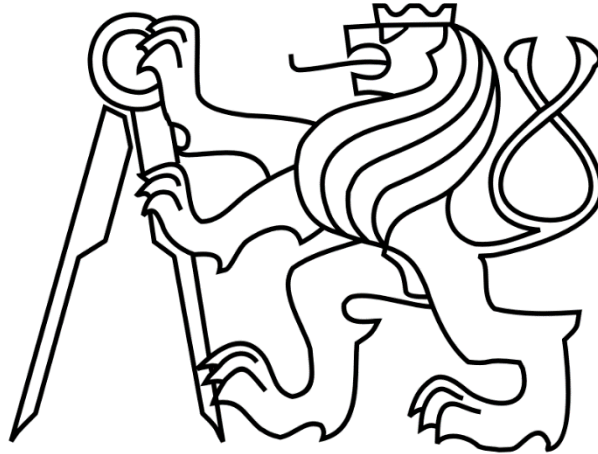


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Identifikace parametrů pro ovlivnění přesnosti a produktivity obrábění ve
vazbě CAM – řídicí systém

2018

Bc. Matěj Pešice

Prohlášení

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

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

V Praze dne 20.5.2018

.....
podpis

Poděkování

Na úvod bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce panu Ing. Petru Vavruškovi, Ph.D. za vedení, podnětné odborné rady a trpělivost při vzniku práce. Zároveň děkuji konzultantovi Ing. Tomáši Fornůskovi a zaměstnancům výzkumného centra RCMT za odborné konzultace i rady a za pomoc v průběhu provádění experimentu.

Rád bych také vyjádřil díky mým rodičům a přátelům za podporu v průběhu mého studia.

Anotace

<i>Jméno autora:</i>	Bc. Matěj Pešice
<i>Název BP:</i>	Identifikace parametrů pro ovlivnění přesnosti a produktivity obrábění ve vazbě CAM – řídicí systém
<i>Číslo BP:</i>	1740
<i>Rozsah práce:</i>	85 stran, 42 obrázků, 18 tabulek, 4 přílohy
<i>Akad. rok vyhotovení:</i>	2017/2018
<i>Škola:</i>	ČVUT – Fakulta strojní
<i>Ústav:</i>	Ú12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
<i>Vedoucí BP:</i>	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
<i>Konzultant:</i>	Ing. Tomáš Fornůsek
<i>Zadavatel tématu:</i>	ČVUT - FS
<i>Využití:</i>	Ovlivnění přesnosti a produktivity obrábění ze strany CAM a řídicího systému.
<i>Klíčová slova:</i>	Dráha nástroje, Tvarové obrábění, NC kód, CNC Řídicí systém
<i>Abstrakt:</i>	V této práci jsou identifikovány parametry z oblasti CAM a řídicího systému, které mají vliv na přesnost a produktivitu obrábění. Na základě rešerše jsou zvoleny parametry, pro které je experimentem ověřována míra jejich vlivu na přesnost a produktivitu při obrábění navržené testovací plochy. Jsou vyhodnocena naměřená data a zhodnoceny vlivy sledovaných parametrů. Pro podporu experimentu je navržen SW nástroj pro analýzu NC kódu.

Annotation

<i>Author:</i>	Bc. Matěj Pešice
<i>Title:</i>	Identification of Parameters to Increase CAM control System Accuracy and Productivity in Machining
<i>Number:</i>	1740
<i>Extent:</i>	85 pages, 42 figures, 18 tables, 4 attachments
<i>Academic Year:</i>	2017/2018
<i>University:</i>	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
<i>Department:</i>	Department of Production Machines and Equipment
<i>Tutor:</i>	Ing. Petr Vavruška Ph.D.
<i>Consultant:</i>	Ing. Tomáš Fornůsek
<i>Submitter:</i>	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
<i>Application:</i>	Influences of CAM and control systems on accuracy and productivity of shape milling.
<i>Keywords:</i>	Toolpath, Shape Milling, NC Code, CNC Control System
<i>Abstract:</i>	In this thesis the parameters, that have influence on productivity and accuracy of machining are analyzed. Based on the research are selected parameters of whis is then verified extent of their influence on productivity and accuracy on proposed shape. Gained data are processed and evaluated. The experiment is supported by developed SW tool, that can evaluate a quality of NC code points distribution.

Obsah

1. Úvod a cíle práce	10
2. Přehled vlivů na přesnost obrábění.....	11
2.1. Vliv na přesnost obrábění – CAD / CAM	11
2.1.1. Možné chyby při modelování	12
2.1.2. Chyby vlivem převodu z CAD do CAM	12
2.1.3. Vytváření drah nástroje – strategie a volené parametry	15
2.2. Převod dat CAM-NC program (postprocessor).....	16
2.3. Funkce řídicího systému – technologická podpora.....	17
2.3.1. Funkce v řídicím systému Siemens Sinumerik 840D.....	18
2.3.2. Funkce v řídicím systému Heidenhain iTNC 530.....	22
2.3.3. Vybrané funkce dalších řídicích systémů.....	23
2.4. Stav řešené problematiky v odborných pramenech	25
2.4.1. Optimalizace dráhy nástroje – úroveň CAM.....	25
2.4.2. Vyhlazování dráhy nástroje – práce s NC kódem	28
2.4.3. Práce s postprocesorem při tvorbě dráhy	30
2.5. Testovací dílce – ověření přesnosti.....	30
2.6. Shrnutí rešerše	32
3. Vlastní řešení	34
3.1. Návrh vlastního řešení	34
3.1.1. Návrh testovací plochy	35
3.1.2. Analýza bodů dráhy nástroje	36
3.1.3. Použité CAM systémy a použitý stroj	42
3.1.4. Nastavení parametrů dráhy v CAM	44

3.1.5.	Nastavení parametrů řídicího systému.....	49
3.1.6.	Provedení experimentu	50
3.2.	Vyhodnocení experimentu.....	51
3.2.1.	Porovnání naměřených a predikovaných dat.....	55
3.2.2.	Vliv nastavení parametrů řídicího systému	60
3.2.3.	Vliv výpočtového jádra CAM systému	63
3.2.4.	Vliv nastavení parametrů dráhy v CAM	65
3.3.	Zhodnocení výsledků a další vývoj	72
4.	Závěr	77
	Seznam použité literatury.....	79
	Seznam použitého softwaru	81
	Seznam obrázků.....	82
	Seznam tabulek.....	84
	Seznam příloh	85

Přehled použitých veličin, jednotek a symbolů

a	[m/s ²]	zrychlení
D	[mm]	průměr nástroje
dv	[-]	poměrná změna rychlosti na dráze
dvr	[1/mm]	poměrná změna rychlosti vztažená k délce bloku
K	[1/mm]	křivost
Kr	[1/mm ²]	křivost vztažená k délce bloku
L	[mm]	délka vektoru dráhy obrábění
N	[mm]	bod dráhy v NC kódu
N_x	[mm]	souřadnice bodu N v ose X
N_y	[mm]	souřadnice bodu N v ose Y
N_z	[mm]	souřadnice bodu N v ose Z
\vec{v}	[mm]	vektor dráhy obrábění
v_n	[-]	poměrný přírůstek směru dráhy
r	[mm]	poloměr křivosti
vf	[mm/min]	posuvová rychlost
Δx	[mm]	polohová odchylka v ose X
Δy	[mm]	polohová odchylka v ose Y
Δz	[mm]	polohová odchylka v ose Z
Δc	[mm]	celková polohová odchylka

Přehled použitých zkratk

CAD	Počítačem podpořený návrh (<i>Computer Aided Design</i>)
CAM	Počítačem podpořená výroba (<i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CL data	Data polohy bodu nástroje (<i>Cutter Location Data</i>)
CNC	Číslicové řízení počítačem (<i>Computer Numerical Control</i>)
3D	Trojrozměrný (<i>Three-dimensional</i>)
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci (<i>International Organization for Standardization</i>)
NC	Číslicové řízení (<i>Numerical Control</i>)
SW	Programové vybavení (<i>Software</i>)

1. Úvod a cíle práce

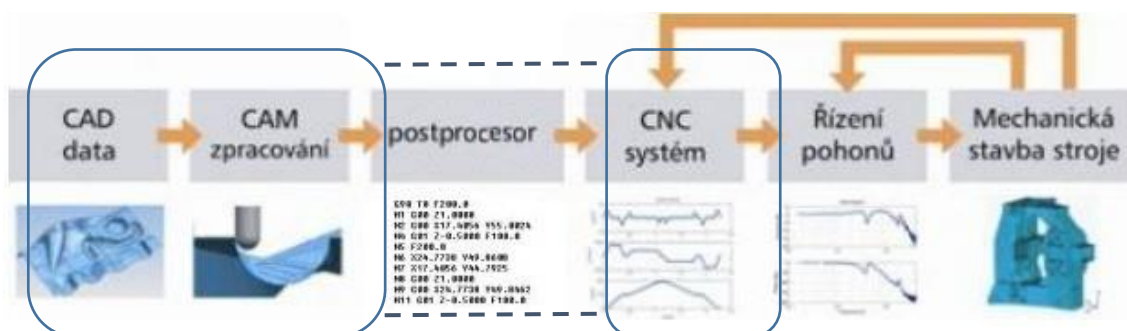
V oblasti výroby složitých tvarových dílců, jako je například frézování kompresorových kol, je kladen velký důraz na přesnost výsledného dílce. Zároveň je v současném vývoji CNC obráběcích strojů požadována vysoká produktivita výroby. Aby bylo dosaženo požadované přesnosti a jakosti obrobku při minimálním výrobním čase, je nutné, aby byla optimálně provedena příprava a nastavení procesu obrábění.

Faktorů, které do procesu vstupují, je velké množství a vycházejí z různých odvětví strojírenství, ať se jedná o konstrukci strojů, materiály a geometrie nástrojů v relaci s materiálem obrobku, nastavení technologických podmínek, softwarové nastavení aj. Z široké škály zmíněných vlivů je tato práce zaměřena na ovlivnění přesnosti a produktivity obrábění v oblasti nastavení parametrů CAM systému a ovlivnění ze strany nastavení řídicího systému stroje.

Hlavním cílem je identifikovat parametry, které ve vytyčené oblasti mají vliv na přesnost a produktivitu obrábění a zjistit velikost jejich vlivu. Součástí vlastního řešení je návrh jednoduchého SW nástroje, který zhodnotí z hlediska rozložení bodů dráhy NC kód, vygenerovaný z CAM při určitém nastavení volených parametrů. Na základě tohoto zhodnocení NC kódu bylo možné rychle odhalit případná problematická místa na dráze nástroje a úpravou parametrů v CAM systému se pokusit o vytvoření dráhy, která bude v daném ohledu vhodnější pro získání požadovaných výsledků. Pro experiment vlastního řešení je třeba vyhledat možné parametry, kterými lze v CAM ovlivnit rozložení interpolačních bodů dráhy obrábění a také funkce řídicího systému stroje, které mají vliv na odbavení NC programu. Zvolené parametry a jejich různá nastavení jsou vstupními proměnnými experimentu, jehož výstupem budou data naměřená na stroji při odbavení konkrétní dráhy. Vyhodnocení experimentu umožní určit vliv každého sledovaného parametru na přesnost a produktivitu obrábění a zhodnotit důležitost různých aspektů nastavení.

2. Přehled vlivů na přesnost obrábění

Při obrábění na CNC obráběcím stroji vstupuje do procesu mnoho faktorů, které ovlivňují obrábění a které mohou také mít vliv na přesnost výsledného obrobku. Na Obr. 1 je schéma posloupnosti jednotlivých oblastí přípravy a realizace CNC obrábění, od návrhu obrobku až po realizaci na CNC obráběcím stroji. V řešené práci bude zaměřena pozornost především na vliv v oblasti CAD / CAM softwaru a na zpracování připraveného NC kódu v CNC systému obráběcího stroje. Jako mezistupeň převodu dat je v posloupnosti zařazen postprocesor, který se stará o konverzi NC dat do jazyka řídicího systému konkrétního stroje a který zohledňuje mechanické a softwarové vlastnosti daného stroje. K ověření dosažených výsledků obrábění komplexních tvarových ploch slouží testovací dílce, které obsahují typické prvky, se kterými je možné se v praxi setkat a na kterých lze snadno verifikovat případné odchylky od uvažovaného modelu. Popisu zmíněných dílců bude také věnován prostor v této části práce.



Obr. 1: Posloupnost vazeb ovlivňujících přesnost dráhového řízení, převzato z lit. [1]

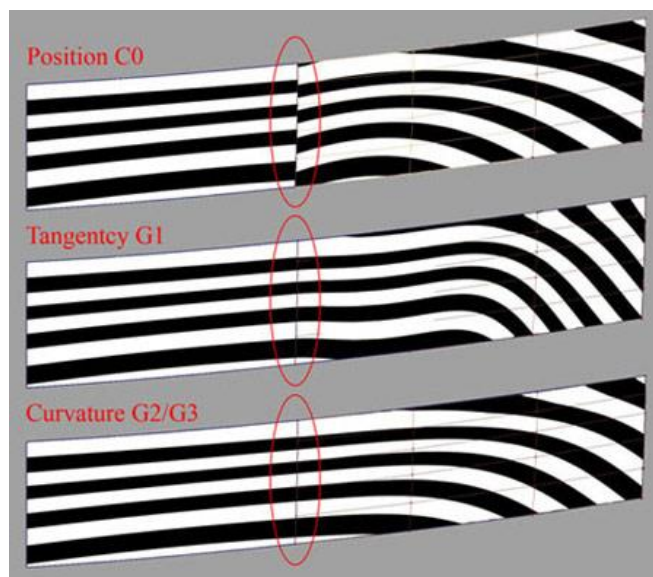
2.1. Vliv na přesnost obrábění – CAD / CAM

Výsledná přesnost obrábění může být ovlivněna již v samotném počátku přípravy výroby a to při práci s 3D modelem navrhované součásti v prostředí CAD softwaru. Ovlivnění zde může nastat na úrovni vytváření modelu součásti. Dalším faktorem, který se může podílet na kvalitě, respektive přesnosti obrobku je přenos jeho modelu z CAD softwaru do CAM softwaru, kam je model načítán jako požadovaná výsledná podoba obráběné součásti. Poslední ovlivnění přesnosti v oblasti sledované v této kapitole nastává v prostředí CAM softwaru, kde probíhá tvorba drah nástroje pro obrábění požadované

součásti. Rozbor CAD-CAM systémů v této kapitole bude zaměřen především na dva systémy: Siemens NX a SolidCAM.

2.1.1. Možné chyby při modelování

Při modelování součásti, obzvlášť bavíme-li se o modelování složitých tvarových ploch, mohou vzniknout určité nežádoucí nedokonalosti povrchu, které ovlivní tvorbu dráhy nástroje a v konečném důsledku způsobí patrné nedostatky v přesnosti výsledného obrobeneho povrchu. Těmito nedokonalostmi jsou míněny především ostré zlomy, narušující hladkost povrchu. Na Obr. 2 jsou příklady spojitosti při napojení dvou ploch, s kterými se lze setkat. Může to být napojení ploch se zlomem (tzv. spojitost C0), dále napojení s hladkostí prvního stupně (G1), nebo, v ideálním případě, vyšší řády spojitosti. Této problematice je důležité se při modelování věnovat a nápomocny v dané oblasti mohou být pokročilé funkce CAD systémů, které umožňují analyzovat křivost, případně je lze využít k úpravám a ovlivnění hladkosti modelovaného povrchu.



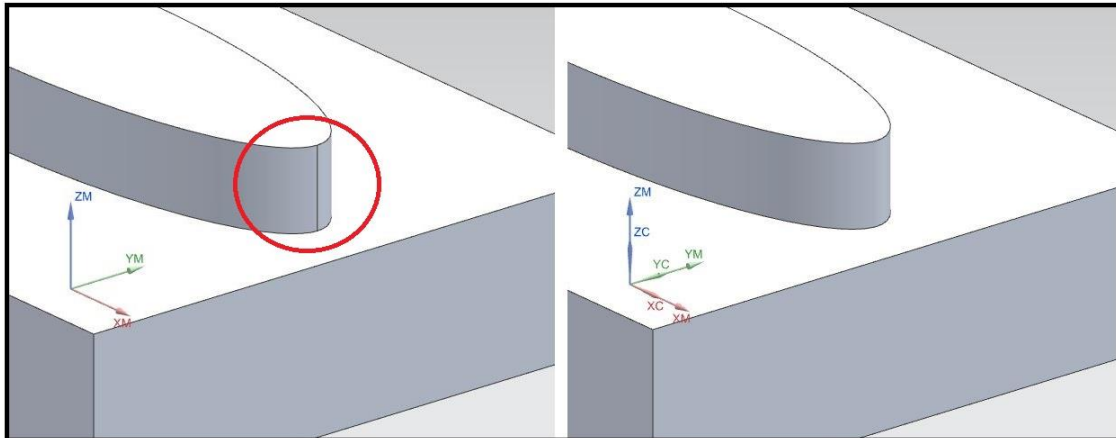
Obr. 2: Příklady napojení povrchu modelu uvedené v lit. [2]

2.1.2. Chyby vlivem převodu z CAD do CAM

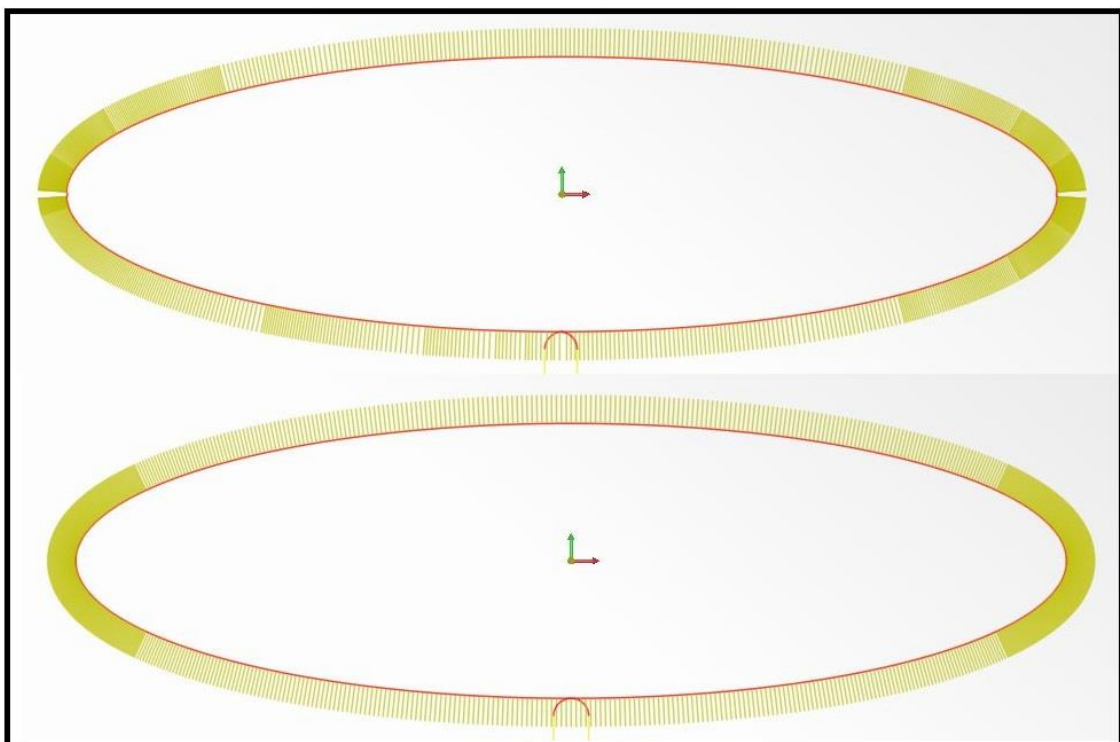
Při převodu z CAD softwaru do CAM softwaru je důležité, jaký formát souboru podporuje daný CAM. Pokud se jedná o CAM integrovaný do CAD softwaru, potom lze 3D model přímo vložit do CAM a není třeba nijak převádět formát souboru. Pokud je však vkládán model do CAM, který není s CAD softwarem provázaný, tak v některých případech je

nutné 3D model převést do univerzálního formátu (např. STEP, IGS, x_t, Parasolid apod.), aby bylo možné model v CAM načíst. CAM z tohoto univerzálního formátu model opět převádí do formátu, se kterým standardně pracuje. Při zmíněných převodech formátů může dojít k zaokrouhlovacím chybám vlivem přepočtu, případně může být celistvá plocha rozdělena na více částí, což může následně způsobovat komplikace při tvorbě drah nástroje, nebo přímo vytvářet dráhy nástroje s chybami.

Zmíněná chyba je demonstrována např. na Obr. 3 a Obr. 4. V programu Solidworks byl vytvořen model obráběné součásti – povrch má tvar elipsy a je navržen pro čtyřosé, bodové obrábění. Následně byl model převeden do formátu STEP a načten v CAM systému Siemens NX. Daný CAM systém umožňuje také otevření původního formátu souboru (*.sldprt) a poté sám provede konverzi na vlastní interní formát systému NX – *.prt. Z Obr. 3 vlevo je patrné, že po načtení modelu z formátu STEP vznikla na vrcholu elipsy nežádoucí nespojitost povrchu a díky převodu modelu byl povrch rozdělen na dvě části. Na Obr. 3 vpravo je požadovaný celistvý tvar po načtení modelu ze SLDPRT. Tato nepřesnost má následně vliv i na vypočtenou dráhu nástroje. Pro obě zmíněné varianty načteného modelu byla vypočtena dráha pro obrobení obvodu elipsového povrchu. Nastavení parametrů dráhy nástroje je totožné – požadované toleranční pásmo pro prokládání bodů dráhy je shodné (0,001 mm) a osa nástroje má v každém bodě dráhy normálový směr na obráběný povrch. Na Obr. 4 nahoře je vidět dráha pro model načtený z formátu STEP. V místech nespojitosti povrchu je patrný výrazný skok v rozteči dvou sousedních bodů vzhledem k hustotě bodů v okolí daného místa. Na Obr. 4 dole je dráha pro model načtený z formátu SLDPRT. V oblastech hlavních vrcholů elipsy není patrné narušení hustoty bodů dráhy. Je také zřejmé, že hustota proložených bodů po obvodu elipsového povrchu se v daných případech odlišuje. Na 3D modelu nemusí být vždy chyby na první pohled patrné, proto je v tomto případě také užitečná analýza tvaru a křivosti ploch, díky které je možné odhalit určité chyby převedeného modelu.



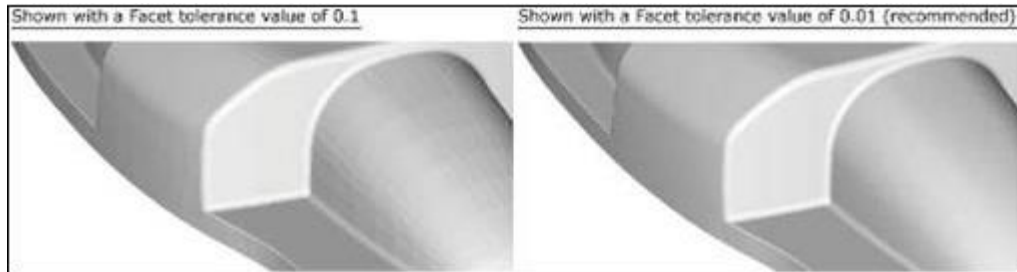
Obr. 3: Vlevo - model převedený ze STEP; model převedený ze SLDPRT vpravo



Obr. 4: Nahoře - dráha vygenerovaná z modelu ve formátu STEP; dole- dráha vygenerovaná z modelu ve formátu SLDPRT

I v případě, kdy není třeba převádět formát souboru, dochází při načítání 3D modelu do CAM k jeho aproximaci pomocí velkého množství malých elementů – trojúhelníkových plošek. Každá ploška je definována třemi vrcholy a normálovým vektorem. Formát modelu takto aproximovaného se nazývá STL a podobně je v CAM aproximovaný i model řezného nástroje, takže při výpočtu dráhy nástroje hraje svojí roli popsána aproximace obrobku a nástroje. Přesnost aproximace je možné ovlivnit počtem plošek, který je závislý na zadané toleranci. Toleranci lze měnit při načítání souboru v CAM. Čím

přesnější je požadovaná tolerance, tím se zvyšuje počet plošek, na které je model rozdělen. Na Obr. 5 je porovnání modelu, který je aproximován v různém tolerančním pásmu. Přesností a vyhlazováním ploch aproximovaných ploškami (anglicky “facets”) se zabývá například studie, popsaná v lit. [3], která bude více zmíněna v kap. 2.4.1.



Obr. 5: Model obrobku aproximovaný při zadání různé tolerance, převzato z lit. [4]

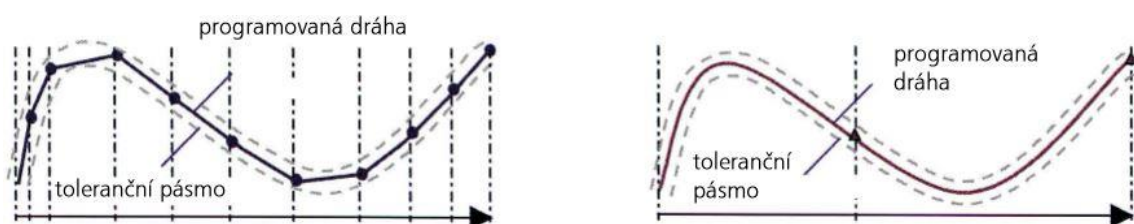
2.1.3. Vytváření drah nástroje – strategie a volené parametry

Při definování obráběcí operace v CAM programátor nastavuje hodnotu tolerance dráhy. Toleranční pásmo interpolace dráhy určuje míru shody interpolované dráhy s požadovaným tvarem obrobku. Čím větší je toleranční pásmo, tím menší jsou nároky na dodržení tvaru při výpočtu interpolované dráhy. Malá hodnota tolerance znamená, že interpolovaná dráha se přibližuje k tvaru obrobku – v případě lineární interpolace dráhy u tvarově složitých ploch bude dráha složená z velkého množství krátkých lineárních úseků. Pozitivum přesného popisu dráhy s sebou nese na druhé straně negativum, kterým je zvyšující se nárok na výpočet, jak ve fázi generování dráhy, tak později při odbavování programu v řídicím systému stroje.

V nastavení dráhy nástroje může programátor volit z množství metod - strategií pohybu. Některé volené strategie jsou vhodné pro speciální případy tvaru programované plochy, jiné lze z hlediska jejich charakteru brát jako univerzální. Pro přípravu dráhy v případě tvarově složitých ploch se často užívá přímé dráhy nástroje, která kopíruje tvar modelu, tzv. *řádkování*. U této strategie je možné nastavit více způsobů typ a hodnotu rozestupů (překrytí) sousedních drah, a zda mají být přejezdy obousměrné, či má být obrábění vedeno pouze jedním směrem. Dále je možné nastavit směr řádkování stanovením úhlu odklonu od základní osy. Tím je docíleno interpolace ve více osách a lze získat plynulejší průběh dráhy díky případně pozvolnějšímú náběhu křivosti při přejezdu tvaru plochy.

V oblasti víceosého obrábění lze pracovat v nejjednodušším případě s konstantním odklonem od osy nástroje Z. V tomto případě se jedná o čtyřosé obrábění a v základu se používají dva směry odklonu nástroje - o úhel naklonění a o úhel vlečení. V NC kódu oproti tříosému obrábění pouze přibývá v každém řádku stanovení fixního úhlu rotační osy, napočítání bodů dráhy se však může zásadně lišit od základního nastavení – nulového úhlu nástroje.

Nejrozšířenější reprezentací ploch v CAD systémech jsou v současné době NURBS křivky, jak je uvedeno v lit. [5]. Abychom docílili požadované shody dráhy nástroje s tvarem modelu obrobku, je v CAM systémech možné definovat, jakým způsobem bude proveden popis dráhy nástroje. Nabízí se zde možnost generování dráhy lineárními interpolacemi, kombinací lineárních a kruhových interpolací a některé CAM systémy obsahují moduly, které do výstupních CL dat vkládají informace, sloužící k výpočtu koeficientů spline funkce dané dráhy nástroje. Např. u Siemens NX CAM je to modul Nurbs Path Generator. Při vhodném nastavení funkce postprocesoru je popis dráhy nástroje do NC programu generován ve formě NURBS interpolací. Porovnání typů interpolací je na Obr. 6 – vlevo dráha programovaná lineárními úseky, vpravo dráha programovaná spline interpolací. Při použití spline interpolace lze dosáhnout velmi dobré hladkosti a kvality povrchu i v případě, že není kladen vysoký nárok na přesnost, skrze toleranci dráhy. Na povrchu obrobku v takovém případě nejsou patrné žádné ostré přechody, jak tomu může být u obrobků při použití lineární interpolace. To je výhodné při víceosém obrábění obrobků obecných ploch.



Obr. 6: Vlevo - Lineární interpolace; vpravo - Spline interpolace. Převzato z lit [5].

2.2. Převod dat CAM-NC program (postprocesor)

Pro vytvoření NC programu a jeho načtení v konkrétním CNC řídicím systému je třeba pamatovat na nezbytný mezistupeň – převodník, kterým je postprocesor. Po

naprogramování drah pro obrobení dílce je jako výstup z CAM systému soubor s univerzálními CL daty. Abychom bylo možné pracovat s programem na požadovaném stroji, je nutné jej převést z CL dat do jazyka konkrétního řídicího systému. Pro realizaci požadovaných drah obrábění je zároveň nezbytné, aby byla respektována hardwarová a softwarová konfigurace daného obráběcího stroje a byly brány v potaz jeho omezení. Tyto informace postprocesor zná a s ohledem na ně generuje výsledný NC kód. Z popsaného je tedy jasné, že postprocesor je unikátní pro každý konkrétní stroj.

Funkce generování spline interpolací

V CL datech, generovaných CAM systémem, může být dráha nástroje popsána informacemi, podle kterých mají být v postprocesoru vypočítány koeficienty požadované spline funkce. Použitý postprocesor musí být nastaven tak, aby byl schopen správně generovat spline interpolace a je třeba znovu zdůraznit, že nastavení takové funkce v postprocesoru se bude lišit pro vytváření NC programu pro řídicí systém Siemens Sinumerik, Heidenhain, respektive kterýkoliv další požadovaný řídicí systém. Nastavením postprocesorů a rozdíly v požadavcích konkrétních řídicích systémů se zabývají autoři lit. [5]. Podrobněji bude tento zdroj zmíněn v kap. 2.4.3.

Problematika převodu pětiosé dráhy

V prostředí CAM systému jsou souřadnice nástroje uvažovány v souřadném systému obrobku, naopak v řídicím systému CNC stroje jsou souřadnice nástroje uvažovány v souřadném systému stroje. Některé řídicí systémy jsou vybaveny funkcí, která je schopna provést převod ze souřadného systému obrobku do souřadného systému stroje (např. u Siemens Sinumerik je to funkce Traori). Avšak pro řídicí systémy, u kterých taková funkce není k dispozici, je třeba postprocesoru, který dokáže tuto transformaci provést. Implementací potřebné funkce do postprocesoru se zabývá autor lit. [6], podrobněji bude popsáno v kap. 2.4.3.

2.3. Funkce řídicího systému – technologická podpora

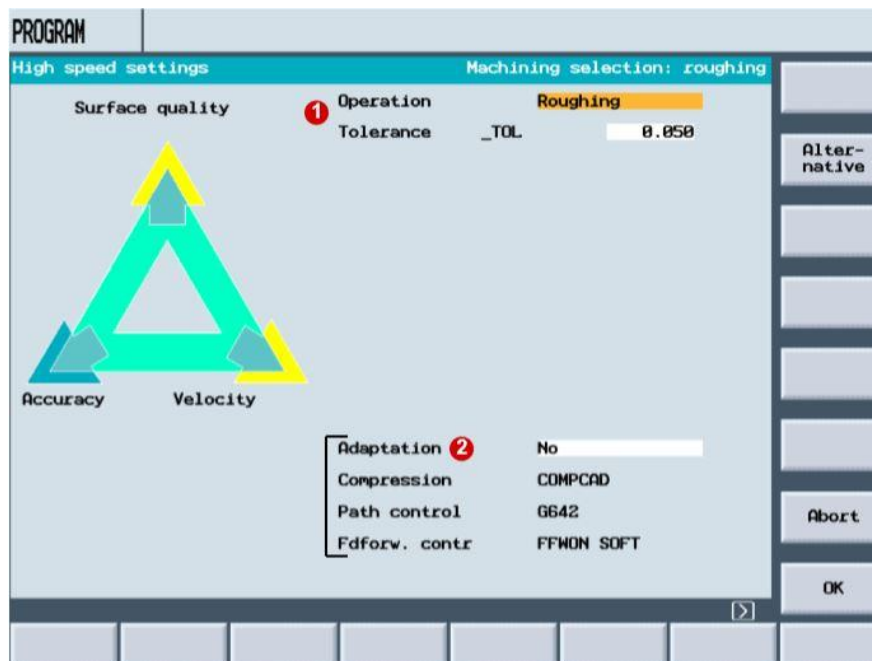
Tato kapitola je věnována rozboru nastavení funkcí řídicího systému obráběcího stroje, které mají přímý vliv na vykonávání NC programu a tím ovlivňují i výslednou přesnost obráběného povrchu. Tyto funkce jsou technologickou podporou obráběcího procesu

přímo na stroji, kdy je možné volit nastavení mimo jiné podle toho, zda chceme klást důraz na přesnost, nebo na produktivitu obrábění. Hlavními sledovanými řídicími systémy budou Siemens Sinumerik a Heidenhain. Budou ale také zmíněny i funkce některých dalších řídicích systémů.

2.3.1. Funkce v řídicím systému Siemens Sinumerik 840D

Cyklus 832

Řídicí systém Siemens Sinumerik 840D umožňuje pro technologickou podporu obrábění použití funkce "High Speed Settings – CYCLE832" viz lit. [7]. Tento cyklus sdružuje funkce, kterými je možné nastavit způsob zpracování NC programu v ř.s. a také chování pohonů stroje. V uživatelském prostředí řídicího systému je možné zvolit, na jaký požadavek z hlediska odbavení programu má být kladen důraz: kvalita povrchu, rychlost, či přesnost, jak je patrné z Obr. 7. Je zde také možné nastavit toleranci, která je dále podstatná pro jednotlivé dílčí funkce cyklu (budou popsány v následujících odstavcích). Po zvolení požadovaných parametrů systém do programu vloží blok, který má např. následující podobu: *N7 CYCLE832(0.05,1,1)*. První hodnota v závorce má význam zmíněné tolerance a druhá hodnota se vztahuje ke zvoleným režimům jednotlivých funkcí cyklu, které budou dále popsány. Číslo 1 značí nastavení pro dokončování, číslo 3 nastavení pro hrubování a číslo 2 je střední nastavení. Třetí hodnota v závorce je typ obrábění – 1 tedy frézování. Mimo popsané formulace lze v NC programu také využít jen některou z funkcí Cyklu 832 a to přímo vypsáním příkazu dané funkce. Nejnovější vydání softwaru řídicího systému přináší některá podstatná vylepšení funkcí Cyklu 832, či jeho doplnění o další funkce, které ovlivňují odbavování NC programu v případech přesného, tříosého, respektive víceosého, tvarového obrábění, popsané v lit. [8] (inovace budou také popsány v následujících odstavcích).



Obr. 7: Nastavení Cyklu 832 v Siemens Sinumerik, převzato z lit. [7]

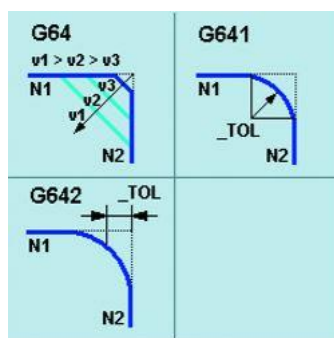
Režim řízení pohybu po dráze

Řízení pohybu po dráze by mělo omezit velké brždění os při přechodech mezi bloky a zajistit plynulost jejich navazování, jak je uvedeno v lit. [7]. Zajištěním spojitého průběhu rychlosti se docílí dodržení požadovaných řezných podmínek a zkrácení doby obrábění. Kontura se při použití tohoto režimu odchyluje od naprogramované v mezích stanovených tolerancemi. V rámci popsaného režimu je zároveň aktivní funkce zjištění několika bloků dopředu – Look Ahead (počet bloků, které jsou načítány je řízen strojním parametrem). Opakem tohoto režimu je funkce G61, u které dochází k přesnému průjezdu dráhy se zastavováním os na každém bloku. Hlavní používané funkce režimu jsou zobrazeny na Obr. 8. Funkce G64 zajišťuje rychlostně plynulý přechod mezi bloky, kdy míra odchylky od naprogramované dráhy je přímo úměrná rychlosti pohybu a není závislá na zadané toleranci. Čím je větší rychlost pohybu, tím je větší i zkreslení dráhy vlivem funkce G64. V případě funkce G641 je přechod mezi bloky tangenciálně napojen a odchylka kontury je řízena tolerancí, zvolenou v nastavení High Speed režimu a jedná se v tomto případě o max. povolený poloměr zaoblení kontury. U funkce G642 se zjišťuje hodnota, o kterou může ř.s. před koncem bloku začít tvořit zaoblení dráhy (odchýlení od původní kontury) ve strojním parametru (*MD 33100: COMPRESS_POS_TOL*). Hodnoty tolerance pro jednotlivé osy zde mohou být různé, na rozdíl od hodnoty tolerance v High

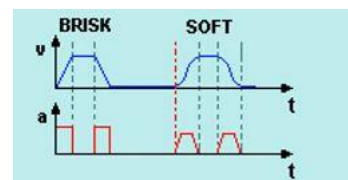
Speed režimu. U nejnovějších verzí řídicího systému výrobce doporučuje v Cyklu 832 použití režimu G645. Tato funkce zaručuje zaoblování přechodů mezi bloky v rámci daných tolerancí, podobně jako G642, ale na rozdíl od této také zajišťuje hladký průběh zrychlení všech os i u tangenciálně napojených bloků, kde by vlivem křivosti dráhy docházelo ke skokům ve zrychlení. Výrobce bude v nových vydáních softwaru inovovat vlastnosti funkce G645, na rozdíl od ostatních funkcí této skupiny, jak vyplývá z informací v lit. [8].

Způsoby chování os při změnách zrychlení

V řídicím systému Sinumerik je možné nastavit způsob dosahování požadované rychlosti viz Obr. 9. Při zvolení příkazu Brisk zrychlují osy maximálním zrychlením až do dosažení žádaného posuvu (bez omezení jerku). V případě příkazu Soft osy dosahují žádané rychlosti plynulým zrychlováním s omezením jerku. Takto jsou omezeny trhavé pohyby – rázy a šetří se tím mechanika stroje. Tyto informace lze dohledat v lit. [7].



Obr. 8: Podfunkce režimu řízení pohybu po dráze, viz lit. [7]



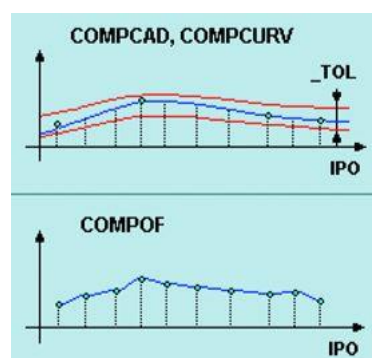
Obr. 9: Průběh změny zrychlení v čase, viz lit. [7]

Najíždění s dopřednou regulací

Funkce feedforward zajišťuje dopřednou korekci rychlosti a zrychlení pohonů os stroje, jak je uvedeno v lit. [7]. Jejím úkolem je eliminovat odchylku vůči naprogramované dráze, která je způsobená setrvačným chováním pohonů. Aktivace/deaktivace této funkce probíhá v NC programu prostřednictvím příkazu "FFWON/FFWOF". Nastavení parametrů funkce je možné měnit ve strojních parametrech daného řídicího systému.

Spline interpolace a komprese NC bloků

Funkce COMPCAD slouží v řídicím systému Sinumerik ke kompresi NC bloků, což má pozitivní vliv na zatížení operační paměti a čas odbavení programu. Vyhlazením dráhy interpolované lineárními úseky pomocí spline křivek lze dosáhnout vyšší hladkosti obrobeného povrchu. Vyhlazení dráhy interpolované G1 úseky – kompresor proloží dráhu spline křivkou ve zvoleném tolerančním pásmu. Proložení spline křivek podléhá určitému tolerančnímu pásmu, jak je patrné z Obr. 10. Toto pásmo je určeno tolerancí, zvolenou v nastavení High Speed režimu. K vyhlazení dráhy pohybu a návaznosti interpolovaných úseků zde dochází na úkor celkové přesnosti výsledného tvaru. Pro samostatné volání funkce se v NC kódu uvede příkaz COMPCAD a doplnění žádané tolerance pro aktivaci režimu, příkaz COMPOF slouží pro deaktivaci režimu. Informace o dané funkci lze dohledat v lit. [7]. Od verze softwaru V4.7 SP2 výrobce v lit. [8] rozlišuje volenou možnost na *Advanced Surface* a *Top Surface*. První jmenovaná pracuje s popsaným kompresorem COMPCAD. Možnost *Top Surface* je výrobcům strojů nabízena jako možné rozšíření softwarového vybavení řídicího systému. Režim používá zdokonalený kompresor s názvem COMPSURF, který si dokáže poradit s dráhou, vykazující nehomogenní rozložení bloků a tím narušení plynulého průběhu. Cílem tedy je, aby obrobený výsledek vykazoval konzistentně vynikající kvalitu povrchu, nezávislou na kvalitě vstupních CAD/CAM dat. V rámci *Top Surface* je také k dispozici volba vyhlazení dráhy (*Smoothing*), kdy na výsledném povrchu jsou zahlazené ostré hrany, respektive striktně dodržené výrazné přechody při neaktivní volbě.



Obr. 10: Kompresor NC bloků v Siemens Sinumerik, viz lit. [7]

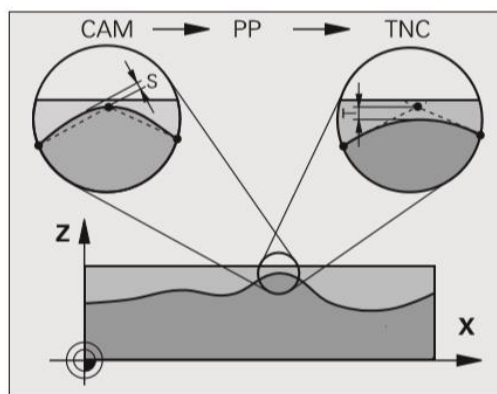
V Siemens Sinumerik 840D je také možné odbavit NC program, v němž je již dráha nástroje popsána pomocí spline interpolací. Na výběr je z několika typů interpolací

– polynommická, A-spline, B-spline, C-spline a tyto režimy jsou voleny na základě typu interpolace vystupující z CAM. Rozmanitost tvaru obrobků, které je třeba popsat, se odráží v množství typů interpolací, přičemž každý ze zmíněných typů je nevhodnější pro určitý tvar obrobku. Oproti funkci komprese NC bloků, zde se během toku dat z CAM po realizaci dráhy obrábění v CNC systému minimalizuje ztráta informací o požadovaném tvaru obrobku. Obecně je použití spline interpolací výhodné kromě velmi přesného matematického popisu tvaru obrobku také z hlediska hladkosti napojení dvou navazujících křivek, což má vliv na plynulost pohybu os obráběcího stroje a tím i na přesnost a produktivitu obrábění, jak je uvedeno v lit. [5].

2.3.2. Funkce v řídicím systému Heidenhain iTNC 530

Cyklus 32

Jedním z velkého množství cyklů dostupných v řídicím systému Heidenhain iTNC530 je Cyklus 32, který, podobně jako Cyklus 832 u Siemens Sinumerik, má za cíl ovlivnění přesnosti a produktivity obrábění v oblasti práce s NC kódem. Cyklus, podobně jako funkce G64 popsaná v kap. 3.3.1., vyhlazuje přechody mezi lineárními bloky v rámci dané tolerance, jak je patrné z Obr. 11. Tolerance je fixně nastavena ve strojních parametrech, nebo ji lze explicitně určit v konkrétním NC programu. Výrobce řídicího systému v lit. [9] doporučuje pro optimální vyhlazení dráhy, stanovit toleranci T (viz Obr. 11) v rozmezí $(100 - 200)\%$ hodnoty S , která odpovídá toleranci aproximace dráhy v CAM. V cyklu se dále volí HSC mód hrubování / dokončení, který aktivuje interně definované nastavení filtrů (důraz na rychlost posuvu / na přesnost kontury), pracujících například s hladkostí průběhu jerku.



Obr. 11: Tolerance v Cyklu 32 Heidenhain, viz lit. [9]

Nastavení servo řízení

V řídicím systému Heidenhain je možné využívat rozsáhlého nastavování řízení pohonů. Je zde dostupná funkce feedforward, která hlídá požadovanou a nominální polohu os a rozdíl kompenzuje. Je zde použit výpočet vlečné chyby, která je funkcí rychlosti a polohové smyčky řízení. Pro hrubování je například možné nastavení rychlostní dopředné vazby semi-feedforward, které upřednostní rychlost odbavení před přesností polohování, jak se uvádí v lit. [9]. Podobně, jako u Siemens Sinumerik je možné použití funkce Look-ahead, která načítá určitý počet bloků dopředu.

Spline interpolace

Řídicí systém Heidenhain iTNC 530 je schopen načítat data z CAM, kde je dráha definovaná spline interpolacemi. Spline interpolátor, obsažený v daném řídicím systému je schopen pracovat s polynomy 3. stupně jak je uvedeno v lit. [10]

Dynamická přesnost a účinnost

Společnost Heidenhain nabízí pro řídicí systém iTNC 530 sady funkcí “Dynamic Precision“ a “Dynamic Efficiency“, které jsou popsány v lit. [10]. Obsažené funkce mají za úkol zlepšovat přesnost, resp. účinnost vůči dynamickým vlivům procesu obrábění. V první zmíněné sadě je například funkce aktivního tlumení vibrací, nebo kompenzace chyb sériově řazených os, způsobených zrychlením. V sadě pro zlepšení účinnosti je například funkce aktivního monitoringu zatížení vřetene, která dokáže v reálném čase měnit posuv, v závislosti na zatížení od řezného procesu, nebo funkci trochoidálního frézování, která zajišťuje konstantní zatížení nástroje v každém místě řezu.

2.3.3. Vybrané funkce dalších řídicích systémů

Pokročilé funkce ovlivnění dráhy a zrychlení (FANUC)

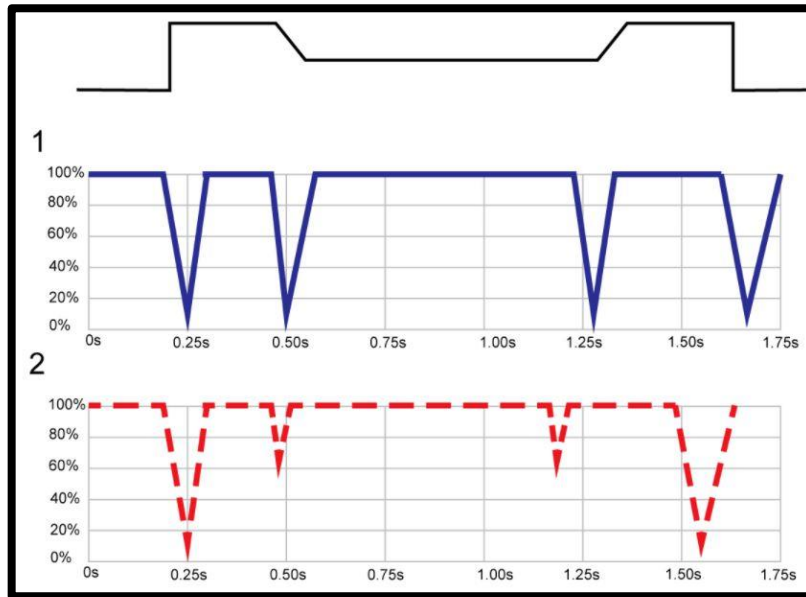
Společnost FANUC nabízí pro svůj řídicí systém sadu podpůrných funkcí, které mají optimalizovat případné chyby stroje a průběh zrychlení pro dosažení co možná nejpřesnějšího výsledku, respektive pro maximalizaci produktivity

Jednou z nabízených funkcí je mód AICC/AIAPC, který v sobě sdružuje funkci Look-ahead (načítání bloků dopředu) a funkci vyhlazování napojení lineárních úseků. Je zde možné zvolit více režimů módu, kdy lze upřednostnit rychlost, nebo naopak přesnost

polohování. Další funkcí je nahrazování lineárních úseků dráhy spline křivkami (podobně jako u Sinumerik funkce COMPCAD). K dispozici jsou také například funkce pro omezení Jerku, nebo nastavení filtrů pro ovlivnění chování servopohonů. [11]

Modul HSM (Haas)

Americká firma Haas nabízí u svého řídicího systému funkce, které jsou dostupné i u konkurenčních výrobců řídicích systémů. Lze zmínit například funkci G64, která označením i vlastnostmi odpovídá funkci popsané u systému Siemens Sinumerik, nicméně nejsou zde k dispozici další nastavení funkce, jako v případě systému Sinumerik. Kromě toho také Haas nabízí možnost použití modulu HSM, obsahujícího funkci Look-ahead, která je schopna načítat až 80 NC bloků dopředu. Vliv funkce výrobce demonstruje na Obr. 12. Jsou zde porovnány průběhy rychlosti během projetí dráhy bez použití (závislost 1) a s použitím (závislost 2) popisovaného modulu. Výrobce neuvádí popis veličin u jednotlivých os grafů, nicméně z kontextu vyplývá, že svislá osa představuje procentuálně podíl okamžité hodnoty posuvu vůči naprogramovanému a podélná osa je časová. Z průběhu je patrné, že v určitých místech dráhy nedochází k poklesu rychlosti až na nulovou hodnotu. Takové zastavení v průběhu dráhy při obrábění může způsobit chyby na povrchu obrobku. Zároveň je zřejmé, že je zkrácen celkový čas průjezdu dráhy. Modul HSM dále umožňuje nastavení vyhlazování napojení lineárních úseků ("*Setting 85*"), nastavení režimu chování pohonů z hlediska zrychlování a rychlosti změny směru (*Setting 191 – Rough/Medium/Finish*) [12]



Obr. 12: Vliv modulu HSM (Haas) na průběh rychlosti, převzato z lit. [12]

2.4. Stav řešené problematiky v odborných pramenech

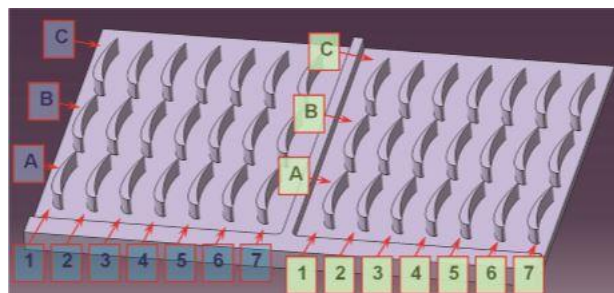
Analýza možných vlivů na přesnost obrábění je předmětem práce mnoha výzkumných pracovišť a v odborných zdrojích je k dohledání široká škála článků, které se zabývají touto problematikou. Autoři prací představují analýzu řešené problematiky a na základě této přicházejí jak na teoretické, tak i na praktické úrovni s novým řešením, které vede ke zdokonalení sledovaného, především tedy přesnosti a efektivity obrábění. Zmapování existujících prací pomůže k detailnější znalosti tématu a může to být vodítkem k nastavení testů této práce.

2.4.1. Optimalizace dráhy nástroje – úroveň CAM

Studie autorů Rong-Shine et al. viz lit. [3] se věnuje zkoumání aproximace použitého modelu v CAM pomocí trojúhelníkových plošek formátu SCL, který je používán pro popis tvaru modelu. Jsou zde popsány konkrétní výsledky s vyčíslením chyby vzniklé při vygenerování dráhy nástroje u aproximovaných kontur. Studie přináší algoritmus, který je schopen aproximované plochy vyhladit a jejich tvar více přiblížit požadovanému. Mohou takto přesněji určit bod dotyku nástroje s povrchem obrobku a také orientaci natočení nástroje vůči obrobku. Z výsledků testů vyplynulo, že je použitím navrženého

algoritmu možné snížit odchylku vygenerované dráhy vůči požadovanému tvaru o 50 procent.

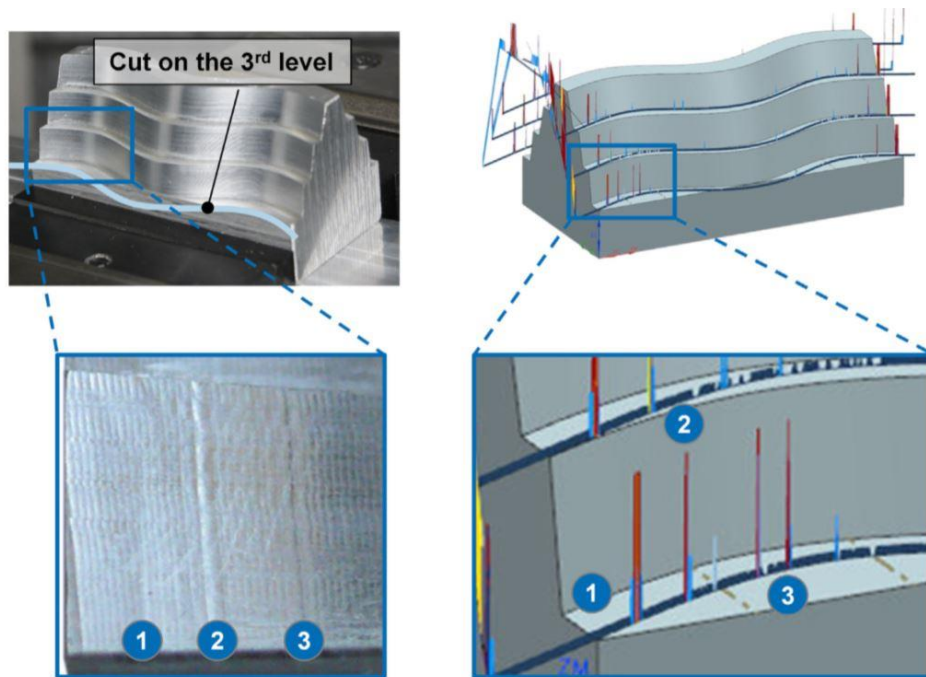
V článku [13] autora Vavrušky jsou porovnávány dráhy nástroje při různém nastavení dráhy. Pro tvorbu drah jsou použity dva CAM systémy – Siemens NX a CATIA. V obou CAM systémech byly vytvářeny dráhy pomocí lineárních interpolací při zadání více hodnot tolerancí výpočtu dráhy a tyto byly mezi sebou porovnány. Dále byly vytvářeny dráhy pomocí kombinace kruhových a lineárních interpolací a pomocí kombinace spline a lineárních interpolací. U vygenerovaných dat byly porovnávány počty bloků NC programů a byly analyzovány průběhy posuvové rychlosti v čase pro každý případ. Navržené dráhy byly obrobena a byly porovnány časy obrábění. Bylo zjištěno, že vlivem výpočtového jádra se vygenerovaná data z obou CAM systémů při stejném nastavení dráhy liší. Na obrobených vzorcích jsou zjevné rozdíly, z kterých je patrná hladkost obrobeného povrchu, resp. chyby na povrchu. Z testů vyplynulo, že nejvýhodnější z testovaných variant, z hlediska času obrábění a dosažení dobré hladkosti povrchu, je použití spline interpolace. Z výsledků analýzy průběhu posuvové rychlosti během obráběné dráhy je zřejmé, že v případě dat vygenerovaných ze Siemens NX pro některé kombinace parametrů, dochází v určitých úsecích dráhy ke skokovému poklesu posuvové rychlosti, zatímco u CATIA takový jev patrný není. Vzhledem k tomu, že do Siemens NX byl model přenesen z CATIA prostřednictvím formátu STEP, nabízí se zde úvaha, zda není na vině vliv přenosu modelu, podobně jako v příkladu z kap. 2.1.2.



Obr. 13: Testovací dílec pro porovnání nastavené dráhy nástroje, převzato z lit. [13]

Autoři lit. [14] se zaměřují na vyhodnocování kvality dráhy nástroje na výstupu z CAM systému. Snaží se zjistit potenciálně kritické oblasti při vytváření dráhy pro pětiosé obrábění pomocí procesních dat z reálných, či simulovaných obráběcích operací. Z reálného stroje mohou být data získávána přímo z integrovaných senzorů a přenášena

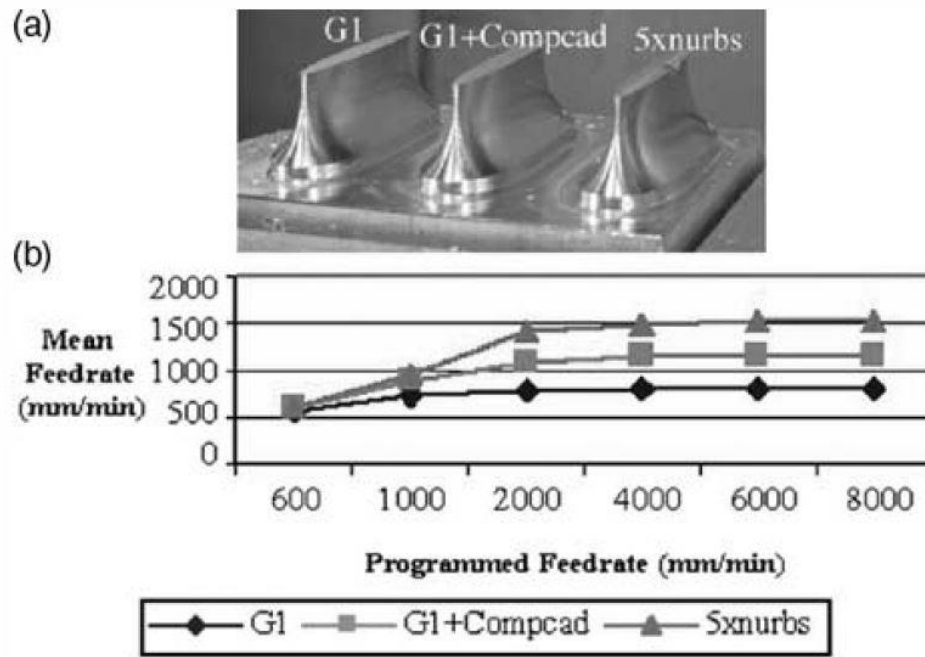
prostřednictvím softwarových nástrojů - např. SinuComNC (Siemens), nebo TNCScope (Heidenhain). V případě potřeby mohou být na obráběcí stroj instalovány určité senzory externě. Zároveň jsou v navrženém systému využívána data z virtuálního výrobního systému s NC simulací, která obsahuje virtuální řídicí systém – např. VNCK ekvivalentní systému Sinumerik 840D. Z procesních dat jsou v navrženém algoritmu získávány informace pomocí technologie Fuzzy Logic, které jsou porovnávány s daty z CAM. Na základě získaných informací je dále pracováno s vyplývajícími poznatky. Poznatky jsou shromažďovány a tvoří inferenční síť, která sleduje vliv hodnot zjišťovaných veličin na dvě oblasti – produktivitu obrábění a kvalitu povrchu. Výstupem z inferenční sítě jsou *koeficienty riskantnosti* pro hodnoty sledovaných parametrů. Koeficienty nabývají hodnot 0 (malý vliv na produktivitu, resp. přesnost) až 1 (velké ovlivnění produktivity / přesnosti, v negativním smyslu). Navržená funkce byla otestována ve virtuálním systému, do kterého byl daný algoritmus implementován a následně byl totožný NC program odbaven na reálném stroji. Na Obr. 14 vpravo jsou ve virtuálním systému zvýrazněny kritické body vypočítané algoritmem, na Obr. 14 vlevo reálný obrobený povrch, na kterém jsou patrné nedokonalosti v místech kritických bodů. Při testech byla například sledována funkce G64 řídicího systému Sinumerik. V případě aktivní funkce G60 – přesné zastavování na blocích, algoritmus indikoval na dráze nástroje vysoký *koeficient riskantnosti*, zatímco s aktivní funkcí vyhlazování dráhy G64 vykazoval tento koeficient nižší hodnoty. Zároveň bylo při návrhu testovacích drah pracováno s křivostí tvaru obráběné dráhy. V testech se autoři zaměřují na zkoumání vztahu mezi křivostí povrchu a poměru aktuální vůči programované rychlosti posuvu (v článku faktor η_{vel}). Analýza realizace totožné dráhy nástroje, která obsahovala oba extrémní křivosti, byla provedena při aktivaci funkce G60 a následně při aktivní funkci G64. Z výsledků testu predikce kritických míst dráhy vyplynulo, že v případě nízké hodnoty křivosti je u testů s aktivní funkcí G64 získán plynulejší a příznivější průběh poměru aktuální vůči programované rychlosti posuvu.



Obr. 14: Test algoritmu pro vyhodnocení kritických úseků dráhy nástroje, převzato z lit. [14]

2.4.2. Vyhlazování dráhy nástroje – práce s NC kódem

V článku [15] autorů Langeron et al. je představen navržený nový formát pro interpolaci dráhy nástroje pro pětiosé obrábění. Nový formát užívá k popisu pohybů nástroje kubické B-spline křivky v souřadném systému obrobku. Použitý formát těží z C2 spojitosti křivek, která napomáhá plynulému průběhu změny rychlosti rotačních os a také má za cíl přispívat k hladkosti obrobeneho povrchu. Popsaný formát slouží k nahrazení G1 interpolaci dráhy na výstupu z CAM systému. V článku je prezentován provedený test obrábění viz Obr. 15, kdy je stejný tvar obrobek za použití G1 interpolace, za použití kompresoru G1 bloků Compcad a za použití navrženého formátu 5x-nurbs. Při použití navrženého formátu polynomičké interpolace bylo dosaženo nejmenší odchylky naprogramovaného a průměrného dosaženého posuvu při průjezdu dráhy ve více hladinách posuvů. Zároveň bylo s polynomičkou interpolací docíleno nejstabilnější geometrické odchylky uvažovaného a reálného povrchu. Testování výhod polynomičké interpolace na C2 spojitém tvaru s rozsáhlou variací křivosti viz Obr. 15.



Obr. 15: Porovnání vzorků obrobků za použití různých typů interpolace, převzato z lit. [15]

V článku [16] autorů Changya et al. je rozebrána analytická práce s dráhou nástroje pro tříosé obrábění. Je zde popsána metoda, podle které jsou body dráhy rozděleny do několika kategorií podle vzdálenosti a úhlu spojnice dvou sousedních bodů. Body jsou rozlišeny na body ostrého zlomu dráhy a body přímkové dráhy. Toto řešení má za cíl rozklíčovat mnohdy složité a “chaotické” programy, skládající se z G1 interpolací a vyhlazovat dráhu jejím prokládáním kubickými B-spline křivkami. Algoritmus používá mimo jiné aproximaci metodou nejmenších čtverců.

Autor Jixiang v lit. [17] přichází s podobnou analýzou, která je zaměřená na případ pětiosého obrábění. Má za cíl dosáhnout tangenciální spojitosti dráhy, aby eliminovala nutnost zastavování a rozjezdu stroje v každém zlomu dráhy, když to tvar obrobku nevyžaduje, ba dokonce je to pro něj nepříznivé. Toto vyhlazování je oproti výše zmíněné metodě složitější, jelikož je třeba se potýkat s relací pozice nástroje a orientace jeho natočení. Jsou zde popsány praktické příklady, na kterých je demonstrován vliv vyhlazení na velikost jerku (ryvu) pohonů jednotlivých os. Vyhlazení zlomů dráhy je na úrovni C3 spojitosti. Metoda pracuje prostřednictvím analytických výpočtů bez iterací a je tedy vhodná pro online použití.

2.4.3. Práce s postprocesorem při tvorbě dráhy

V článku autora Zivkovic [18] byla zjištěna chyba generování NC kódu prostřednictvím dvou různých postprocesorů (vytvořené ve dvou verzích SW PostBuilderu – verze v NX 7 a v NX 8). V článku je ukázáno, že po vygenerování kódu stejné dráhy prostřednictvím dvou postprocesorů nebyly souřadnice shodné, což poukazuje na použití rozdílného matematického prostředku pro transformaci souřadnic nástroje. Bylo zjištěno, že v novější verzi - NX 8 jsou transformace souřadnic chybné, což má za následek chybný výpočet dráhy. Z popsaného lze konstatovat, že postprocesor může mít vliv na chyby při výpočtu dráhy nástroje a tedy i chyby povrchu obrobku.

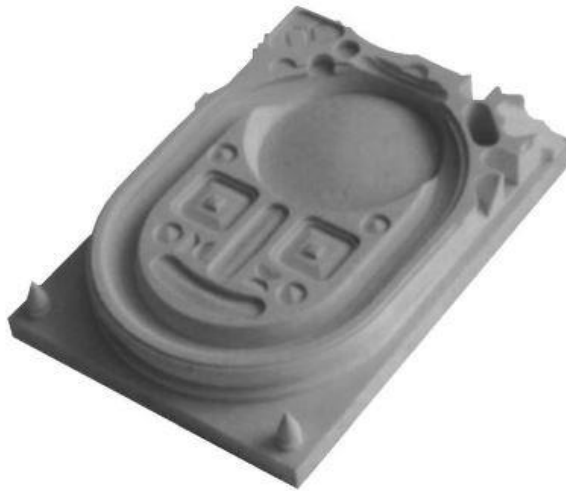
Článek [6] autora Vavrušky je zaměřen na generování bodů dráhy pro víceosé obrábění. Je zde navržen algoritmus, který je nejen schopen transformace dat ze souřadného systému obrobku do souřadného systému stroje, ale ještě dodatečné interpolace potřebných bodů dráhy nástroje v případě, že při současných bodech dráhy není splněna požadovaná přesnost dráhy. Tento algoritmus lze implementovat do postprocesoru a použít jej místo funkce transformování dat v řídicím systému. Funkčnost algoritmu byla ověřena vygenerováním dráhy pro obrobení lopatky kompresorového kola a bylo zjištěno, že výsledná dráha nástroje splňuje požadovanou toleranci.

2.5. Testovací dílce – ověření přesnosti

Testovací dílce slouží k verifikaci přesnosti obrobení a zjištění odchylek obrobeného povrchu od požadovaného, ideálního 3D modelu, pro který bylo CNC obrábění připraveno. Testování přesnosti pomocí testovacích dílců lze dále rozdělit na dvě kategorie. První kategorií jsou testovací dílce, určené ke zjištění přesnosti daného stroje – tedy přesnosti polohování os, případně zjištění nepřesností pramenících z mechanické stavby stroje (vliv tuhosti a dalších vlastností). Povaze zaměření testů odpovídají testovací dílce, které blíže specifikuje například norma ISO 10791-7, popisující dva dílce – jeden pro test přesnosti pozice a konturování, druhý pro test čelního frézování. Do druhé kategorie testovacích dílců lze zařadit dílce, na kterých je ověřován vliv nastavení procesu obrábění (například nastavení různých režimů v řídicím systému, různé

nastavení parametrů a strategií v CAM a další). Druhá zmíněná kategorie je pro řešené téma důležitá a v této kapitole bude detailně diskutována.

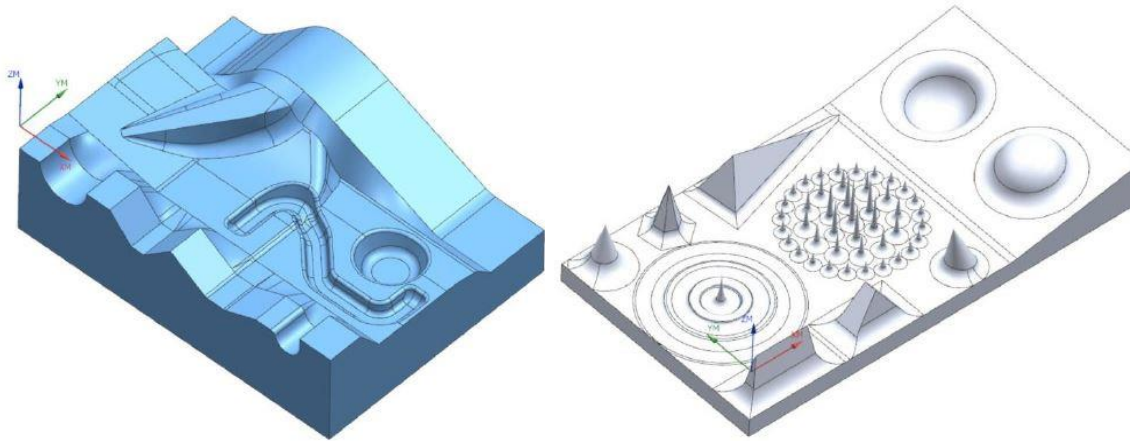
Německá společnost NC-Gesellschaft vydala v roce 2005 návrh doporučeného testovacího dílce viz Obr. 16, pro High Speed Cutting obrábění. Daný dílec obsahuje sadu tvarových prvků, které jsou svým tvarem vhodné k verifikaci dosažených výsledků, jak je uvedeno v lit. [19]. Verifikace může být u tohoto typu dílce za prvé měřením a kontrolou splnění požadovaných tolerancí, za druhé již samotnou inspekcí makroskopických projevů nepřesnosti obrábění na obrobeném povrchu. Autor také navrhuje některé z možných zdrojů chyb, které mohou být vhodné jako předměty sledování.



Obr. 16: Testovací dílec NCG pro pětiosé obrábění, převzato z lit. [19]

V lit. [20] jsou uvedeny dva příklady testovacích dílců. První dílec (na Obr. 17 vlevo) nese interní označení "Mercedes" a byl navržen pro výzkumné účely ve výrobě německé automobilky. Dílec je tvarově rozmanitý a jeho prvky jsou odvozeny z používaných forem, které vyžadují tvarovou přesnost a hladkost povrchu. Složitost spočívá především v časté a výrazné změně křivosti povrchu, respektive ve výskytech ostrých zlomů v přechodech mezi sousedícími tvary. Druhý dílec (na Obr. 17 vpravo) nese interní označení "Okuma" podle přesných obráběcích center japonského výrobce Okuma. Návrh obou dílců od sebe dělí řádově desetiletí a s tím souvisí i vyšší komplikovanost druhého zmíněného dílce, pramenící z vyšších požadavků na současné stroje. Jsou zde tvary, k jejichž korektnímu obrobení je třeba výkonný a přesný frézovací stroj, například ostré kuželové a pyramidové prvky, či kulové, vypouklé a vyduté segmenty. Na

zmíněných testovacích tvarech výrobci řídicích systému, případně výrobci složitých dílců testují různá nastavení stroje, respektive řídicího systému stroje. Jedná se o parametry zmíněné v kap. 2.3, tedy především o funkce ovlivňující odbavení NC kódu, ovlivnění limitů zrychlení a jerků pohybových os a další. Na dílcích jsou také testována různá nastavení dráhy v CAM systémů, jako například nastavení strategie změny směru řádkování, u kterého se projeví interpolace ve třech osách.



Obr. 17: Testovací dílce, vlevo - "Mercedes", vpravo - "Okuma", převzato z lit. [16]

2.6. Shrnutí rešerše

Na možné faktory ovlivňující přesnost a produktivitu obrábění, které jsou prezentované v rešeršní části práce, lze pohlížet z různých hledisek, v závislosti na stádiu přípravy, respektive samotné realizace obrábění, přinášející sledované výsledky. Ve fázi práce s 3D modelem součásti v CAD systému je třeba se zaměřit na analýzu spojitosti a návaznosti povrchů a na průběh křivosti obráběných tvarů, což jsou významné parametry pro optimální nastavení obrábění jak v prostředí CAM systému, tak pro nastavení funkcí řídicího systému stroje. Podstatná je také rozdílnost mezi různými CAD systémy, zejména problematika převodních formátů 3D souboru pro načtení v CAM systému. Ve vzájemném porovnání vlivů z různých CAM systémů lze nalézt rozdíly v generovaném NC kódu vlivem výpočtového jádra daného softwaru a zásadní bude zaměření na nastavení parametrů dráhy v CAM.

Výrobci vybavují řídicí systémy strojů širokým spektrem funkcí, které slouží k technologické podpoře obrábění a pomocí nich lze optimalizovat chování dílčích částí, které ovlivňují odbavení NC kódu. Některé z funkcí nabízejí pouze možnost aktivace / deaktivace, bez dalšího nastavování, u jiných funkcí jsou dostupná různá nastavení, v závislosti na konkrétních požadavcích, kladených na vyráběný dílec. Například u Siemens Sinumerik je k dispozici Cyklus 832, u kterého je právě možné volit různá uživatelská nastavení, obdobně u řídicího systému Heidenhain se jedná o Cyklus 32. Analýza bude také zaměřena právě na tento typ funkcí, jelikož mají přímý vliv na přesnost a produktivitu výroby.

Byly dohledány odborné články, zabývající se problematikou vytváření NC kódu pro obrábění tvarově složitých ploch a další práce se získaným kódem. Tyto zdroje jsou vhodné k pochopení daného tématu, získání informací o možných ovlivněních rozložení bodů při generování dráhy a také k inspiraci pro návrh souboru nastavení experimentu. Vyhledání dostupných informací o testovacích dílcích je důležité pro návrh testovacího tvaru pro experiment ve vlastním řešení práce. Byl zjištěn charakter tvarových prvků, který je vhodný pro simulaci určitých případů, s kterými je možné se z hlediska tvaru v dané oblasti obrábění setkat. Bylo také zjištěno, jaká nastavení parametrů se na daných dílcích vzhledem k vlivu na přesnost a produktivitu sledují. Například na testovacím dílci "Mercedes" je sledován vliv nastavení funkcí, ovlivňujících odbavení NC kódu, jako například Cyklus 832 řídicího systému Siemens Sinumerik, nebo také změna směru řádkování plochy pro zjištění vlivu zapojení více strojních os do interpolace. Vzhledem k obdobnému zaměření analýzy řešené práce bude použit charakter tvarů, vyskytujících se na dohledaných testovacích dílcích, v návrhu vlastního testovacího dílce.

3. Vlastní řešení

První ovlivnění přesnosti tvarového obrábění bylo zjištěno na samém počátku řetězce přípravy programu pro CNC obrábění a to v problematice převodu 3D modelu z CAD do CAM systému, jak bylo zmíněno v kap. 2.1.2. Při transferu dat prostřednictvím univerzálního formátu STEP bylo zjištěno ovlivnění celistvosti ploch převáděného 3D modelu. Vznik nespojitých ploch byl příčinou problému u vygenerované dráhy, spočívajícího v chybném napočítání bodů NC kódu. V případě načtení 3D modelu v originálním formátu SLDPRT nedošlo k narušení celistvosti plochy a u vygenerovaného NC kódu nebyly v dané oblasti dráhy indikovány chybně napočítané interpolační body.

Další parametry analyzované v této kapitole jsou takové, u kterých je ovlivnění přesnosti a produktivity obrábění možné dosáhnout úpravou jejich nastavení. Analýza chování daných parametrů je popsána v následující kapitole Návrhu vlastního řešení.

3.1. Návrh vlastního řešení

Jak vyplynulo z rešerše, pro sledování ovlivnění dosažitelné přesnosti a produktivity obrábění a vlivů na sledované parametry je třeba nejprve navrhnout plochu obrobku, jejíž tvar bude obsahovat prvky potenciálně problémové z hlediska vygenerovaných bodů NC kódu a z hlediska následného odbavení NC kódu řídicím systémem stroje. Pro analýzu NC kódu, generovaného při různém nastavení parametrů v CAM systému, bude navržen SW nástroj, kterým lze mezi sebou porovnávat jednotlivé naprogramované dráhy. Analyzováním rozložení bodů dráhy budou tímto nástrojem identifikována kritická místa na dráze a navrženými proměnnými bude kvantifikována míra "problémovosti" části analyzovaného NC kódu.

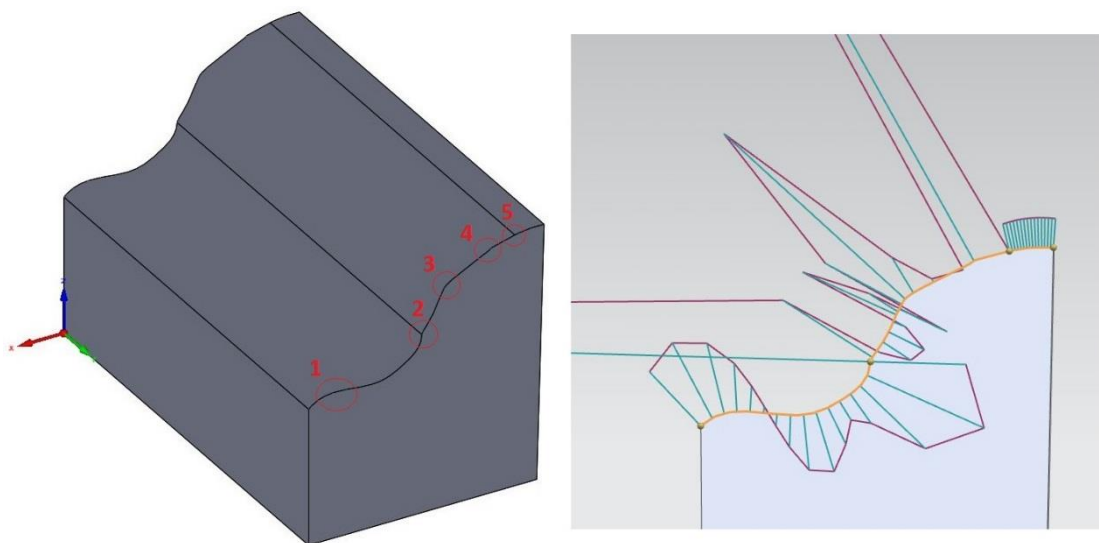
Z oblasti volených parametrů při vytváření dráhy v CAM systému bude pracováno s parametry nejběžněji nastavovanými v oblasti dokončování tvarového obrábění. Jedná se zejména o nastavení tolerance výpočtu bodů lineárně interpolované dráhy a dále o ovlivnění směru dráhy v případě strategie řádkování. Z parametrů víceosého obrábění budou analyzovány fixní úhly odklonu nástroje pro čtyřosé obrábění. Pro zjištění vlivu výpočtového jádra konkrétního CAM systému budou porovnány NC kódy vygenerované

při totožném nastavení dráhy nástroje, které budou vystupovat ze dvou CAM systémů - NX CAM a SolidCAM.

Z uživatelských funkcí, které lze nastavit v řídicím systému stroje jsou pro praktické testování podstatné zejména funkce řídicího systému, které ovlivňují řízení pohybu po dráze a chování pohonů. Dále bude analyzován vliv komprese lineárních bloků při různém uživatelském nastavení dané funkce. Pro sledování vlivu nastavení funkcí řídicího systému a také sledování odbavení konkrétního NC programu bude využito zaznamenávání aktuálních dat rychlosti a polohy nástroje pomocí diagnostické funkce stroje a takto bude možné provést rychlé porovnání daných nastavení bez nutnosti zhotovení a následného zhodnocování fyzického obrobku.

3.1.1. Návrh testovací plochy

Na základě poznatků z kap. 2.5. a postupného vývoje 3D modelu byla navržena testovací plocha, která je vidět na Obr. 18. Tato plocha obsahuje několik prvků, které charakterizují některé případy problematických míst, které se na tvarových plochách v praxi vyskytují. Významné je především místo se skokovou změnou křivosti kde se vyskytuje vysoká hodnota křivosti na velmi krátkém úseku (úsek 4). Dále je na ploše místo s ostrým zlomem (úsek 2) a místo pozvolného přechodu z konvexního na konkávní tvar (úsek 1). Plocha je navržena tak, že její tvar ve směru osy Y je neměnný.

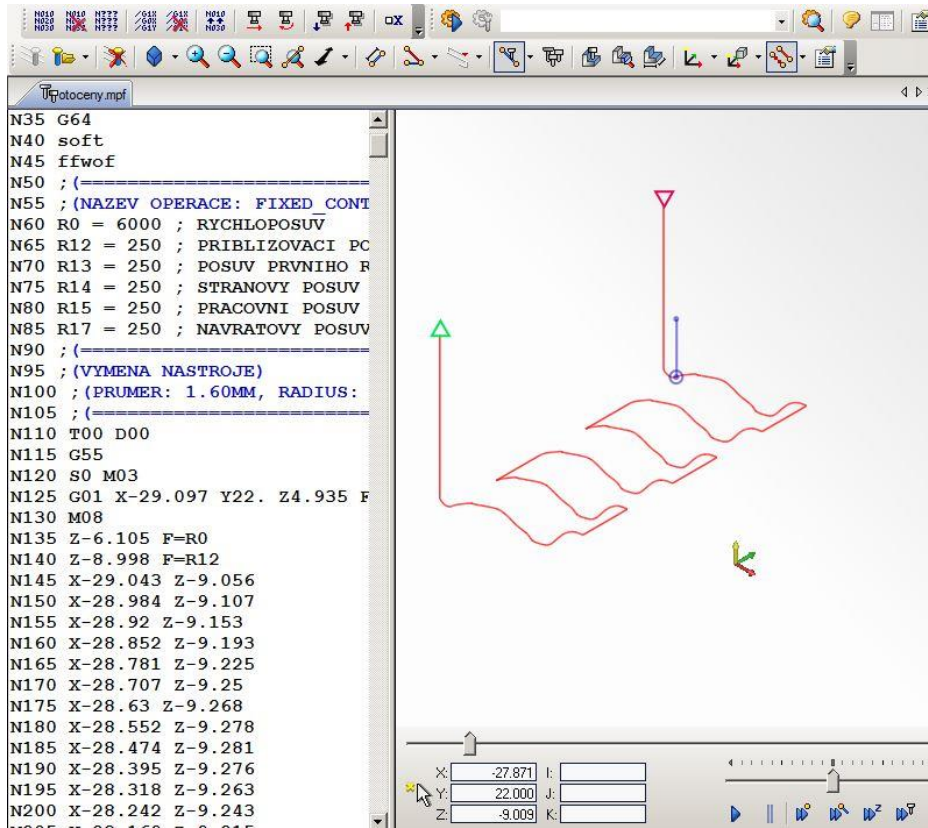


Obr. 18: Navržená testovací plocha - vlevo 3D mode; vpravo křivost tvořící křivky tvaru

3.1.2. Analýza bodů dráhy nástroje

Ve vygenerovaném NC kódu pro obrobení navržené testovací plochy lze vzhledem k navrženým problematickým místům očekávat výskyt určitých nežádoucích jevů v rozložení bodů lineárně interpolované dráhy. Může se jednat například o lokální nahuštění bodů, chaotické skoky a vybočení v bodech dráhy atp. Při změně některého parametru operace v CAM a následném srovnání daných dvou drah se bude rozložení bodů a charakter, respektive výskyt těchto problematických jevů lišit. Například při nastavení nižší hodnoty tolerančního pásma pro prokládání dráhy interpolačními body lze očekávat na dráze větší množství bodů a tedy výraznější problém v kritických místech dráhy. Rozložení bodů dráhy je určeno výpočtovým jádrem použitého CAM softwaru, tudíž při vygenerování dráhy stejného úseku plochy při totožném nastavení operace ve dvou rozdílných CAM systémech, nebudou získané dráhy z hlediska rozložení bodů totožné.

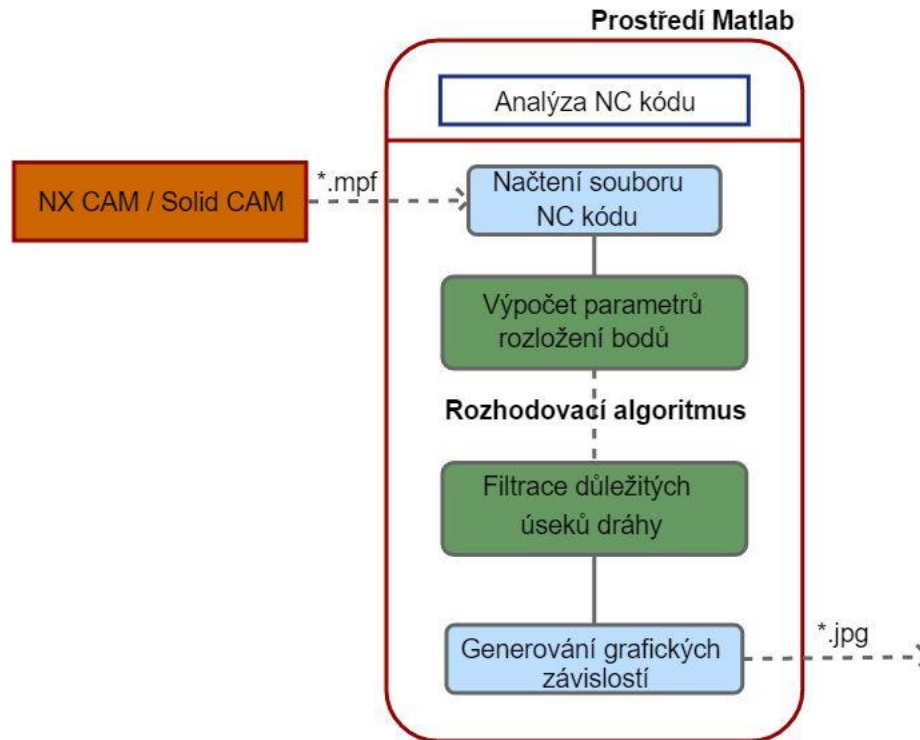
Pro analýzu takovýchto rozdílů není vhodný žádný dostupný nástroj, ať už integrovaný v CAM systému, nebo používaný samostatně. Pro zobrazení bodů vygenerované dráhy se běžně v praxi používá například NC program editor Cimco Edit. Tento SW umožňuje rychlé a pohodlné zobrazení a kontrolu, případně editaci NC programu na úrovni běžného použití pro přípravu obrábění, jak je patrné z Obr. 19. V popsaném specifickém případě, kdy chceme analyzovat a porovnávat mezi sebou z hlediska rozložení bodů různé dráhy a určit, případně kvantifikovat, konkrétní změnu, způsobenou změnou některého parametru v nastavení operace, však Cimco Edit není svými možnostmi dostačující. Zmíněné problematické jevy v rozložení bodů by nemusely být pohledem na dráhu ani patrné, a pokud ano, není zde žádný nástroj k určení míry změny při porovnávání zkoumaných drah.



Obr. 19: Využití editoru CIMCO Edit pro zobrazení NC programu a dráhy nástroje

Z tohoto důvodu je třeba navrhnout vlastní softwarový nástroj, který požadovanou kontrolu a porovnání bude umožňovat. Pro zpracování tohoto nástroje byla zvolena forma scriptu v Matlab, kde bude navržen výpočtový algoritmus analýzy a budou zde generovány grafické výstupy zanalyzovaných výsledků.

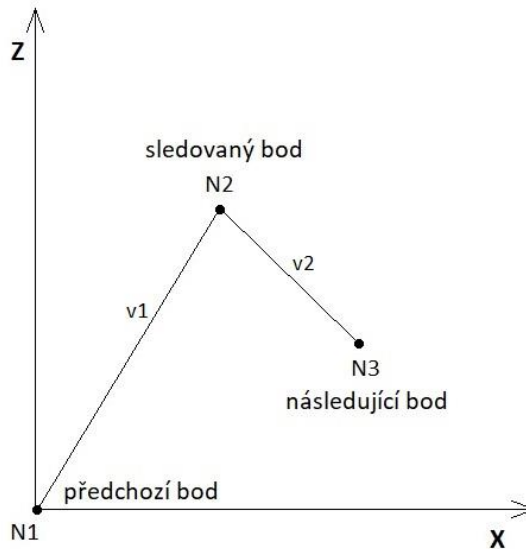
Celková posloupnost funkce SW nástroje pro analýzu rozložení bodů NC kódu dráhy, využívaná v experimentální části práce, je shrnuta v blokovém schématu na Obr. 20. Níže budou popsány parametry, které budou v rámci nástroje vyhodnocovány.



Obr. 20: Blokové schéma použití SW nástroje pro analýzu NC kódu

Směrnice pohybu na dráze v jednotlivých osách

V navrženém algoritmu jsou body dráhy analyzovány z hlediska jejich rozmístění a vzájemné polohy v prostoru. Pro každý sledovaný bod NC kódu jsou ve výpočtu důležité dva sousední body – předchozí a následující. V odvození výpočtu je sledovaný bod označen $N2$, předchozí bod $N1$ a následující bod $N3$, jak je naznačeno v Obr. 21, na příkladu bodů v rovině XZ. Definování souřadnic bodů je ve vztahu (1). Z těchto tří bodů je možné odečtením souřadnic získat dva vektory – $\vec{v1}$ a $\vec{v2}$, které se stýkají v bodě $N2$. Výpočet vektorů $\vec{v1}$ a $\vec{v2}$ je dán vztahy (2) a (3). Průmětem vektoru do jednotlivých os kartézského souřadného systému lze zjistit směrnice pro jednotlivé osy stroje, dané orientací vektoru v prostoru.



Obr. 21: Naznačení sledovaného bodu na dráze

Definování souřadnic bodů dráhy:

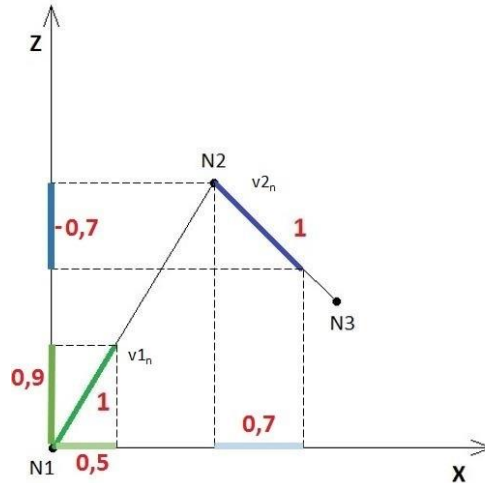
$$N1 = [n1_x; n1_y; n1_z]; N2 = [n2_x; n2_y; n2_z]; N3 = [n3_x; n3_y; n3_z] \quad (1)$$

Výpočet vektorů dráhy:

$$\vec{v1} = N2 - N1 = [n2_x - n1_x; n2_y - n1_y; n2_z - n1_z] = [v1_x; v1_y; v1_z] \quad (2)$$

$$\vec{v2} = N3 - N2 = [n3_x - n2_x; n3_y - n2_y; n3_z - n2_z] = [v2_x; v2_y; v2_z] \quad (3)$$

Aby nebyl výsledný průmět ovlivněn délkou uvažovaného vektoru a byl daný pouze orientací vektoru, je třeba promítat jeho znormovaný, jednotkový vektor v_n . Tak je následně možné mezi sebou porovnávat směrnice více vektorů, určených body dráhy z NC kódu. Znormované vektory, které jsou v dalším popisu označovány jako poměrné přírůstky směru v jednotlivých osách, jsou vyznačeny na Obr. 22. Pokud L je délka vektoru, v_n se vypočítá dle vztahů (4) a (5).



Obr. 22: Definování poměrných přírůstků

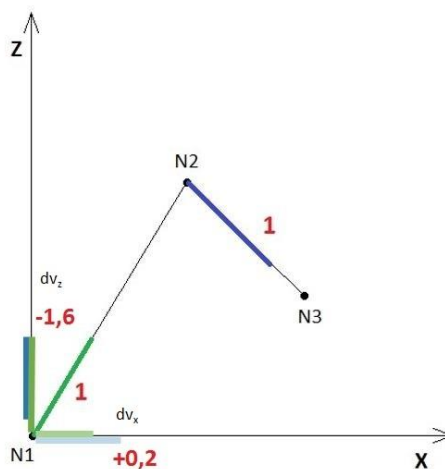
Délka vektoru:

$$L = \|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (4)$$

Výpočet poměrných přírůstků:

$$\vec{v}_n = \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|} = \frac{[v_x; v_y; v_z]}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} = [v_{nx}; v_{ny}; v_{nz}]; \|\vec{v}_n\| = 1 \quad (5)$$

Z hodnot poměrných přírůstků směrů, určenými body N1, N2 a N3, je dále jejich odečtením možné zjistit rozdíl přírůstků ve sledovaném bodě N2 dle vztahu (6). Tento rozdíl je označen dv a je zobrazen na . Lze ho interpretovat jako poměrný požadavek na změnu rychlosti v každé ose v bodě N2, určený z prostorových souřadnic bodů N1, N2 a N3.



Obr. 23: Definování rozdílů přírůstků

Výpočet rozdílů přírůstků:

$$dv_x = v_{2nx} - v_{1nx}; \quad dv_y = v_{2ny} - v_{1ny}; \quad dv_z = v_{2nz} - v_{1nz} \quad (6)$$

Křivost, zjištěná z bodů dráhy

Dalším navrženým analytickým parametrem, který bude u testovacích drah sledován, je křivost v určitém bodě dráhy, kterou je opět možné zjistit ze souřadnic tří bodů – tedy sledovaného bodu $N2$, přecházejícího $N1$ a následujícího $N3$. Je třeba nalézt poloměr r takové kružnice, která prochází všemi třemi body. Tento poloměr je potom poloměrem křivosti v bodě $N2$ sledované dráhy. Algoritmus pro výpočet poloměru r hledané kružnice nejprve hledá rovinu, v které leží všechny tři body, následně zjišťuje střed kružnice a nakonec počítá její poloměr. Postup výpočtu převzat ze zdroje [21].

Křivost K ve sledovaném bodě lze vypočítat jako převrácenou hodnotu zjištěného poloměru křivosti r , podle vztahu:

$$K = \frac{1}{r} \quad (7)$$

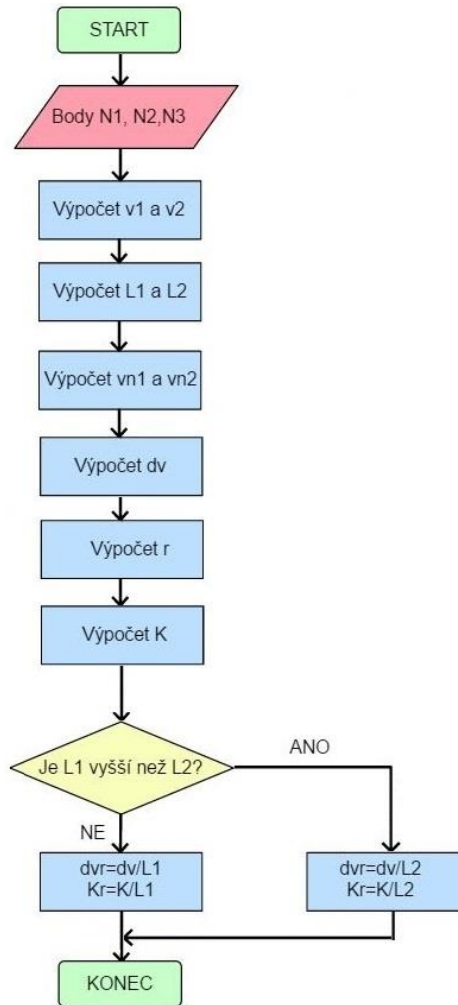
Filtrace důležitých úseků na dráze

Z hlediska rozložení bodů, pokud je zohledňována problematika odbavení bodů v CNC systému, jsou nejvíce kritické úseky, v kterých je velký požadavek na změnu rychlosti dv na krátké vzdálenosti mezi sousedními body L . Naopak méně zajímavé jsou úseky, na kterých je velký požadavek na změnu rychlosti dv , ale délka bloku L , na které má ke změně dojít, má vysokou hodnotu. Aby bylo možné filtrovat úseky, které jsou z hlediska relace dv a L kritické, je zaveden parametr $dvr=dv/L$. Ve výpočtovém algoritmu je zahrnuta podmínka, že dv je děleno vzdáleností $L1$, tedy vzdáleností bodů $N1$ a $N2$, nebo $L2$, tedy vzdáleností bodů $N2$ a $N3$, v závislosti na tom, která ze vzdáleností má nižší hodnotu.

Podobná úvaha je zavedena i v případě křivosti. Z hlediska rozložení bodů, pokud je zohledňována problematika odbavení bodů v CNC systému, jsou nejvíce kritické úseky, v kterých dochází k velké změně křivosti na krátké vzdálenosti mezi sousedními body L . Aby bylo možné filtrovat úseky, které jsou z hlediska relace K a L kritické, je zaveden parametr $Kr=K/L$ a ve výpočtovém algoritmu je opět zahrnuta podmínka, že parametr

K je dělen vzdáleností $L1$, nebo $L2$ v závislosti na tom, která ze vzdáleností má nižší hodnotu.

Celý postup výpočtu parametrů navržených pro analýzu rozložení bodů dráhy je shrnut ve vývojovém diagramu na Obr. 24.



Obr. 24: Vývojový diagram výpočtu analytických parametrů dráhy

3.1.3. Použité CAM systémy a použitý stroj

V experimentální části vlastního řešení budou analyzovány parametry, které ovlivňují přesnost a produktivitu výsledného obrobku v oblasti parametrů volených v CAM

systemu a v oblasti nastavení funkcí řídicího systému. Příprava dráhy a změna parametrů bude provedena ve dvou CAM systémech – Siemens NX a SolidCAM.

Změna nastavení funkcí řídicího systému bude testována na Siemens Sinumerik 840D V2.7 SP2, který je používán na stroji, zvoleném pro odbavení navržených testovacích přejezdů. Jedná se o soustružnické centrum SP430 vyráběné společností Kovošvit MAS a. s. (na Obr. 25), které je dostupné na Ústavu výrobních strojů a zařízení Ú12135. Tento stroj je vybaven dvěma nástrojovými hlavami, přičemž horní nástrojová hlava disponuje nástrojovým vřetenem. Spolu s použitím dostupné osy Y je tak možné obrábění v režimu tříosého frézovacího centra. V kombinaci s využitím osy C v polohové vazbě je navíc možné odbavovat víceosé frézovací operace. Další parametry stroje shrnuje Příloha 1. Pohybové osy stroje jsou uloženy na valivém vedení a jejich pohyb je zprostředkován kuličkovými šrouby, které jsou přes spojky připojeny k asynchronním motorům. Asynchronní motory os stroje jsou řízeny frekvenčními měniči Siemens, které dostávají informace z kaskádní regulace polohy, zpracovávající data z interpolátoru. V řídicím systému stroje je nastaveno naladění kaskádní regulace, odpovídající požadavku na odbavování operací pro tvarové obrábění. Jsou zde také definovány limity rychlostí, zrychlení a jerku pro jednotlivé pohybové osy. Záloha řídicího systému, v které jsou popsána nastavení zaznamenaná, jsou v elektronické příloze s označením Složka 1.



Obr. 25: Soustružnické centrum KMAS SP430

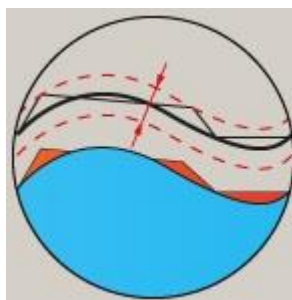
Nastavené limity rychlostí strojních os odpovídají hodnotám rychloposuvu, které uvádí Příloha 1. Tyto hodnoty jsou spolu s limity zrychlení os uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Nastavené limity strojních os

Strojní osa	Limit rychlosti [m/min]	Limit zrychlení [m/s ²]
X ₁	30	2
Y	25	2
Z ₁	30	3

3.1.4. Nastavení parametrů dráhy v CAM

Základním a velmi důležitým parametrem, s kterým se při nastavování dráhy pracuje, je změna tolerance aproximace dráhy, která určuje pásmo, v kterém CAM napočítává interpolační body dráhy. Pro testovací dráhu jsou voleny tolerance v hodnotách, které odpovídají použití při dokončovacím obrábění. Jsou to konkrétně hodnoty (0,01; 0,0075; 0,005; 0,0025; 0,001) mm, které jsou v testu definovány jako “velká změna tolerance”. Z dřívějších zkušeností a testů vyplývá, že i velmi malá změna tolerance může mít zásadní vliv na rozložení bodů dráhy. Proto jsou voleny také hodnoty (0,003; 0,0025; 0,002) mm, definované jako “malá změna tolerance”.



Obr. 26: Toleranční pásmo dráhy, převzato z lit. [4]

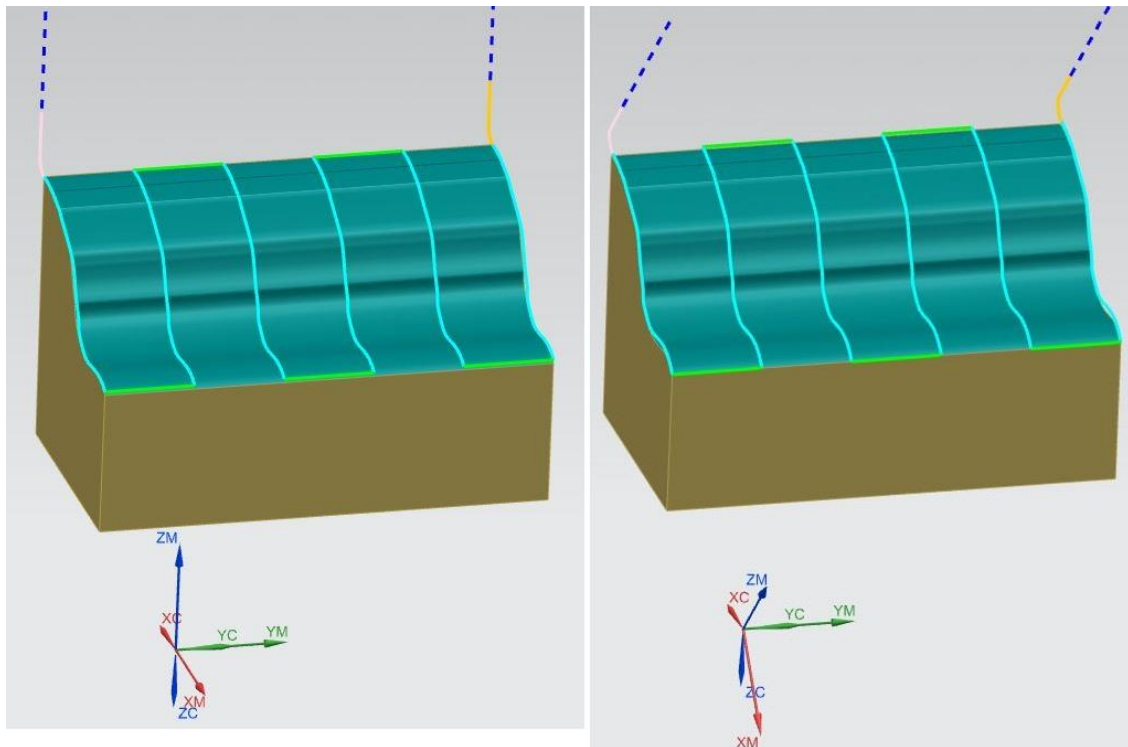
Základní nastavení dráhy

Základním nastavením dráhy je přímé řádkování plochy ve směru roviny ZX, u kterého se na interpolaci podílejí dvě strojní osy (osa X a osa Z) a vektor nástroje směřuje ve směru osy Z souřadného systému obrobku, jak je patrné z Obr. 27 vlevo. Nastavení dráhy v prostředí NX CAM bylo provedeno v operaci “Fixed Contour”, v prostředí SolidCAM v operaci “3D HSM”, se zvolenou technologií “Linear machining”. Nástroj zvolený pro

všechna nastavení testovací dráhy je kulová fréza s průměrem řezné části $D=6$ mm. Dráha řádkování plochy je nastavena na obousměrné řádkování, aby bylo možné sledovat změnu bodů dráhy při různém směru přejezdu plochy. NC kód navržené dráhy je pro testy vygenerován ve všech zvolených hodnotách nastavení tolerance dráhy.

Nastavení s úhlem vlečení nástroje

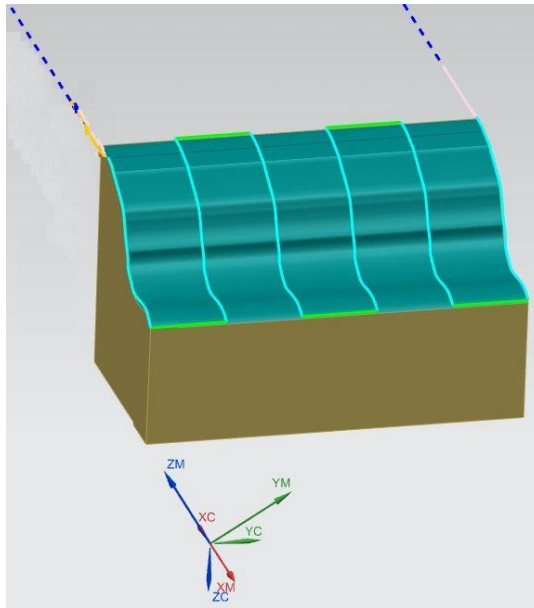
První zvolená úprava nastavení vůči základnímu je změna úhlu vlečení nástroje. Dochází k natočení souřadného systému obrobku vůči souřadnému systému stroje o konstantní úhel kolem osy Y, jak je zřejmé z Obr. 27 vpravo. Jedná se tedy o čtyřosou operaci. Na interpolaci se stále podílí dvě strojní osy (osa X a osa Z), nicméně vlivem natočení souřadného systému jsou body dráhy jinak rozděleny do strojních os vůči základnímu nastavení. Podobně, jako v případě změny tolerance dráhy i v tomto případě je definována "velká změna úhlu vlečení" a to pro úhly 20° ; $32,5^\circ$; 45° a bude analyzován vliv "malé změny úhlu vlečení" v hodnotách $31,5^\circ$; $32,5^\circ$; $33,5^\circ$. V CAM systému NX Cam je popsána změna nastavení úhlu možná přímo v operaci "Fixed Contour", v prostředí SolidCAM je pro danou úpravu třeba vytvořit pětiosou "Simultaneous 5-Axis Milling" operaci. NC kód navržené dráhy je pro testy vygenerován ve všech zvolených hodnotách nastavení tolerance dráhy pouze pro hodnotu úhlu vlečení $32,5^\circ$. U ostatních navržených úhlů je NC kód generován pro dvě hodnoty tolerance dráhy – $0,005$ mm a $0,002$ mm.



Obr. 27: Vlevo - základní nastavení dráhy; vpravo - nastavení s úhlem naklonění nástroje

Nastavení s úhlem naklonění nástroje

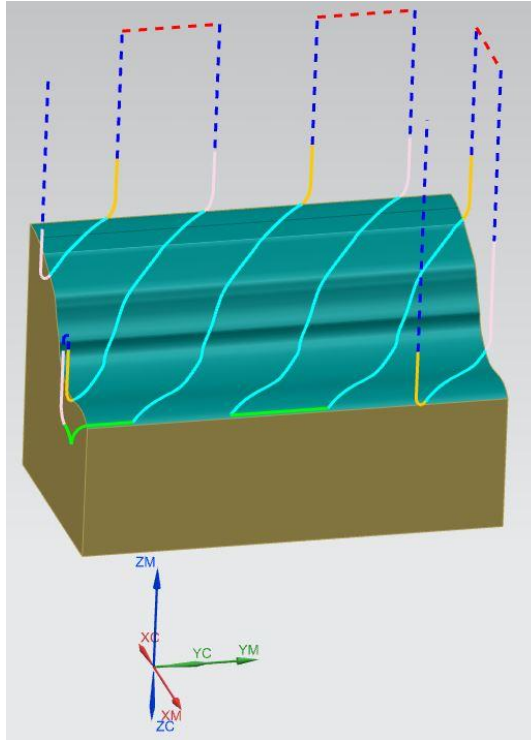
Další zvolené nastavení dráhy je změna úhlu naklonění nástroje. Dochází k natočení souřadného systému obrobku vůči souřadnému systému stroje o konstantní úhel kolem osy X, jak je zobrazeno na Obr. 28, a jedná se tedy opět o čtyřosou operaci. Na interpolaci se nyní díky natočení souřadného systému podílí tři strojní osy – X, Y a Z. U popsaneho nastavení je opět definována “velká změna úhlu naklonění” a to pro úhly 20°; 32,5°; 45° a bude analyzován vliv “malé změny úhlu naklonění” v hodnotách 31,5°; 32,5°; 33,5°. Daná změna je v NX CAM provedena v operaci “Fixed Contour”. V SolidCAM nebylo dosaženo totožného nastavení dráhy s daným nastavením, jako v NX CAM, tudíž by výsledky nebyly porovnatelné. Vliv tohoto nastavení tedy není pro dráhy získané ze SolidCAM vyhodnocován. NC kód navržené dráhy je pro testy vygenerován ve stejných tolerancích, jako v případě změny úhlu vlečení nástroje. Tedy ve všech zvolených hodnotách nastavení tolerance dráhy pouze pro hodnotu úhlu vlečení 32,5° a u ostatních navržených úhlů je generován pro dvě hodnoty tolerance dráhy – 0,005 mm a 0,002 mm.



Obr. 28: Nastavení dráhy s úhlem naklopení nástroje

Změna směru řádkování

Poslední nastavení dráhy bylo připraveno tak, aby bylo možné analyzovat změnu směru řádkování. Řádkování plochy již není ve směru osy X, jako u základního nastavení, ale definuje se úhel, o který je směr řádkování otočen od osy X, jak ukazuje Obr. 29. Na interpolaci se zde tedy podílí tři strojní osy – X, Y a Z a vektor nástroje směřuje ve směru osy Z souřadného systému obrobku, který v tomto nastavení není natočen vůči souřadnému systému stroje. Při změně úhlu směru řádkování lze vzhledem k rozdílné strmosti kritických prvků plochy v šikmých směrech očekávat i zásadní rozdíly v “problémovosti” NC kódu v daných místech. Změna úhlu směru řádkování je navržena pro hodnoty úhlů 1°, 2°, 44°, 45° a 46°. V obou CAM systémech je možné popsanou změnu provést přímo v operaci základního nastavení dráhy. NC kód navržené dráhy je pro testy vygenerován ve všech zvolených hodnotách nastavení tolerance dráhy pouze pro hodnotu úhlu vlečení 45°. U ostatních navržených úhlů je NC kód generován pro dvě hodnoty tolerance dráhy – 0,005 mm a 0,002 mm.



Obr. 29: Nastavení směru řádkování

Pro všechna nastavení dráhy budou v experimentu analyzovány dva přejezdy dráhy (tam a zpět), v případě změnu směru řádkování to budou přejezdy, které vedou šikmo přes celou délku plochy, tedy přes všechny tvarové prvky. Navržená nastavení jsou shrnuta a očíslována v Tab. 2, kde číselné označení rozlišuje kombinaci konkrétního nastavení dráhy a zvoleného tolerančního pásma dráhy. Před číslem nastavení bude navíc označení písmenem N pro programy generované z NX CAM a S pro programy generované ze SolidCAM. Označení N401 je tedy přiřazeno nastavení dráhy v NX s úhlem vlečení nástroje $32,5^\circ$ a tolerancí dráhy $0,01$ mm. Šedě je zvýrazněno pásmo malé změny nastavení tolerance a pásmo malé změny nastavení úhlu. Experiment je navržen tak, aby mezi sebou bylo z každého typu nastavení možné porovnat pro jeden střední úhel změnu všech navržených tolerancí a pro každou změnu úhlu dráhy pro dvě hodnoty tolerance.

Tab. 2: Shrnutí nastavení dráhy v CAM, zvolených pro realizaci experimentu

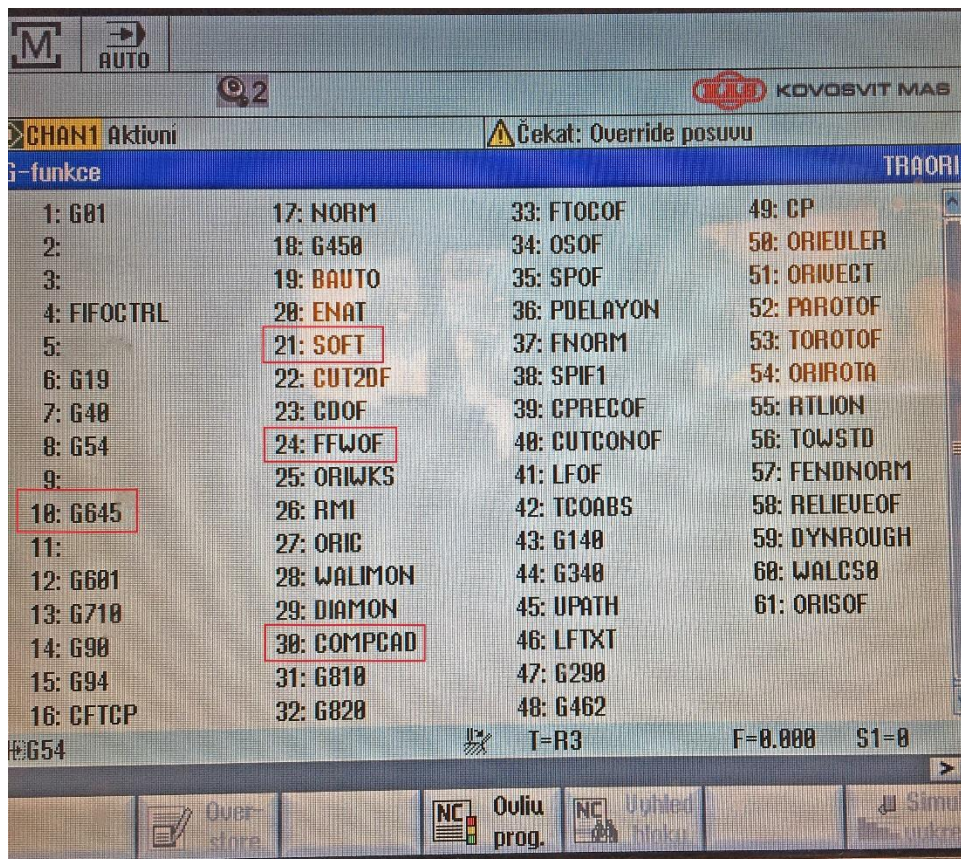
Tolerance [mm]	základ	úhel vlečení [°]					úhel naklopení [°]					směr řádkování [°]				
		20	31,5	32,5	33,5	45	20	31,5	32,5	33,5	45	44	45	46	1	2
0,01	101			401					901					1301		
0,0075	102			402					902					1302		
0,005	103	203	303	403	503	603	703	803	903	1003	1103	1203	1303	1403	1503	1603
0,003	104			404					904					1304		
0,0025	105			405					905					1305		
0,002	106	206	306	406	506	606	706	806	906	1006	1106	1206	1306	1406	1506	1606
0,001	107			407					907					1307		

3.1.5. Nastavení parametrů řídicího systému

Z možných nastavení řídicího systému Siemens Sinumerik bude testována změna nastavení balíčku technologické podpory obrábění High Speed Settings - CYCLE832, který je v praxi u daného řídicího systému nejvíce využíván. Nastavení Cyklu 832 je možné navolením nastavení v uživatelské nabídce cyklu, nebo uvedením patřičného příkazu v NC programu, jak bylo popsáno v kap. 2.3.1. Pro řešený případ byla zvolena druhá zmíněná varianta, tedy pro tři hodnoty tolerance, které budou v Cyklu měněny, bude v programech použita formulace:

- CYCLE832(0.001,1,1)
- CYCLE832(0.005,1,1)
- CYCLE832(0.1,1,1)

Střední hodnota v závorce, tedy "1" znamená nastavení pro dokončování a funkce aktivované cyklem jsou: zaoblování na přechodech bloků G645, nastavení pohonů SOFT, vypnutý režim Feedforward a aktivní kompresor COMPCAD, jak je vyznačeno na Obr. 30, v seznamu aktivních funkcí při zvoleném nastavení.



Obr. 30: Aktivní funkce při zvoleném nastavení řídicího systému

Posledním nastavením, zvoleným pro experiment bude volba vypnutí kompresoru COMPCAD a ostatní funkce aktivní stejně, jako u nastavení s aktivním Cyklem 832. U tohoto nastavení je předpokládána nejmenší odchylka od požadovaného tvaru, jelikož bude aktivní pouze zaoblování na přechodech bloků, ale řídicí systém nebude dráhu prokládat splinem, jak je tomu v případě aktivního kompresoru. Zpřesnění oproti nastavení s aktivní kompresí je však na úkor zvýšeného času průjezdu dráhy. Formulace uvádění v NC programu bude tedy:

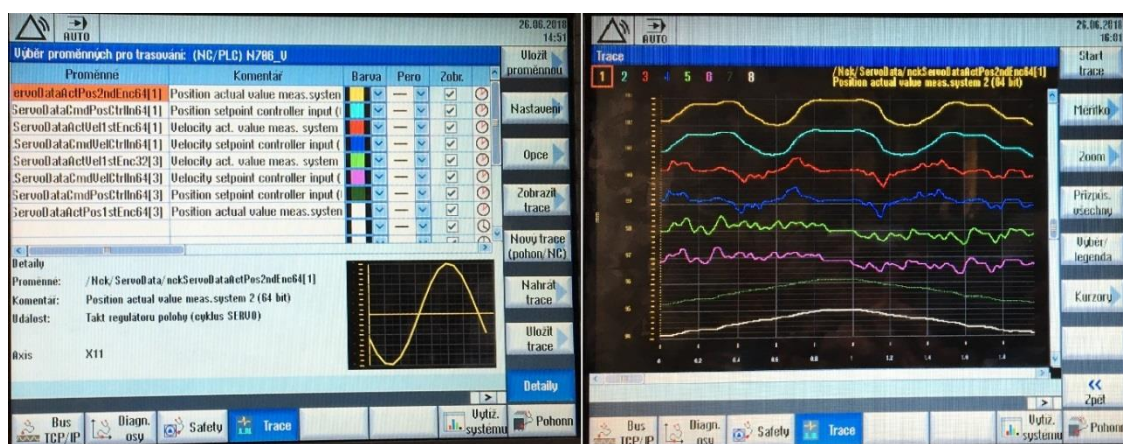
- COMPOF, FFWOF, G645, SOFT

Pro všechny měřené přejezdy bude v NC programu nastavena pracovní posuvová rychlost na hodnotu $v_f=2500$ mm/min.

3.1.6. Provedení experimentu

Zmíněný řídicí systém umožňuje zaznamenávat během obrábění aktuální hodnoty současně až deseti zvolených parametrů stavu os a dalších měřitelných hodnot stroje

díky funkci Servo Trace. Tato funkce je pro řešený experiment nezbytná, jelikož je jejím prostřednictvím možné zaznamenat čas odbavení jednotlivých testovacích programů a zaznamenávat rychlost a polohu aktivních os pro vyhodnocení testů. Vzhledem k velkému množství testovacích měření je možné je takto mezi sebou porovnat, aniž by pro vyhodnocení muselo být zhotoveno velké množství reálných obrobků. Na Obr. 31 je vizualizace prostředí Servo Trace na panelu stroje. Data z měření Servo Trace jsou ze stroje exportována ve formátu *.xml a následně zpracována v prostředí Matlab, kde jsou generované grafické závislosti naměřených hodnot.



Obr. 31: (Vlevo) volba měřených hodnot, (vpravo) průběh naměřených hodnot

Při provádění navržených testů budou pro každý odbavovaný program a každou interpolující osu zaznamenávány výstupní proměnné, jimiž jsou aktuální hodnoty následujících veličin:

- požadovaná poloha “*position setpoint controller input*”
- skutečná poloha “*position actual value*”
- požadovaná rychlost “*velocity setpoint controller input*”
- skutečná rychlost “*velocity actual value*”

Pro všechny měřené přejezdy bude v NC programu nastavena pracovní posuvová rychlost na hodnotu $f=2500$ mm/min.

3.2. Vyhodnocení experimentu

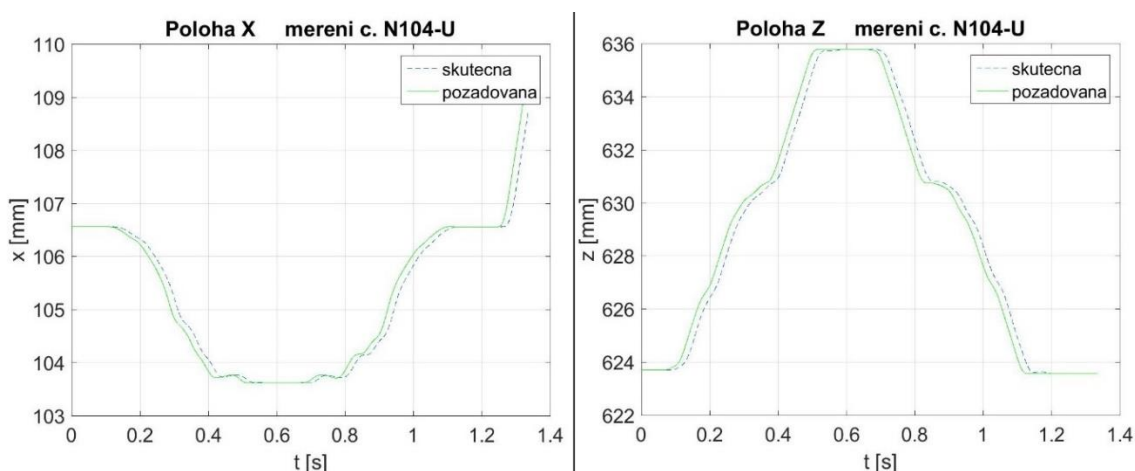
Pro jednodušší způsob odkazování se na aktivní nastavení řídicího systému bylo zvoleno označení podle Tab. 3, které se doplní za číselné označení nastavení dráhy v CAM,

uvedené v Tab. 2. Tímto způsobem je přiřazeno měření konkrétního přejezdu dráhy danému nastavení dráhy v CAM a danému nastavení funkcí řídicího systému a je takto označována sledovaná kombinace vstupních parametrů. S101-T tedy budou označeny průběhy poloh a rychlostí strojních os naměřené během přejezdu základního nastavení dráhy v SolidCAM při toleranci 0,01 mm a nastavení řídicího systému s aktivní funkcí Cyklu 832 a tolerancí Cyklu 0,001 mm. Příklady průběhů naměřených dat pro každý nastavovaný parametr v CAM systému obsahuje Příloha 2, kompletní soubor grafů je potom v elektronické příloze práce. Příklad tabulky vyhodnocených dat (základní nastavení dráhy) obsahuje Příloha 4, kompletní soubor vyhodnocených dat je v elektronické příloze práce.

Tab. 3: Označení nastavení funkcí řídicího systému

Nastavení řídicího systému	Označení
CYCLE832(0.001)	-S
CYCLE832(0.005)	-T
CYCLE832(0.01)	-U
COMPOF	-V

Na Obr. 32 jsou zobrazena data z měření polohy os v čase během přejezdu s nastavením N104-U. Zelená křivka reprezentuje požadovanou polohu a modrá přerušovaná křivka reprezentuje skutečnou polohu v čase.



Obr. 32: Průběh dílčích poloh os v čase - měření N104-U (osa X - vlevo; osa Z - vpravo)

Z dat dílčích poloh os je možné v každém měřeném čase získat hodnoty polohových odchylek Δx a Δy , pokud x_p a z_p jsou naměřené hodnoty požadované polohy a x_s a z_s jsou naměřené hodnoty skutečné polohy, dle vztahu (8).

Výpočet polohových odchylek:

$$\Delta x = x_p - x_s; \quad \Delta z = z_p - z_s \quad (8)$$

Průměrné hodnoty dílčích polohových odchylek $\overline{\Delta x}$ a $\overline{\Delta z}$, pokud n je celkový počet naměřených časových vzorků, lze získat dle vztahu (9).

Průměrné hodnoty polohových odchylek:

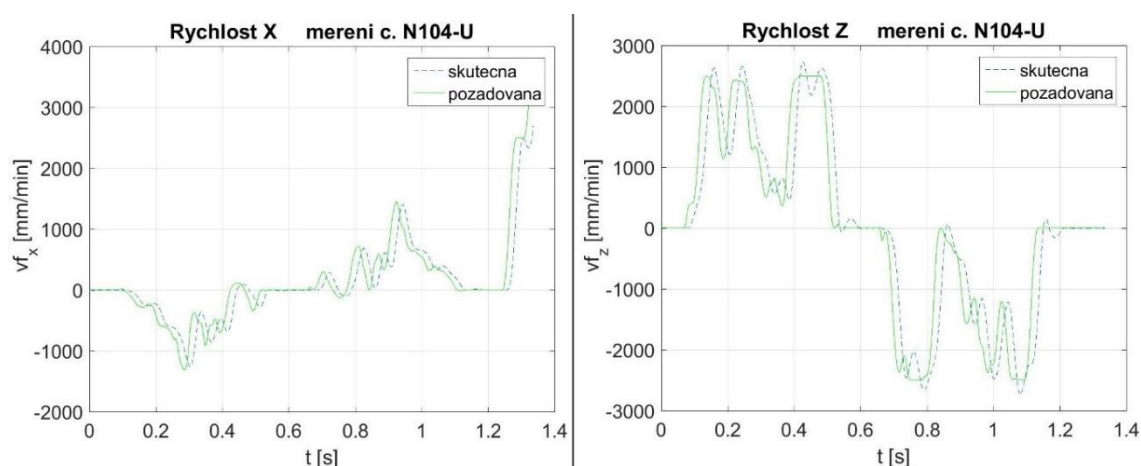
$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i; \quad \overline{\Delta z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta z_i \quad (9)$$

Celkovou průměrnou polohovou odchylku $\overline{\Delta c}$ lze získat vektorovým součtem dílčích průměrných polohových odchylek $\overline{\Delta x}$ a $\overline{\Delta z}$ dle vztahu (10).

Celková průměrná polohová odchylka:

$$\overline{\Delta c} = \sqrt{\overline{\Delta x}^2 + \overline{\Delta z}^2} \quad (10)$$

Na Obr. 33 jsou zobrazena data z měření rychlosti os v čase během přejezdu s nastavením N104-U. Zelená křivka reprezentuje požadovanou rychlost a modrá přerušovaná křivka reprezentuje skutečnou rychlost v čase.



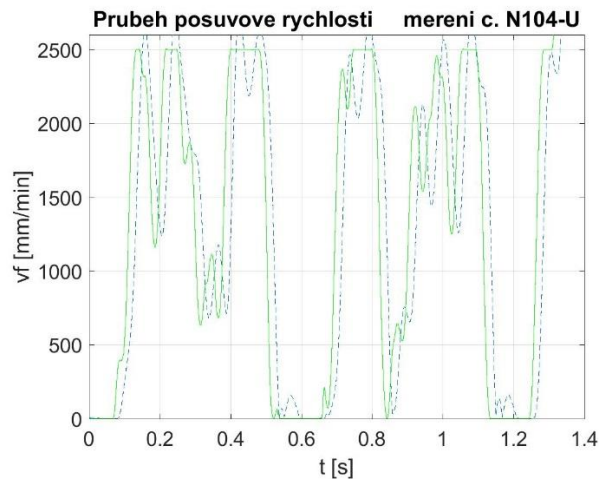
Obr. 33: Průběh dílčích rychlostí os v čase - měření N104-U (osa X - vlevo; osa Z - vpravo)

Celkovou posuvovou rychlost v_f , pokud i označuje časový vzorek měření, lze získat vektorovým součtem dílčích rychlostí v_{fx} a v_{fz} , dle vztahu (11).

Výpočet celkové posuvové rychlosti:

$$vf_i = \sqrt{vf_{xi}^2 + vf_{zi}^2} \quad (11)$$

Na Obr. 34 je zobrazen průběh celkové posuvové rychlosti z dat měření rychlosti os v čase během přejezdu s nastavením N104-U. Z průběhu celkové posuvové rychlosti na měřené dráze je patrné, že jak požadovaná, tak skutečná rychlost nejsou konstantní, ale dochází u nich k poklesu od hodnoty 2500 mm/min, která je zadána v NC programu. Samotný výskyt těchto poklesů je způsobený tvarem dráhy, kdy v některých kritických úsecích není možné dosáhnout změny rychlosti v požadovaném čase z důvodu dosažení limitu rychlosti, zrychlení, či jerku v jedné, či více osách. Velikost poklesů, jejich četnost a výskyt na dráze je dána konkrétním nastavením parametrů dráhy v CAM systému a také nastavením funkcí řídicího systému, se kterým je měřený přejezd odbaven. Z hlediska přesnosti a produktivity obrábění znamenají poklesy rychlosti na dráze prodloužení času obrábění, nedodržení technologických podmínek, tedy případné stopy na povrchu obrobku a také mohou být pohony os vystavovány nežádoucím rázům.



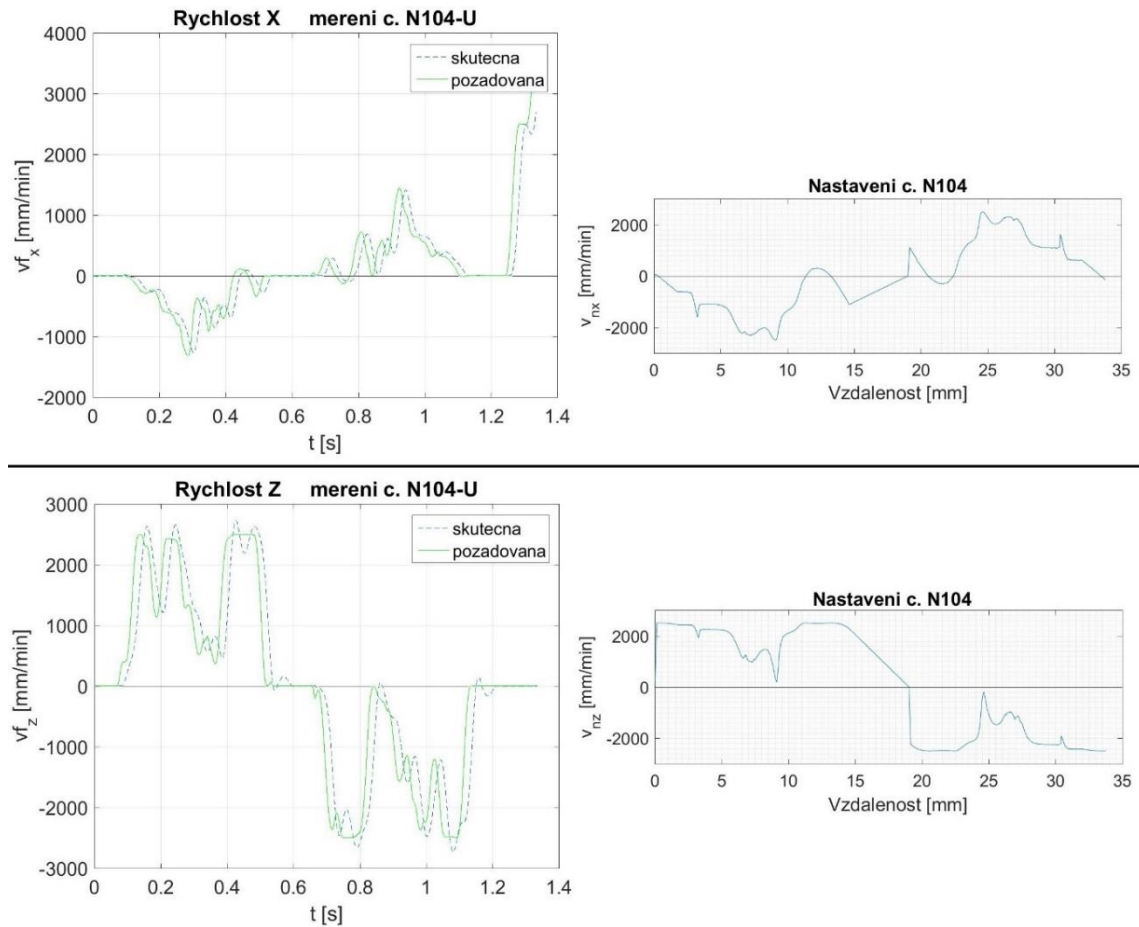
Obr. 34: Průběh celkové posuvové rychlosti v čase - měření N104-U

Popsané vyhodnocení je naznačeno v případě dat dráhy, na které interpolují dvě strojní osy. Dle uvedených vztahů je rozšířený výpočet použit i pro výpočty daných hodnot v případě vyhodnocování dat drah, na kterých interpolují současně tři strojní osy.

3.2.1. Porovnání naměřených a predikovaných dat

Jedním z cílů Vlastního řešení je nalézt určitou shodu mezi proměnnými, získanými v analýze NC kódu a naměřenými daty při odbavení dané dráhy. Nalezením takové shody je možné dokázat, že rozložení bodů dráhy, vygenerované z CAM při zvoleném nastavení, má vliv na plynulost odbavení NC kódu a to i v případě aktivní funkce komprese bodů, kdy ve skutečnosti nástroj analyzovanými interpolačními body neprojíždí.

Základní podobnost je možné hledat mezi parametrem poměrných přírůstků směru v jednotlivých osách v_n , které lze chápat také jako přírůstky rychlosti a dílčími rychlostmi, naměřenými v jednotlivých osách. Přírůstky v_n nabývají hodnot od -1 do 1. Pro lepší ilustraci lze jejich vynásobením hodnotou naprogramovaného posuvu f získat hodnoty rychlosti velikostně porovnatelné s reálně naměřenými daty. Na Obr. 35 vlevo jsou průběhy rychlostí v osách X (nahore) a Z (dole) získaných při měření N104-U, na Obr. 35 vpravo jsou potom průběhy přírůstků rychlosti dráhy N104, převedené na posuvovou rychlost. Příklady grafů z analýzy NC kódu pro každý parametr nastavovaný v CAM uvádí Příloha 3. Kompletní soubor grafických výstupů je v elektronické příloze.

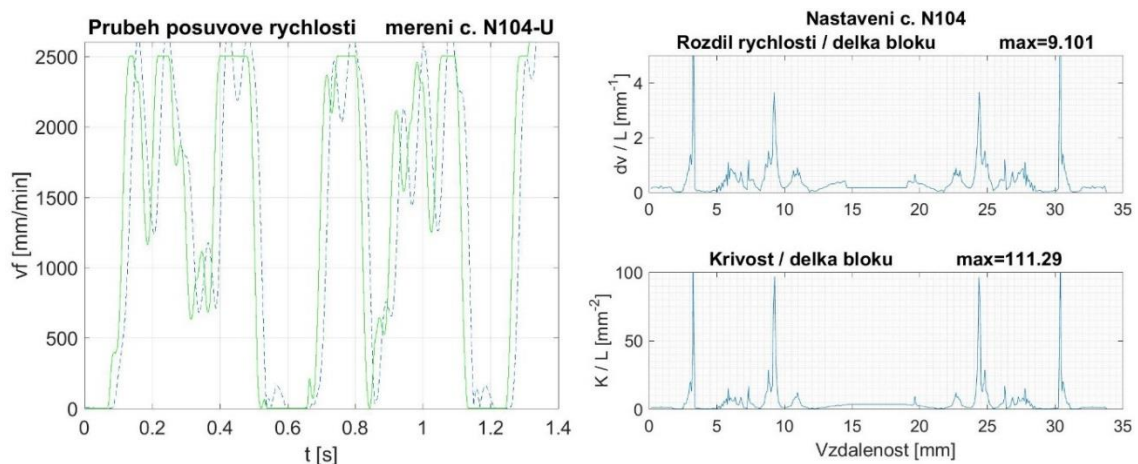


Obr. 35: Vlevo - průběh naměřených rychlostí os; vpravo - průběh rychlostí os z analýzy NC kódu

Z porovnání je patrné, že i s přihlédnutím k faktu, že měření N104-U proběhlo při aktivním funkci komprese bloků, jsou průběhy naměřených dílčích rychlostí a průběhy predikovaných rychlostí podobné. Rozdílnost je především ve velikostech dosažených rychlostí a to souvisí i s problémem určení celkové rychlosti na dráze tímto způsobem. Jak plyne z definice poměrných přírůstků směru v_n (jednotkových vektorů), vektorovým složením dílčích složek v_{nx} a v_{nz} je na celé dráze konstantní přírůstek velikosti “1” (případně “-1”), respektive “2500” (případně “-2500”) u přepočteného parametru. Aby průběh výsledné rychlosti na dráze nebyl konstantní a bylo tedy docíleno vyšší shody, mezi predikovaným a skutečným stavem, musel by parametr v_n v každém bodě dráhy zohledňovat limity rychlosti, zrychlení a jerku strojních os, které mají spojitost s poklesy dílčích, respektive celkové rychlosti.

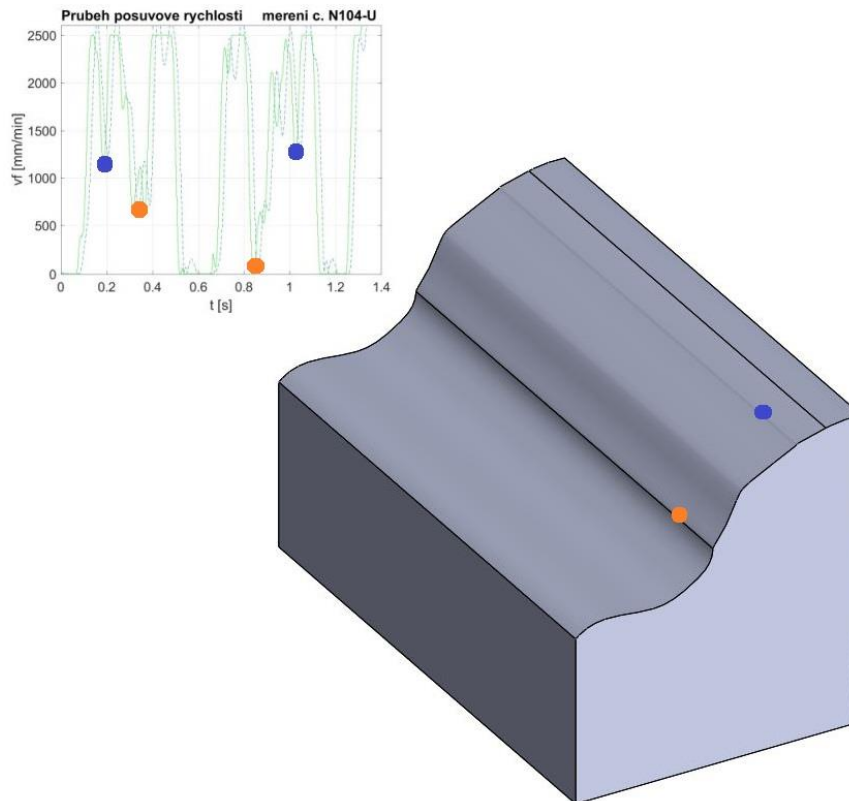
Přibližnou spojitost mezi poklesy v průběhu celkové naměřené rychlosti na dráze a rozložením interpolačních bodů NC kódu lze hledat v parametrech dvr a Kr . Na Obr. 36

vlevo je průběh posuvové rychlosti z měření N104-U, vpravo nahoře průběh parametru dvr a vpravo dole průběh parametru Kr na dráze N104. V průběhu parametrů dvr a Kr jsou výrazné na přejezdu dráhy v každém směru dvě špičkové hodnoty. Ze zobrazeného průběhu a i z dalších porovnávaných dat je zřejmé, že významnější vliv na pokles rychlosti mají úseky na dráze, kde dochází ke zvýšení parametrů dvr a Kr na delší dráze, než v případě úseku, na kterém dochází ke zvýšení parametrů pouze na krátké vzdálenosti. Popsaný znak parametrů je z hlediska poklesu rychlosti podstatnější, než porovnání maximální hodnoty nárůstu hodnoty parametrů. Zároveň je možné z průběhů konstatovat, že zatímco u analytických parametrů rozložení bodů dráhy nezáleží na směru přejezdu plochy, pro odbavení NC kódu je směr přejezdu podstatný, vzhledem k rozdílným hodnotám poklesu rychlosti, a tedy i času přejezdu. Vliv lze opět hledat v limitech pohybových os, které nejsou v analýze zohledněny.



Obr. 36: Vlevo - průběh posuvové rychlosti měření N104-U; vpravo - průběh dvr (nahoře) a Kr (dole) na dráze N104

Z porovnání průběhu dílčích rychlostí s průběhem parametru v_n lze odvodit konkrétní úseky NC kódu a lze zjistit, v kterých úsecích dráhy N104 dochází k zásadním poklesům posuvové rychlosti. Na Obr. 37 je zvýrazněno, o jaké úseky dráhy sledované dráhy se jedná. V obdobném vyhodnocení ostatních měření se výskyt poklesů posuvové rychlosti v těchto úsecích opakuje a poklesy rychlosti se vyskytují i na zbývajících úsecích, jejichž tvar byl při návrhu uvažován jako potenciálně kritický pro rozložení bodů a také odbavení dráhy.



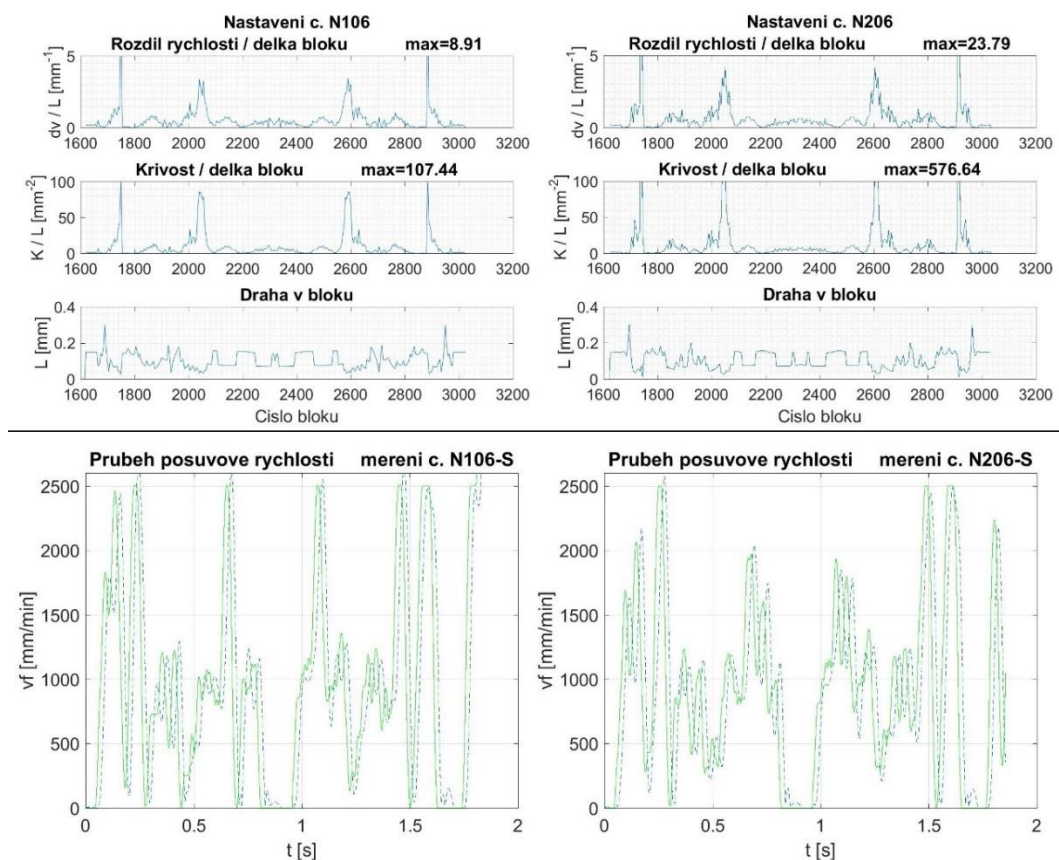
Obr. 37: Identifikace úseků poklesu posuvové rychlosti na testované ploše

Z proměnných hodnot sledovaných v analýze dráhy lze tedy zjistit úseky dráhy, které budou z hlediska dosažení zadané posuvové rychlosti problematické. Na základě zjištěných faktů vyplývá, že čím plynulejší je průběh sledovaných parametrů rozložení bodů dráhy, tím lze očekávat plynulejší průběh posuvové rychlosti (s méně výraznými poklesy, případně bez nich) a tedy i kratší čas přejezdu. Není však dostatečné sledovat pouze jeden z analyzovaných parametrů, ale je nutné sledovat průběh všech popsanych parametrů, jelikož různé změny dráhy se mohou na různých úsecích dráhy projevit v jiném analyzovaném parametru.

Je důležité ještě jednou zdůraznit, že analytické hodnocení rozložení bodů dráhy je při srovnání s naměřenými daty orientační také z důvodu použití kompresoru dat, kdy pro tři sledovaná nastavení funkce komprese a tedy různé naměřené průběhy rychlostí při odbavení totožného NC kódu je do porovnání k dispozici pouze jeden průběh dráhy.

Pro stanovení míry shody naměřených a predikovaných dat bylo provedeno porovnání podle testů vždy dvou sousedních měření (například 103 - 203; 106 - 206; 203 - 303 atd.). Porovnávány byly průběhy celkové naměřené rychlosti na dráze z poklesů četnosti,

charakteru a míry poklesů rychlosti na dráze a z hlediska celkového času průjezdu dráhy. Zároveň byly porovnávány průběhy parametrů dvr a Kr odpovídající nastavení dráhy, pro která byla změřena data. Příklad porovnání lze vysvětlit na Obr. 38, kde nahoře jsou hodnoty parametrů dvr a Kr v průběhu dráhy N106 (vlevo) a N206 (vpravo), dole jsou potom průběhy posuvových rychlostí z měření N106-S a N206-S. Z porovnání průběhů parametrů dvr a Kr lze zjistit, že lokální zvýšení parametrů je výraznější v případě dráhy N206. Z toho lze předpokládat, že míra poklesů rychlosti na dráze a tedy i celkový čas průjezdu dráhy bude vyšší pro měření N206-S. Z porovnání průběhů posuvových rychlostí na dráze lze konstatovat, že na dráze N206-S je méně často dosaženo naprogramované posuvové rychlosti (2500 mm/min), než na dráze N106-S a tedy i celkový čas průjezdu dráhy je vyšší u měření N206-S. Popsané porovnání bylo tedy označeno jako "shodné". V opačném případě, tedy pokud se předpoklad neshodoval s naměřeným výsledkem, byla konstatována "neshoda". V některých případech nastal i stav, kdy z porovnání nebylo možné určit, které měření / nastavení vychází lépe (oba průběhy totožné).



Obr. 38: Porovnání predikovaných dat - nahoře a skutečných dat - dole

V Tab. 4 jsou uvedeny celkové výsledky shody pro každé nastavení řídicího systému a pro dvě tolerance CAM systému. Celková zjištění jsou totožná pro NX CAM i SolidCAM.

Tab. 4: Míra shody naměřených a predikovaných dat

Nastavení řídicího systému	Tolerance CAM	Míra shody [%]
CYCLE832(0.001) -S	0,005	80
	0,002	40
CYCLE832(0.005) -T	0,005	20
	0,002	40
CYCLE832(0.01) -U	0,005	20
	0,002	20
COMPOF -V	0,005	20
	0,002	20

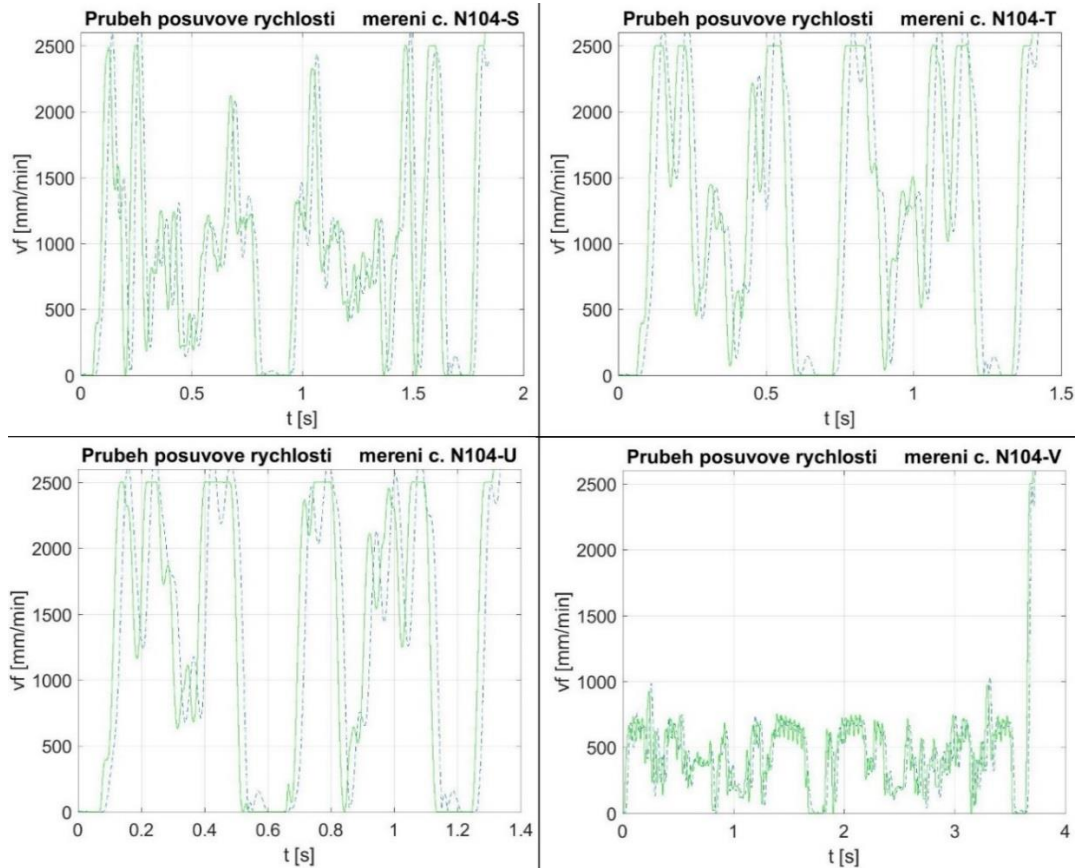
Z výsledků vyplývá, že největší shody (80%), mezi naměřenými a predikovanými daty bylo dosaženo při nastavení řídicího systému -S a tolerance v CAM 0,005 mm. Naopak nejnižší shoda je při porovnání měření s nastavením řídicího systému -U a -V (20% pro obě hodnoty tolerance CAM. Při vyhodnocování bylo také zřejmé, že pokud dvě porovnávané dráhy mají totožný průběh v parametrech *dvr* a *Kr* mají rovněž průběhy celkových rychlostí na dráze shodné. To je další známka vlivu rozložení bodů NC kódu na odbavení programu v řídicím systému.

3.2.2. Vliv nastavení parametrů řídicího systému

Ovlivnění přejezdu dráhy působením nastavení funkcí řídicího systému bude demonstrováno na příkladu dráhy N104, nicméně níže popsané znaky chování jsou zřejmé u všech provedených měření.

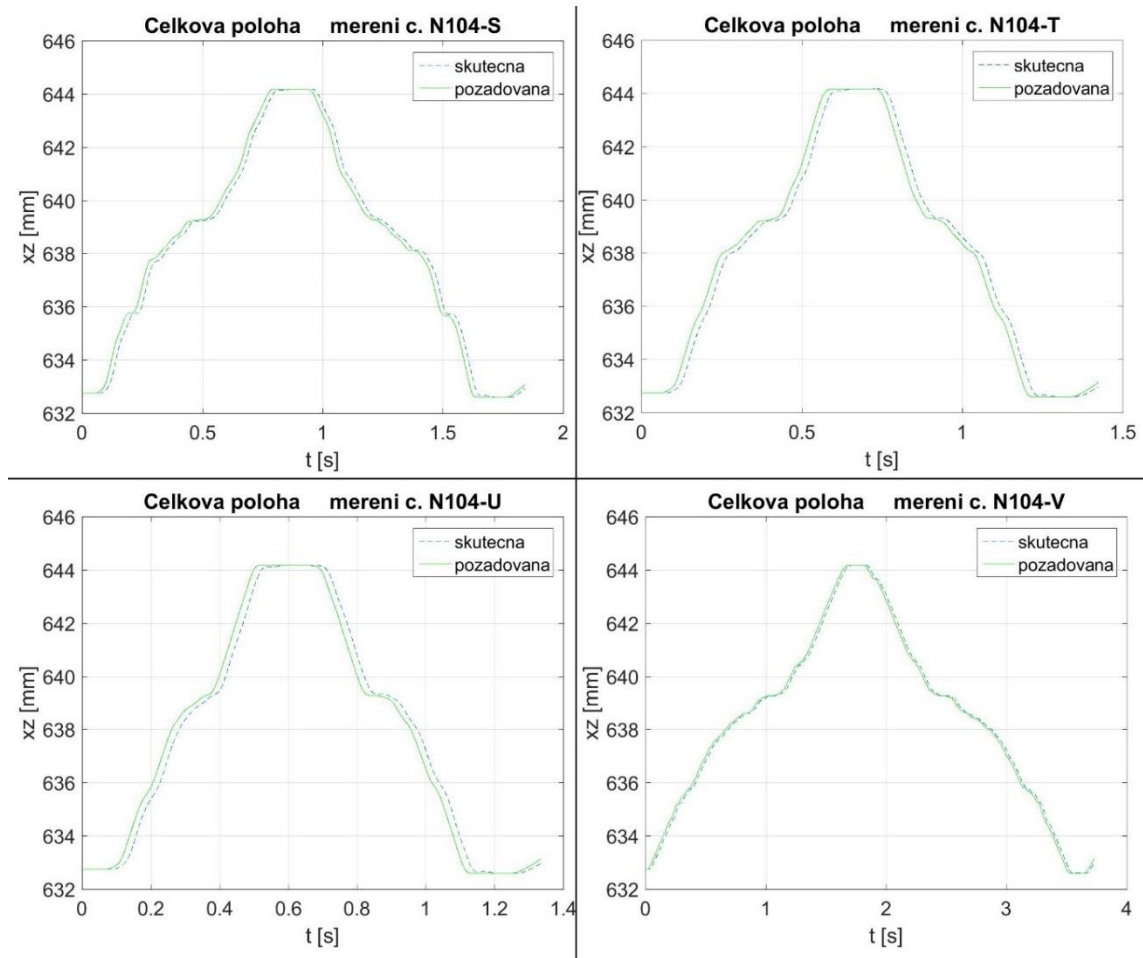
Na Obr. 39 jsou průběhy posuvové rychlosti pro čtyři nastavení řídicího systému při průjezdu dráhy N104 (vlevo nahoře – nastavení -S; vpravo nahoře – nastavení -T; vlevo dole – nastavení -U; vpravo dole – nastavení -V; podle Tab. 3). Z průběhů je zřejmé, že s rostoucí tolerancí v Cyklu 832 přibývá poklesů rychlosti a také roste celkový čas průjezdu dráhy. V případě nastavení -V, tedy s vypnutou kompresí dat, není požadované posuvové rychlosti na celé dráze dosaženo a to se odráží i v celkovém čase, který je v daném případě nejdelší. Jedná se o důležitý poznatek, vzhledem k tomu, že je aktivní

funkce G645, která by měla eliminovat poklesy rychlosti na přechodech, mezi interpolačními body dráhy. Na výsledku je vidět vliv této funkce, který se neshoduje s očekáváním.



Obr. 39: Průběh posuvové rychlosti pro různá nastavení funkcí řídicího systému - nastavení dráhy N104

Na Obr. 40 jsou průběhy celkové polohy v čase pro čtyři nastavení řídicího systému při průjezdu dráhy N104 (vlevo nahoře – nastavení -S; vpravo nahoře – nastavení -T; vlevo dole – nastavení -U; vpravo dole – nastavení -V). V průbězích je z hlediska odchylky skutečné a požadované polohy zřejmý opačný trend, než v případě poklesů rychlosti, resp. celkového času. Tedy při nastavení -V je dosaženo nejnižší celkové polohové odchylky, při nastavení -S naopak odchylky nejvyšší.



Obr. 40: Průběh celkové polohy pro různá nastavení funkcí řídicího systému – nastavení dráhy N104

Popsaná zákonitost, patrná z grafických průběhu je číselně zaznamenána v Tab. 5. Těmito výsledky byl potvrzen předpoklad z fáze návrhu testů, zmíněný v kap. 3.1.5.

Tab. 5: Celkový čas a polohová odchylka pro nastavení N104

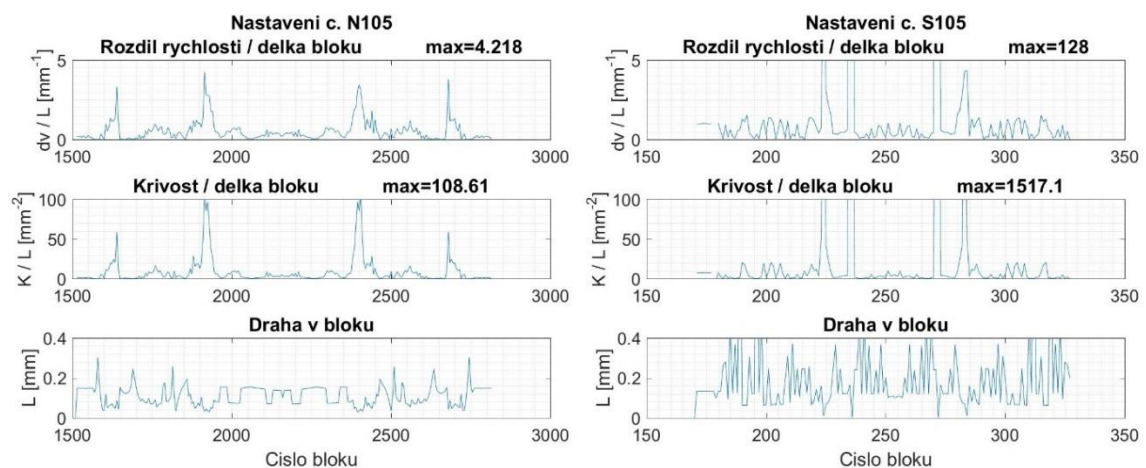
Nastavení řídicího systému	Celkový čas průjezdu dráhy [s]	Celková průměrná polohová odchylka [mm]
CYCLE832(0.001) -S	1,646	0,279
CYCLE832(0.005) -T	1,218	0,362
CYCLE832(0.01) -U	1,122	0,385
COMPOF -V	3,59	0,139

Ze souboru naměřených dat lze pro všechny dráhy odvodit, že procentuálně celkový čas dosahuje při nastavení -T průměrně 70% času oproti nastavení -S a při nastavení -U průměrně 60% času oproti nastavení -S. Polohová odchylka procentuálně při nastavení -T dosahuje průměrně 130% odchylky oproti nastavení -S a při nastavení -U průměrně 140% odchylky oproti nastavení -S. Nastavení -V do porovnání záměrně není

zahrnuto, jelikož rozpětí rozdílů časů a odchylek pro porovnání s nastaveními řídicího systému s aktivním Cyklem 832 je příliš vysoké.

3.2.3. Vliv výpočtového jádra CAM systému

Vliv výpočtového jádra na generování dráhy je demonstrován na nastavení dráhy 105, tedy základním nastavení s tolerancí dráhy 0,0025 mm. Na Obr. 41 vlevo je analýza dráhy připravené v Siemens NX a vpravo dráha připravená v SolidCAM. Z průběhů délky bloků v grafech dole je patrná různá systematika generování bodů u obou CAM systémů. SolidCAM má v délce bloků časté, pravidelné výkyvy a maximální hodnoty výkyvů jsou vyšší, než u NX CAM. V případě průběhů parametrů dvr a Kr je také vidět rozdíl, kdy v první kritickém úseku patrném v průběhu dráhy z NX, u SolidCAM není v parametrech znatelné zvýšení.



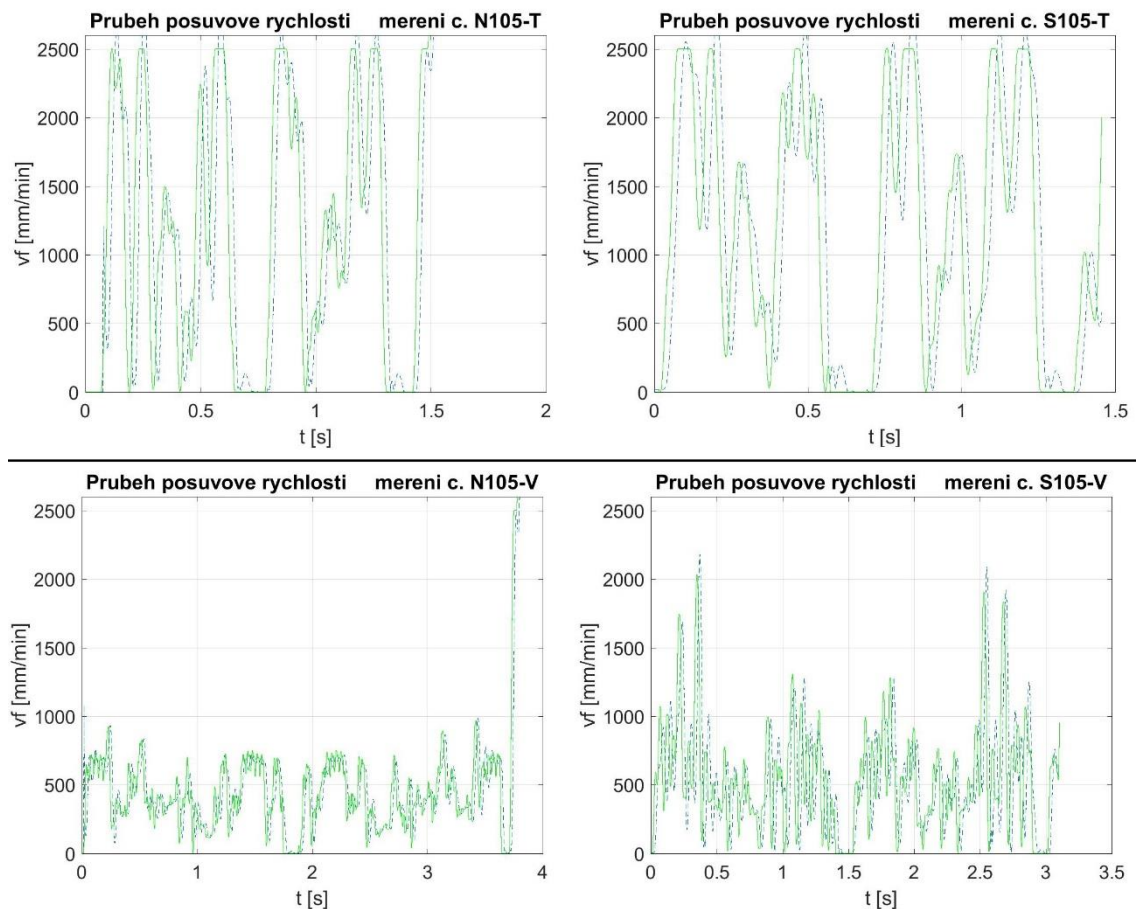
Obr. 41: Porovnání analytického vyhodnocení dráhy: vlevo - N105; vpravo - S105

Charakter rozložení bodů, především délka bloků se v naměřených datech projevuje zvláště u nastavení řídicího systému -V, tedy v případě vypnutého kompresoru bloků. Jak je uvedeno v Tab. 6, čas přejezdu dráhy ze SolidCAM je u tohoto režimu výrazně nižší, než čas přejezdu dráhy z NX CAM. Zároveň průměrná celková polohová odchylka na dráze je zde vyšší u přejezdu dráhy ze SolidCAM. Stejně pravidlo, jako v případě dráhy 105 se vyskytuje u všech vyhodnocených dat. U ostatních nastavení řídicího systému, tedy u těch, kde je aktivní Cyklus 832 s funkcí COMPCAD nelze podobné pravidlo při porovnání měření dráhy ze Solid CAM a NX CAM určit.

Tab. 6: Srovnání naměřených hodnot dráhy 105 z NX CAM a SolidCAM

Nastavení řídicího systému	Nastavení 105			
	NX CAM		SolidCAM	
	Čas	$\overline{\Delta c}$	Čas	$\overline{\Delta c}$
CYCLE832(0.001) -S	1,606	0,286	1,73	0,285
CYCLE832(0.005) -T	1,38	0,345	1,316	0,364
CYCLE832(0.01) -U	1,1	0,379	1,118	0,413
COMPOF -V	3,668	0,146	2,958	0,171

Popsaná závislost je patrná z Obr. 42, kde rozdíl průběhu posuvové rychlosti u nastavení -V (dole) je velmi výrazný. Tato rozdílnost se shoduje s rozdílností rozložení bloků drah z obou CAM systémů. U průběhů posuvové rychlosti s nastavením -T (nahore) není patrný rozdíl v charakteru průběhu. To poukazuje na vliv kompresoru bloků dráhy, který dráhami s rozdílným charakterem rozložení bodů proloží dráhy se srovnatelnými rysy z hlediska průběhu posuvové rychlosti.



Obr. 42: Porovnání naměřených rychlostí dráhy z NX CAM - vlevo a SolidCAM - vpravo

3.2.4. Vliv nastavení parametrů dráhy v CAM

Pro každé nastavení dráhy je vyhodnocen vliv změny tolerance (vliv malé a velké změny) a vliv změny úhlu (kromě základního nastavení, vliv malé a velké změny), jak bylo definováno v kap. 3.1.4. Vyhodnocováno je procentuální rozpětí naměřených časů přejezdů napříč danou změnou tolerance, nebo úhlu, kde procentuální hodnota je vztažená k průměrné hodnotě daného výběru. Dále je vyhodnocováno procentuální rozpětí maximálních a průměrných celkových polohových odchylek napříč danou změnou tolerance, nebo úhlu, kde procentuální hodnota je opět vztažená k průměrné hodnotě daného výběru. V Tab. 7 jsou červenou barvou zvýrazněny výběry drah pro porovnání vlivu změny tolerance a modrou barvou zvýrazněny výběry drah pro porovnání vlivu změny úhlu v každém nastavení dráhy.

Tab. 7: Rozdělení testů pro vyhodnocení výsledků

Tolerance [mm]	základ	úhel vlečení [°]					úhel naklopení [°]					směr řádkování [°]				
		20	31,5	32,5	33,5	45	20	31,5	32,5	33,5	45	44	45	46	1	2
0,01																
0,0075																
0,005																
0,003																
0,0025																
0,002																
0,001																

Základní nastavení dráhy

U vyhodnocení naměřených výsledků základního nastavení dráhy jsou nejvíce vypovídající výsledky, naměřené při nastavení řídicího systému -V, tedy nastavení s deaktivovaným kompresorem bloků dráhy. Hodnoty časů přejezdů a průměrných polohových odchylek při porovnání drah s měnící se tolerancí odpovídají očekávání. Tedy s přísnější tolerancí dráhy v CAM systému se zvyšuje celkový čas přejezdu a naopak klesá průměrná polohová odchylka na dráze.

Z vyhodnocení dat naměřených při nastavení řídicího systému s aktivním Cyklem 832 již nelze vyvodit podobný závěr pro měnící se toleranci dráhy v CAM systému. Například ve vyhodnocení dat s nastavením -T se lze naopak setkat se situací, kdy výsledný čas přejezdu pro nízkou toleranci dráhy v CAM je nižší a polohová odchylka má vyšší

hodnotu, než je tomu u dráhy s vyšší tolerancí dráhy v CAM. Tedy pokud je pojednáváno o změně tolerance dráhy v CAM systému v souvislosti s nastavením řídicího systému s aktivním Cyklem 832, v případě základního nastavení dráhy lze konstatovat, že komprese bloků rozdílů mezi dráhami smazává a uplatňuje se zde především vliv změny tolerance v Cyklu 832, jak bylo zmíněno v kap. 3.2.2. a ilustrováno na Tab. 5. Výsledné vyhodnocení naměřených dat, získaných při měření přejezdů drah ve všech tolerancích dráhy z CAM systému je zaznamenáno v Tab. 8. Z dat v tabulce je možné doplnit poznatek o vlivu výpočtového jádra CAM systému konstatováním, že pro velkou změnu tolerance v CAM bylo u základního nastavení dráhy ze SolidCAM naměřeno výrazně vyšší rozpětí hodnot celkového času a průměrné polohové odchylky v porovnání s dráhami z NX CAM.

Tab. 8: Výsledek vyhodnocení dat základního nastavení dráhy

Nastavení řídicího systému	Základní nastavení dráhy				Změna tolerance CAM
	NX CAM		SolidCAM		
	Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí $\overline{\Delta c}$ [%]	Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí $\overline{\Delta c}$ [%]	
Cyklus 832 (-S,-T,-U)	6,1 až 12,3%	4,5 až 7,6%	2,8 až 22,4%	1,5 až 23%	velká
	2,5 až 12,5%	2,6 až 6,3%	4,4 až 13,5%	3,6 až 10,7%	malá
COMPOF (-V)	45%	41,8%	37,6%	35,3%	velká
	8,4%	12,7%	7,9%	8,5%	malá

Nastavení s úhlem vlečení nástroje

U dráhy s definovaným úhlem vlečení nástroje nastává změna v rozdělení pohybu na dráze mezi dvě interpolující strojní osy (X a Z), vůči základnímu nastavení dráhy. Míra změny je závislá na konkrétním zvoleném úhlu vlečení nástroje. Díky této rozdílnosti můžou být body na dráze rozloženy tak, že bude v předpokládaných místech docházet k menším, nebo naopak větším poklesům posuvové rychlosti a zároveň se bude měnit celková polohová odchylka.

V Tab. 9 jsou uvedené výsledky vyhodnocení dat při změně nastavení úhlu vlečení nástroje pro dvě hodnoty tolerance dráhy z CAM. Z výsledků je zřejmé, že rozpětí časů a polohových odchylek je při změně úhlu vlečení nižší, než při změně tolerance CAM u základního nastavení dráhy. Nejvýraznější rozdíl je patrný u nastavení řídicího systému s vypnutou kompresí bloků. Zároveň lze z výsledků konstatovat, že snížení hodnoty tolerance CAM vede ke zvýšení rozpětí časů a polohových odchylek při nastavení změny úhlu vlečení nástroje. To v důsledku znamená, že pro nastavení dráhy s vyšší hodnotou tolerance v CAM má změna parametru naklopení nástroje menší vliv, než pro nastavení dráhy s nižší hodnotou tolerance v CAM.

Tab. 9: Výsledek vyhodnocení dat změny nastavení úhlu vlečení nástroje

Tolerance CAM [mm]	Nastavení řídicího systému	Nastavení s úhlem vlečení nástroje				Změna úhlu vlečení
		NX CAM		SolidCAM		
		Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí Δc [%]	Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí Δc [%]	
0,005	Cyklus 832 (-S,-T,-U)	4,6 až 7,8%	2,6 až 7,5%	8,1 až 18,1%	4 až 6,3%	velká
		1,9 až 12%	3,8 až 8,7%	3,1 až 10%	1,2 až 3,5%	malá
	COMPOF (-V)	3,4%	9%	3,4%	5,9%	velká
		0,9%	0,7%	0,9%	1%	malá
0,002	Cyklus 832 (-S,-T,-U)	5,3 až 13%	3,8 až 8,7%	12,6 až 20,5%	2,5 až 8,7%	velká
		1 až 6,9%	0,7 až 7,6%	6,4 až 14,2%	2,1 až 4,1%	malá
	COMPOF (-V)	5,7%	9%	18,4%	4,2%	velká
		3,3%	3,4%	4,1%	0,7%	malá

V Tab. 10 jsou uvedeny výsledky vyhodnocení dat při změně tolerance v CAM u nastavení s úhlem vlečení 32,5°. Z výsledků vyplývá, že změna tolerance v nastavení s úhlem vlečení nástroje má u drah generovaných z NX CAM obdobný vliv na rozpětí času a polohové odchylky, jako v základním nastavení dráhy. Co se týče drah generovaných

ze SolidCAM, pokud je aktivní Cyklus 832, je v případě nastavení s úhlem vlečení nástroje 32,5° dosaženo výrazně nižšího rozpětí času a polohové odchylky napříč tolerancemi, v porovnání se základním nastavením dráhy.

Tab. 10: Výsledek vyhodnocení dat nastavení s úhlem vlečení nástroje 32,5°

Nastavení řídicího systému	Nastavení s úhlem vlečení nástroje 32,5°				Změna tolerance CAM
	NX CAM		SolidCAM		
	Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí Δc [%]	Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí Δc [%]	
Cyklus 832 (-S,-T,-U)	6 až 11,4%	4,5 až 7,6%	4,1 až 9,8%	6,2 až 10,4%	velká
	2,5 až 7,3%	3,7 až 6%	1,3 až 3,7%	1,1 až 4,8%	malá
COMPOF (-V)	47,7%	39,4%	76,4%	73,4%	velká
	10,4%	9,4%	14%	10%	malá

Nastavení s úhlem naklonění nástroje

U dráhy s definovaným úhlem naklonění nástroje nastává změna v rozdělení pohybu na dráze mezi tři interpolující strojní osy (X, Y a Z), přičemž rozdělení pohybu závisí na velikosti úhlu naklonění. Celková polohová odchylka je u tohoto nastavení tedy rozdělena do tří os.

V Tab. 11 jsou uvedené výsledky vyhodnocení dat při změně nastavení úhlu naklonění nástroje pro dvě hodnoty tolerance dráhy z CAM. V porovnání s nastavením úhlu vlečení nástroje je změnou úhlu naklonění nástroje dosaženo nižšího rozpětí celkové polohové odchylky pro všechny nastavení řídicího systému, tedy změna úhlu naklonění má méně výrazný vliv na polohovou odchylku. Rozpětí času jsou v porovnání změny těchto dvou parametrů řádově srovnatelné. Zároveň lze z výsledků konstatovat, že snížení hodnoty tolerance CAM má opačný efekt, než v případě nastavení úhlu vlečení nástroje, tedy že vede ke snížení rozpětí časů a polohových odchylek při nastavení změny úhlu vlečení nástroje. To v důsledku znamená, že pro nastavení dráhy s nižší hodnotou tolerance

v CAM má změna parametru naklopení nástroje menší vliv, než pro nastavení dráhy s vyšší hodnotou tolerance.

Tab. 11: Výsledek vyhodnocení dat nastavení změny úhlu naklopení nástroje

Tolerance CAM [mm]	Nastavení řídicího systému	Nastavení úhlu naklopení nástroje NX CAM		Změna úhlu naklopení
		Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí $\overline{\Delta c}$ [%]	
0,005	Cyklus 832 (-S,-T,-U)	9,1 až 17,7%	0,3 až 4,2%	velká
		4,3 až 8,7%	2,2 až 7,2%	malá
	COMPOF (-V)	6,5%	2,2%	velká
		1,7%	2,7%	malá
0,002	Cyklus 832 (-S,-T,-U)	9,1 až 11,6%	0,2 až 2,4%	velká
		2 až 8,5%	1,1 až 6,3%	malá
	COMPOF (-V)	5,8%	0,8%	velká
		2,1%	0,8%	malá

V Tab. 12 jsou uvedeny výsledky vyhodnocení dat při změně tolerance v CAM u nastavení s úhlem naklopení 32,5°. Z výsledků vyplývá, že změna tolerance v nastavení s úhlem vlečení nástroje má u drah nižší vliv na rozpětí času a celkovou polohovou odchylku, než v základním nastavení dráhy. Tedy změna tolerance dráhy v CAM v případě nastavení úhlu naklopení nástroje 32,5° nejméně ovlivňuje čas a celkovou polohovou odchylku v porovnání se základním nastavením dráhy a s nastavením úhlu vlečení nástroje 32,5°.

Tab. 12: Výsledek vyhodnocení dat nastavení s úhlem naklonění nástroje 32,5°

Nastavení řídicího systému	Nastavení s úhlem naklonění nástroje 32,5° NX CAM		Změna tolerance CAM
	Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí Δc [%]	
Cyklus 832 (-S,-T,-U)	1,4 až 2,8%	1,9 až 3,3%	velká
	0,6 až 3,7%	1 až 2,9%	malá
COMPOF (-V)	45,9%	37,6%	velká
	12,2%	11,3%	malá

Změna směru řádkování

U dráhy s nastavenou změnou směru řádkování plochy dochází k rozdělení pohybu na dráze mezi tři interpolující strojní osy (X, Y a Z), přičemž rozdělení pohybu závisí na úhlu směru řádkování. Celkový čas přejezdu (vzhledem k porovnávání pouze dvou přejezdů - tam a zpět) se se zvyšující se hodnotou úhlu směru řádkování zvyšuje také čas přejezdu. Z tohoto důvodu lze očekávat vysokou hodnotu rozpětí času vlivem změny směru řádkování.

V Tab. 13 jsou uvedené výsledky vyhodnocení dat při změně směru řádkování plochy pro dvě hodnoty tolerance dráhy z CAM. Výsledky potvrdily předpoklad zvýšení rozpětí času přejezdu, které je při změně směru řádkování téměř dvojnásobné, než například při změně úhlu vlečení u měření s aktivním Cyklem 832. V případě vypnuté komprese bloků dráhy je rozdíl ještě markantnější. Co je ale podstatnější, je rozpětí celkové polohové odchylky vlivem velké změny směru řádkování plochy. U změny tohoto parametru je indikován největší vliv na celkovou polohovou odchylku změřenou na přejezdu dráhy.

Tab. 13: Výsledek vyhodnocení dat změny směru řádkování plochy

Tolerance CAM [mm]	Nastavení řídícího systému	Nastavení směru řádkování plochy				Změna směru řádkování
		NX CAM		SolidCAM		
		Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí Δc [%]	Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí Δc [%]	
0,005	Cyklus 832 (-S,-T,-U)	17,6 až 24,9%	44,3 až 51,3%	7,9 až 31,3%	35,6 až 40,8%	velká
		15,6 až 21%	1,1 až 3,9%	6,3 až 18,9%	6,9 až 13,8%	malá
	COMPOF (-V)	29,3%	44,3%	23%	35,2%	velká
		17,4%	5,2%	27,5%	3,2%	malá
0,002	Cyklus 832 (-S,-T,-U)	17,9 až 45,9%	40 až 56,3%	20,8 až 25,2%	35,4 až 42,1%	velká
		22,8 až 38,7%	4,7 až 9,1%	11,4 až 30,2%	3,6 až 12,4%	malá
	COMPOF (-V)	18,7%	44,5%	42%	39,7%	velká
		13,7%	2,7%	20,4%	3,2%	malá

Popsaná zákonitost je konkrétně vyčíslena v Tab. 14, kde hodnoty celkových polohových odchylek pro jednotlivá nastavení řídicího systému a tolerance CAM směru řádkování 1° a 45° jsou vztaženy k hodnotám základního nastavení dráhy. Jedná se o dráhy vygenerované v NX CAM, nicméně výsledky se řádově shodují s výsledky drah, generovaných v SolidCAM. Jak z tabulky vyplývá, změna směru řádkování o 1° od základního nastavení způsobuje při všech nastaveních řídicího systému u obou tolerancí z CAM snížení polohové odchylky vůči základnímu nastavení. V případě nastavení řídicího systému s aktivním Cyklem 832 je to snížení v řádu 30%, přičemž pro směr řádkování 1° je čas přejezdu vyšší vůči základnímu nastavení v průměru o 2 až 5%. Pro nastavení směru řádkování 45° jsou vyhodnocené polohové odchylky naopak vyšší v porovnání se základním nastavením dráhy.

Tab. 14: Porovnání celkové průměrné polohové odchylky pro různá nastavení směru řádkování

Tolerance CAM	Nastavení řídicího systému	Celková polohová odchylka $\overline{\Delta c}$		
		NX CAM		
		Základní nastavení	Směr řádkování 1°	Směr řádkování 45°
0,005	-S	100%	71%	115%
	-T	100%	64%	111%
	-U	100%	73%	122%
	-V	100%	91%	146%
0,002	-S	100%	72%	106%
	-T	100%	64%	116%
	-U	100%	73%	133%
	-V	100%	85%	135%

Vliv tolerance na rozpětí času přejezdu a rozpětí polohové odchylky je u nastaveného směru řádkování 45° v porovnání se základním nastavením výrazně vyšší pouze pro velkou změnu tolerance v případě nastavení řídicího systému -V, jak je patrné z Tab. 15.

Tab. 15: Výsledek vyhodnocení dat nastavení směru řádkování 45°

Nastavení řídicího systému	Nastavení se směrem řádkování plochy 45°				Změna tolerance CAM
	NX CAM		SolidCAM		
	Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí $\overline{\Delta c}$ [%]	Rozpětí času přejezdu [%]	Rozpětí $\overline{\Delta c}$ [%]	
Cyklus 832 (-S,-T,-U)	5,8 až 7,9%	6,3 až 8,3%	19,6 až 25,5%	14,4 až 17,5%	velká
	3,9 až 5,5%	3,1 až 4,8%	3,4 až 5,4%	1,1 až 5,3%	malá
COMPOF (-V)	78,1%	70,4%	27,9%	26,1%	velká
	14,1%	12,1%	8,3%	7,8%	malá

3.3. Zhodnocení výsledků a další vývoj

Z dat získaných provedením navrženého experimentu, který měl za cíl identifikovat míru ovlivnění přesnosti a produktivity sledovanými parametry, bylo možné vyhodnotit pro každý parametr výsledky, kterými lze mezi sebou parametry porovnat a lze z nich vyvodit

obecné závěry. Veličiny, které byly získány z dat, naměřených při přejezdech navržených drah pomocí diagnostické funkce stroje jsou zaprvé průběhy dílčích rychlostí v jednotlivých pohybových osách a složená celková posuvová rychlost na dráze, zadruhé dílčí polohy v čase pro jednotlivé pohybové osy. Z těchto bylo možné pro každé měření určit celkový čas přejezdu dráhy pro vyhodnocení produktivity a celkovou průměrnou polohovou odchylku na dráze pro vyhodnocení přesnosti, dosažené na dané dráze při konkrétním nastavení.

Prostřednictvím parametrů, navržených k použití v SW nástroji pro analýzu NC kódu, byly vyhodnocovány vstupní NC kódy všech drah, připravených pro experiment. Následně byla hledána shoda, mezi průběhy hodnot parametrů rozložení bodů NC kódu, vystupujících z použitého SW nástroje a reálně naměřenými daty pro jednotlivá nastavení. Bylo konstatováno, že použitý nástroj v navržené podobě nedosahuje požadované přesnosti a spolehlivosti pro predikci výsledků, získaných odbavením NC kódu. Nástrojem je možné zjišťovat pouze některé základní, obecné znaky konkrétního NC kódu. Hlavní omezení nástroje spočívá v zanedbání limitů strojních os stroje a především v absenci informací o výpočtu dráhy řídicím systémem při použití kompresoru bloků dráhy. Pro zdokonalení daného SW nástroje by byla vhodná implementace nastavení limitů rychlosti, zrychlení a jerku v jednotlivých osách a návrh algoritmu pro simulaci spline interpolátoru pro prokládání dráhy. Aby bylo možné dosáhnout přesné shody dat predikovaných z NC kódu, musel by se algoritmus shodovat s reálným interpolátorem stroje, u kterého jsou pro prokládání dráhy používány křivky pátého řádu.

Vliv nastavení funkcí řídicího systému je velice zásadní. Z výsledků vyplývá, že na čas průjezdu dráhy a polohovou odchylku má vliv především tolerance, nastavená v Cyklu 832 a zastiňuje rozdíly vlivem nastavení tolerance dráhy v CAM. Nastavení přísnější tolerance má efekt zvýšení času a snížení polohové odchylky pouze v případě nastavení řídicího systému -V, tedy při vypnutí kompresoru bloků příkazem COMPOF.

Z hlediska výpočtového jádra CAM systému bylo indikováno rozdílné rozložení bodů při porovnání NX CAM a SolidCAM. Rozdíl je vidět ve vzdálenosti bloků dráhy a u SolidCAM se projevuje při nastavení řídicího systému -V vyššími dosahovanými posuvovými

rychlostmi na dráze a kratšími časy průjezdu dráhy. Při vyhodnocení dat, naměřených při změně parametrů CAM se v porovnání vyskytují nastavení, pro které je u drah z jednoho CAM systému vyšší rozpětí časů a polohových odchylek.

Byla vyhodnocena data a popsány výsledky, získané z měření dráhy při různém nastavení dráhy v CAM systému. Byly popsány rozdíly v rozpětí časů a polohových odchylek při změně úhlů nastavení nástroje a směru řádkování při snížení tolerance v CAM. Z výsledků je také možné určit, u kterých parametrů má velký vliv malá změna úhlu a také jaký vliv má pro nastavení s konstantním úhlem nástroje, nebo směru řádkování tolerance dráhy v CAM systému. Například u úhlu naklopení $32,5^\circ$ má změna CAM tolerance jen velmi malý vliv na rozpětí času a polohové odchylky v porovnání s ostatními nastaveními drah. Naopak u úhlu vlečení nástroje má při nastavení řídicího systému s aktivním Cyklem 832 řádově podobný vliv na rozpětí času a polohové odchylky změna CAM tolerance, jako změna úhlu vlečení nástroje. Pro nastavení směru řádkování bylo zjištěno vysoké ovlivnění výsledků změnou směru řádkování od základního nastavení dráhy o pouhý jeden stupeň. Bylo tím dosaženo výrazně nižší polohové odchylky při nepatrném zvýšení času průjezdu dráhy.

Z hlediska nastavení řídicího systému bylo zjištěno zásadní ovlivnění v nastavení tolerance Cyklu 832, jak bylo popsáno v kap. 3.2.2. Významné je také zjištění ohledně nastavení s vypnutím komprese dat COMPOF. Jeho použití vede k vyšším časům průjezdu dráhy, ale na druhé straně k nižším polohovým odchylkám, v porovnání s aktivním Cyklem 832. Při zvolení konkrétního nastavení řídicího systému lze však také hledat nastavení dráhy v CAM, aby byly výsledky z hlediska sledovaného parametru optimální. V Tab. 17 je shrnutí vlivů jednotlivých parametrů na celkový čas přejezdu a v Tab. 18 shrnutí vlivů jednotlivých parametrů na průměrnou polohovou odchylku na dráze z NX CAM při každém nastavení řídicího systému a při dvou nastaveních tolerance z CAM. Podle procentuálního rozpětí času / odchylky vlivem změny parametru je stanovena stupnice vlivu 1 až 8, podle Tab. 16. "1" tedy značení nejmenší ovlivnění, "8" největší. Pro SolidCAM je pořadí důležitosti parametrů shodné s výsledkem z NX CAM.

Tab. 16: Definování stupnice vlivu

Stupeň	1	2	3	4	5	6	7	8
Rozpětí [%]	0 až 5	5 až 10	10 až 20	20 až 30	30 až 40	40 až 50	50 až 60	60 až 80

Tab. 17: Souhrn vlivů parametrů na celkový čas přejezdu

Vliv parametru na celkový čas	Nastavení ŘS	CYCLE832(0.001) -S	CYCLE832(0.005) -T	CYCLE832(0.01) -U	COMPOF -V
	Základní nastavení		-	-	-
Změna tolerance CAM		2	3	2	6
Změna úhlu vlečení nástroje		2	3	3	2
Změna tolerance CAM - 32,5°		2	3	2	6
Změna úhlu naklopení nástroje		4	4	2	2
Změna tolerance CAM - 32,5°		1	1	1	6
Změna směru řádkování		3	6	6	3
Změna tolerance CAM - 45°		2	2	2	8

Tab. 18: Souhrn vlivů parametrů na polohovou odchylku

Vliv parametru na polohovou odchylku	Nastavení ŘS	CYCLE832(0.001) -S	CYCLE832(0.005) -T	CYCLE832(0.01) -U	COMPOF -V
	Základní nastavení		-	-	-
Změna tolerance CAM		2	2	2	6
Změna úhlu vlečení nástroje		2	2	1	2
Změna tolerance CAM - 32,5°		2	2	2	5
Změna úhlu naklopení nástroje		1	1	1	1
Změna tolerance CAM - 32,5°		3	5	5	7
Změna směru řádkování		6	7	7	6
Změna tolerance CAM - 32,5°		2	2	2	8

Ze shrnutí vyplývá, celkově na změnu celkového času přejezdu měřené dráhy má největší vliv změna směru řádkování a nejmenší vliv změna úhlu vlečení nástroje. Na polohovou odchylku má největší vliv změna směru řádkování a nejmenší vliv změna úhlu naklopení nástroje. Nejvíce se vliv každého parametru projeví na celkovém čase při nastavení řídicího systému -T a -U a na polohové odchylce při nastavení -T a -V. Dále bylo zjištěno, že změna tolerance CAM systému při fixním nastavení sledovaného parametru

dráhy v CAM má největší vliv na rozpětí času a polohové odchylky pro všechna měření u nastavení řídicího systému -V. V případě nastavení řídicího systému -S, -T a -U je vliv změny tolerance CAM nízký, kromě změny u parametru úhlu naklopení nástroje $32,5^\circ$. Zde je vliv změny tolerance na celkový čas v porovnání s ostatními porovnávanými velmi nízký, naopak vliv změny tolerance na polohovou odchylku je zde výrazně vyšší, vůči ostatním porovnávaným.

4. Závěr

Pro nutnost načerpání informací o řešené problematice byla provedena rešerše zaměřená na CAM systémy, nastavení řídicích systémů strojů a odborné prameny ve zvolené oblasti práce a v oblasti výpočtů spojených s dráhou nástroje. Z rešerše byly zjištěny možné parametry nastavení CAM systémů a řídicích systémů, kterými by mohla být ovlivněna přesnost a produktivita obrábění. Z dostupných informací však nevyplývala míra, případně způsob, jakým daný parametr přesnost a produktivitu v praxi ovlivní.

Z tohoto důvodu byl navržen experiment, na jehož výstupu jsou dosavadní neznámé z hlediska sledovaného vlivu rozklíčované. Ve dvou CAM systémech (Siemens NX CAM a SolidCAM) byly generovány dráhy obrábění navržené testovací plochy při nastavování navržených parametrů v CAM. Odbavením programů na stroji MAS SP430, vybaveným řídicím systémem Siemens Sinumerik 840D, byly za pomoci diagnostické funkce Servo Trace změřeny sledované hodnoty polohy a rychlosti na dráze, aniž by bylo nutné obrábět a vyhodnocovat výsledky na reálném obrobku. V řídicím systému stroje bylo měněno nastavení uživatelských funkcí, čímž byl v měřeních zaznamenán i vliv nastavení řídicího systému.

Byl také navržen SW nástroj pro analýzu rozložení bodů dráhy v NC kódu. Vyhodnocované parametry nástroje jsou vhodné pouze pro přibližnou predikci výsledků, ovlivněných rozložením bodů sledované dráhy. Byla zjištěna příčina odchýlení se od reálných výsledků a byla navržena úprava nástroje, pro přiblížení získaných výstupů analýzy skutečnosti. Jedná se však o poměrně složitou úpravu, která nástroj vzdaluje od požadavku na jednoduchost a rychlost používání. V současné době vznikají SW, které jsou s ohledem na konkrétní nastavení řídicího systému a na dynamiku stroje schopny simulovat proces obrábění a následně vyhodnotit jakost povrchu a celkový čas obrábění. Poznatky z této práce v oblasti vlivů parametrů, měněných v CAM systému, budou prospěšné k vytváření optimalizačních algoritmů pro přípravu NC programů s optimálním nastavením pro úsporu celkového času, nebo přesnosti obrobku, jelikož poukazují na parametry, kterými je možné tyto výstupy nejvíce ovlivňovat.

Byly sledovány dva směry z hlediska nastavení řídicího systému. Jedním je volba nastavení Cyklu 832 s aktivní kompresí bloků a u této byla dále pozorována ovlivnění změnou tolerance kompresoru a na druhé straně je nastavení s neaktivní kompresí bloků. Druhé zmíněné nastavení není výhodné z hlediska produktivity obrábění, ale je při něm dosahováno vysoké přesnosti. U nastavení s kompresí bloků dráhy je ovlivnění změnou tolerance kompresoru významnější, než změnou výchozí tolerance dráhy v CAM systému. Relace mezi změnou parametrů CAM systému a nastavením řídicího systému byla detailně zanalyzována.

Z provedeného shrnutí vlivů změny sledovaných parametrů na celkový čas přejezdu dráhy a polohovou odchylku na dráze byla realizována stupnice důležitosti těchto parametrů. Celkový čas přejezdu dráhy a polohovou odchylku lze ze sledovaných parametrů CAM nejvíce ovlivnit změnou směru řádkování. Nejvíce se vliv změny parametrů v CAM systému projevuje na naměřených výsledcích při aktivním nastavení řídicího systému CYCLE832(0.005,1,1). Ovlivnění ze strany tolerance CAM systému je u většiny nastavení dráhy v CAM podstatné především při nastavení řídicího systému COMPOF. Parametr úhlu naklopení z tohoto hlediska však vybočuje od ostatních parametrů a je zde významné ovlivnění polohové odchylky změnou tolerance v CAM u všech nastavení řídicího systému, naproti tomu ovlivnění času je u tohoto parametru nižší, v porovnání s ostatními parametry, nastavovanými v CAM. Zjištěné poznatky také umožní technologovi detailnější náhled do daného tématu a jako jakási příručka, na jaké parametry je vhodné se při přípravě a realizaci obrábění zaměřit. Provedením a vyhodnocením experimentu byl splněn vytyčený cíl, tedy na základě získaných informací je možné efektivněji měnit parametry dráhy v CAM systému a se získanou znalostí lépe nastavovat funkce řídicího systému stroje.

Seznam použité literatury

- [1] J. Veselý, M. Sulitka a J. Smolík, „Simulace CNC obrábění,“ červen 2011. [Online]. Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-cnc-obrabeni.html>. [Přístup získán 15 prosinec 2017].
- [2] A. K. Network, „Curvature Continuity In Surface Modeling,“ Prosinec 2005. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/alias-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Alias-Tutorials-Legacy/files/GUID-9DD73E22-A5EF-4952-BB84-2CEE2109993C-htm.html>. [Přístup získán 5 Prosinec 2018].
- [3] L. Rong-Shine a Y. Cheng-Bing, „Accurate Trajectory Control for Five-Axis Tool-Path Planning,“ IMECS, Hong Kong, 2012. [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/e10d/5f920904dc548da2b3f4cad89072388f33ec.pdf>. [Přístup získán 15 prosinec 2017].
- [4] SolidCAM, *Uživatelský manuál - Frézování*, 2015.
- [5] J. Rybín a M. Janda, „Využití metod spline interpolace při výrobě průtočných profilů,“ *Výzkumná zpráva VCSSVT, ČVUT v Praze, Fakulta Strojní*, 2009.
- [6] P. Vavruška, „Interpolation of Toolpath by a Postprocessor for Increased Accuracy in Multi-Axis Machining,“ *7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting*, 2016.
- [7] Siemens, „Sinumerik Tool and Mold Making,“ Srpen 2007. [Online]. Available: https://www.siemens.be/cmcc/upload/asap2/EIT_Machine_Tools/Release-1569/SIN_WF_0807_en_1471438.pdf. [Přístup získán 10 Listopad 2017].
- [8] Siemens, „840D sl SINUMERIK,“ v *Operate V2.7/4.4*, 2016.
- [9] Heidenhain, „User manual, Cycle programming - iTNC 530,“ Listopad 2011. [Online]. Available:

- https://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/iTNC530/34049x-07/zyklen/670_388-22.pdf. [Přístup získán 20 Prosinec 2017].
- [10] Heidenhain, „iTNC 530 HSCI,“ Září 2013. [Online]. Available: <http://www.fcrmotion.com.au/wp-content/uploads/2014/11/Heidenhain-TNC-530-catalogue.pdf>. [Přístup získán 20 Prosinec 2017].
- [11] F. Amerika, „High-Precision Machining,“ [Online]. Available: <https://www.fanucamerica.com/home/products-services/cnc/cnc-technology/high-precision-machining>. [Přístup získán 30 Prosinec 2017].
- [12] Haas, „High-Speed Machining,“ [Online]. Available: <https://diy.haascnc.com/reference-docs/high-speed-machining#gsc.tab=0>. [Přístup získán 30 Prosinec 2017].
- [13] P. Vavruška, „Analysis of Finishing NC Programs from Two Different CAM Systems,“ *9th International Conference on Machine Tools, Automation, Technology and Robotics*, 2012.
- [14] W. L. Christian Brecher, „Evaluation of toolpath quality: User-assisted CAM for complex milling processes,“ Srpen 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581713000539>. [Přístup získán 5 Leden 2018].
- [15] J. M. Langeron, E. Duc, C. Lartigue a P. Bourdet, „A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves,“ Prosinec 2003. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448503002550>. [Přístup získán 2 Leden 2018].
- [16] Y. Changya a Y. Jinanqhong, „Three-Axis Tool-Path B-Spline Fitting Based on Preprocessing,“ 2012. [Online]. Available: http://www.mmscience.eu/archives/MM_Science_201219.pdf. [Přístup získán 5 prosinec 2017].

- [17] Y. Jixiang a Y. Alexander, „An analytical local corner smoothing algorithm for five-axis CMC machining,” 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695517301153>. [Přístup získán 5 prosinec 2017].
- [18] S. Zivkovic, „NX CAM Post Processing Errors: Machine Data File Generator vs. Post Builder,” 2016.
- [19] S. Bossoni, „Geometric and Dynamic Evaluation and Optimization of Machining Centers,” ETH Zurich, 2009.
- [20] Z. Hájíček, „DP - Testování virtuálního NC stroje v prostředí PLM systému NX,” Fakulta Strojní, ZČU Plzeň, 2013.
- [21] F. E. MathWorks, „circlefit3d - fit circle to three points in 3d space,” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34792-circlefit3d-fit-circle-to-three-points-in-3d-space?focused=5215276&tab=function>. [Přístup získán 5 Leden 2018].

Seznam použitého softwaru

1. SolidWorks Vzdělávací edice, 2015 SP5.0
2. SolidCAM, 2015
3. Siemens NX 10
4. Zoner Photo Studio, Verze 14.0
5. Microsoft Office Standard 2013, SP3
6. Cimco Edit V5.5
7. Matlab R2015b

Seznam obrázků

Obr. 1: Posloupnost vazeb ovlivňujících přesnost dráhového řízení, převzato z lit. [1].	11
Obr. 2: Příklady napojení povrchu modelu uvedené v lit. [2].....	12
Obr. 3: Vlevo - model převedený ze STEP; model převedený ze SLDPRT vpravo.....	14
Obr. 4: Nahoře - dráha vygenerovaná z modelu ve formátu STEP; dole- dráha vygenerovaná z modelu ve formátu SLDPRT	14
Obr. 5: Model obrobku aproximovaný při zadání různé tolerance, převzato z lit. [4]...	15
Obr. 6: Vlevo - Lineární interpolace; vpravo - Spline interpolace. Převzato z lit [5].	16
Obr. 7: Nastavení Cyklu 832 v Siemens Sinumerik, převzato z lit. [7]	19
Obr. 8: Podfunkce režimu řízení pohybu po dráze, viz lit. [7]	20
Obr. 9: Průběh změny zrychlení v čase, viz lit. [7]	20
Obr. 10: Kompresor NC bloků v Siemens Sinumerik, viz lit. [7].....	21
Obr. 11: Tolerance v Cyklu 32 Heidenhain, viz lit. [9].....	22
Obr. 12: Vliv modulu HSM (Haas) na průběh rychlosti, převzato z lit. [12].....	25
Obr. 13: Testovací dílec pro porovnání nastavené dráhy nástroje, převzato z lit. [13] .	26
Obr. 14: Test algoritmu pro vyhodnocení kritických úseků dráhy nástroje, převzato z lit. [14].....	28
Obr. 15: Porovnání vzorků obrobených za použití různých typů interpolace, převzato z lit. [15]	29
Obr. 16: Testovací dílec NCG pro pětiosé obrábění, převzato z lit. [19]	31
Obr. 17: Testovací dílec, vlevo - "Mercedes", vpravo – "Okuma", převzato z lit. [16]...	32
Obr. 18: Navržená testovací plocha - vlevo 3D mode; vpravo křivost tvořící křivky tvaru	35
Obr. 19: Využití editoru CIMCO Edit pro zobrazení NC programu a dráhy nástroje	37
Obr. 20: Blokové schéma použití SW nástroje pro analýzu NC kódu	38
Obr. 21: Naznačení sledovaného bodu na dráze	39
Obr. 22: Definování poměrných přírůstků.....	40
Obr. 23: Definování rozdílů přírůstků	40
Obr. 24: Vývojový diagram výpočtu analytických parametrů dráhy	42
Obr. 25: Soustružnické centrum KMAS SP430.....	43
Obr. 26: Toleranční pásmo dráhy, převzato z lit. [4]	44

Obr. 27: Vlevo - základní nastavení dráhy; vpravo - nastavení s úhlem naklonění nástroje	46
Obr. 28: Nastavení dráhy s úhlem naklonění nástroje	47
Obr. 29: Nastavení směru řádkování	48
Obr. 30: Aktivní funkce při zvoleném nastavení řídicího systému	50
Obr. 31: (Vlevo) volba měřených hodnot, (vpravo) průběh naměřených hodnot	51
Obr. 32: Průběh dílčích poloh os v čase - měření N104-U (osa X - vlevo; osa Z - vpravo)	52
Obr. 33: Průběh dílčích rychlostí os v čase - měření N104-U (osa X - vlevo; osa Z - vpravo)	53
Obr. 34: Průběh celkové posuvové rychlosti v čase - měření N104-U	54
Obr. 35: Vlevo - průběh naměřených rychlostí os; vpravo - průběh rychlostí os z analýzy NC kódu.....	56
Obr. 36: Vlevo - průběh posuvové rychlosti měření N104-U; vpravo - průběh dvr (nahore) a Kr (dole) na dráze N104	57
Obr. 37: Identifikace úseků poklesu posuvové rychlosti na testované ploše.....	58
Obr. 38: Porovnání predikovaných dat - nahore a skutečných dat - dole.....	59
Obr. 39: Průběh posuvové rychlosti pro různá nastavení funkcí řídicího systému - nastavení dráhy N104	61
Obr. 40: Průběh celkové polohy pro různá nastavení funkcí řídicího systému – nastavení dráhy N104	62
Obr. 41: Porovnání analytického vyhodnocení dráhy: vlevo - N105; vpravo - S105.....	63
Obr. 42: Porovnání naměřených rychlostí dráhy z NX CAM - vlevo a SolidCAM - vpravo	64

Seznam tabulek

Tab. 1: Nastavené limity strojních os.....	44
Tab. 2: Shrnutí nastavení dráhy v CAM, zvolených pro realizaci experimentu	49
Tab. 3: Označení nastavení funkcí řídicího systému	52
Tab. 4: Míra shody naměřených a predikovaných dat	60
Tab. 5: Celkový čas a polohová odchylka pro nastavení N104	62
Tab. 6: Srovnání naměřených hodnot dráhy 105 z NX CAM a SolidCAM	64
Tab. 7: Rozdělení testů pro vyhodnocení výsledků	65
Tab. 8: Výsledek vyhodnocení dat základního nastavení dráhy	66
Tab. 9: Výsledek vyhodnocení dat změny nastavení úhlu vlečení nástroje	67
Tab. 10: Výsledek vyhodnocení dat nastavení s úhlem vlečení nástroje 32,5°	68
Tab. 11: Výsledek vyhodnocení dat nastavení změny úhlu naklopení nástroje.....	69
Tab. 12: Výsledek vyhodnocení dat nastavení s úhlem naklopení nástroje 32,5°	70
Tab. 13: Výsledek vyhodnocení dat změny směru řádkování plochy.....	71
Tab. 14: Porovnání celkové průměrné polohové odchylky pro různá nastavení směru řádkování	72
Tab. 15: Výsledek vyhodnocení dat nastavení směru řádkování 45°	72
Tab. 16: Definování stupnice vlivu	75
Tab. 17: Souhrn vlivů parametrů na celkový čas přejezdu	75
Tab. 18: Souhrn vlivů parametrů na polohovou odchylku	75

Seznam příloh

Textové přílohy

- Příloha 1: Parametry stroje MAS SP430 / Y2 1100
- Příloha 2: Příklad grafů naměřených dat
- Příloha 3: Příklad grafů z analýzy NC kódu
- Příloha 4: Příklad tabulky naměřených dat - základní nastavení dráhy

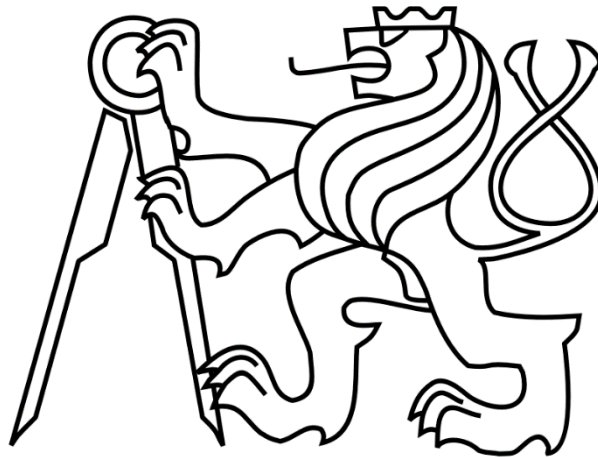
Obsah CD přílohy

- Složka 1: Záloha nastavení řídicího systému stroje
- Složka 2: SW nástroj pro analýzu NC kódu (Matlab script)
- Složka 3: NC programy testovacích drah
- Složka 4: Kompletní grafy z analýzy NC kódů
- Složka 5: Naměřená data ze Servo Trace
- Složka 6: Kompletní grafy dat naměřených v Servo Trace
- Složka 7: Kompletní vyhodnocená naměřená data

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Textové přílohy

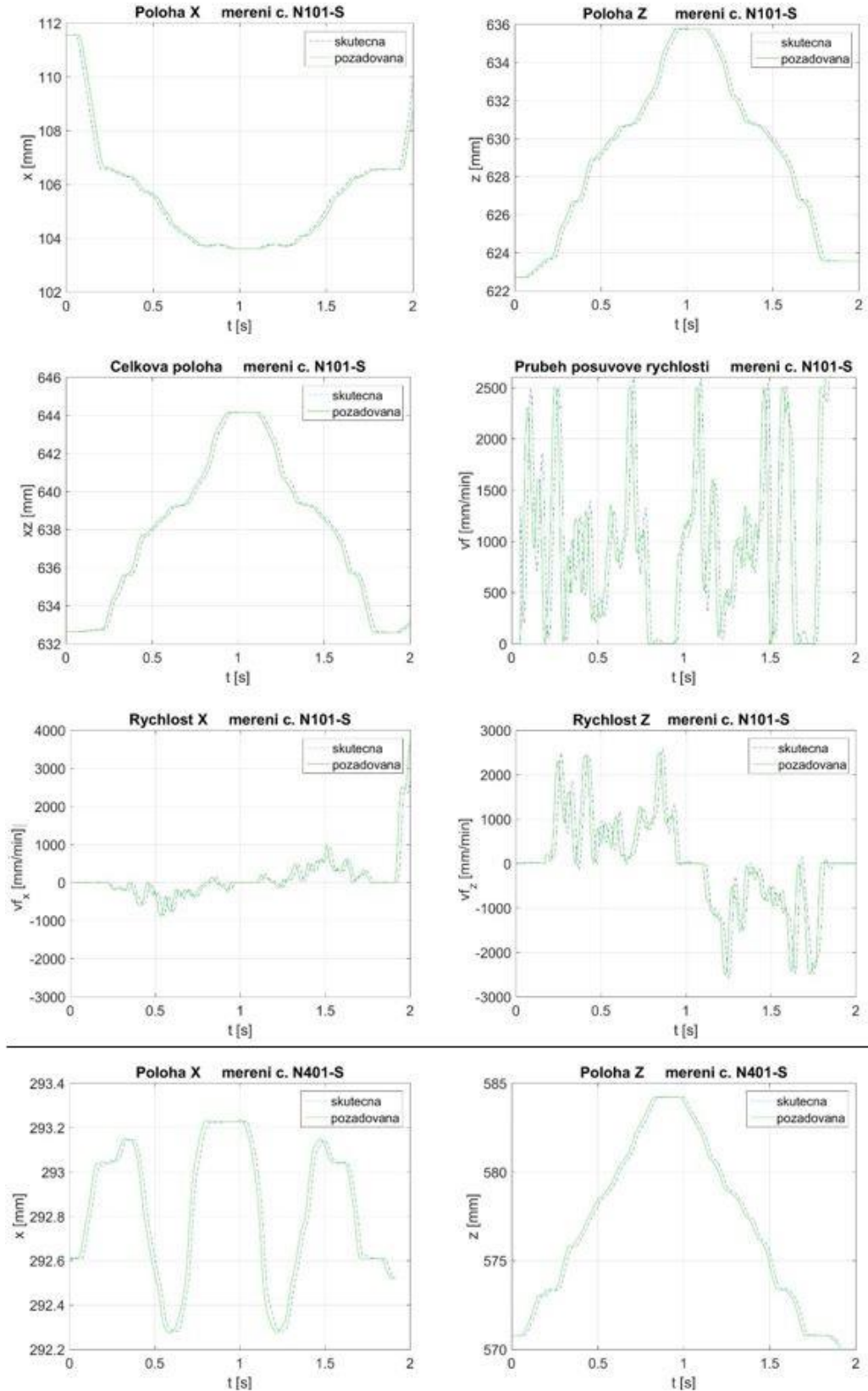
2018

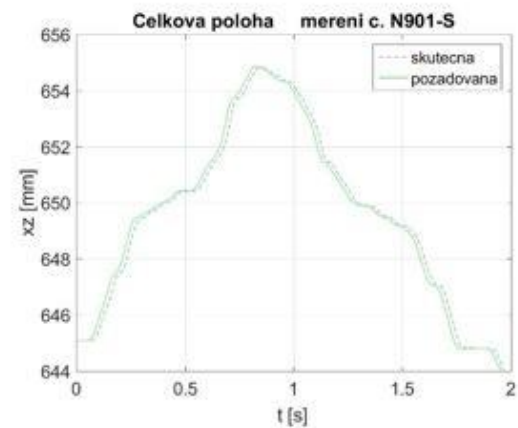
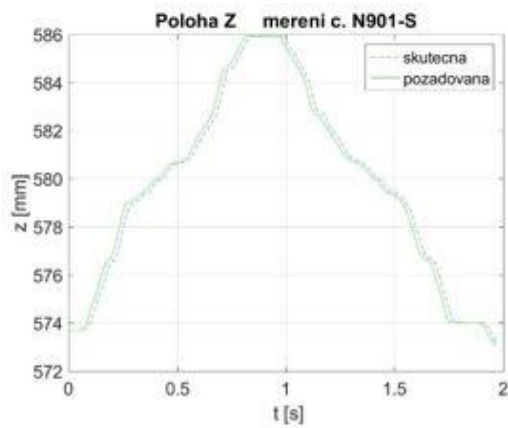
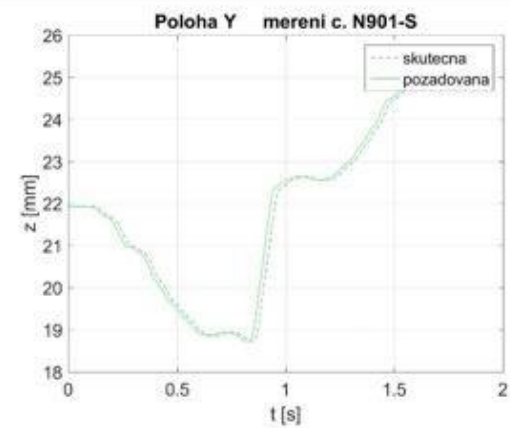
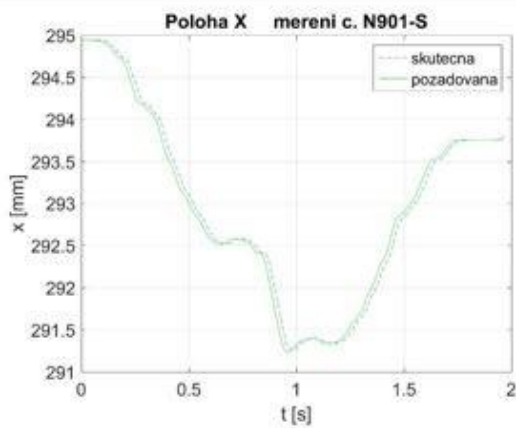
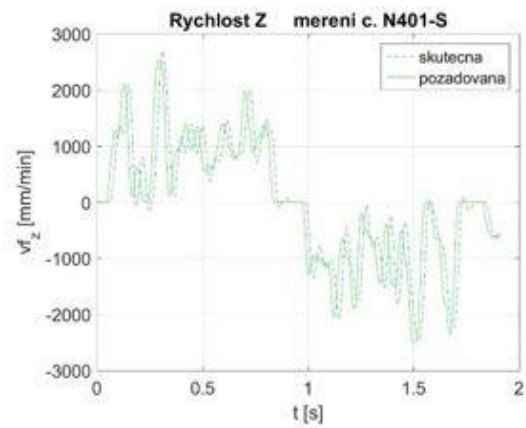
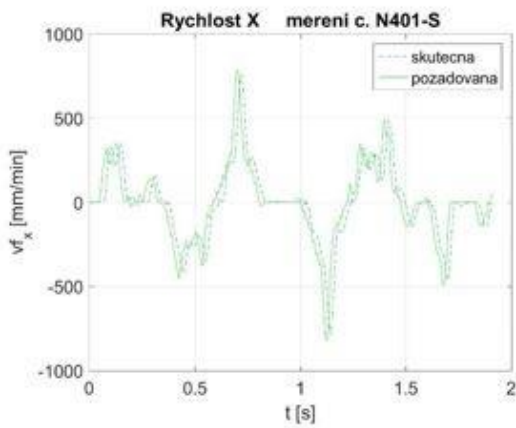
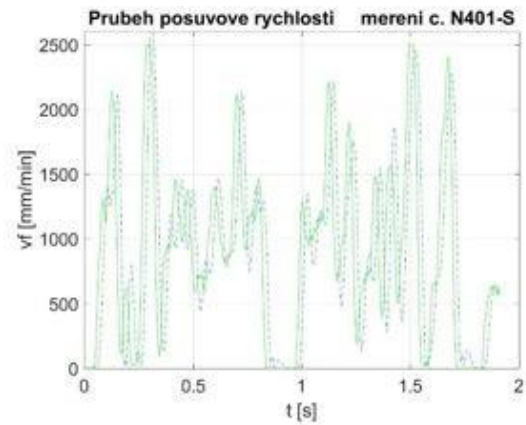
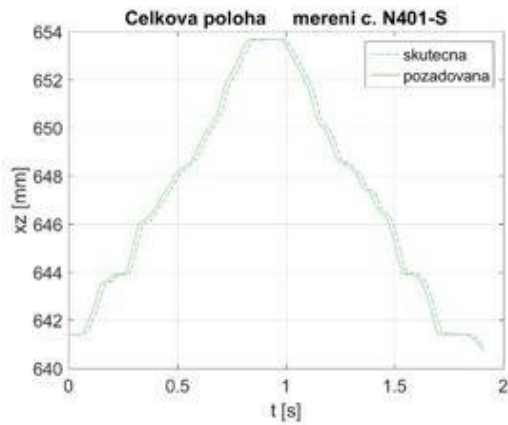
Bc. Matěj Pešice

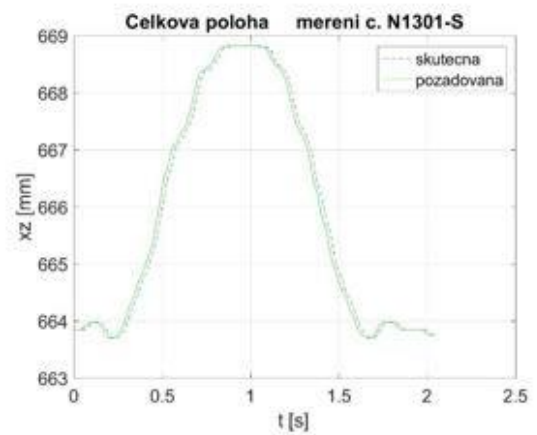
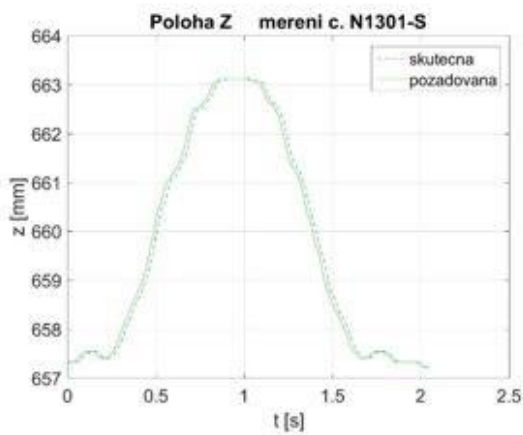
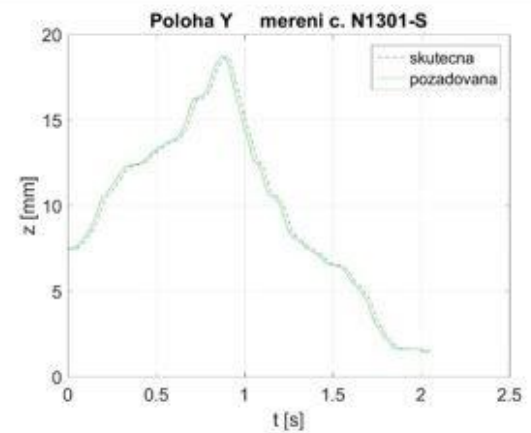
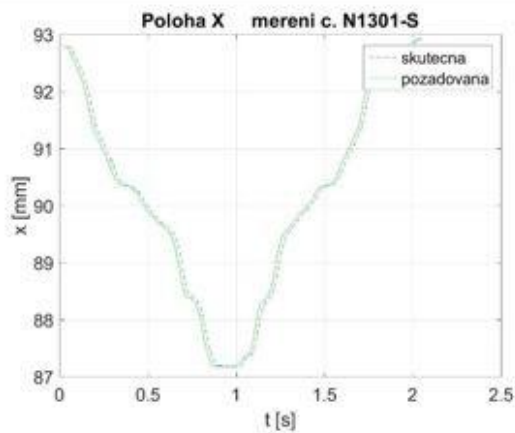
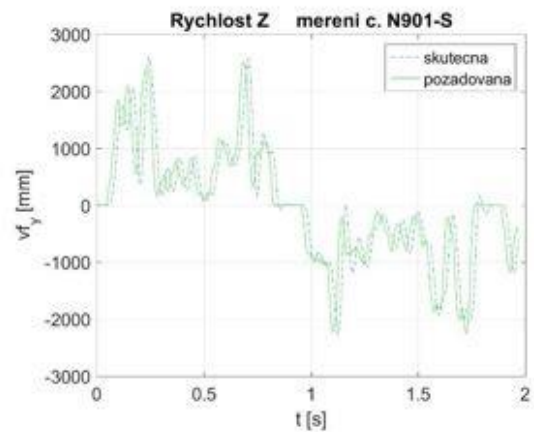
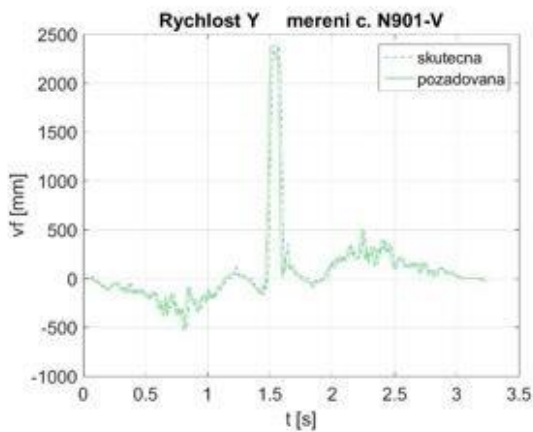
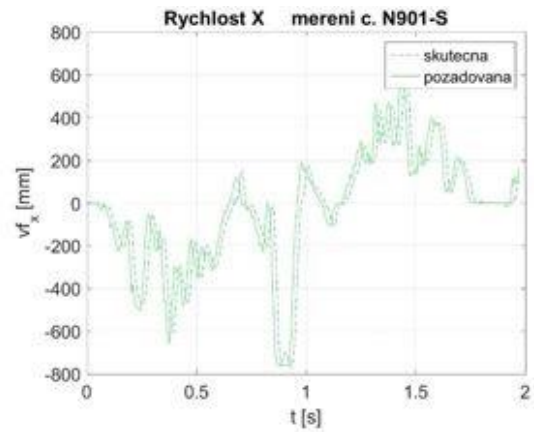
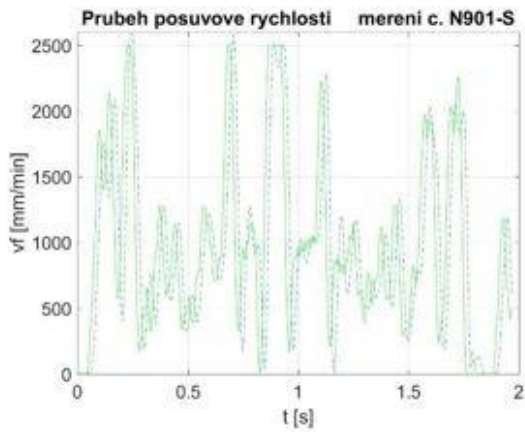
Příloha 1: Parametry stroje MAS SP430 / Y2 1100

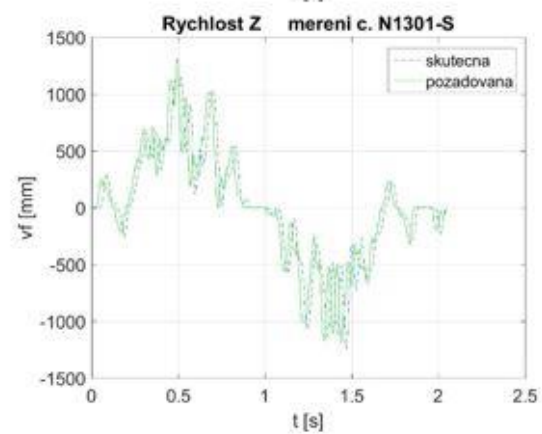
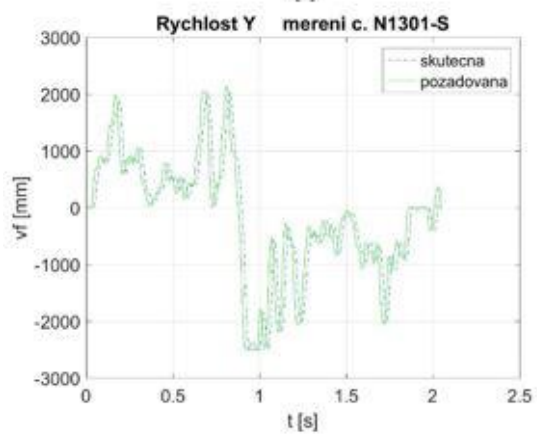
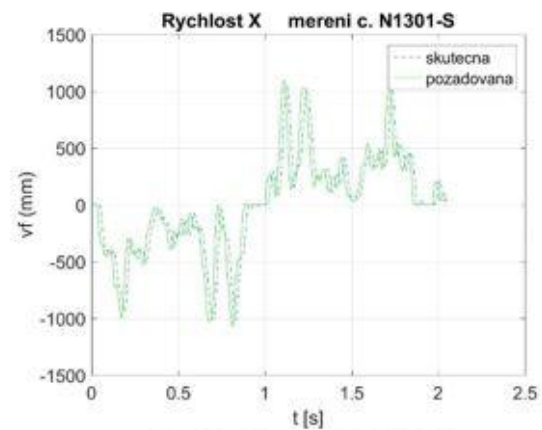
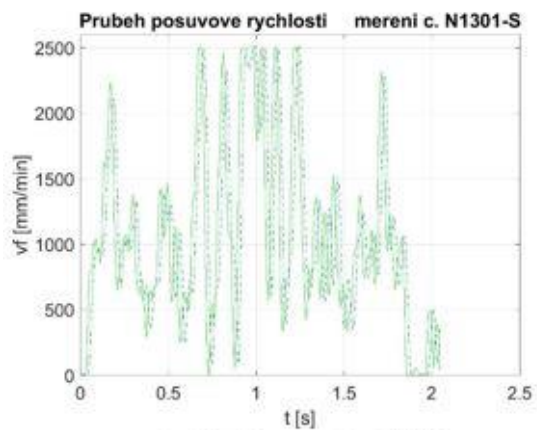
Parametr	Hodnota	Jednotka
Pracovní prostor		
Max. délka soustružení	1100	mm
Max. \varnothing soustružení – horní hlava	550	mm
Max. \varnothing soustružení – spodní hlava	430	mm
Max. průchod tyče vřetena	90	mm
Pojezdy os		
Osy X_1 / Z_1	325 / 1225	mm
Osy X_1 / Z_1	217 / 1215	mm
Osa Y	+100 / -80	mm
Rychloposuv		
Osy $X_1 / Z_1 / X_2 / Z_2$	30	m/min
Osa Y	25	m/min
Hlavní vřeteno		
Max. otáčky	3150	min ⁻¹
Horní nástrojová hlava		
Počet poloh	12	-
Průměr otvoru VDI	50	mm
Max. otáčky nástrojového vřetena	4000	min ⁻¹
Spodní nástrojová hlava		
Počet poloh	8	-
Průměr otvoru VDI	50	mm
Koník		
Kužel dutiny – MORSE	6	-
Zdvih pinole	160	mm
Průměr pinole	150	mm
Motor – Hlavní vřeteno		
Výkon S1 / S6 – 40%	28 / 42	kW
Max. krouticí moment S1 / S6 – 40%	1403 / 2106	Nm
Motor nástrojového vřetena horní hlavy		
Výkon S1 / S6 – 40%	22,3	kW
Max. krouticí moment S1 / S6 – 40%	71	Nm
Délka x šířka x výška		
Délka x šířka x výška	5591 x 2594 x 2402	mm
Hmotnost		
Hmotnost	12 500	kg

Příloha 2: Příklad grafů naměřených dat (kompletní soubor grafů v el. příloze)



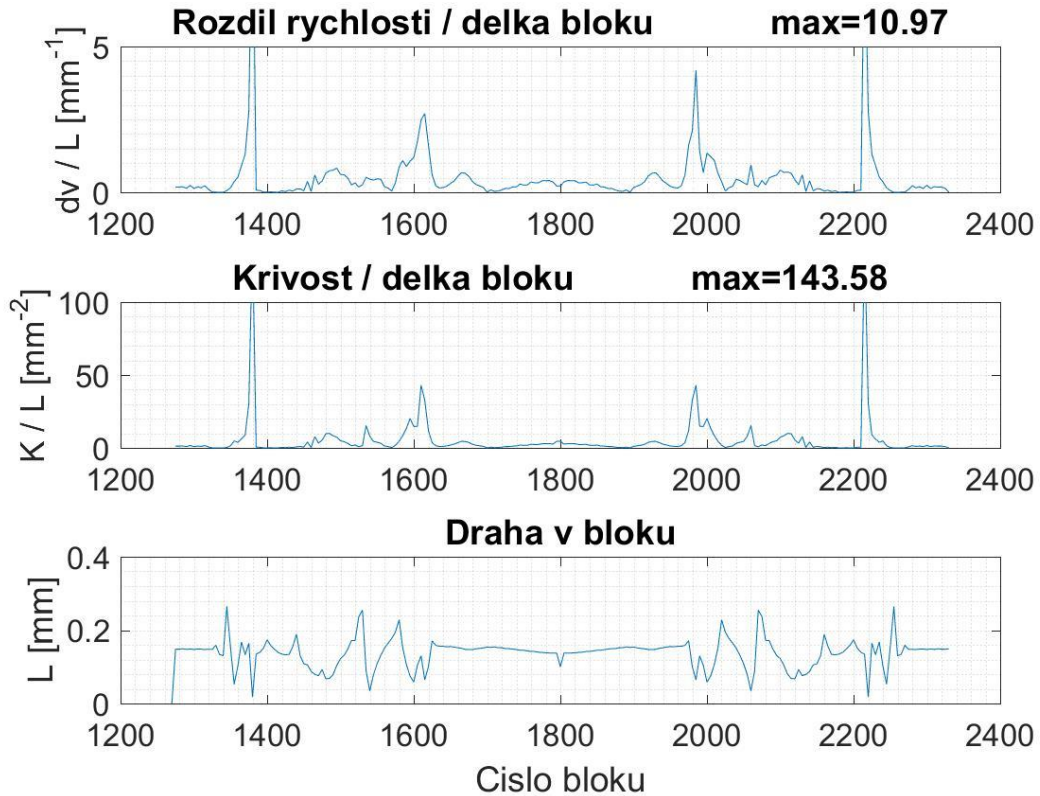




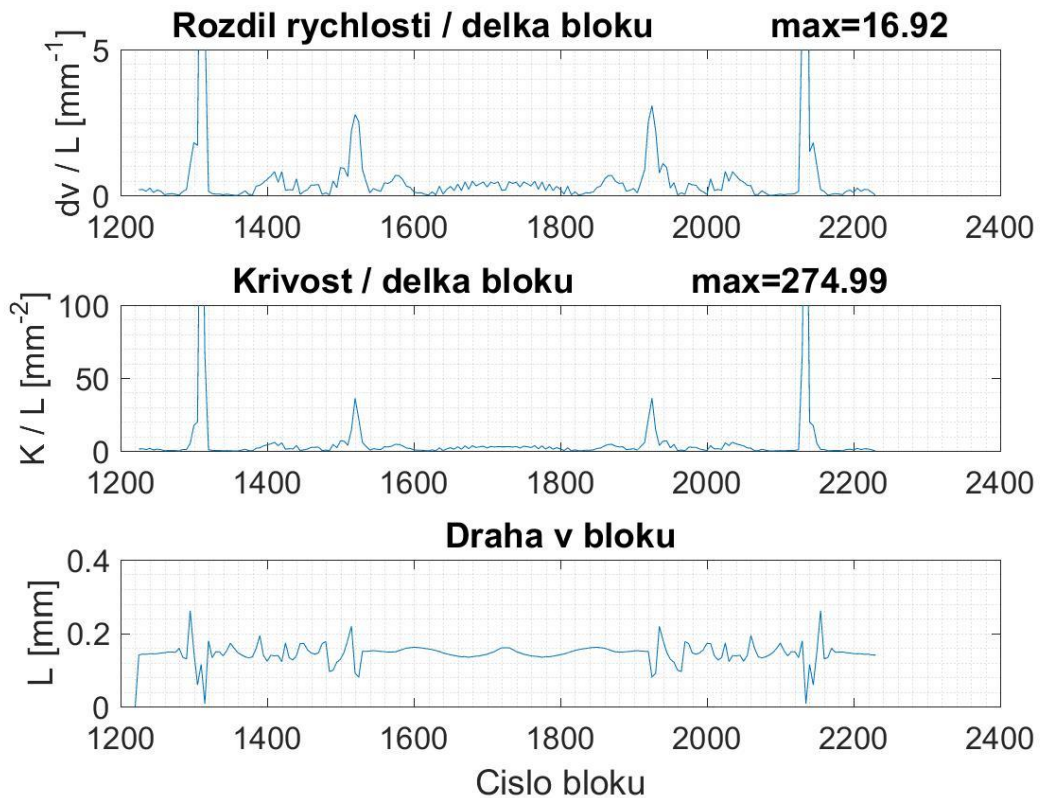


Příloha 3: Příklad grafů z analýzy NC kódu (kompletní soubor grafů v el. příloze)

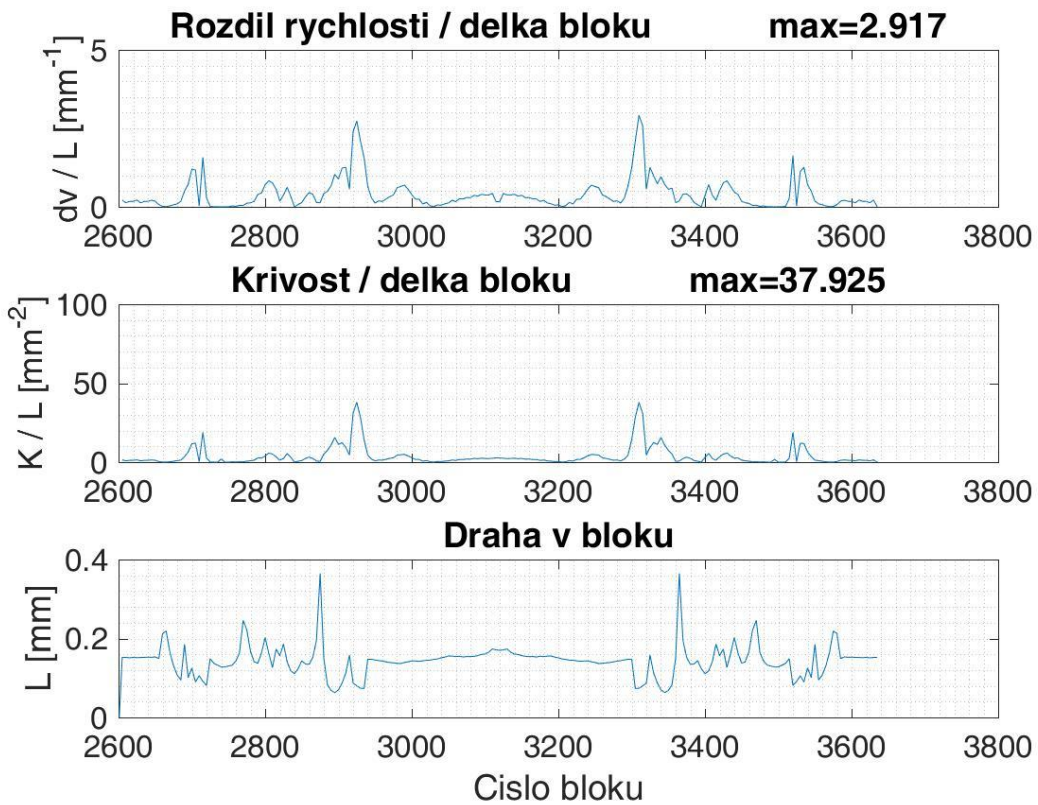
Nastavení c. N101



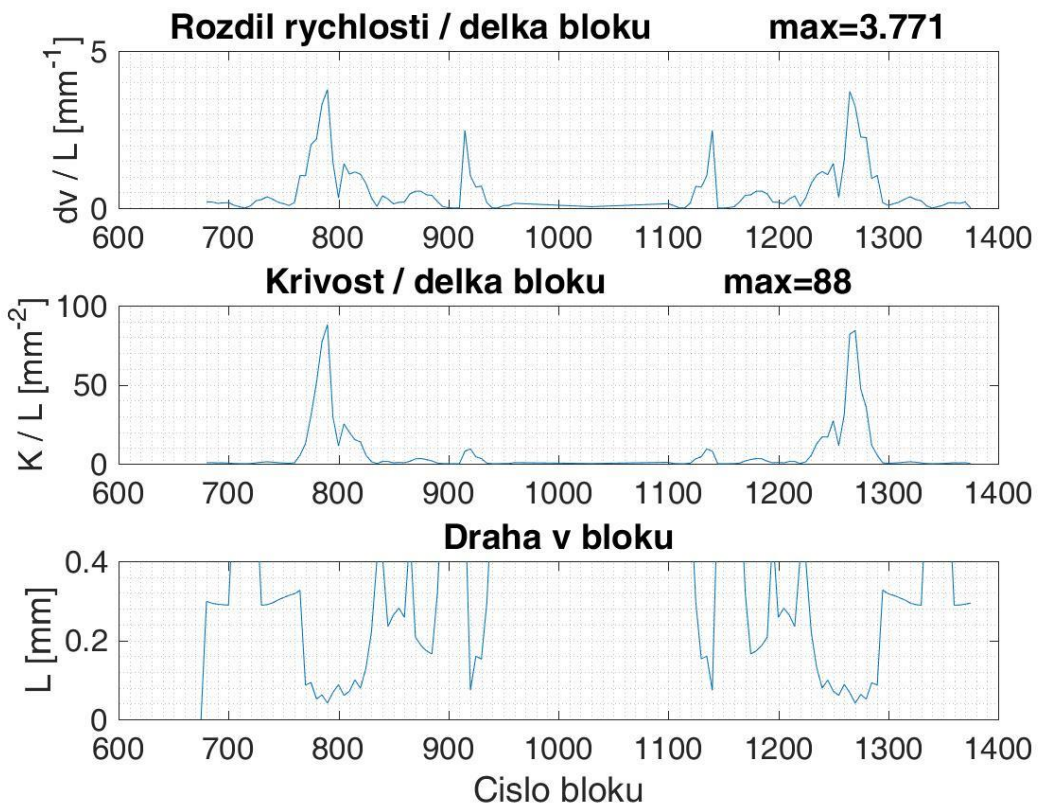
Nastavení c. N401



Nastavení c. N901



Nastavení c. N1301



Příloha 4: Příklad tabulky naměřených dat - základní nastavení dráhy (kompletní soubor dat v el. příloze)

parametr	CAM	Funkce ŘS	Celkový čas [s]						
			0,01	0,0075	0,005	0,003	0,0025	0,002	0,001
(základ)	NX	_S	1,62	1,602	1,628	1,646	1,606	1,642	1,544
		_T	1,242	1,378	1,258	1,218	1,38	1,348	1,254
		_U	1,128	1,192	1,13	1,122	1,1	1,2	1,152
		_V	3,102	3,216	3,272	3,59	3,668	3,894	4,74
	SLD	_S	1,905	1,646	1,514	1,888	1,73	1,652	1,862
		_T	1,294	1,256	1,23	1,236	1,316	1,196	1,29
		_U	1,162	1,16	1,15	1,14	1,118	1,09	1,13
		_V	2,404	2,446	2,51	2,766	2,958	2,986	3,452

Polohová odchylka [mm]		Tolerance CAM																					
parametr	CAM	Funkce řS	0,01			0,0075			0,005			0,003			0,0025			0,002			0,001		
			X	Z	Celk.	X	Z	Celk.	X	Z	Celk.	X	Z	Celk.	X	Z	Celk.	X	Z	Celk.	X	Z	Celk.
-S	average	0,137	0,253	0,288	0,096	0,271	0,288	0,092	0,258	0,274	0,090	0,264	0,279	0,096	0,270	0,286	0,095	0,265	0,282	0,100	0,278	0,296	
		1,054	0,799	1,323	1,055	0,802	1,325	1,058	0,786	1,318	0,917	0,790	1,210	1,054	0,770	1,305	1,054	0,790	1,317	1,056	0,810	1,331	
-T	average	0,163	0,304	0,345	0,161	0,301	0,342	0,118	0,336	0,356	0,120	0,341	0,362	0,163	0,304	0,345	0,115	0,325	0,344	0,116	0,328	0,348	
		1,056	0,865	1,365	1,056	0,865	1,365	1,059	0,864	1,366	1,055	0,859	1,360	1,056	0,852	1,357	1,055	0,868	1,366	1,056	0,845	1,352	
NX	average	0,188	0,338	0,387	0,181	0,338	0,383	0,127	0,361	0,383	0,127	0,363	0,385	0,179	0,335	0,379	0,120	0,341	0,361	0,123	0,349	0,370	
		1,058	0,851	1,358	1,056	0,849	1,355	1,058	0,847	1,355	1,055	0,853	1,357	1,056	0,845	1,352	1,055	0,849	1,354	1,056	0,844	1,352	
-V	average	0,052	0,142	0,151	0,078	0,145	0,164	0,052	0,142	0,151	0,047	0,130	0,139	0,070	0,128	0,146	0,044	0,120	0,128	0,036	0,099	0,106	
		1,071	0,302	1,113	1,067	0,303	1,109	1,067	0,275	1,102	1,066	0,310	1,110	1,066	0,297	1,107	1,066	0,315	1,111	1,069	0,294	1,109	
(zaklad)	average	0,064	0,251	0,259	0,073	0,287	0,296	0,078	0,315	0,324	0,064	0,252	0,260	0,070	0,276	0,285	0,072	0,282	0,291	0,065	0,256	0,264	
		0,270	0,819	0,862	0,278	0,762	0,811	0,275	0,814	0,860	0,238	0,801	0,836	0,261	0,799	0,840	0,268	0,772	0,817	0,258	0,778	0,819	
-T	average	0,090	0,354	0,365	0,093	0,363	0,375	0,091	0,368	0,379	0,096	0,373	0,386	0,091	0,353	0,364	0,097	0,377	0,389	0,091	0,356	0,367	
		0,331	0,867	0,929	0,361	0,863	0,935	0,394	0,855	0,941	0,364	0,859	0,933	0,386	0,865	0,947	0,367	0,837	0,913	0,400	0,864	0,952	
SLD	average	0,098	0,394	0,406	0,097	0,389	0,400	0,095	0,389	0,400	0,098	0,393	0,405	0,100	0,400	0,413	0,101	0,408	0,420	0,098	0,394	0,406	
		0,483	0,847	0,975	0,526	0,843	0,994	0,532	0,843	0,997	0,531	0,842	0,996	0,531	0,850	1,002	0,481	0,850	0,977	0,455	0,851	0,965	
-V	average	0,053	0,205	0,211	0,052	0,200	0,207	0,049	0,194	0,200	0,046	0,176	0,182	0,043	0,166	0,171	0,042	0,161	0,166	0,037	0,142	0,147	
		0,192	0,643	0,671	0,192	0,627	0,656	0,223	0,630	0,668	0,204	0,657	0,688	0,194	0,625	0,654	0,194	0,612	0,642	0,193	0,615	0,645	