matlab (Math laboratory) je software určen zejména pro vědecko-technické výpočty a simulace. Jednou z výhod Matlabu je možnost rozšíření o různé knihovny funkcí (toolboxy), nebo možnost práce s maticemi.

### 5.2 Výpočetní jádro

Prvním krokem je selektování a setřídění obecných CL dat z CAMu. Tento proces probíhá pomocí postprocesoru. Výstupem je matice vybranných CL dat zapsaných v textovém souboru. Po spuštění funkce dochází k načtení textového souboru vygenerovaného z postprocesoru. Dále dochází k přiřazení proměných k jednotlivým prvkům matice selektovaných a tříděných CL dat. Následuje uživatelské nastavení hodnot , bočního kroku při řádkování, řezné rychlosti, posuvu na zub a počtu zubů frézy. Samotné výpočty jsou řešeny pomocí analytické geometrie. Pro návrh a popis výpočtů byl vytvořen modelový případ nástroje s obrobkem, viz Obr. 54. Jedná se o obecné pětiosé obrábění, jednotlivé pohledy jsou orientovány dle souřadného systému nalevo v dolní části obrázku. Toto řešení je použitelné jak pro tříosé frézování, tak i pro víceosé frézování.

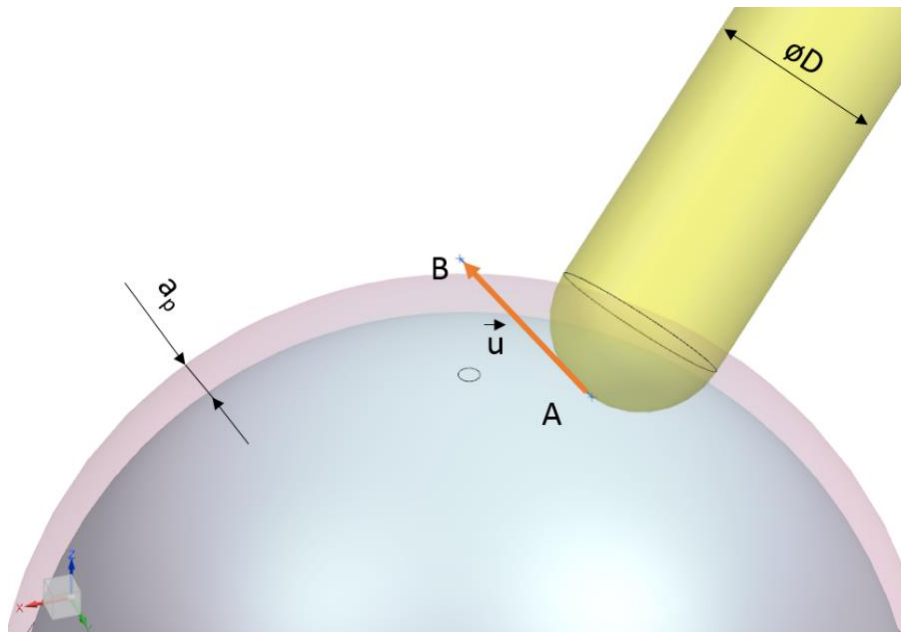


Obr. 54: Modelový případ nástroje s obrobkem

Prvním výpočetním krokem je určení vektoru vyjadřujícího směr dráhy nástroje dle vzorce (6). K tomu je použita informace o aktuálním referenčním bodě nástroje A [ $X_A$ ;  $Y_A$ ;  $Z_A$ ] a následujícím referenčním bodě nástroje B [ $X_B$ ;  $Y_B$ ;  $Z_B$ ]. Obr. 55 je znázorněn nástroj, jehož aktuální referenční bod je bod A.

Vektor směru dráhy nástroje:

$$\vec{u} = B - A = (X_B - X_A; Y_B - Y_A; Z_B - Z_A) \quad (6)$$



Obr. 55: Vektor směru dráhy nástroje

Dále je nutné rekonstruovat obráběnou plochu. Obráběná plocha může být tvarově libovolná a proto bylo přistoupeno k její náhradě pomocí rovin v jednotlivých bodech



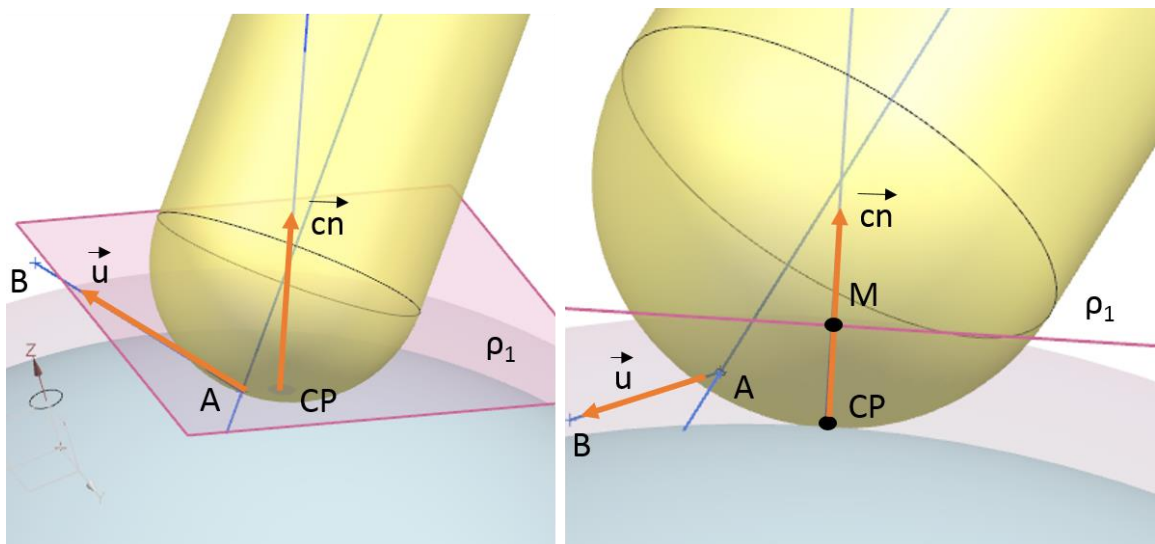
dráhy nástroje. Rekonstrukce plochy je tvořena pomocí roviny  $\rho_1$  s normálovým vektorem  $\vec{cn}$  ( $cn_1; cn_2; cn_3$ ) a bodem M [ $X_M; Y_M; Z_M$ ]. Vektor  $\vec{cn}$  je jednotkový vektor. Bod M je vzdálen od kontaktního bodu CP [ $X_{CP}; Y_{CP}; Z_{CP}$ ] ve směru normály  $\vec{cn}$  o hodnotu  $a_p$  [mm], tedy hodnotu přídatku z předchozí operace.

Souřadnice bodu M:

$$M = CP + (\vec{cn} * a_p) \quad (7)$$

Rovnice roviny  $\rho_1$ :

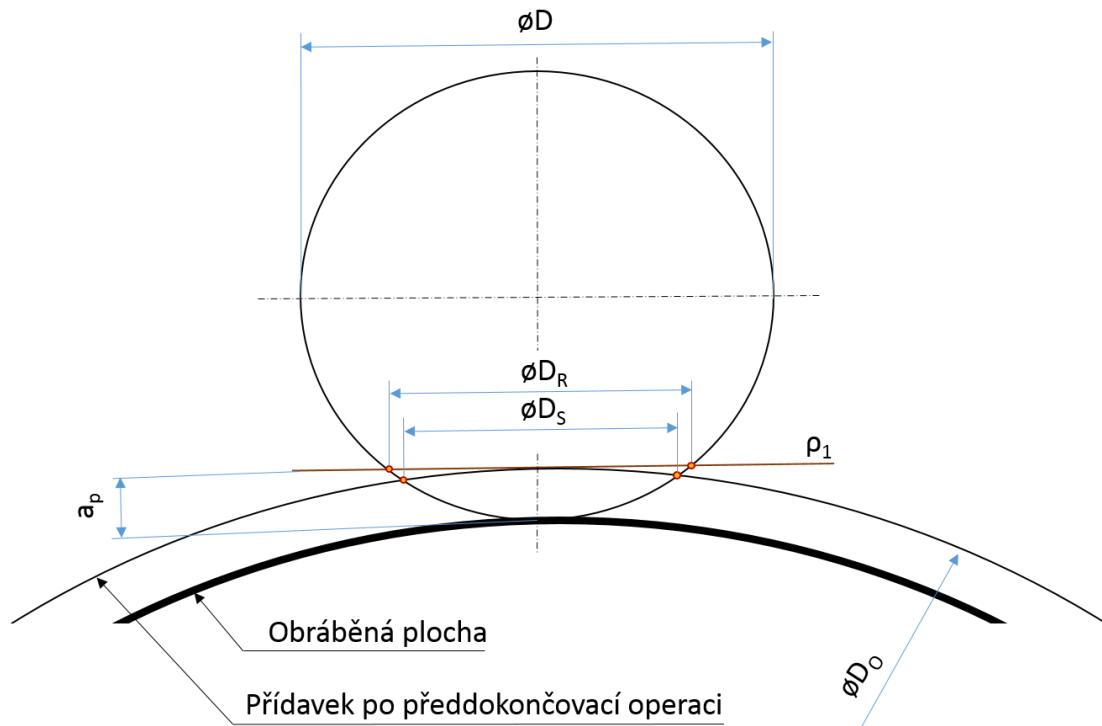
$$\rho_1: cn_1 * X_M + cn_2 * Y_M + cn_3 * Z_M + d_1 = 0 \quad (8)$$



Obr. 56: Konstrukce roviny  $\rho_1$

Bylo provedeno měření v CAD softwaru pro určení velikosti odchylky reálného geometrického řezného průměru  $D_S$  a řezného průměru  $D_R$  získaného náhradou libovolně tvarové plochy rovinou  $\rho_1$ . Jako modelový případ byl zvolen nástroj o průměru 10 mm a válcová obráběná plocha o průměru 100 mm, viz Obr. 57. Vstupní proměnná hodnota byla axiální hloubka řezu  $a_p$ . Hodnoty  $\chi_1$  (procentuální vyjádření rozdílu  $D$  a  $D_S$  vůči  $D$ ) a  $\chi_2$  (procentuální vyjádření rozdílu  $D$  a  $D_R$  vůči  $D$ ), které určují procentuální vyjádření rozdílu mezi maximálním průměrem nástroje a skutečným řezným průměrem nástroje byly vypočteny dle vzorce (9) a (10). Celkový rozdíl  $\sigma$  mezi  $\chi_1$  a  $\chi_2$  je vypočten dle vzorce (11). Velikost rozdílu  $\sigma$  je v porovnání s  $\chi_1$  a  $\chi_2$  zanedbatelná, je tedy možné nahradit libovolně tvarovou plochu rovinou  $\rho_1$ . V Tab. 2 jsou zaznamenány naměřené

a vypočtené hodnoty. Z výpočtů vyplývá, že čím je vyšší hodnota  $a_p$ , tím se procentuálně zmenšuje rozdíl průměrů  $D_R$  a  $D_S$  viz Obr. 58. Další sada výpočtů s nástrojem o průměru 2 mm spolu s vyhodnocením je uložena v elektronické příloze s označením složka 2.



Obr. 57: Modelový případ pro měření rozdílu mezi  $D_S$  a  $D_R$

Tab. 2: Hodnoty rozdílů  $D_S$  a  $D_R$

č. testu	D [mm]	$a_p$ [mm]	$D_0$ [mm]	$D_S$ [mm]	$D_R$ [mm]	$\chi_1$ [%]	$\chi_2$ [%]	$\sigma$ [%]
1	10	0,02	100	0,852	0,894	91,479	91,065	0,41
2	10	0,05	100	1,346	1,411	86,544	85,893	0,65
3	10	0,08	100	1,700	1,782	83,001	82,183	0,82
4	10	0,11	100	1,991	2,086	80,091	79,140	0,95
5	10	0,14	100	2,243	2,350	77,568	76,502	1,07
6	10	0,17	100	2,469	2,585	75,313	74,146	1,17
7	10	0,2	100	2,674	2,800	73,257	72,000	1,26
8	10	0,23	100	2,864	2,998	71,358	70,019	1,34
9	10	0,26	100	3,041	3,183	69,586	68,173	1,41

Procentuální vyjádření rozdílu D a  $D_S$ :

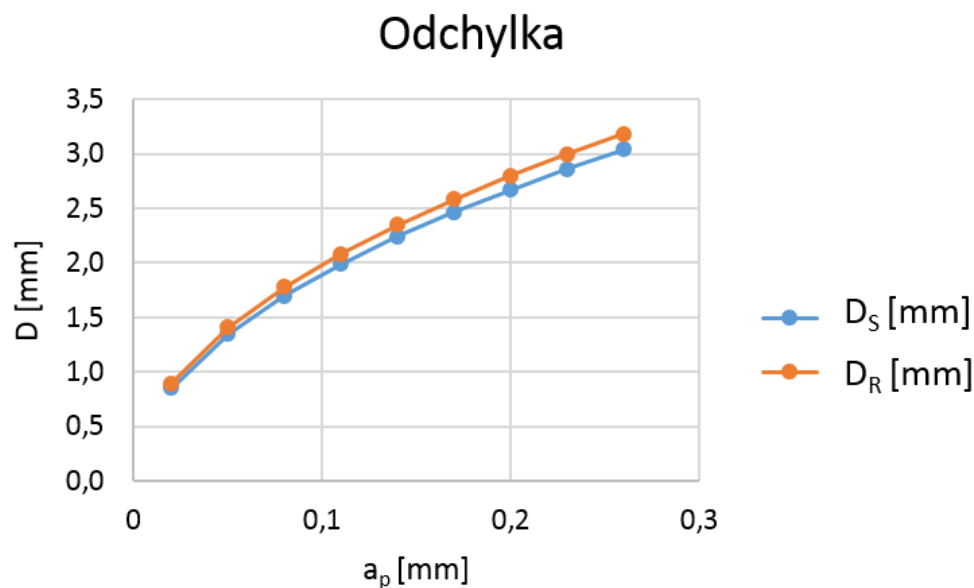
$$\chi_1 = \frac{D - D_S}{D} * 100 \quad [\%] \quad (9)$$

Procentuální vyjádření rozdílu D a  $D_S$ :

$$\chi_2 = \frac{D - D_R}{D} * 100 \quad [\%] \quad (10)$$

Rozdíl mezi  $\chi_1$  a  $\chi_2$ :

$$\sigma = \chi_1 - \chi_2 \quad [\%] \quad (11)$$



Obr. 58: Graf odchylky  $D_S$  a  $D_R$  v závislosti na  $a_p$

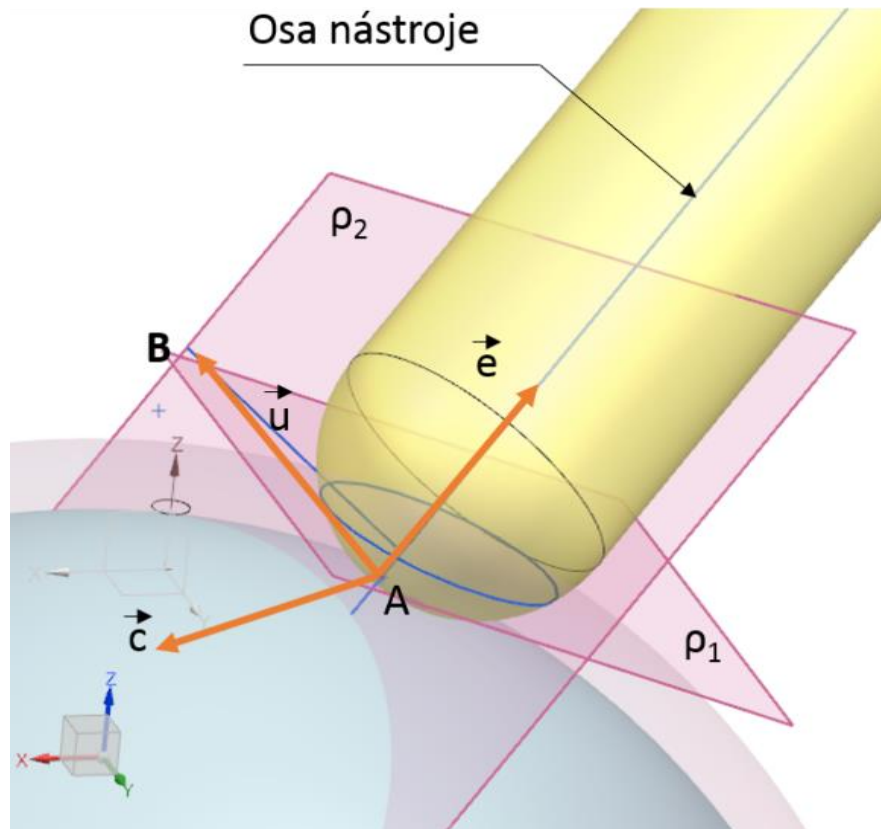
Dalším krokem je konstrukce roviny potřebné k výpočtu skutečných řezných průměrů nástroje ve směru pohybu nástroje, jak pro tříosé obrábění, tak i pro víceosé obrábění. Označení této roviny je  $\rho_2$ , viz Obr. 59. Rovina  $\rho_2$  je sestrojena pomocí normálového vektoru  $\vec{c}$  této roviny a bodu A. Jednotkový vektor  $\vec{c}$  je vektorovým součinem jednotkového vektoru osy nástroje  $\vec{e}$  a jednotkového vektoru směru pohybu nástroje  $\vec{u}$ . Tato rovina slouží k následnému hledání skutečného řezného průměru nástroje s obrobkem ve směru pohybu nástroje. Normálový vektor  $\vec{c}$  je tedy vyjádřen pomocí vzorce (12). Rovnice roviny  $\rho_2$  je vyjádřena vzorcem (13).

Normálový vektor  $\vec{c}$  k rovině  $\rho_2$ :

$$\vec{c} = \vec{u} \times \vec{e} = (u_2 * e_3 - e_2 * u_3, u_3 * e_1 - e_3 * u_1, u_1 * e_2 - e_1 * u_2) \quad (12)$$

Rovnice roviny  $\rho_2$ :

$$\rho_2: c_1 * X_A + c_2 * Y_A + c_3 * Z_A + d_2 = 0 \quad (13)$$



Obr. 59: Konstrukce roviny  $\rho_2$

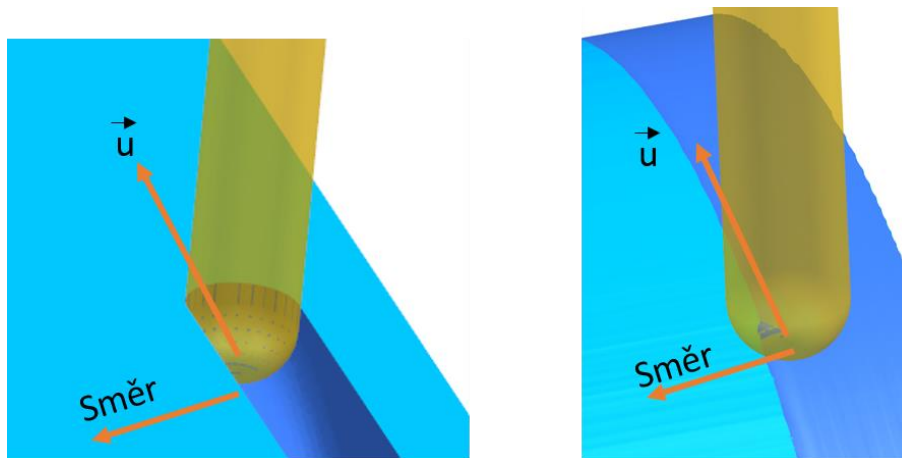
Poslední konstrukcí je konstrukce roviny, která slouží k následnému výpočtu skutečných řezných průměrů nástroje na levé a na pravé straně nástroje (bráno z pohledu na nástroj ve směru pohybu nástroje, viz následující odstavec). Označení této roviny je  $\rho_3$ . Rovina  $\rho_3$  je kolmá na rovinu  $\rho_2$  přes osu nástroje. Její konstrukce lze provést pomocí normálového vektoru, tedy vektorem směru  $\vec{u}$  a bodem A viz vzorec (14).

Rovnice roviny  $\rho_3$ :

$$\rho_3: u_1 * X_A + u_2 * Y_A + u_3 * Z_A + d_3 = 0 \quad (14)$$

Maximální skutečný řezný průměr nástroje je výsledkem dvou průniků těles. Prvním průnikem roviny  $\rho_1$ , roviny  $\rho_2$  a kulové plochy symbolizující nástroj jsou získány dva průsečíky  $P_2, P_3$ . Druhým průnikem roviny  $\rho_1$ , roviny  $\rho_3$  a kulové plochy symbolizující nástroj jsou získány další dva průsečíky  $P_4, P_5$ . Výsledkem jsou čtyři body „průsečíky“

( $P_2, P_3, P_4, P_5$ ) v souřadném systému obrobku, viz Obr. 61. Maximum z kolmé vzdálenosti k ose nástroje z bodů  $P_2, P_3, P_4, P_5$  určuje maximální řezný průměr nástroje. Avšak to by platilo při průjezdu nástroje plným průměrem, tj. struktura přídatku na dokončení by ještě nebyla porušena dokončovacím obráběním. V případě řádkovacích operací je materiál postupně odebírán z jedné strany obrobku. Dochází tedy k odlehčení nástroje z jedné strany, kdy materiál přídatku byl obroben minulým průjezdem nástroje, viz Obr. 60. Tento případ lze optimalizovat posunem bodu  $P_2$ , nebo  $P_3$  k ose nástroje v závislosti na směru obrábění o krok, tj. vzdálenost mezi jednotlivými řádky dráhy nástroje.



Obr. 60: Případy řádkování; (vlevo) obrábění plným průměrem nástroje, (vpravo) nástroj řádkuje zleva doprava částí svého průměru

Průsečíky  $P_2 [P_{2x}; P_{2y}; P_{2z}]$  a  $P_3 [P_{3x}; P_{3y}; P_{3z}]$  se vypočítají soustavou tří rovnic dle vzorce (15). Jedná se o průsečíky rovin  $\rho_1$  a  $\rho_3$  s kulovou plochou nahrazující kulový nástroj se středem v bodě  $CC [CC_X; CC_Y; CC_Z]$  (střed  $S$  kulové části nástroje) a poloměru nástroje  $R$ . Průsečíky  $P_4 [P_{4x}; P_{4y}; P_{4z}]$  a  $P_5 [P_{5x}; P_{5y}; P_{5z}]$  se vypočítají také soustavou tří rovnic dle vzorce (16). Jedná se o průsečíky rovin  $\rho_1$  a  $\rho_2$  s kulovou plochou nahrazující kulový nástroj se středem v bodě  $CC [CC_X; CC_Y; CC_Z]$  a poloměru nástroje  $R$ .

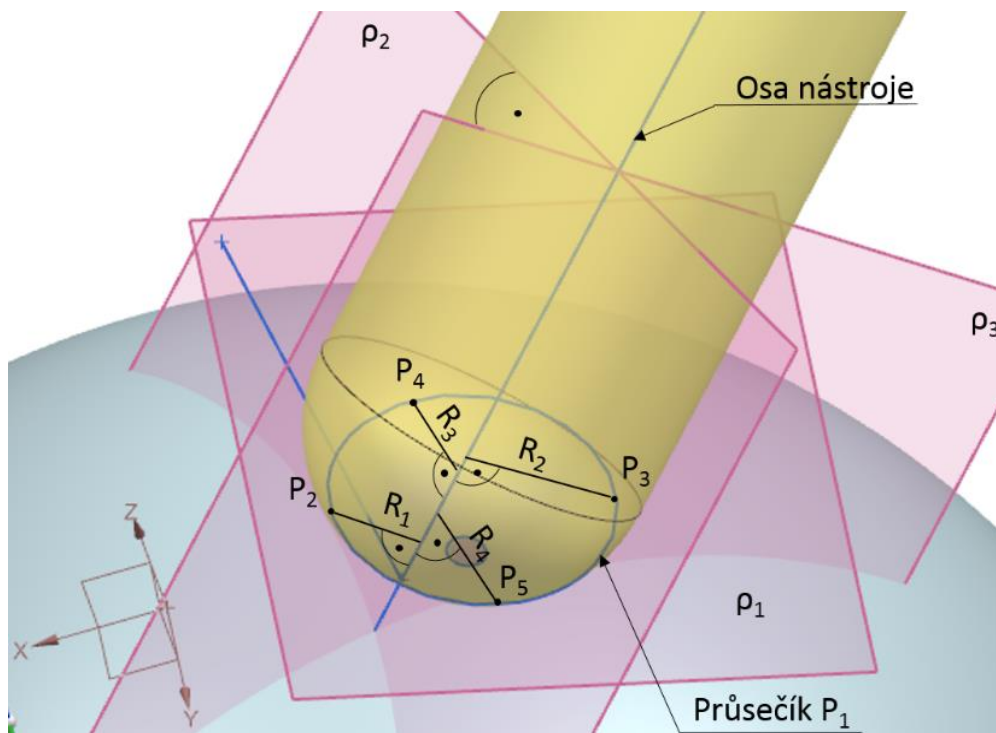
Výpočet průsečíků  $P_2$  a  $P_3$ :

$$\begin{aligned} \rho_3: u_1 * P_{x2,3} + u_2 * P_{y2,3} + u_3 * P_{z2,3} + d_3 &= 0 \\ \rho_1: cn_1 * P_{x2,3} + cn_2 * P_{y2,3} + cn_3 * P_{z2,3} + d_1 &= 0 \\ \kappa: (P_{x2,3} - CC_X)^2 + (P_{y2,3} - CC_Y)^2 + (P_{z2,3} - CC_Z)^2 &= R^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Výpočet průsečíků  $P_3$  a  $P_4$ :

$$\begin{aligned}\rho_3: & c_1 * P_{x3,4} + c_2 * P_{y3,4} + c_3 * P_{z3,4} + d_2 = 0 \\ \rho_1: & cn_1 * P_{x3,4} + cn_2 * P_{y3,4} + cn_3 * P_{z3,4} + d_1 = 0 \\ \kappa: & (P_{x3,4} - CC_X)^2 + (P_{y3,4} - CC_Y)^2 + (P_{z3,4} - CC_Z)^2 = R^2\end{aligned}\quad (16)$$

Výpočty soustav rovnic ze vrorce (15) a (16) jsou počítány pomocí symbolické matematiky v softwaru Matlab. Hledané průsečíky se skutečnými řeznými průměry jsou patrné na Obr. 61.

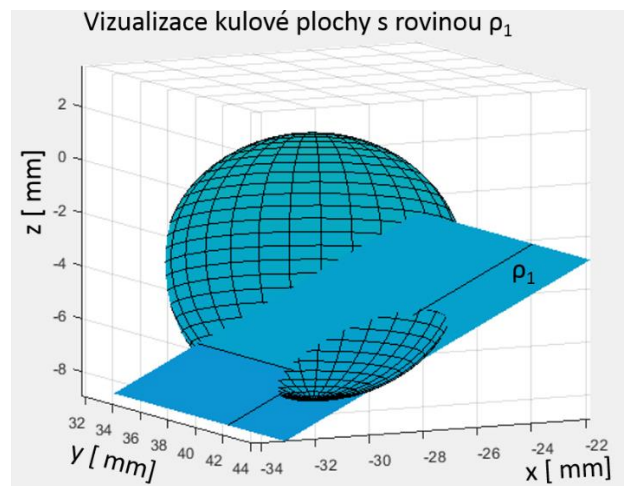


Obr. 61: Hledání maximálního řezného průměru nástroje

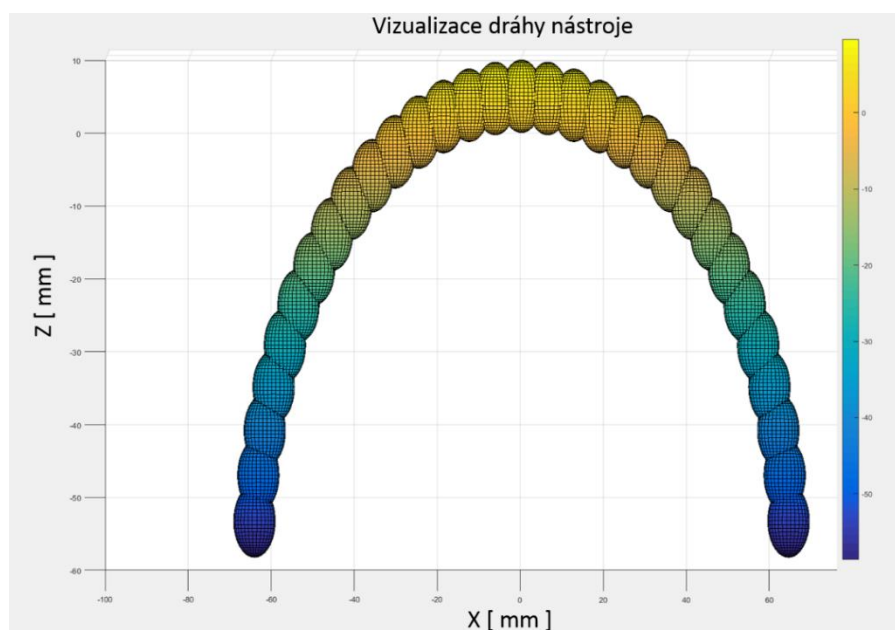
Po určení maximálního řezného průměru nástroje dochází k výpočtům velikosti posuvové rychlosti a velikosti otáček vřetene. I zde jsou zařazeny filtry pro eliminaci nulové řezné rychlosti, tedy nekonečně velké hodnoty otáček vřetene viz optimalizační funkce operující s bodem dotyku. Po určení parametrů  $S$  a  $F$  je vygenerován optimalizovaný NC kód opět viz optimalizační funkce operující s bodem dotyku.

### 5.3 Vizualizace

V této optimalizační funkci operující s přidavkem z předchozí operace je možné pomocí grafického rozhraní softwaru MATLAB vizualizovat výpočetní uzly a dráhy nástroje se simulací kulové části nástroje. Například na Obr. 62 je ukázána vizualizace kulové plochy nástroje v určitém bloku NC kódu, kterou protíná rovina  $\rho_1$  symbolizující přidavek materiálu po předchozí operaci. Na Obr. 63 je vizualizace dráhy nástroje při průjezdu jednoho řádku vybraného z celé řádkovací operace. Kruhová řezná část nástroje je vizualizována pomocí kulové plochy. Celá tato vizualizace lze barevně odstupňovat například dle velikosti hodnoty na pracovní ose Z.

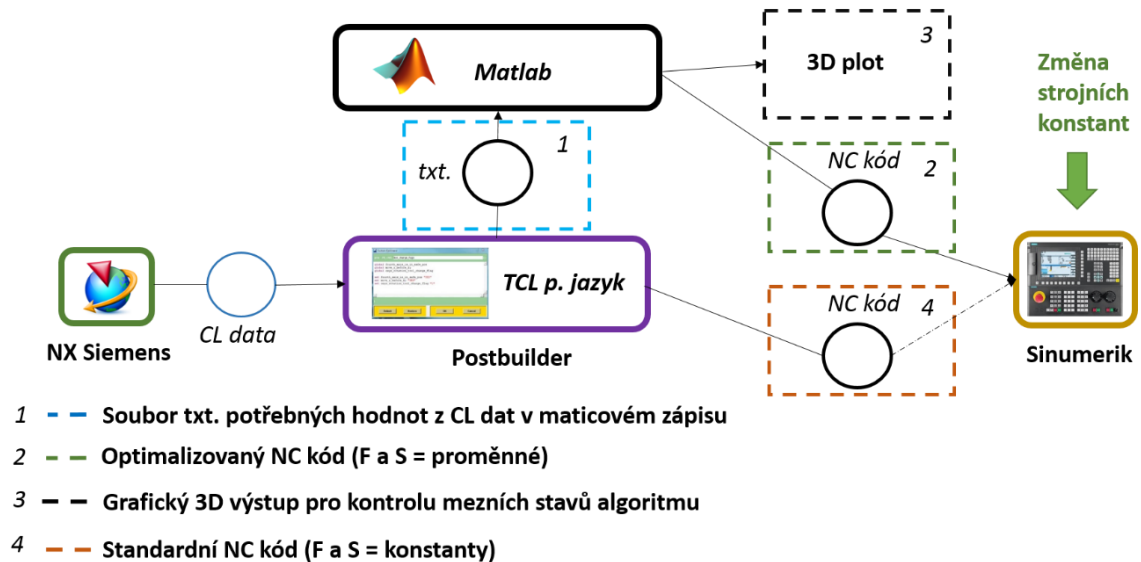


Obr. 62: Ukázka simulace roviny  $\rho_1$  v daném bloku NC kódu v MATLABU



Obr. 63: Simulace dráhy nástroje v MATLABU

Kompletní optimalizační funkce operující s bodem dotyku je znázorněna na Obr. 64. Funkce je tvořena pomocí dvou základních optimalizačních modulů. První modul vypočítává maximální skutečný řezný průměr nástroje. Druhý modul slouží k vizualizaci libovolných volitelných úseků výpočtů v algoritmu, například dráhu nástroje.

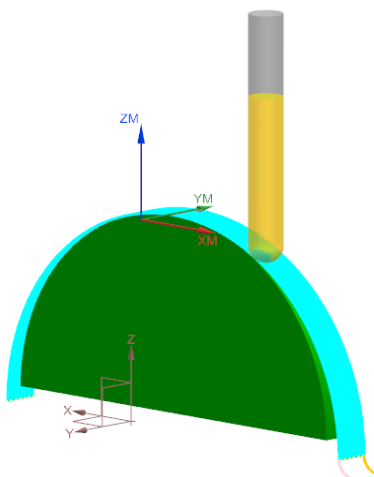


Obr. 64: Optimalizační funkce operující s přídavkem z předchozí operace



## 6. Testování optimalizační funkce při obrábění

Bylo provedeno testování optimalizační funkce operující s bodem dotyku při obrábění s následným vyhodnocením. Cílem měření je ověřit funkčnost optimalizační funkce. Pro možnost porovnání byly vždy realizovány dva testy se stejnými technologickými parametry. Jeden test byl s použitím optimalizační funkce operující s bodem dotyku a druhý test byl proveden konvenčním způsobem obrábění. Mezi vyhodnocované parametry patří: výrobní čas, jakost povrchu, drsnost povrchu a elektrická spotřeba měřená na patě stroje.



Obr. 65: (Vlevo) nastavení dráhy nástroje v CAM; (vpravo) test na stroji

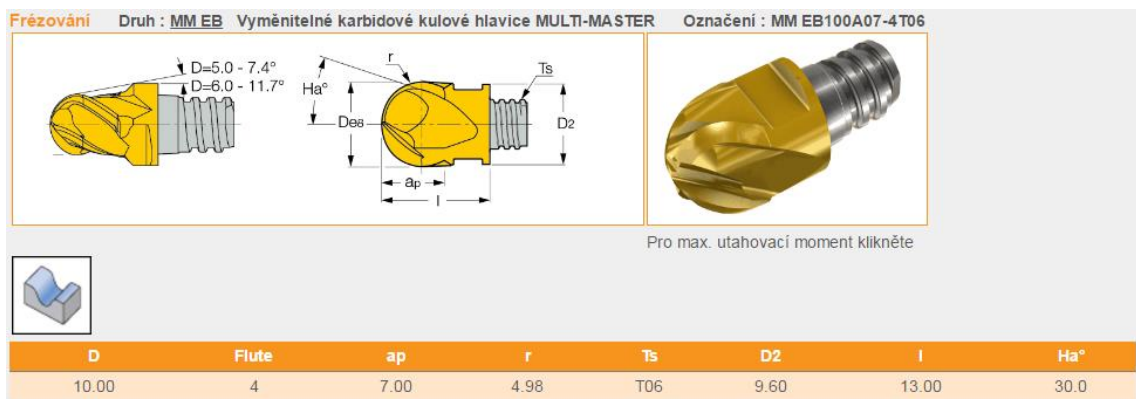
### Podoba experimentu

Testy obráběním byly prováděny na stroji s označením MCFV 5050 LN viz kapitola použitá aparatura. Jako testovací polotovar byl zvolen válec o průměru 119,5 mm a šířce 62 mm. Polotovar byl upnut pomocí svěráku s vysokou tuhostí upnutí. Materiál polotovaru byla ocel ČSN 12050. Strategie obrábění byla zvolena Variable Contour – řádkování. Pro možnost porovnání byl obrobek o určité šířce konvenčním řádkováním

s konstantní hodnotou velikosti otáček vřetene a pás o stejné šíři pomocí optimalizační funkce s proměnlivou hodnotou velikosti otáček vřetene. Před dokončovacím obráběním bylo provedeno předdokončení z důvodu zajištění téměř konstantního přídatku pro dokončovací obrábění. Byly provedeny tři sady testů obráběním s označením V1, V2 a V3 (označení V – vzorek, a číslo značí pořadí testu). Jako reprezentativní případ byl zvolen test s označením V3, výsledky ostatních testů jsou zaznamenány v elektronické příloze s označením složka 1. Průběh testů byl zaznamenán na videokameru, příslušná videa jsou přiložena v elektronické příloze také s označením složka 1.

### Použitý nástroj

Pro test s označením V3 byl použit nástroj od firmy ISCAR. Jedná se o vyměnitelnou kulovou hlavici MULTI-MASTER ze slinutého karbidu s označením EB100A07-4T06 upevněnou na těle frézy, viz Obr. 66. Vyložení nástroje bylo 70 mm.



Obr. 66: Vyměnitelná karbidová kulová hlavice MULTI-MASTER, převzato z lit. [22]

### Parametry obrábění

V Tab. 3 jsou zaznamenány parametry obrábění testu s označením V3. Dále je zde uvedeno vyhodnocení výrobního času a zkrácení výrobního času při použití optimalizační funkce (označené V3o) oproti konvenčnímu způsobu obrábění (označené V3k). Vyhodnocení výrobního času bylo provedeno z videozáznamu pořízeného v průběhu obrábění. V případě testu s označením V3 činila úspora strojního času po optimalizaci **35,2%** oproti původnímu výrobnímu času.

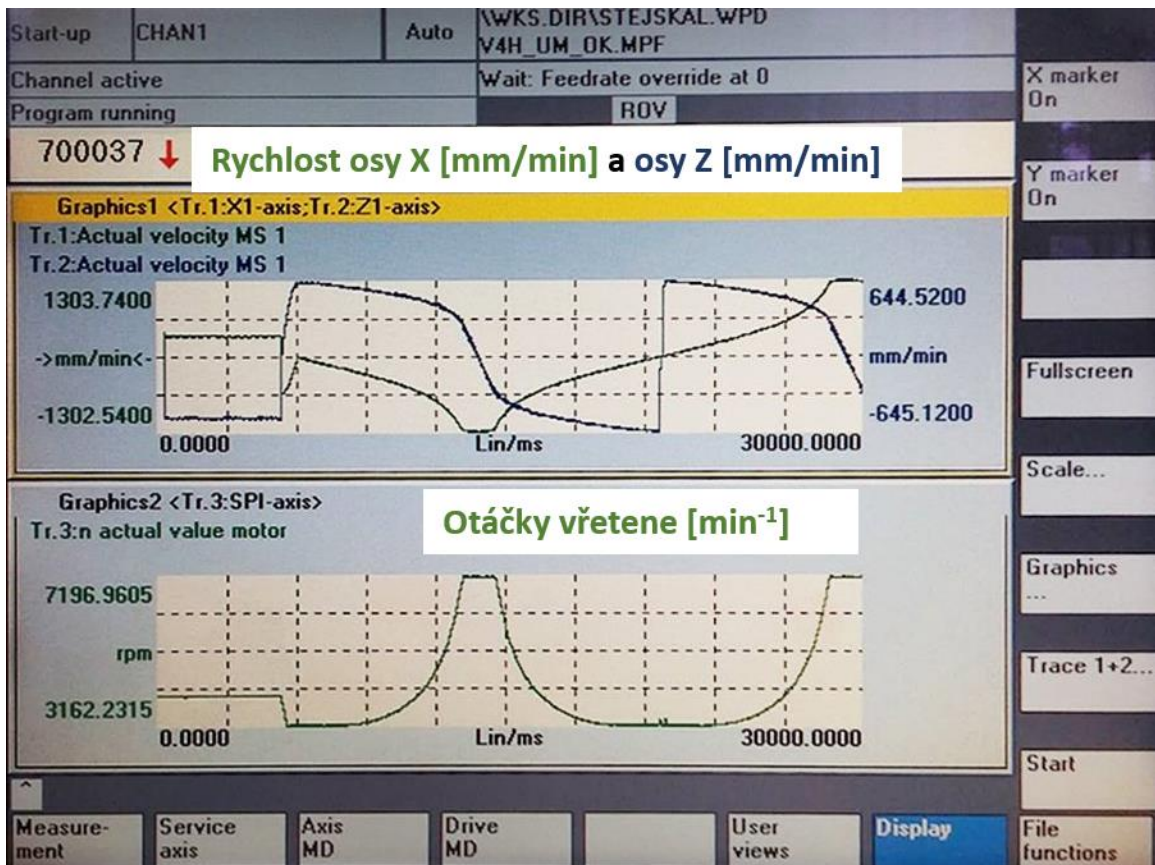


Č. vzorku	V3k	V3o
Materiál	ČSN 12 050	
Polotovar $\varnothing D_0$ [mm]	119,5	
Výsledný $\varnothing$ obrobku [mm]	119,15	
Nástroj	MULTIMASTER EB100A07-4T06	
Vyložení nástroje [mm]	70	
S [ $\text{min}^{-1}$ ]	2865	<b>2865→5155</b>
F [mm/min]	573	<b>573→1031</b>
$v_c$ [m/min]	90	
$f_z$ [mm]	0,05	
$a_p$ [mm]	0,15	
Scallop [mm]	0,044	
Tolerance [mm]	0,003	
Výrobní čas [s]	<b>515</b>	<b>381</b>
Úspora času [%]	<b>0</b>	<b>35,2</b>

Tab. 3: Parametry obrábění a vyhodnocení výrobních časů

## 6.1 Měření os stroje pomocí Servo Trace

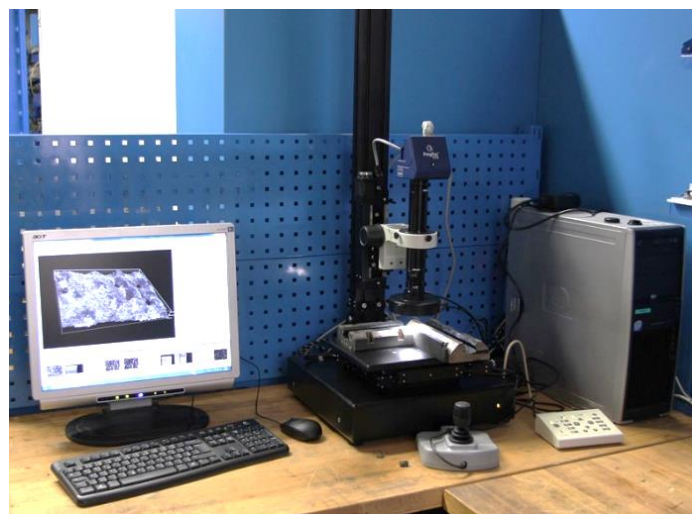
Dokončovací obráběcí cyklus strategií řádkováním byl měřen pomocí funkce Servo Trace v řídicím systému Sinumerik. Na Obr. 67 (dole) je zaznamenán grafický průběh změny otáček vřetene při průjezdu jedné řádky z dokončovacího cyklu. Tento graf koresponduje s grafem na Obr. 67 (nahoře), kde je záznam rychlosti pohybových os stroje X a Z. Hlavní pohyb konaný při testovacím obrábění byl ve směru osy X a Z, proto byly pro záznam zvoleny zmiňované pohybové osy stroje. Na horním grafickém záznamu (v průběhu rychlostí osy X a Z) je ověřena plynulost pohybu posuvových os stroje X a Z při plynulé změně otáček vřetene.



Obr. 67: Měření os stroje pomocí funkce Servo Trace (vzorek V3)

## 6.2 Měření na mikroskopu

Vyhodnocování kvality obrobeného povrchu a opotřebení břitu nástroje bylo prováděno na optickém mikroskopu sestaveném firmou Laboratory Imaging, viz Obr. 68. V Tab. 4 jsou uvedeny technické parametry optického mikroskopu, viz lit. [23].

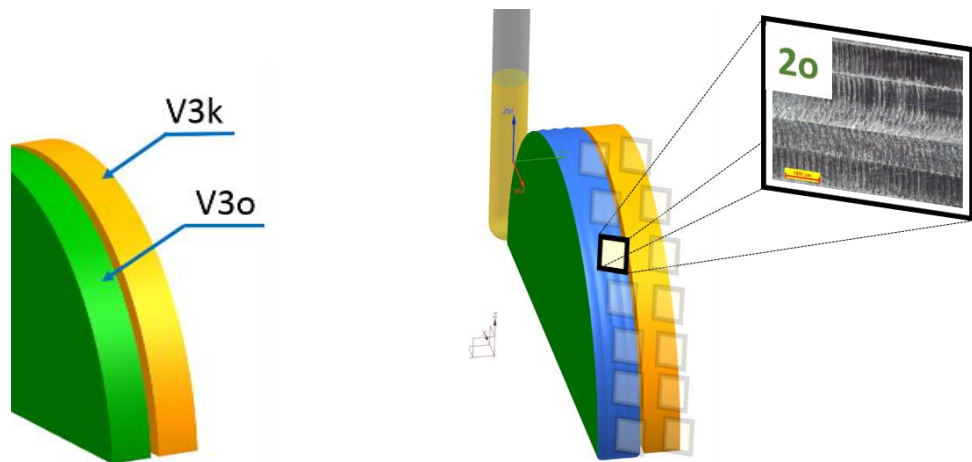


Obr. 68: Optický mikroskop - Laboratory Imaging

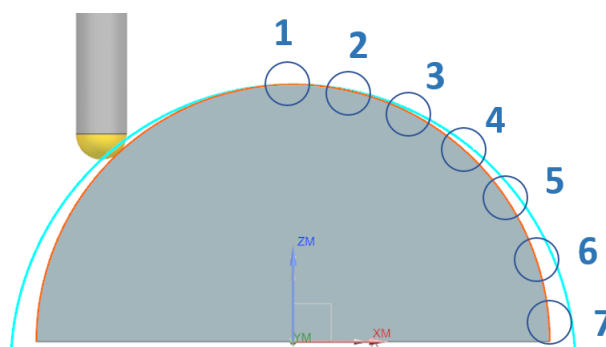
Tab. 4: Technické parametry optického mikroskopu, viz lit.[23]

<b>Dynamický rozsah zvětšení</b>	0,58x – 7,0x
<b>Zorné pole čočky</b>	0,006 – 85,71 mm
<b>Pracovní vzdálenost čočky</b>	32 - 341 mm
<b>Rozlišení kamery</b>	2 Mpix
<b>Velikost senzoru</b>	1/2"
<b>Velikost pixelu</b>	3,2 x 3,2 um
<b>Snímací frekvence</b>	10 fps

Na optickém mikroskopu byly foceny výsledné plochy po obrobení s optimalizační funkcí a běžným konvenčním způsobem. Tyto plochy byly následně porovnány. Na Obr. 69 (vlevo) jsou vyznačeny jednotlivé obrobené plochy, zelenou barvou plocha obrobená s optimalizační funkcí operující s bodem dotyku (V3o) a oranžově vyznačená plocha obrobená konvenčním způsobem (V3k). Na Obr. 69 vpravo je vidět ukázka zaměření mikroskopu na obrobenou plochu. Každá obrobená plocha byla měřena sedmkrát v označených místech, viz Obr. 70.

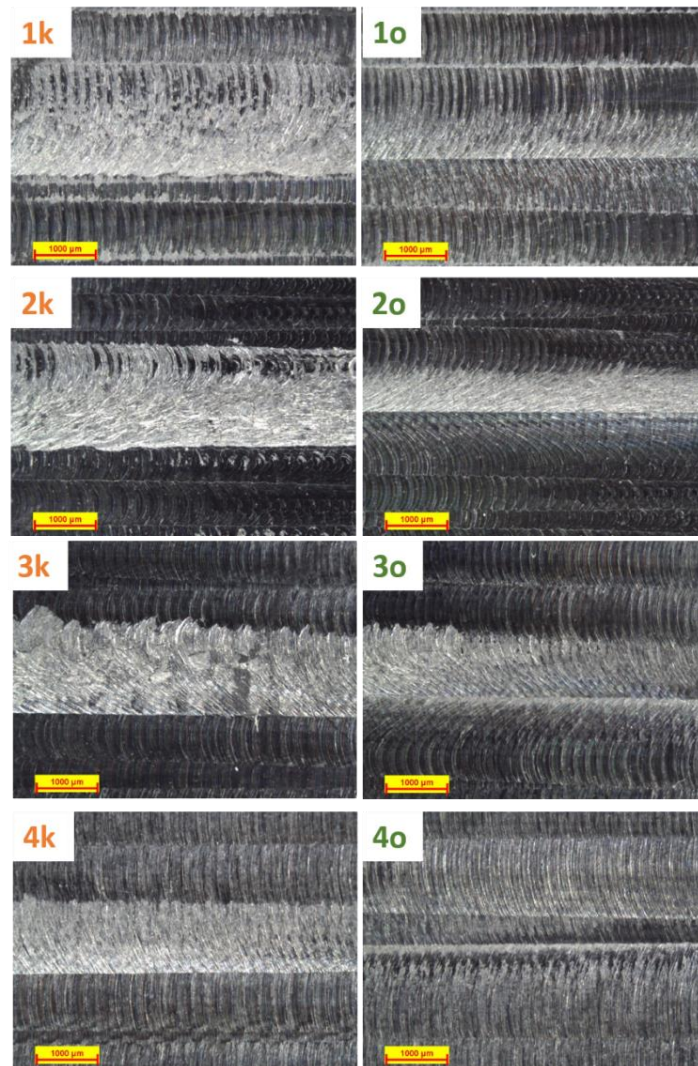


Obr. 69: Obrobené plochy s optimalizační funkcí a konvenčním způsobem

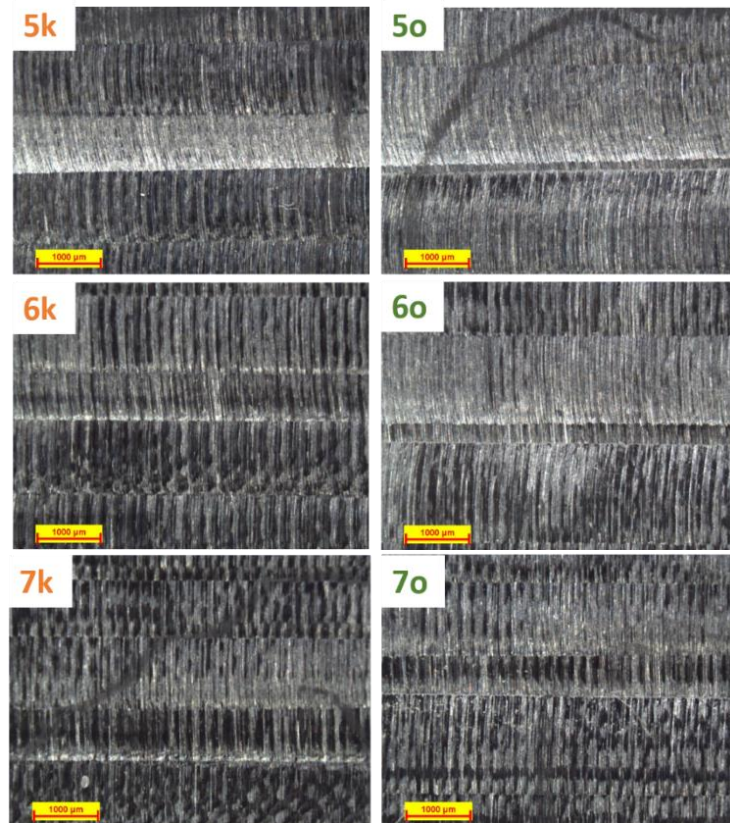


Obr. 70: Rozložení měřicích bodů po obrobeném vzorku

Na Obr. 71 a Obr. 72 jsou ve dvou sloupcích (vlevo konvenční způsob obrábění a vpravo obrábění s optimalizační funkcí) zobrazeny snímky z mikroskopu. Ze snímků je patrné, že s rostoucím rozdílem mezi skutečným řezným průměrem nástroje a maximálním řezným průměrem nástroje se jakost obrobeného povrchu opticky zhoršuje (platí pro oba způsoby obrábění: s optimalizací i bez optimalizace). Tento fakt nejvíce dokazují snímky pořízené v místech s označením 1 až 4. Je však patrné, že plochy obrobené s optimalizační funkcí vychází po optickém vyhodnocení jakosti povrchu daleko lépe nežli plochy obrobené konvenčním způsobem, tedy bez optimalizace, viz Obr. 71. Naopak u snímků s označením 5 až 7 je rozdíl v jakosti povrchu minimální, neboť rozdíl mezi skutečným řezným průměrem nástroje a maximálním průměrem nástroje (nastaveno u konvenčního způsobu obrábění) je výrazně menší nežli u snímků 1 až 4, viz Obr. 72.



Obr. 71: Snímky 1-4 z mikroskopu obrobených ploch (vlevo) konvenčním způsobem a (vpravo) s optimalizační funkcí



Obr. 72: Snímky 5-7 z mikroskopu obroběných ploch (vlevo) konvenčním způsobem a (vpravo) s optimalizační funkcí

### 6.3 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu bylo měřeno v návaznosti na optické vyhodnocení jakosti povrchu v kapitole s označením 7.2 Měření na mikroskopu.

#### Postup Měření

Drsnost jedné obroběné plochy byla měřena ve čtyřech bodech označených čísly 1 a 4 dle Obr. 70. Měření drsnosti bylo realizováno v drážkách vzniklých po dokončovacím obrábění strategií řádkováním, viz Obr. 74. Byly měřeny parametry jakosti povrchu  $R_a$  (střední aritmetická úchylka profilu) a  $R_z$  (výška nerovnosti profilu). Každé měření bylo pětkrát opakované. Drsnost povrchu byla měřena dle normy ISO 468.

#### Surtronic 3+

K měření drsnosti na vzorku V3 byl použit dílenský drsnoměr Surtronic 3+ od firmy Taylor Hobson. Tento drsnoměr umožňuje přímo vyhodnocení parametrů drsnosti

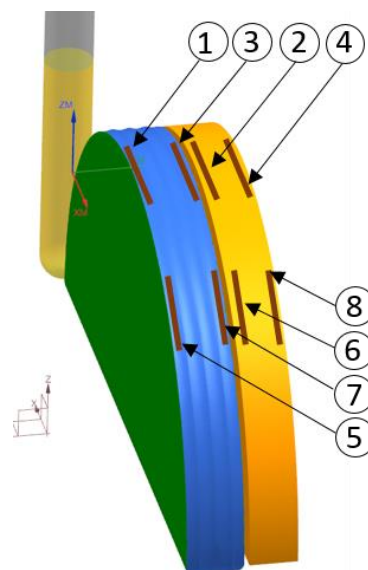
s následným exportem naměřených dat s příslušnými grafy. V Tab. 5 jsou uvedeny technické parametry drsnoměru, převzato z lit. [24].

Tab. 5: Technické parametry drsnoměru, viz lit.[24]

<b>Surtronic 3+</b>	
<b>Měřicí rozsah</b>	300 $\mu\text{m}$
<b>Rozlišení</b>	0,01 $\mu\text{m}$
<b>Snímač</b>	Indukční, diamantový hrot o poloměru 5 $\mu\text{m}$
<b>Snímaná délka</b>	0,25 – 25 mm
<b>Cutoff</b>	0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm
<b>Převodový poměr</b>	1 A/100 mV
<b>Parametry</b>	Ra, Rq, Rz, Ry, Sm, Rt



Obr. 73: Měření drsnosti na vzorku V3



Obr. 74: Oblasti měření drsnosti





Tab. 6: Vyhodnocení Ra a Rz

Č. měření	Průměrné hodnoty	
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,35	2,37
2	0,42	2,63
3	0,62	4,17
4	1,53	10,77
5	0,58	4,02
6	0,60	4,40
7	0,50	3,46
8	0,59	4,00

V Tab. 6 jsou uvedeny průměrné naměřené hodnoty Ra a Rz. Výsledky se shodují s měřeními na mikroskopu. Ze záznamu drsností je patrné, že s rostoucím rozdílem mezi skutečným řezným průměrem nástroje a maximálním řezným průměrem nástroje se jakost obrobeneho povrchu opticky zhoršuje (platí pro oba způsoby obrábění: s optimalizací i bez optimalizace). Tento fakt nejvíce dokazují hodnoty Ra a Rz naměřené v místech s označením 1, 2, 3 a 4. Naopak v měřících místech s označením 4 - 7 byly hodnoty Ra a Rz téměř totožné.

#### 6.4 Měření spotřeby elektrické energie

Optimalizační funkce vyžaduje plynulou změnou hodnoty otáček vřetene během obráběcího cyklu (při konvenčním obrábění je hodnota otáček vřetene konstantní), tím je neustále kladen nárok na akceleraci a deceleraci pohonu vřetene. Nejvyšší aktuální spotřeba elektrické energie u vřeten při dokončovacím obrábění nastává právě při akceleraci a deceleraci pohonu vřetene. Lze tedy predikovat vyšší aktuální spotřebu elektrické energie u obrábění s optimalizační funkcí oproti konvenčnímu způsobu obrábění, avšak v celkové spotřebě elektrické energie bude zahrnut i výrobní čas, který je u obrábění s optimalizační funkcí výrazně nižší, nežli u konvenční způsobu obrábění.

#### Třífázový analyzátor C.A. 8335 Qualistar plus

K měření spotřeby elektrické energie byl použit třífázový analyzátor od firmy Chauvin Arnoux s klešťovými převodníky proudu MN 71 s uzavřeným magnetickým obvodem umožňujícím měření střídavých proudů, viz Obr. 75. Pro měření byla použita funkce

měření příkonu ve watech. Naměřená data byla ukládána do analyzátoru ve formátu .cls. V Tab. 7 jsou uvedeny technické parametry optického mikroskopu, viz lit. [25].

Tab. 7: Technické parametry C.A. 8335 a klešťových převodníků , viz lit.[25]

<b>Třífázový analyzátor C.A. 8335 Qualistar plus</b>	
<b>Fázové napětí</b>	10 – 1000 V
<b>Sdružené napětí</b>	10 – 2000 V
<b>Rozlišení</b>	0,1 V
<b>Přesnost</b>	± 0,5 %
<b>Klešťové převodníky</b>	
<b>Měřicí rozsah</b>	0,01 – 12 A
<b>Převodovém poměr</b>	1 A/100 mV
<b>Přesnost</b>	≤1 %

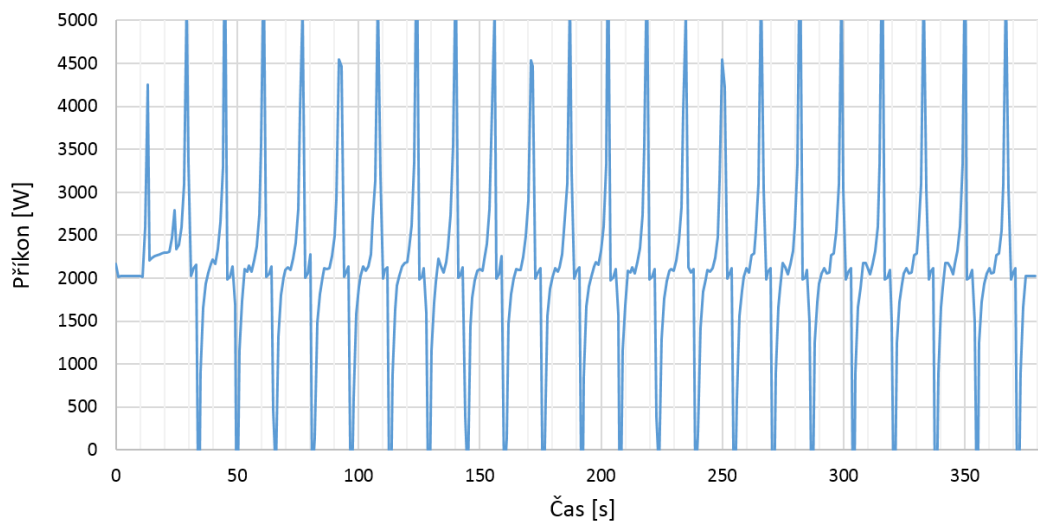


Obr. 75: (Nahoře) Třífázový analyzátor C.A. 8335 Qualistar plus, (dole) klešťový převodník, viz lit. [25]

### Postup měření

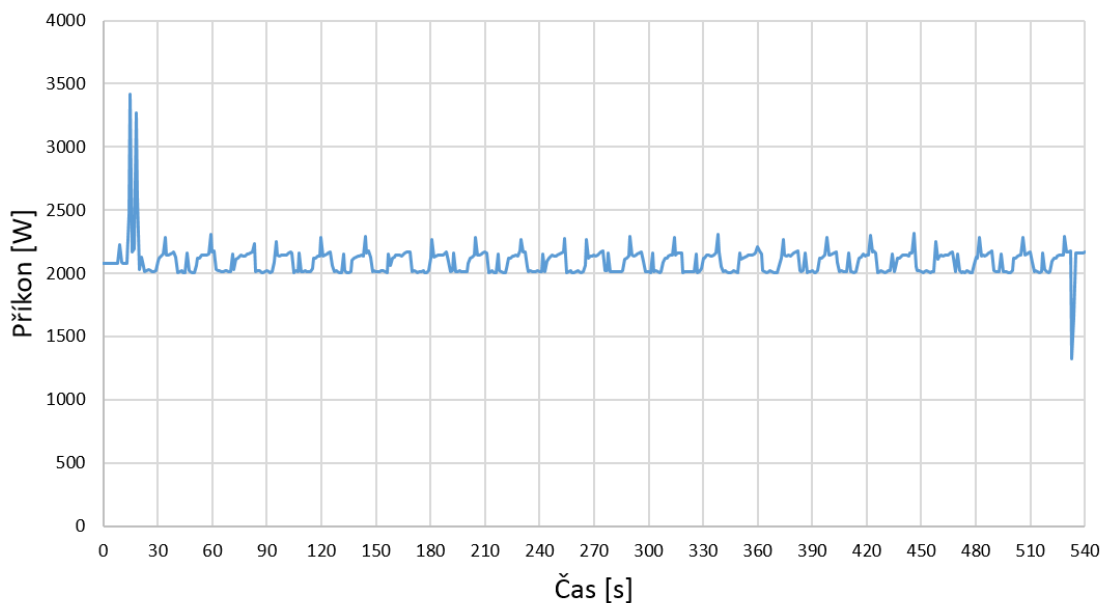
Třífázový analyzátor C.A. 8335 Qualistar plus s klešťovými převodníky byl zapojen na patě stroje, tj. k přívodu elektrické energie do obráběcího stroje s označením MCFV 5050 LN (LM1). Klešťové převodníky byly zapojeny na jednotlivé fáze v rozvodné skřini. Měření probíhalo po celou dobu obráběcího cyklu s optimalizační funkcí a konvenčním způsobem obrábění. Cílem tohoto měření bylo porovnat celkovou spotřebu elektrické energie obráběcího stroje při obrábění s optimalizační funkcí (plynulou změnou otáček vřetene a měnící se velikostí posuvové rychlosti) a při obrábění konvenčním způsobem (konstantní posuv a konstantní hodnota otáček vřetene).

## Spotřeba elektrické energie při optimalizovaném obrábění



Obr. 76: Aktuální spotřeba při obrábění s optimalizační funkcí

## Spotřeba elektrické energie při konvenčním obrábění



Obr. 77: Aktuální spotřeba při obrábění konvenčním způsobem

V Tab. 8 jsou uvedeny vyhodnocené údaje k měření spotřeby elektrické energie při obrábění s optimalizační funkcí a konvenčním způsobem obrábění. Průběh aktuální spotřeby elektrické energie při obrábění s optimalizační funkcí je patrný na Obr. 76, a na Obr. 77 je zaznamenán průběh aktuální spotřeby elektrické energie u konvenčního



způsobu obrábění. Celková spotřeba elektrické energie byla vypočítána ze vzorce (17). Spotřeba elektrické energie při obrábění s optimalizační funkcí a konvenčním způsobem obrábění byla vypočítána ze vzorce (18).

Měřením bylo ověřeno, že aktuální spotřeba elektrické energie je vyšší při obrábění s optimalizační funkcí, avšak celková spotřeba elektrické energie potřebné k obrobení dílce je výrazně nižší nežli u konvenčního způsobu obrábění z důvodu zkrácení hlavního strojního času.

Celková úspora elektrické energie na dílci V3 s použitím optimalizační funkce je **31,8%**.

Tab. 8: Vyhodnocení spotřeby elektrické energie

Měření	Aktuální spotřeba [kWh]	Doba obrábění dílce [hodiny]	Spotřeba za obrobení dílce [kWh]	Úspora [%]
Konvenční	2,0955	0,143	299,770	0
Optimalizace	2,1499	0,106	227,526	<b>31,8</b>

Aktuální spotřeba elektrické energie:

$$E_C = \sum_{i=0}^n E_i \quad [\text{kWh}] \quad (17)$$

Spotřeba elektrické energie pro jeden obráběcí cyklus:

$$E_S = E_C * t_E \quad [\text{kWh}] \quad (18)$$



## 7. Diskuse výsledků a další vývoj

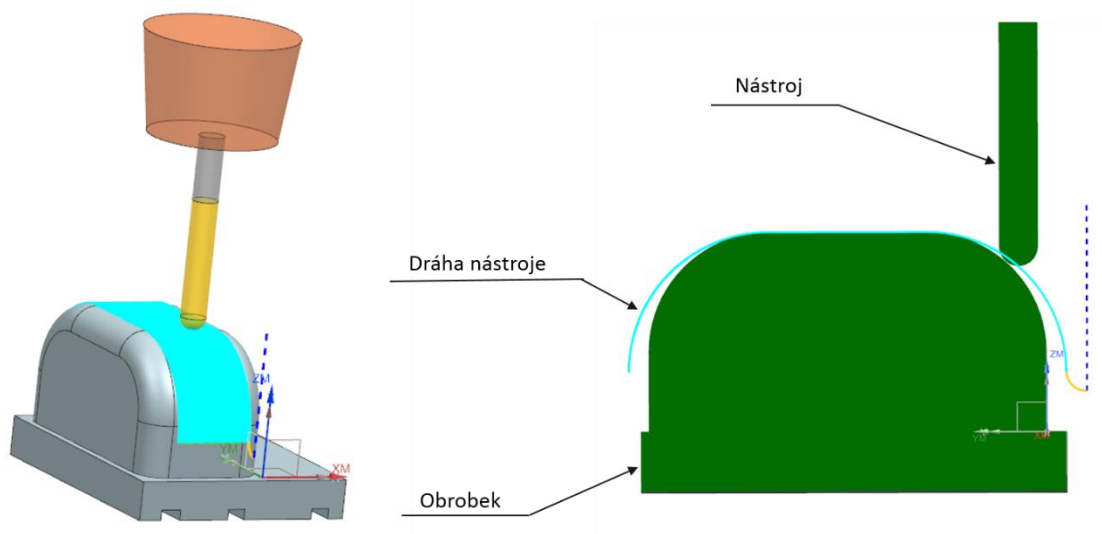
Důležitý výsledek této práce je docílení plynulé změny otáček vřetene při plynulé interpolaci pohybových os stroje, aniž by osy stroje zastavovaly při novém požadavku na změnu otáček vřetene a obrábění tak může být plynulé. Toto řešení bylo zprovozněno pro řídicí systém Sinumerik 840D a pokračováním vývoje bude spočívat ve zprovoznění pro řídicí systém iTNC 530 od společnosti Heidenhain. Adekvátní plynulá změna otáček vřetene za pohybu os by mohla být užitečná i pro potlačování nežádoucích vibrací během obrábění. K tomuto účelu by musely být vyvinuty algoritmy pro generování např. sinusového průběhu otáček, nebo by otáčky musely být měněny během obrábění adaptivně.

Plynulá změna otáček vřetene při frézovacích operacích přináší mnoho otázek k řešení. Například jestli má plynulá změna otáček při obrábění vliv na životnost vřetene nebo na životnost řídicích elektrických komponent. Také možné nadměrné zahřívání ložisek způsobené častou změnou otáček může ovlivnit výslednou přesnost obrobeneho dílce, proto by bylo vhodné provést měření teploty při obrábění s optimalizační funkcí a porovnat hodnoty s konvenčním způsobem obrábění. Velká pozornost a další vývoj by měl také směřovat na řízení součinnosti vřetene a pohybových os stroje, zatím je součinnost vřetene a pohybových os řešena na úrovni NC kódu, kdy požadované hodnotě otáček vřetene je nastavena příslušná požadovaná hodnota velikosti posuvové rychlosti, avšak požadovaná velikost posuvové rychlosti není vždy dodržena z důvodu např. naladění pohonů, naladění řídicího systému, tvaru dráhy nástroje atd. Proto by bylo vhodné zaměřit pozornost přímo na interpolovaná data a pracovat při optimalizaci například s reálnými velikostmi posuvových rychlostí.

Významným výsledkem je výpočtové a programové řešení myšlenky dodržování technologických parametrů při dokončovacím obrábění tvarových ploch nástroji s kruhovou řeznou hranou obráběcím testem na CNC stroji. Toto řešení je nyní také zpracováno ve formě patentové přihlášky vynálezu, která je podána na Úřad průmyslového vlastnictví pro získání právní ochrany duševního vlastnictví vynálezu (číslo přihlášky: PV 2017-403). Pokračování vývoje bude realizace obráběcího testu na víceosém CNC stroji s využitím optimalizační funkce při obrábění složitých tvarových

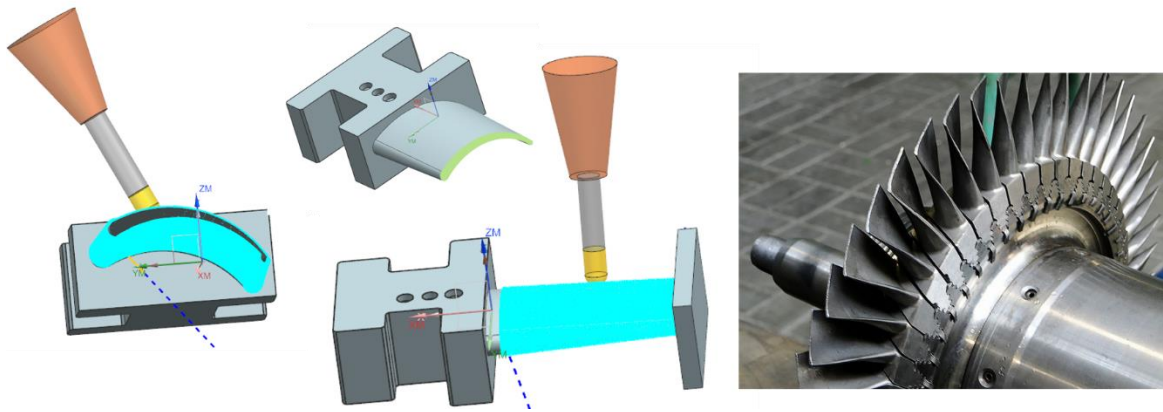
dílců, například lopatek lopatkových kol se začleněním rotačních os do obráběcího procesu.

Oblast využitelnosti optimalizační funkce je široká, například od výroby forem až po letecké dílce. Například na Obr. 78 je ukázka tříosého obrábění části formy. Konvenčním způsobem obrábění při dokončování tvarové plochy formy je výrobní čas přibližně 14 minut. Použitím optimalizační funkce operující s bodem dotyku je možné snížit výrobní čas na cca 9,7 minuty, tedy celková úspora času na jedné části formy je **4,3 minuty** z původních 14 minut.



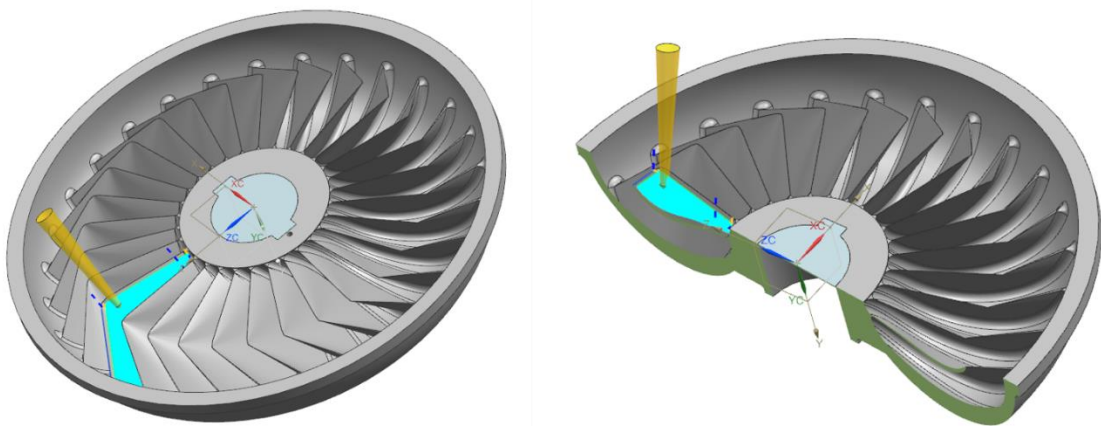
Obr. 78: Tříosé obrábění části formy

Na Obr. 79 je další ukázka využitelnosti optimalizační funkce operující s bodem dotyku při čtyřosém obrábění pro výrobu lopatek do lopatkových kol využívaných například v energetickém průmyslu. Jedno lopatkové kolo má přibližně okolo padesáti lopatek. Dokončovací obrábění jedné lopatky konvenční metodou trvá cca 15,3 min. Při použití optimalizační funkce je výrobní čas zkrácen na přibližně 5,2 minuty při stejných technologických podmínkách. Při výrobě celého lopatkového kola čítajícího například padesát lopatek, je možné díky použití optimalizační funkce zkrátit celkový výrobní čas až o **4,3 hodiny** z původních 12,7 hodin.



Obr. 79: Čtyřosé obrábění lopatky, viz lit. [26]

Dalším příkladem je využití optimalizační funkce pro obrábění lopatkových kol při pětiosém obrábění, viz Obr. 80. Konvenčním způsobem obrábění je jedna plocha lopatky obrobena za cca 6,5 minuty. Při použití optimalizační funkce se doba obrábění snižuje na 3,7 minuty na jedné lopatce. Celková úspora času při výrobě celého lopatkového kola o třiceti lopatkách je **1,4 hodiny** z původních 3,25 hodin.



Obr. 80: Pětiosé obrábění lopatkového kola

V neposlední řadě by bylo vhodné zpřesnit informaci o přídavku materiálu po předchozí operaci, například přídavek materiálu po hrubování válcovou frézou, kdy samotný přídavek nemá po celé obráběné ploše konstantní hodnotu  $a_p$ . Přídavek z předchozí operace je nyní v rámci diplomové práce nahrazován rovinou v oblasti daného bodu dráhy nástroje.



Další možný vývoj je integrace optimalizační funkce přímo do CAM softwaru Siemens NX, kde by byla například vytvořena záložka s nastavením a výběrem optimalizace, především by se využilo prostředí Siemens NX, které je uživatelům dobře známé. Integrace funkce by byla realizována pomocí programovacího jazyku C#. Dále by bylo vhodné integrovat optimalizační funkci do dalších CAM softwarů. V návaznosti na integraci funkce do CAM softwaru by bylo vhodné integrovat i část optimalizační funkce do PLC stroje. Například změna otáček by mohla být volána pomocí M funkcí z NC kódu.





## 8. Závěr

Ve vazbě na zadání byla provedena rešerše současného stavu optimalizací obráběcího procesu se zaměřením na CAM softwary, nastavby CAM softwarů, optimalizace v řídicích systémech a odborné články zabývající se optimalizacemi. Z rešerše vyplynulo, že se nikdo nezabývá optimalizacemi ohledně dodržení technologických parametrů při dokončovacím obrábění tvarových ploch nástroji s kruhovou řeznou hranou. V důsledku pohybu kontaktního bodu (mezi nástrojem a obráběnou plochou) se mění během obráběcího procesu skutečný řezný průměr nástroje. Při konvenčním způsobu obrábění je hodnota otáček vřetene konstantní, tím pádem není dodržena předepsaná řezná rychlost. Aby byla dodržena konstantní řezná rychlost je nutné plynule měnit hodnotu otáček vřetene v závislosti na změně skutečného řezného průměru nástroje. Následně bylo nalezeno řešení plynulé změny otáček vřetene při plynulé interpolaci pohybových os stroje v řídicím systému Sinumerik, neboť změna otáček vřetene při interpolaci pohybových os není standardně možná. Pro tento účel bylo použito programování NC kódu pomocí synchronních akcí spolu se změnou strojní konstanty v řídicím systému. S proměnlivou hodnotou otáček vřetene je závisle měněna i velikost posuvové rychlosti z důvodu dodržení technologem předepsaného posuvu na zub frézy. Tím pádem jsou nejen dodrženy technologické parametry, ale díky změně velikosti posuvové rychlosti je zkrácen i výrobní čas. Pro řešení této problematiky vznikla funkce s názvem optimalizační funkce operující s bodem dotyku.

Dále byly navrženy varianty umístění optimalizačního modulu do řetězce CAM → postprocesor. Optimalizační modul operující s bodem dotyku byl zařazena dle varianty s optimalizačním modulem integrovaným v postprocesoru, neboť tato varianta splňuje požadavek jednoduché realizace.

Byly provedeny návrhové výpočty algoritmu naprogramovaného v postbuilderu v jazyce TCL (modul: JÁDRO), jak pro tříosé obrábění, tak i pro víceosé obrábění. Výstupem z modulu JÁDRO je optimalizovaný NC kód s proměnnou hodnotou otáček vřetene a velikosti posuvové rychlosti. V návaznosti na modul JÁDRO byly realizovány dva další moduly s označením CL a TIME. Modul CL generuje z postprocesoru nový CL datový soubor, který slouží k následné vizualizaci v Siemens NX. Je možné barevně vizualizovat změnu skutečného řezného průměru nástroje na stávajících drahách nástroje. Modul



TIME je určen k simulaci obráběcího procesu při statické poloze vřetene pro možnost měření otáček vřetene pomocí laserové sondy. Modul TIME generuje nový upravený NC kód, ve kterém jsou nahrazeny lineární interpolace pohybových os troje časovými prodlevami.

Bylo také navrženo řešení optimalizační funkce se zahrnutím úběru materiálu po předchozí operaci. Optimalizační modul operující s přidavkem materiálu byl zařazen dle varianty s optimalizačním modulem integrovaným v samostatném sériově zapojeném softwaru. Tato varianta splňuje kompromis mezi jednoduchostí realizace a výpočetními možnostmi. Hodnoty velikosti otáček vřetene a velikosti posuvové rychlosti jsou určeny z maximálního skutečného řezného průměru nástroje.

Optimalizační funkce operující s bodem dotyku byla ověřena obráběcím testem na CNC stroji s označením MCFV 5050 LN. V obráběcím testu byly vždy porovnány dvě stejné plochy, kdy první plocha byla obrobena konvenčním způsobem obrábění a druhá s optimalizační funkcí. V případě obrábění testovacího dílce (V3) byla zjištěna **úspora výrobního času** ve výši **35,2%** oproti původnímu výrobnímu času. Dále byl povrch po obrobení nasnímán mikroskopem. Ze snímků bylo patrné, že s rostoucím rozdílem mezi skutečným řezným průměrem nástroje a maximálním řezným průměrem nástroje se jakost obrobeného povrchu opticky zhoršuje (platí pro oba způsoby obrábění: s optimalizací i bez optimalizace). Na základě snímků z mikroskopu bylo přistoupeno k měření drsnosti povrchu. Celková drsnost povrchu vychází lépe ve prospěch obrábění s optimalizační funkcí. Posledním testem bylo měření elektrické spotřeby vřetene. Celková **úspora elektrické energie** při obrábění testovacího dílce (V3) s použitím optimalizační funkce byla **31,8%** oproti konvenčnímu způsobu obrábění.

Na dodržování technologických podmínek při řízení otáček a posuvových rychlostí při obrábění s nástroji s kruhovou řeznou hranou byla podána přihláška vynálezu (číslo přihlášky: PV 2017-403) ve smyslu zákona č. 527/1990 Sb. o vynálezech a zlepšovacích návrzích ve znění pozdějších novel a na technické řešení ve smyslu zákona č. 478/1992 Sb., o užitných vzorech, které je nové, přesahuje rámec pouhé odborné dovednosti a je průmyslově využitelné.



## Seznam použité literatury

- [1] Technologie TrueMill. 3E PRAHA ENGINEERING [online]. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://3epraha.cz/technologie-truemill>
- [2] NX CAM 3-Axis Milling. SIEMENS [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/nx/for-manufacturing/cam/3-axis-milling.shtml>
- [3] Surfcam Waveform. surfcam. [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.surfcam.com/surfcam-waveform>
- [4] imachining. SolidCAM. [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.solidcam.cz/imachining-revoluce-v-cnc-obrabeni/drahy-nastroje-imachining/>
- [5] VERICUT. SlideShare. [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://fr.slideshare.net/arnaudprunet7/cgtech-vericut-2014>
- [6] VoluMill Version 7 - The next generation. Celeritive [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <http://www.volumill.com/content/volumill-version-7-next-generation-0>
- [7] VoluMill Siemens NX CAM and CAM Express. Celeritive [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <http://www.volumill.com/partners/volumill-siemens-nx-cam-and-cam-express>
- [8] TOOL-PATH & FEED-RATE OPTIMIZATION. ICAM [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <http://icam.com/tool-path-optimization-software/>
- [9] Technical Online-Documentation for SINUMERIK, SINAMICS, SIMOTION and SIMOTICS. SIEMENS [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109476679/technical-online-documentation-for-sinumerik-sinamics-simotion-and-simotics?dti=0&lc=en-WW>
- [10] Machine Tool Control. SIEMENS [online]. [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/nx/for-manufacturing/machine-tool-controllers/>
- [11] Výkonové frézování. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vykonove-frezovani.html>



- [12] Dynamic Efficiency – Working Efficiently and with Process Reliability. HEIDENHAIN [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: [http://www.heidenhain.us/addl-materials/enews/stories\\_0614/main-mt.php](http://www.heidenhain.us/addl-materials/enews/stories_0614/main-mt.php)
- [13] SARASUA, J. A. a I. CASCON. Integration of machining mechanistic models into CAM software [online]. 2014, 5--17 [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-d933e081-489d-4efb-a398-40c459251353>
- [14] FERRY, W. B. S.: Virtual five-axis flank milling of jet engine impellers. Vancouver, 2008. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. The University of British Columbia
- [15] TUNC, L. T. et al: Process simulation integrated tool axis selection for 5-axis tool path generation. In CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 65, Issue 1. Amsterdam: Elsevier, 2016. s. 381-384.
- [16] KLOYPAYAN, Jirawan a Yuan-Shin LEE. Material engagement analysis of different endmills for adaptive feedrate control in milling processes [online]. 2002, 22 [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361501001361>
- [17] ERKORKMAZ, Kaan, S. Ehsan LAYEGH, Ismail LAZOGLU a Huseyin ERDIM. Feedrate optimization for freeform milling considering constraints from the feed drive system and process mechanics [online]. 2013, 4 [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850613000851?via%3Dihub>
- [18] TUNC, L.Taner, Matej SULITKA a Jan KOPACKA. Integrated simulation system for 5-axis milling cycles [online]. 2015, 6 [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361501001361>
- [19] GUZEL, B.U. a I. LAZOGLU. Increasing productivity in sculpture surface machining via off-line piecewise variable feedrate scheduling based on the force system model [online]. 2004, 8 [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503002360>
- [20] VAVRUŠKA, P.: Technologické návstavy postprocesorů pro víceosé CNC stroje. Praha, 2013. Disertační práce na ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Ústav Výrobních strojů a zařízení. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Jaroslav Rybín, CSc.



- [21] MÁDL, Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK. TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ 1.díl. 2007. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [22] Milling. ISCAR [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Applications.aspx?mapp=ML>
- [23] Hardware pro mikroskopii. LABORATORY IMAGING [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <http://www.limaging.cz/cs/contact/8>
- [24] Taylor-Hobson Surtronic 3 Roughness Gage. Artisan technology group [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: [https://www.artisanng.com/Scientific/77021/Taylor\\_Hobson\\_Surtronic\\_3\\_Roughness\\_Gage](https://www.artisanng.com/Scientific/77021/Taylor_Hobson_Surtronic_3_Roughness_Gage)
- [25] Qualistar+. Chauvin Arnoux [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <http://qualistar.chauvin-arnoux.com/fr/le-produit-qualistar-plus>
- [26] Software improves blisk and turbine blade machining. MIT Publishing [online]. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <https://www.pesmedia.com/software-improves-blisk-and-turbine-blade-machining/>



## Seznam obrázků

OBR. 1: STRUČNÉ SCHEMA ZAMĚŘENÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	14
OBR. 2: UKÁZKA TROCHOIDÁLNÍHO OBRÁBĚNÍ V DRÁŽCE (SIEMENS NX) .....	15
OBR. 3: PROBLEMATIKA KOMPENZACE POSUVOVÉ RYCHLOSTI V RÁDIUSU (SIEMENS NX) .....	16
OBR. 4: POROVNÁNÍ BĚŽNÉHO OBRÁBĚNÍ (VLEVO) S FUNKCÍ WAVEFORM (VPRAVO), VIZ LIT. [3].....	16
OBR. 5: UKÁZKA PROSTŘEDÍ SURFCAMU A POUŽITÍ FUNKCE WAVEFORM, PŘEVZATO Z LIT. [3] .....	17
OBR. 6: (VLEVO) OPTIMALIZOVANÉ DRÁHY NÁSTROJE; (VPRAVO) KONVENČNÍ GENEROVÁNÍ DRÁH NÁSTROJE, VIZ LIT. [1] ...	17
OBR. 7: UKÁZKA DRÁH NÁSTROJE S KANÁLY A MORFUJÍCÍMI SPIRÁLY, PŘEVZATO Z LIT. [4] .....	18
OBR. 8: OPTIMALIZACE VELIKOSTI POSUVOVÉ RYCHLOSTI NÁSTROJE (VERICUT), PŘEVZATO Z LIT. [5] .....	19
OBR. 9: UKÁZKA PROSTŘEDÍ VERICUT NA STROJI MAZAK VTC800, PŘEVZATO Z LIT. [5].....	20
OBR. 10: UKÁZKA SIMULACE OBRÁBĚNÍ S FUNKCÍ VOLUMILL S PŘEDEPSANÝM ÚHLEM OPÁSÁNÍ, PŘEVZATO Z LIT. [7] .....	20
OBR. 11: ADAPTIVNÍ OBRÁBĚNÍ INTEGROVANÉ V SIEMENS NX (VOLUMILL), PŘEVZATO Z LIT. [7] .....	21
OBR. 12: ICAM A FUNKCE SMARTCUT, PŘEVZATO Z LIT. [8].....	21
OBR. 13: ICAM A FUNKCE SMARTFEED, PŘEVZATO Z LIT. [8] .....	22
OBR. 14: FUNKCE BRISK A SOFT (SINUMERIK), PŘEVZATO Z LIT. [9] .....	22
OBR. 15: PŘÍKLAD VYHLAZENÍ PLOCHY POMOCÍ FUNKCE COMPCAD, PŘEVZATO Z LIT. [10] .....	23
OBR. 16: FUNKCE COMPCAD (SINUMERIK), PŘEVZATO Z LIT. [10] .....	23
OBR. 17: POROVNÁNÍ POVRCHŮ PO OBRÁBĚNÍ: VLEVO BEZ AFC; VPRAVO S AKTIVOVANÝM AFC SPOLU S TROCHOIDÁLNÍMI DRÁHAMÍ, VIZ LIT. [11] .....	24
OBR. 18: UKÁZKA VYUŽITÍ AFC SPOLEČNĚ S TROCHOIDÁLNÍM OBRÁBĚNÍ, PŘEVZATO Z LIT. [12] .....	25
OBR. 19: SCHÉMA STRUKTURY SOFTWARE, PŘEVZATO Z LIT. [13] .....	26
OBR. 20: UKÁZKA SILOVÉHO ZATÍŽENÍ NÁSTROJE (NAHOŘE); BAREVNÁ VIZUALIZACE DRÁH NÁSTROJE (DOLE), VIZ LIT. [13]..	27
OBR. 21: AXIÁLNÍ A RADIÁLNÍ HLOUBKA ŘEZU .....	30
OBR. 22: TYPY NÁSTROJŮ PRO PROGRAMOVÁNÍ V CAM SOFTWARE, PŘEVZATO Z LIT. [22].....	31
OBR. 23: ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA BODU DOTYKU NÁSTROJE S OBROBKEM .....	33
OBR. 24: PRŮBĚH ZMĚNY PRŮMĚRU NÁSTROJE PŘI OBRÁBĚNÍ MODELOVÉHO DÍLCE .....	34
OBR. 25: PRŮBĚH ŘEZNÉ RYCHLOSTI PŘI OBRÁBĚNÍ MODELOVÉHO DÍLCE .....	35
OBR. 26: PRŮBĚH POSUVOVÉ RYCHLOSTI PŘI OBRÁBĚNÍ MODELOVÉHO DÍLCE .....	35
OBR. 27: VARIANTA S UMÍSTĚNÍM OPTIMALIZAČNÍHO MODULU DO CAM SOFTWARE .....	36
OBR. 28: VARIANTA S UMÍSTĚNÍM OPTIMALIZAČNÍHO MODULU DO POSTPROCESORU.....	37
OBR. 29: VARIANTA S OPTIMALIZAČNÍM MODULEM INTEGROVANÝM V SAMOSTATNÉM SÉRIOVĚ ZAPOJENÉM SOUBORU.....	38
OBR. 30: VARIANTA S OPTIMALIZAČNÍM MODULEM INTEGROVANÝM V SAMOSTATNÉM SOFTWARE .....	39
OBR. 31: VARIANTA S UMÍSTĚNÍM OPTIMALIZAČNÍHO MODULU DO ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU A POSTPROCESORU .....	40
OBR. 32: VARIANTA S ČÁSTEČNÝM UMÍSTĚNÍM OPTIMALIZAČNÍHO MODULU DO SAMOSTATNÉHO SOFTWARE A DO ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU .....	40
OBR. 33: CNC STROJ MCFV 5050 LN (LM1) .....	43
OBR. 34: UKÁZKA OPERACE TURBOMACHINERY MILLING (SIEMENS NX), PŘEVZATO Z LIT. [12] .....	44



---

OBR. 35: VIZUALIZOVANÉ DRÁHY NÁSTROJE SE ZÁKLADNÍM NASTAVENÍM OPERACE .....	45
OBR. 36: UKÁZKA HLEDÁNÍ PROMĚNNÝCH Z CL DAT POMOCÍ NÁSTROJE POST REVIEW TOOL .....	46
OBR. 37: NASTAVENÍ OPERACE V NX SIEMENS.....	47
OBR. 38: MODELOVÉ PŘÍPADY DRÁH NÁSTROJE PRO TŘÍOSÉ OBRÁBĚNÍ (NALEVO) A PRO VÍCEOSÉ OBRÁBĚNÍ (NAPRAVO).....	48
OBR. 39: VYTVÁŘENÍ POSTPROCESORU (POSTBUILDER).....	49
OBR. 40: PROGRAM AND TOOLPATH (POSTBUILDER) .....	50
OBR. 41: OKNO CUSTOM COMMAND V POSTBUILDERU .....	51
OBR. 42: OVLÁDACÍ PANEL S ŘÍDICÍM SYSTÉMEM SINUMERIK 840D, PŘEVZATO Z LIT. [9] .....	52
OBR. 43: UKÁZKA NC KÓDU (ISO-KÓD) .....	52
OBR. 44: PŘÍPAD ZMĚNY OTÁČEK (ZELENĚ VYZNAČENÉ PŘÍKAZY K LINEÁRNÍ INTERPOLACI) .....	53
OBR. 45: SYNCHRONNÍ AKCE (ZELENĚ VYZNAČENÉ PŘÍKAZY K LINEÁRNÍ INTERPOLACI) .....	53
OBR. 46: TESTOVÁNÍ ROZSAHU OTÁČEK PŘI POUŽITÍ FUNKCE OVR .....	54
OBR. 47: PLYNULÁ ZMĚNA OTÁČEK VŘETENE ZA POHYBU OSY X (SERVO TRACE).....	55
OBR. 48: VÝPOČET SKUTEČNÉHO PRŮMĚRU NÁSTROJE Z BODU DOTYKU NÁSTROJE S OBROBKEM .....	56
OBR. 49: POMOCNÝ TROJÚHELNÍK PRO VÝPOČET SKUTEČNÉHO PRŮMĚRU NÁSTROJE.....	57
OBR. 50: STRUČNÝ VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRVNÍHO OPTIMALIZAČNÍHO MODULU .....	59
OBR. 51: BAREVNÁ VIZUALIZACE ZMĚNY PRŮMĚRU NÁSTROJE V PRŮBĚHU OBRÁBĚNÍ V CAM.....	60
OBR. 52: (VLEVO) BODY DRÁHY NÁSTROJE PO SOBĚ JDoucÍCH V NC KÓDU; (VPRAVO) NAHRAZENÍ LINEÁRNÍCH INTERPOLACÍ ČASOVÝMI PRODLEVAMI .....	62
OBR. 53: OPTIMALIZAČNÍ FUNKCE OPERUJÍCÍ S BODEM DOTYKU NÁSTROJE S OBROBKEM .....	62
OBR. 54: MODELOVÝ PŘÍPAD NÁSTROJE S OBROBKEM .....	64
OBR. 55: VEKTOR SMĚRU DRÁHY NÁSTROJE .....	64
OBR. 56: KONSTRUKCE ROVINY $P_1$ .....	65
OBR. 57: MODELOVÝ PŘÍPAD PRO MĚŘENÍ ROZDÍLU MEZI $D_s$ A $D_r$ .....	66
OBR. 58: GRAF ODCHYLKY $D_s$ A $D_r$ V ZÁVISLOSTI NA $A_p$ .....	67
OBR. 59: KONSTRUKCE ROVINY $P_2$ .....	68
OBR. 60: PŘÍPADY ŘÁDKOVÁNÍ; (VLEVO) OBRÁBĚNÍ PLNÝM PRŮMĚREM NÁSTROJE, (VPRAVO) NÁSTROJ ŘÁDKUJE ZLEVA DOPRAVA ČÁSTÍ SVĚHO PRŮMĚRU .....	69
OBR. 61: HLEDÁNÍ MAXIMÁLNÍHO ŘEZNÉHO PRŮMĚRŮ NÁSTROJE.....	70
OBR. 62: UKÁZKA SIMULACE ROVINY $P_1$ V DANÉM BLOKU NC KÓDU V MATLABU.....	71
OBR. 63: SIMULACE DRÁHY NÁSTROJE V MATLABU .....	71
OBR. 64: OPTIMALIZAČNÍ FUNKCE OPERUJÍCÍ S PŘÍDAVKEM Z PŘEDCHOZÍ OPERACE .....	72
OBR. 65: (VLEVO) NASTAVENÍ DRÁHY NÁSTROJE V CAM; (VPRAVO) TEST NA STROJI.....	73
OBR. 66: VYMĚNITELNÁ KARBIDOVÁ KULOVÁ HLAVICE MULTI-MASTER, PŘEVZATO Z LIT. [22].....	74
OBR. 67: MĚŘENÍ OS STROJE POMOCÍ FUNKCE SERVO TRACE (VZOREK V3).....	76
OBR. 68: OPTICKÝ MIKROSKOP - LABORATORY IMAGING .....	76
OBR. 69: OBROBENÉ PLOCHY S OPTIMALIZAČNÍ FUNKCÍ A KONVENČNÍM ZPŮSOBEM .....	77
OBR. 70: ROZLOŽENÍ MĚŘÍCÍCH BODŮ PO OBROBENÉM VZORKU .....	77

---



OBR. 71: SNÍMKY 1-4 Z MIKROSKOPU OBROBENÝCH PLOCH (VLEVO) KONVENČNÍM ZPŮSOBEM A (VPRAVO) S OPTIMALIZAČNÍ FUNKCÍ .....	78
OBR. 72: SNÍMKY 5-7 Z MIKROSKOPU OBROBENÝCH PLOCH (VLEVO) KONVENČNÍM ZPŮSOBEM A (VPRAVO) S OPTIMALIZAČNÍ FUNKCÍ .....	79
OBR. 73: MĚŘENÍ DRSNOSTI NA VZORKU V3 .....	80
OBR. 74: OBLASTI MĚŘENÍ DRSNOSTI .....	80
OBR. 75: (NAHOŘE) TŘÍFÁZOVÝ ANALYZÁTOR C.A. 8335 QUALISTAR PLUS, (DOLE) KLEŠŤOVÝ PŘEVODNÍK, VIZ LIT. [25] ..	82
OBR. 76: AKTUÁLNÍ SPOTŘEBA PŘI OBRÁBĚNÍ S OPTIMALIZAČNÍ FUNKCÍ .....	83
OBR. 77: AKTUÁLNÍ SPOTŘEBA PŘI OBRÁBĚNÍ KONVENČNÍM ZPŮSOBEM .....	83
OBR. 78: TŘÍOSÉ OBRÁBĚNÍ ČÁSTI FORMY .....	86
OBR. 79: ČTYŘOSÉ OBRÁBĚNÍ LOPATKY, VIZ LIT. [26].....	87
OBR. 80: PĚTIOSÉ OBRÁBĚNÍ LOPATKOVÉHO KOLA .....	87





## Seznam tabulek

TAB. 1: VÝBĚR VARIANT .....	41
TAB. 2: HODNOTY ROZDÍLŮ $D_S$ A $D_R$ .....	66
TAB. 3: PARAMETRY OBRÁBĚNÍ A VYHODNOCENÍ VÝROBNÍCH ČASŮ.....	75
TAB. 4: TECHNICKÉ PARAMETRY OPTICKÉHO MIKROSKOPU, VIZ LIT.[23] .....	77
TAB. 5: TECHNICKÉ PARAMETRY DRSNOMĚRU, VIZ LIT.[24].....	80
TAB. 6: VYHODNOCENÍ $R_A$ A $R_Z$ .....	81
TAB. 7: TECHNICKÉ PARAMETRY C.A. 8335 A KLEŠŤOVÝCH PŘEVODNÍKŮ , VIZ LIT.[25] .....	82
TAB. 8: VYHODNOCENÍ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE .....	84



## Seznam příloh

### Textové přílohy

- Příloha 1: Vývojový diagram zahrnující optimalizační funkce
- Příloha 2: Vývojový diagram modulu JÁDRO, část 1.
- Příloha 3: Vývojový diagram modulu JÁDRO, část 2.
- Příloha 4: Vývojový diagram modulu JÁDRO, část 3.
- Příloha 5: Vývojový diagram modulu CL
- Příloha 6: Vývojový diagram modulu TIME
- Příloha 7: Myšlenková mapa (optimalizační funkce operující s  
přídavkem z předchozí operace)
- Příloha 8: NC kód (optimalizační funkce operující bodem dotyku –  
modul JÁDRO)
- Příloha 9: CL data (optimalizační funkce operující bodem dotyku –  
modul CL)
- Příloha 10: NC kód (optimalizační funkce operující bodem dotyku –  
modul TIME)

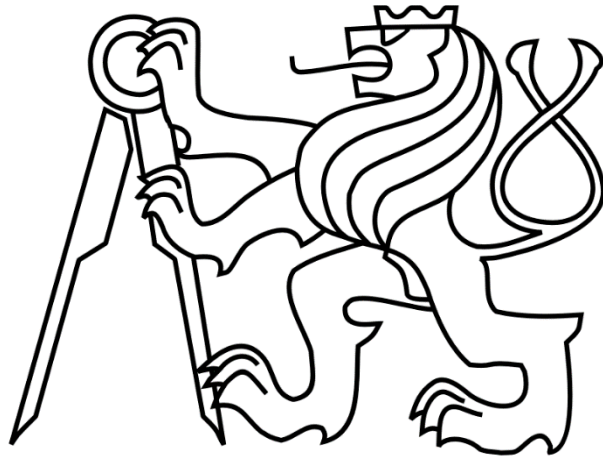
### Obsah CD přílohy

- Složka 1: Vyhodnoceni\_testy\_obrazenim
- Složka 2: Odchylka\_k\_ro1\_d2
- Složka 3: Foto\_testy\_mikroskop
- Složka 4: Protokoly\_mereni\_dsrnosti
- Složka 5: Elektricka\_spotreba\_raw
- Složka 6: Rozbehove\_testy\_a\_laser\_sonda

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

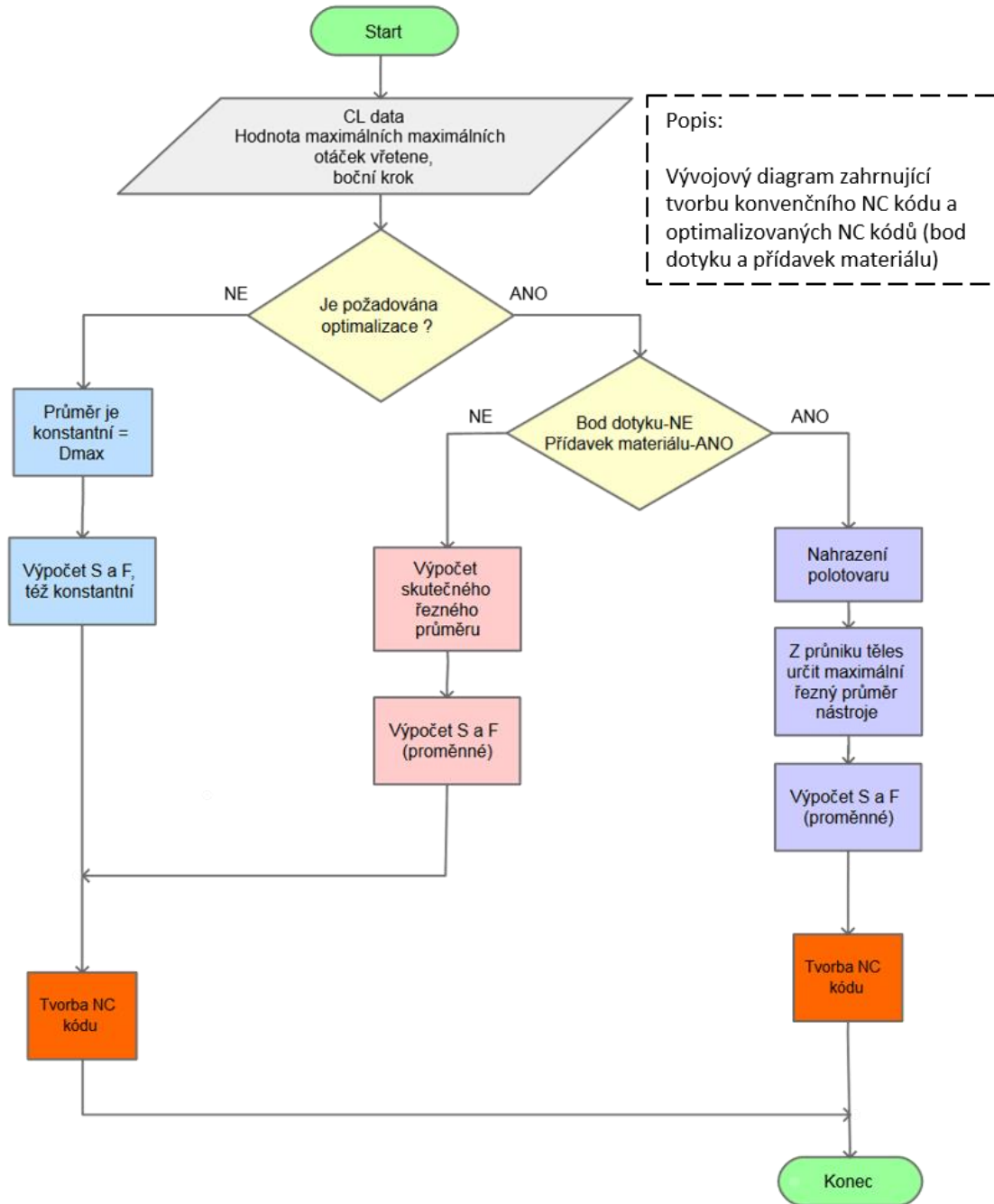
Textové přílohy

2017

Bc. Michal Stejskal

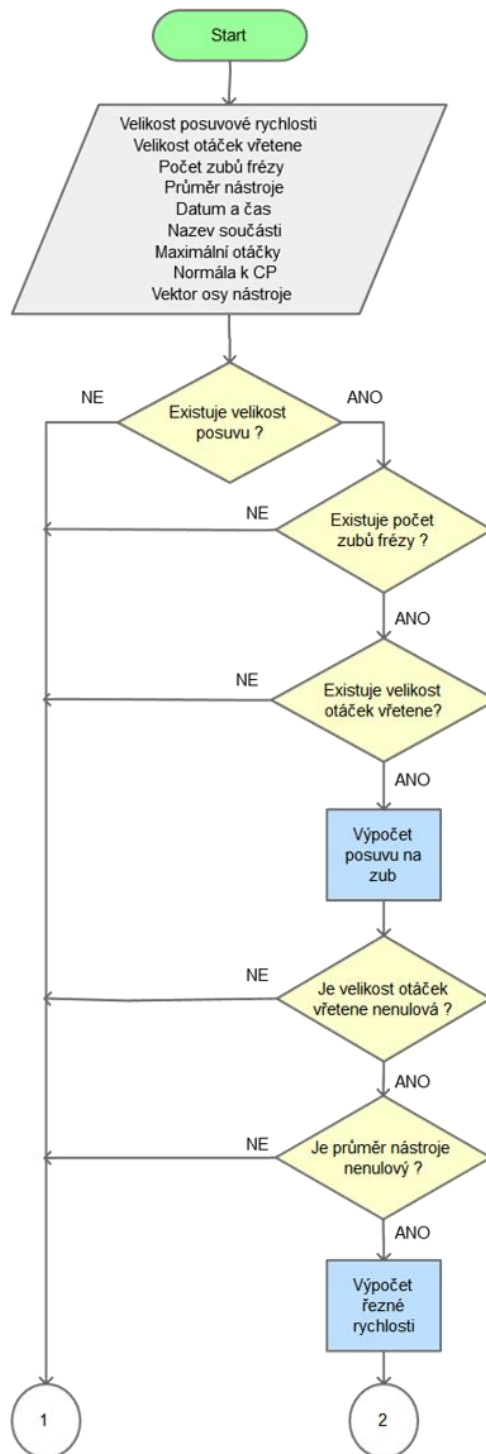


**Příloha 1:** Vývojový diagram zahrnující optimalizační funkce



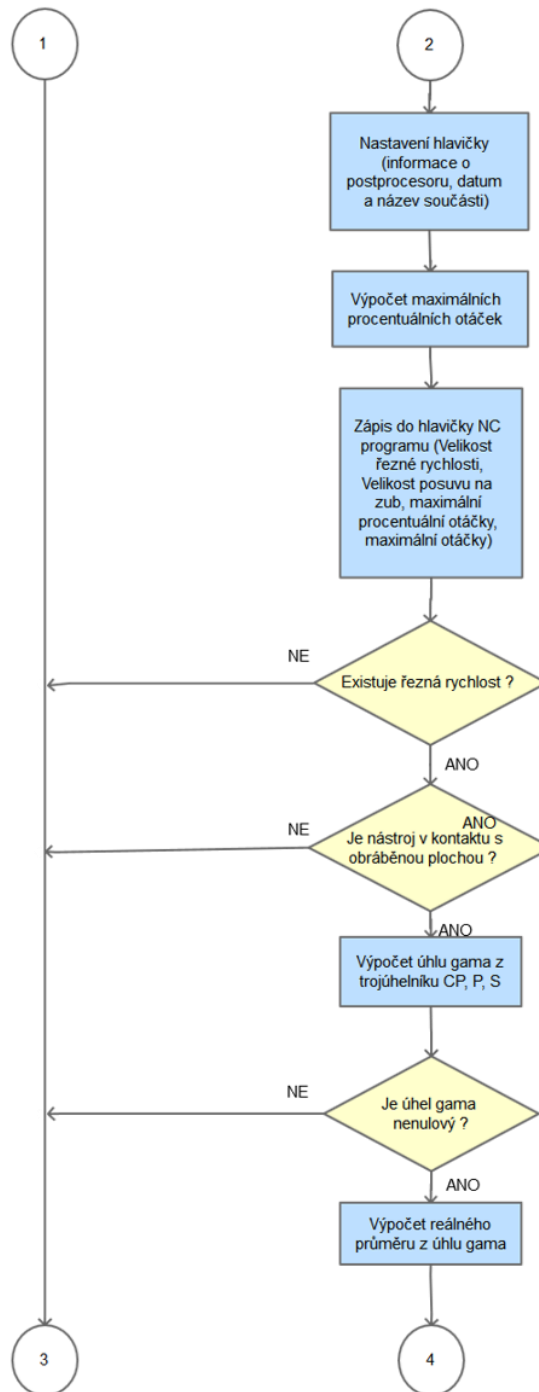


Příloha 2: Vývojový diagram modulu JÁDRO, část 1.



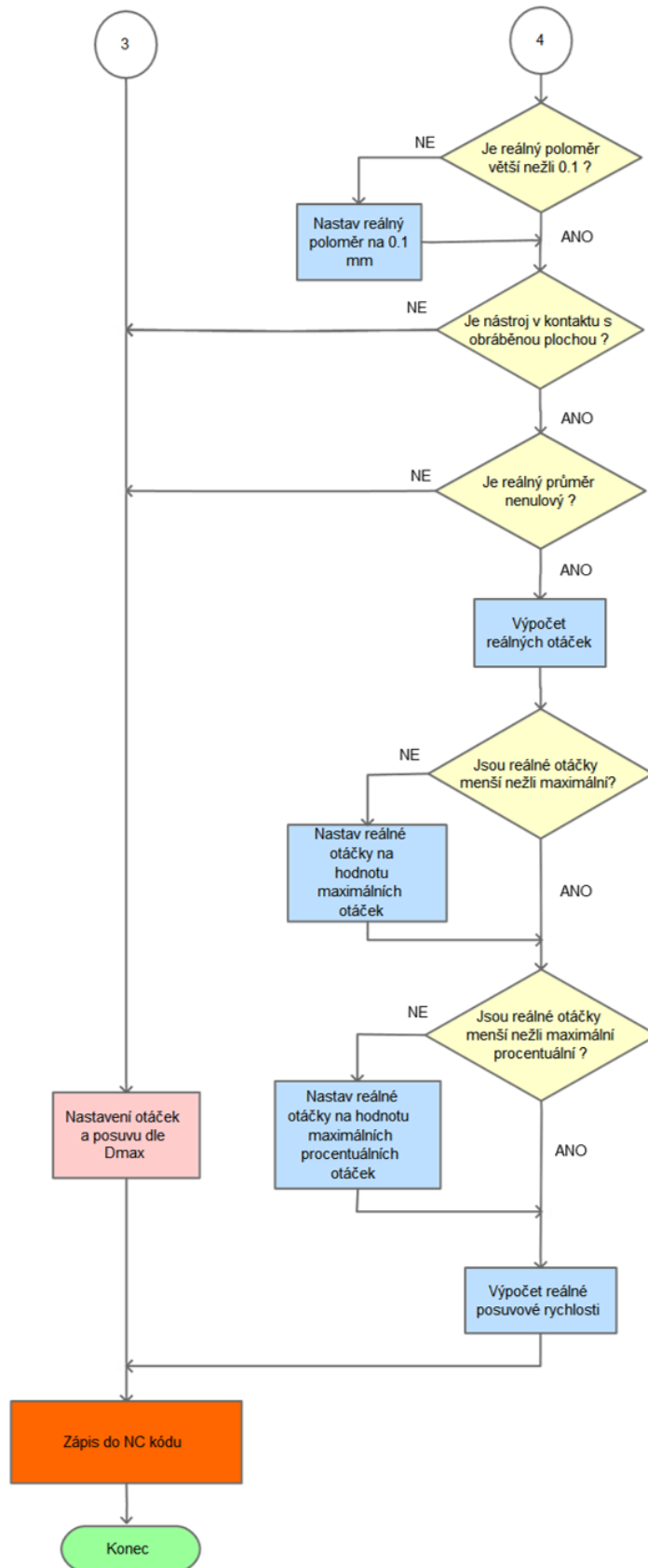


**Příloha 3:** Vývojový diagram modulu JÁDRO, část 2.



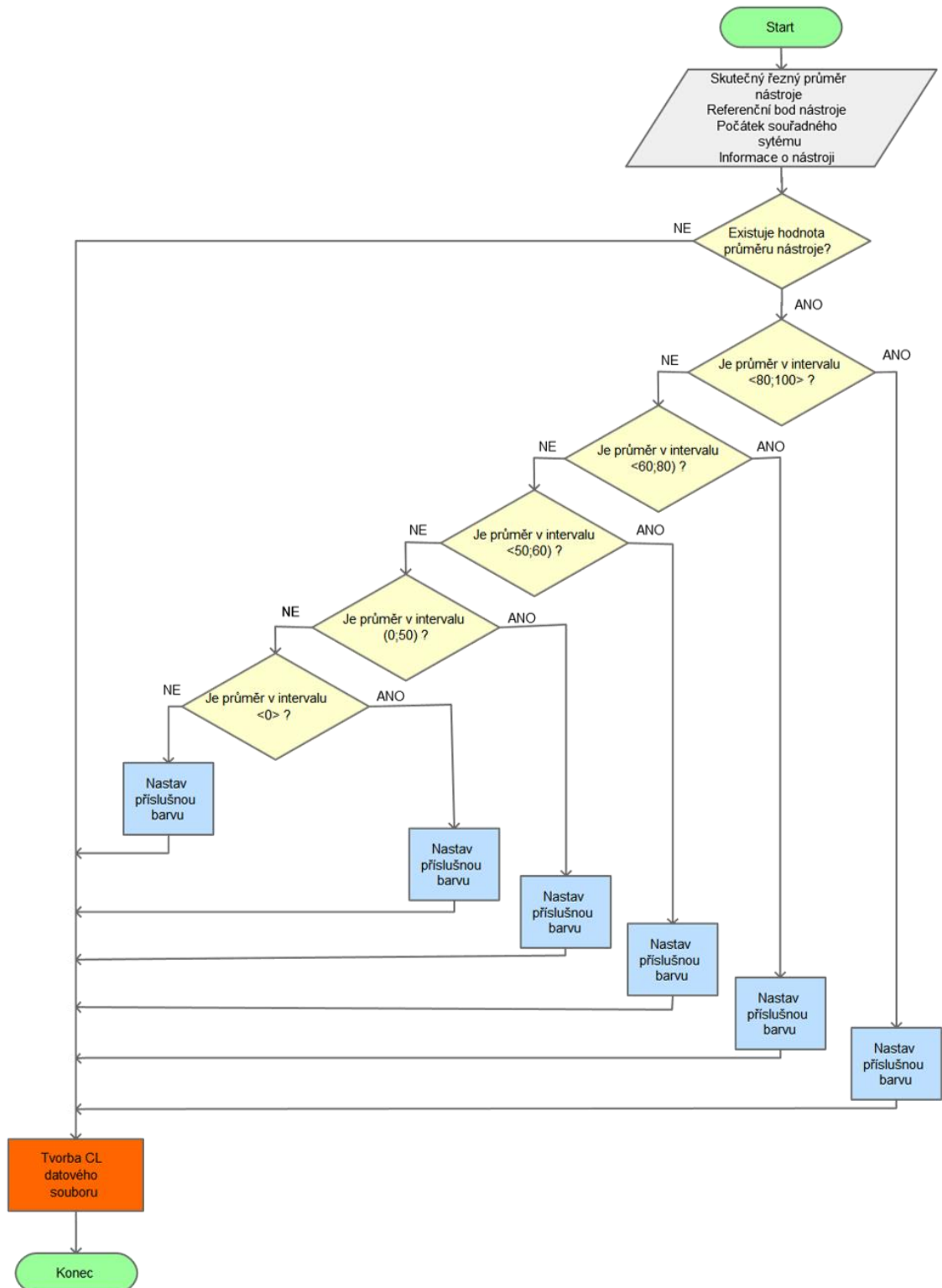


Příloha 4: Vývojový diagram modulu JÁDRO, část 3.





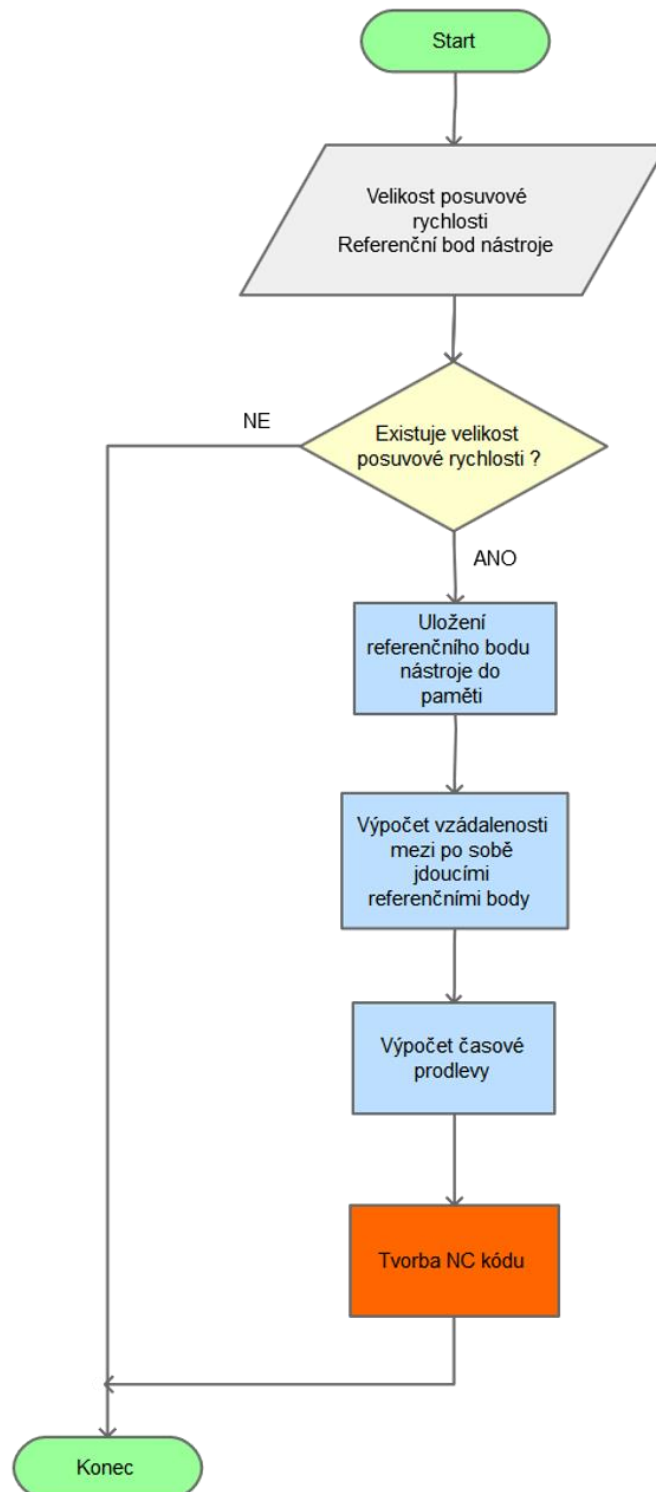
Příloha 5: Vývojový diagram modulu CL





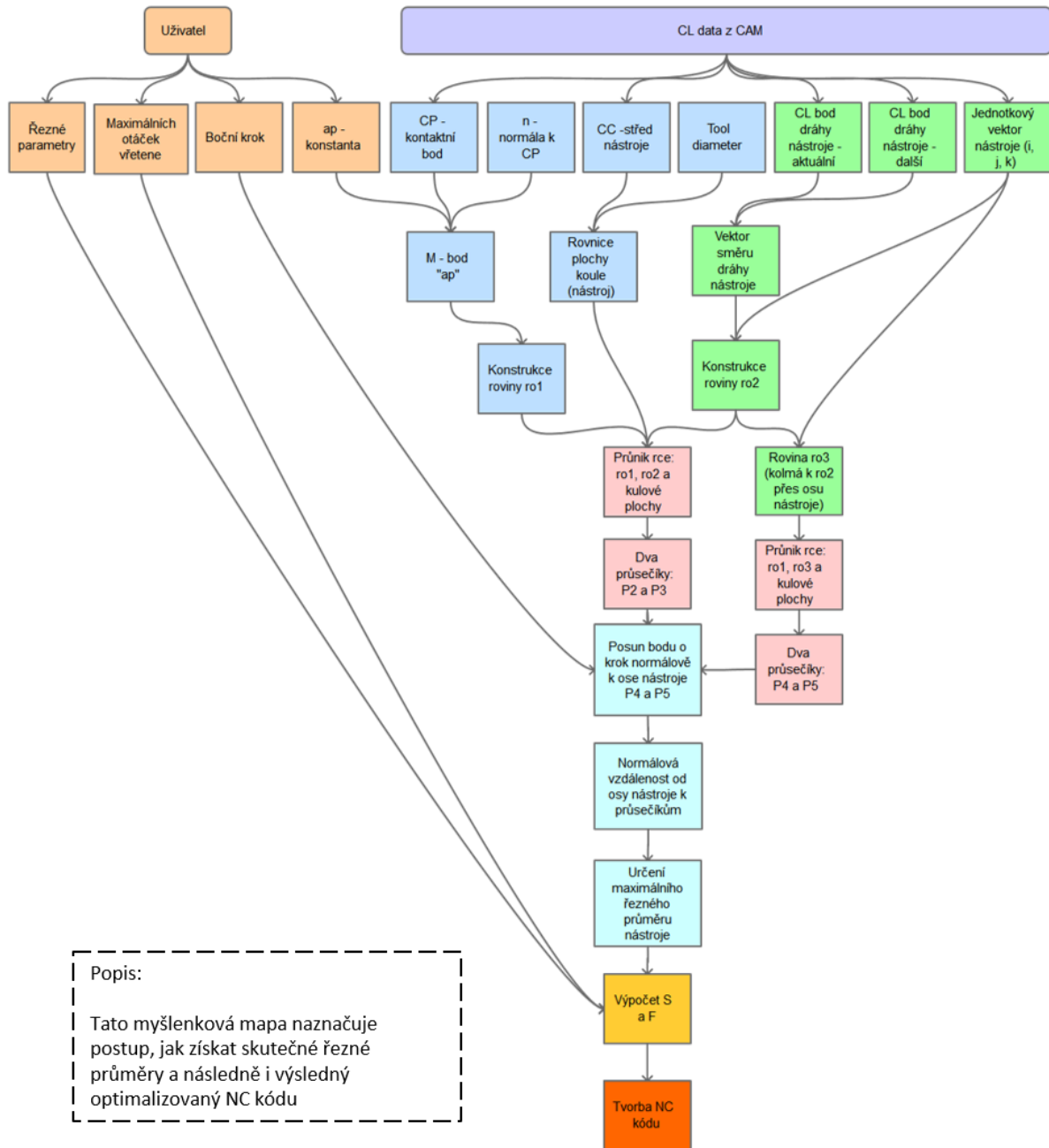


**Příloha 6:** Vývojový diagram modulu TIME





**Příloha 7:** Myšlenková mapa (optimalizační funkce operující s přídavkem z předchozí operace)



**Příloha 8:** NC kód (optimalizační funkce operující bodem dotyku – modul JÁDRO)

```
N10 ;(STROJ: LM1)
N15 ;(SYSTEM: SINUMERIK 840D)
N20 ;(POSTPROCESSOR: LM1_SIN840D_POLY)
N25 ;(DATUM: 09.07.2017, CAS: 21:50)
N30 G40 G17 G90 G56
N35 G64
N40 soft
N45 ffwof
N50 ;////////////////////////////////////
N55 ;Rizeni konstantni rychlosti a posuvu
N60 ;////////////////////////////////////
N65 ;Pracuje s bodem dotyku
N70 ;Testovací postprocesor M.S.
N80 ;PART NAME :Q:\1-WP02__VYKONNOST\_CVUT-PRAHA\KONSTRUKCE_VYVOJ\T1 -
N95 ;(=====)
N100 ;(NAZEV OPERACE: BD)
N105 ;-----Nastaveno-----
N110 ;fz :0.050
N115 ;vc :100.0
N120 ;Fmax :1292
N125 ;Smax :6367
N135 ;(=====)
N145 ;(PRUMER: 10.00MM, RADIUS: 5.00MM)
N150 ;(=====)
N155 T01 D01
N160 G55
N165 S3978.75
N170 do $aa_ovr[S1]=80
N175 M3
N180 G01 X69.747 Y23. Z-64.897 F=2000
N185 M08
N190 X68.632 Z-64.794
N195 X67.569 Z-64.445
N200 X66.609 Z-63.868
N205 X65.802 Z-63.092
N210 X65.188 Z-62.156
N215 X64.797 Z-61.107
N220 do $aa_ovr[S1]=80.0
N225 X64.65 Z-59.997 F=636.6
N230 do $aa_ovr[S1]=80.1
N235 X64.6 Z-57.462 F=637.1
N240 do $aa_ovr[S1]=80.3
N245 X64.451 Z-54.928 F=638.6
N250 do $aa_ovr[S1]=80.7
N255 X64.202 Z-52.401 F=641.1
N260 do $aa_ovr[S1]=81.2
N265 X63.854 Z-49.887 F=644.6
N270 do $aa_ovr[S1]=82.0
N275 X63.408 Z-47.387 F=649.1
N280 do $aa_ovr[S1]=82.8
N285 X62.864 Z-44.908 F=654.7
N290 do $aa_ovr[S1]=83.9
N295 X62.223 Z-42.451 F=661.5
N300 do $aa_ovr[S1]=85.1
N305 X61.486 Z-40.022 F=669.4
```



**Příloha 9:** CL data (optimalizační funkce operující bodem dotyku – modul CL)

```
=====ZEOCNCS=====
TLDATA/MILL,10.000000000000000,5.000000000000000,75.000000000000000
MSYS/-0.0000,-4.0000,60.0000,-1.0000,0.0000,0.0000,-0.0000,-1.0000,0.0000
PAINT/COLOR,36
GOTO/64.6500,23.0000,-64.9966
PAINT/COLOR,34
GOTO/64.6002,23.0000,-62.4619
PAINT/COLOR,34
GOTO/64.4507,23.0000,-59.9275
PAINT/COLOR,34
GOTO/64.2019,23.0000,-57.4012
PAINT/COLOR,34
GOTO/63.8541,23.0000,-54.8864
PAINT/COLOR,34
GOTO/63.4078,23.0000,-52.3874
PAINT/COLOR,34
GOTO/62.8637,23.0000,-49.9078
PAINT/COLOR,34
GOTO/62.2227,23.0000,-47.4514
PAINT/COLOR,34
GOTO/61.4858,23.0000,-45.0221
PAINT/COLOR,34
GOTO/60.6541,23.0000,-42.6235
PAINT/COLOR,34
GOTO/59.7288,23.0000,-40.2595
PAINT/COLOR,34
GOTO/58.7115,23.0000,-37.9335
PAINT/COLOR,34
GOTO/57.6036,23.0000,-35.6495
PAINT/COLOR,34
GOTO/56.4069,23.0000,-33.4106
PAINT/COLOR,34
GOTO/55.1232,23.0000,-31.2205
PAINT/COLOR,34
GOTO/53.7545,23.0000,-29.0824
PAINT/COLOR,34
GOTO/52.3029,23.0000,-26.9997
PAINT/COLOR,211
GOTO/50.7707,23.0000,-24.9756
PAINT/COLOR,211
GOTO/49.1602,23.0000,-23.0132
PAINT/COLOR,211
GOTO/47.4740,23.0000,-21.1155
PAINT/COLOR,211
GOTO/45.7145,23.0000,-19.2854
PAINT/COLOR,211
GOTO/43.8845,23.0000,-17.5261
PAINT/COLOR,211
GOTO/41.9868,23.0000,-15.8398
PAINT/COLOR,211
GOTO/40.0244,23.0000,-14.2293
PAINT/COLOR,37
GOTO/38.0003,23.0000,-12.6970
```

**Příloha 10:** NC kód (optimalizační funkce operující bodem dotyku – modul TIME)

```
T01 D01
G55
do $aa_ovr[S1]=80.0
G04 F=8.5638
do $aa_ovr[S1]=80.1
G04 F=0.2388
do $aa_ovr[S1]=80.3
G04 F=0.2385
do $aa_ovr[S1]=80.7
G04 F=0.2376
do $aa_ovr[S1]=81.2
G04 F=0.2363
do $aa_ovr[S1]=82.0
G04 F=0.2347
do $aa_ovr[S1]=82.8
G04 F=0.2327
do $aa_ovr[S1]=83.9
G04 F=0.2303
do $aa_ovr[S1]=85.1
G04 F=0.2275
do $aa_ovr[S1]=86.6
G04 F=0.2245
do $aa_ovr[S1]=88.2
G04 F=0.2210
do $aa_ovr[S1]=90.1
G04 F=0.2173
do $aa_ovr[S1]=92.2
G04 F=0.2132
do $aa_ovr[S1]=94.6
G04 F=0.2088
do $aa_ovr[S1]=97.3
G04 F=0.2040
do $aa_ovr[S1]=100.3
G04 F=0.1989
do $aa_ovr[S1]=103.6
G04 F=0.1936
do $aa_ovr[S1]=107.3
G04 F=0.1879
do $aa_ovr[S1]=111.5
G04 F=0.1819
do $aa_ovr[S1]=116.2
G04 F=0.1757
do $aa_ovr[S1]=121.4
G04 F=0.1692
do $aa_ovr[S1]=127.3
G04 F=0.1624
do $aa_ovr[S1]=134.0
G04 F=0.1554
do $aa_ovr[S1]=141.5
G04 F=0.1481
do $aa_ovr[S1]=150.1
G04 F=0.1406
do $aa_ovr[S1]=160.0
G04 F=0.1329
do $aa_ovr[S1]=171.4
```