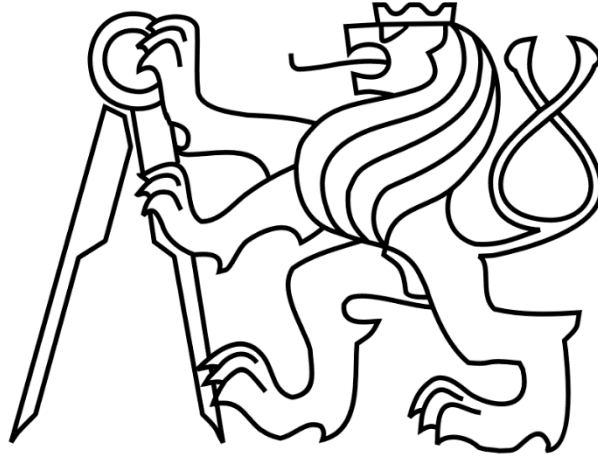


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

**Simulační model obráběcího stroje v CAM systému Siemens NX  
s verifikací strojního času**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zbíral** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **487149**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Simulační model obráběcího stroje v CAM systému Siemens NX s verifikací strojního času**

Název bakalářské práce anglicky:

**Simulation model of a machine tool in a Siemens NX CAM system with verification of machine time**

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Student bude pracovat na vytváření simulačního modelu stroje v prostředí CAM systému Siemens NX pro možnosti verifikace strojních časů, tedy s emulátorem řídicího systému. Pro predikci strojních časů budou použita reálná nastavení kinematických parametrů strojních os obráběcího stroje. Osnova: A) Rešerše možností simulace obrábění s predikcí strojního času a vytváření simulačních modelů strojů s emulátorem řídicího systému v Siemens NX CAM, B) analýza nastavení kinematických parametrů v řídicím systému stroje Siemens Sinumerik 840D: omezení max. rychlostí os, max. zrychlení, max ryvů a dalších funkcí, které mají vliv na výsledný čas, C) Analýza možností zahrnutí kinematických parametrů pohonů do emulátoru řídicího systému v NX, D) Vytvoření simulačního modelu stroje MAS SP430 s emulátorem řídicího systému v NX, E) Návrh drah nástrojů a porovnání strojního času získaného ze simulace obrábění s modelem stroje s kinematickými parametry v NX vůči času získaného na reálném CNC stroji, F) Analýza možností verifikace strojních časů v Siemens NX CAM. Rozsah textové části: 40 - 60 stran; Rozsah grafické části: záznamy z měření na stroji.

Seznam doporučené literatury:

1) HÁJÍČEK, Z.: Testování virtuálního NC stroje v prostředí PLM systému NX. Plzeň, 2013. 83 s. Diplomová práce na ZČU v Plzni. Fakulta strojní. Katedra technologie obrábění. 2) RYBÍN, J.: Automatické řídicí systémy. 1. vydání. Praha: ČVUT, 1991. 150 s. ISBN 80-01-00694-8.; 3) SINUMERIK 810D/840D Manual, Tool and Mold Making. ([https://support.industry.siemens.com/cs/document/28787329/sinumerik-840d-840di-810d-802d-sl%3A-tool-and-mold-making\(3-axes\)?dl=0&lc=en-US](https://support.industry.siemens.com/cs/document/28787329/sinumerik-840d-840di-810d-802d-sl%3A-tool-and-mold-making(3-axes)?dl=0&lc=en-US))

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

**Ing. Tomáš Kratěna, ústav výrobních strojů a zařízení FS**

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

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

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## **Prohlášení**

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

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

V Praze dne 23.7.2021

.....

podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Petru Vavruškovi, Ph. D. za poskytnutí informací ohledně problematiky, rady, konzultace a příjemnou spolupráci. Dále bych rád poděkoval všem pracovníkům Ústavu výrobních strojů a zařízení, zejména Ing. Tomáši Kratěnovi, za pomoc s tvorbou simulačního modelu a Ing. Matěji Pešice za asistenci p experimentem. V neposlední řadě patří poděkování všem mým blízkým, rodině a přítelkyni za podporu při tvorbě této práce.



## Anotace

Autor:	Jan Zbíral
Název BP:	Simulační model obráběcího stroje v CAM systému Siemens NX s verifikací strojního času
Rozsah práce:	69 str., 44 obr., 7 tab.
Školní rok zhotovení:	2021
Škola:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135, Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí BP:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Tomáš Kratěna
Zadavatel:	ČVUT FS, Ú12135
Využití:	Predikce strojního času užitím simulačního modelu obráběcího stroje v CAM systému Siemens NX
Klíčová slova:	Simulace obrábění, Simulační model, Strojní čas, Emulátor řídicího systému, CSE driver, Virtuální stroj, NC program, Siemens NX
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá problematikou predikování strojních časů při simulaci obrábění řízené NC programem s využitím modelu obráběcího stroje. Takový model byl vytvořen pro stroj Kovosvit MAS SP 430, včetně úprav emulátoru ŘS pro zpřesnění predikce strojního času. Nakonec byl proveden experiment zjišťující odchylku strojních časů mezi simulací a realitou.



## Annotation

Author:	Jan Zbírál
Title of bachelor dissertation:	Simulation model of a machine tool in a Siemens NX CAM system with verification of machine time
Extend:	69 p., 44 fig., 7 tab.
Academic year:	2021
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135, Research Centre of Manufacturing Technology
Supervisor:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Consultant:	Ing. Tomáš Kratěna
Submitter of the Theme:	CTU FME, RCMT
Application:	Machining time prediction using virtual machine tool in CAM system Siemens NX
Key words:	Machining simulation, Simulation Model, Machining time, Simulation engine, CSE simulation engine, Virtual machine tool, NC program, Siemens NX
Annotation:	This bachelor's thesis deals with predicting of machining times with using NC program driven machining simulation, which takes into account machine tool kinematics. This type of simulation model was created for machine Kovošvit MAS SP 430, including editing simulation engine for more precise machining times predictions. Finally the experiment, which showed differences in machining times between simulation and reality was carried out.



## Seznam zkratek

Zkratka	Význam anglicky	Význam česky
ANN	Artificial Neural Network	Umělá neuronová síť
CAD	Computer Aided Design	Počítačem podporované konstruování
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačem podporovaná výroba
CL	Cutter Location	Poloha nástroje
CNC	Computer Numerical Control	Počítačové numerické řízení
CSE	Common Simulation Engine	Simulační jádro
ISO	International Organization for Standardization	Mezinárodní organizace pro normalizaci
ISV	Integrated Simulation and Verification	Integrovaná simulace a ověření
MTB	Machine Tool Builder	Tvořič výrobního stroje
NC	Numerical Control	Numerické řízení
PLC	Programmable Logic Controller	Programovatelný logický automat
PLM	Product Lifetime Management	Správa životního cyklu produktu
ŘS		Řídicí systém
TPS	Tool Path Simulation	Simulace nástrojových drah
VNCK	Virtual NC Controller Kernel	Jádro virtuálního ŘS



## Seznam použitých veličin

Značka	Název	Jednotka
t	čas	s
L	délka	mm
f	posuv za minutu	mm/min





## Obsah

1	Úvod a cíle práce.....	11
2	Problematika přípravy a odbavení NC kódu .....	12
2.1	Obrábění .....	12
2.2	Skladba NC programu.....	13
2.3	Tvorba NC programu .....	14
2.4	Postprocesor a řídicí systém.....	15
3	Rešerše možností simulace obrábění s predikcí strojního času.....	17
3.1	Digitální dvojče.....	17
3.2	Druhy simulací .....	19
3.3	Výhody použití simulací .....	20
3.4	Možnosti predikce strojních časů .....	22
3.4.1	Využití neuronových sítí .....	22
3.4.2	Virtuální CNC.....	23
3.4.3	Simulační model stroje .....	24
3.5	Softwarové řešení pro tvorbu simulačních modelů .....	25
3.5.1	CAD/CAM software a PLM řešení .....	25
3.5.2	Specializovaná softwarová řešení .....	27
3.6	Výpočet strojních časů .....	28
3.6.1	Manuální výpočet strojního času .....	28
3.6.2	Řešení v softwaru.....	29
3.7	Kinematické parametry v Siemens NX CAM.....	30
3.8	Výměny nástrojů .....	33
3.9	Analýza nastavení kinematických parametrů v ŘS Sinumerik 840D ...	33
3.10	Shrnutí rešerše .....	36
4	Návrh variant řešení predikce strojního času.....	37
4.1	Interpolátor v postprocesoru – Varianta A.....	37
4.2	Využití řídicího systému – Varianta B.....	38
4.3	Simulační model – Varianta C.....	38
4.4	Výběr varianty .....	39
5	Tvorba simulačního modelu stroje MAS SP 430 s emulátorem ŘS.....	41
5.1.1	Představení stroje.....	41
5.2	Testy citlivosti.....	41



---

5.3	Simulační model .....	43
5.3.1	Podklady pro simulační model.....	43
5.3.2	Machine tool builder .....	49
5.3.3	Emulátor řídicího systému (CSE driver) .....	54
6	Ověření simulačního modelu pro predikci strojních časů .....	60
6.1	Testovací dráhy nástrojů.....	60
6.2	Měření času na stroji.....	63
6.3	Měření času v simulaci.....	64
6.4	Vyhodnocení možnosti predikce strojního času .....	64
7	Závěr .....	68
	Seznamy .....	70



# 1 Úvod a cíle práce

Obrábění je proces, při kterém dochází k odebrání materiálu za účelem dosažení požadovaného tvaru součásti. Pro zvýšení celkové efektivity se používají CNC (Computer Numerical Control) obráběcí stroje, které se liší od konvenčních strojů tím, že jsou pohony strojních os ovládány pomocí počítače (řídící systém). Jelikož jsou CNC obráběcí stroje drahé, je potřeba co nejvíce eliminovat možnost poškození těchto strojů. Pro tento účel lze použít simulační modely obráběcích strojů, které jsou řízeny NC (Numerical Control) programem. Takový model je schopen odhalit možné kolize ještě před nahráním programu do stroje. Strojní hodina CNC stroje má vysokou hodnotu. Při využití určitého softwarového nástroje pro predikci strojního času lze například sledovat, jak moc lze NC program optimalizovat nebo předem odhadnout, jak dlouho bude trvat vyrobít danou výrobní dávku, což je výhodné z hlediska plánování. Simulovat výrobní procesy lze na několika úrovních. Nejčastější je simulace v CAM na úrovni CL dat. Tato simulace však není moc přesná, zvláště pro predikci strojních časů, jelikož nepracuje s kinematickými parametry stroje a také nepokrývá vlivy postprocesoru a řídicího systému. Vyšším stupněm je simulace řízená NC programem, která dříve zmíněné aspekty již zahrnuje. [1]

Cílem této práce je provést rešerši možností simulace obrábění s predikcí strojního času a vytváření simulačních modelů strojů s emulátorem řídicího systému v softwaru Siemens NX CAM. Dále analyzovat nastavení kinematických parametrů v řídicím systému Siemens Sinumerik 840D. V dalším kroku je zapotřebí analyzovat možnosti zahrnutí kinematických parametrů do emulátoru řídicího systému v Siemens NX CAM. Následně vytvořit simulační model stroje MAS SP 430 včetně emulátoru řídicího systému v Siemens NX CAM. Dalším bodem je navržení testovacích drah nástrojů a porovnání strojního času získaného ze simulace a času získaného z reálného stroje. Nakonec provést analýzu možností verifikace strojních časů v Siemens NX CAM.

## 2 Problematika přípravy a odbavení NC kódu

Následující řádky popisují základy obrábění, ale také postup tvorby NC programů, z čeho se NC program skládá a jaká je jeho cesta od vytvoření po pohyb stroje.

### 2.1 Obrábění

Obrábění je proces, při kterém dochází k odstraňování přebytečného materiálu z polotovaru součásti tak, aby vznikla součást požadovaného tvaru, rozměrů a jakosti. Tento proces probíhá v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Obrábění standardně dělíme na konvenční (třískové) a nekonvenční. Do nekonvenčního obrábění spadají například elektroerozivní technologie. Častější je konvenční obrábění. Při konvenčním obrábění odchází přebytek materiálu z řezného procesu ve formě třísky. Do této skupiny se řadí například soustružení nebo frézování. Soustružením se vyrábějí převážně dílce rotačního charakteru. Stroj se nazývá soustruh, nástrojem může být například soustružnický nůž. Hlavní řezný pohyb koná obrobek - rotační. Nástroj koná vedlejší řezný pohyb - přímočarý. Technologií frézování se naopak vyrábějí převážně dílce s rovinnou charakteristikou. V tomto případě je strojem frézka. Nástrojem může být fréza – vícebřitý rotační nástroj. V případě frézování hlavní řezný pohyb koná nástroj a jedná se o pohyb rotační. Vedlejší pohyb koná obrobek a je buďto přímočarý nebo rotační.[2]

Dříve se používaly obráběcí stroje manuální. Konvenční soustruh je zobrazen vlevo na obr. 2.1. Tyto stroje ovládal pracovník přímo pomocí ovládacích prvků. S postupem doby se začaly objevovat stroje numericky řízené (NC stroje). Nejdříve byly jednoduché a jako médium pro přenos programu do stroje se využívaly děrné štítky a děrné pásy. S vývojem počítačových technologií se od papírových štítků upustilo a využívá se k přenosu informací do stroje počítačového programu. Dnes jsou na trhu velmi pokročilé CNC obráběcí stroje, které mají mnoho přídatných strojních os, dokážou interpolovat několika osami najednou a často jsou natolik multifunkční, že ani nelze přesně určit jaké koncepce stroj je. V tom případě se jedná o tzv. multifunkční stroj. Vpravo na obr.2.1 lze vidět jednoduchý CNC soustruh. Stroje manuálně ovládané mají stále své místo. Využívají se hlavně při kusové výrobě nebo při různých údržbách,

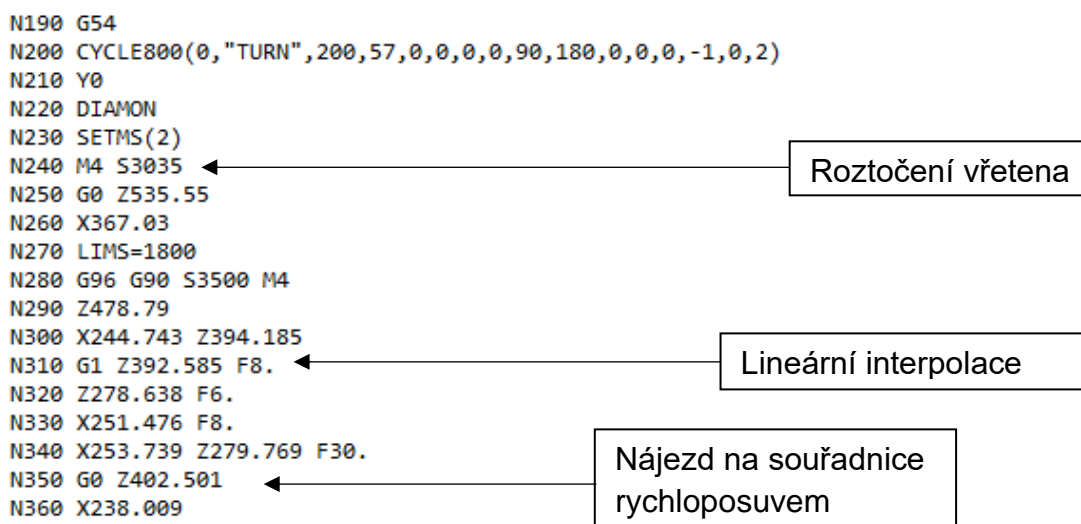
opravách atd. Jak již bylo řečeno, CNC obráběcí stroje jsou řízeny NC programem. NC program obsahuje veškeré informace o tom, co má stroj při obráběcím procesu udělat. Obsahuje dráhy nástrojů, rezné podmínky, informace o nástrojích a další funkce nutné pro správný běh stroje. NC program se může lišit dle použitého jazyka řídicího systému stroje (např. G-kód (ISO-kód), Dialog atd..). Skladbou NC programu se ve zkratce zabývá další kapitola. [3]



Obr. 2.1: Vlevo konvenční soustruh [4], vpravo CNC soustruh [5]

## 2.2 Skladba NC programu

Struktura NC programu se liší dle použitého jazyka řídicího systému, základní rysy jsou však shodné. NC program je charakterem textový soubor. Řádky se nazývají věty (bloky) a ve větách jsou slova (adresy), která obsahují například souřadnice pro pohyb. NC program se odbavuje po řádcích (větách, blocích). V ISO kódu se používají dva druhy úvodních znaků pro rozlišení typu funkcí. Funkce začínající G se nazývají přípravné. Pod tuto skupinu spadají příkazy pro pohyb např. G00, G01 – lineární interpolace. Dále do přípravných funkcí spadají funkce pro nastavení pracovních rovin, obrobkových souřadných systémů atd. Druhou skupinou jsou funkce pomocné. Pomocné funkce začínají písmenem M a starají se o funkce stroje. Pomocné funkce řídí roztočení a zastavení vřetena, výměny nástrojů, spouštění přívodu chladicí kapaliny atp. [1] Příklad NC programu zobrazuje obr.2.2. V tomto případě se jedná o NC program pro řídicí systém Sinumerik 840D.

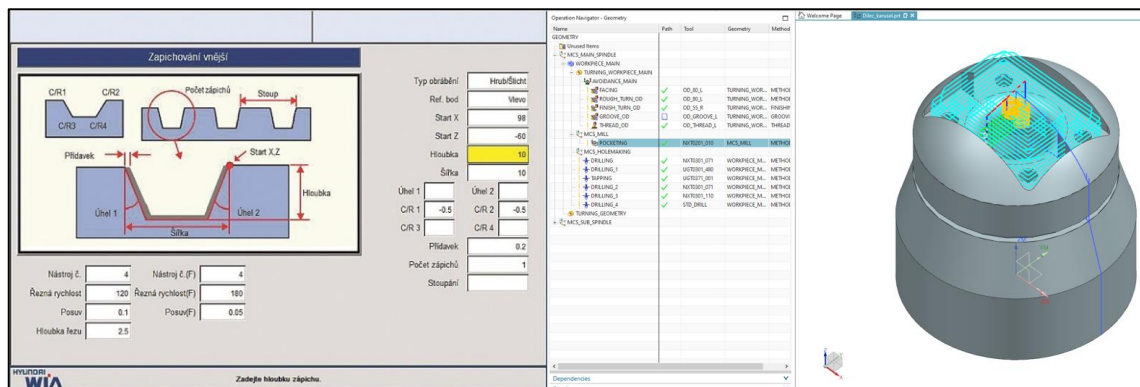


Obr. 2.2: Příklad NC programu

## 2.3 Tvorba NC programu

NC programy lze v zásadě vytvářet třemi způsoby. Manuální programování spočívá v zapisování řádku jeden po druhém, slovo po slově. Programátor však musí znát kompletně celou syntaxi NC kódu. Tento způsob se používá na jednoduché součásti nebo při upravování programu získaném například z CAM prostředí. Programovat složité součásti ručně je velmi náročné a také zdoluhavé. Ručně programovat lze buďto na PC v editoru NC programů či v textových editorech. Dalším způsobem, jak získat NC program, je dílenské programování, tento způsob je ukázán na obr. 2.3 vlevo. Jak již název napovídá, jedná se o způsob, kterým se NC program vytváří přímo na výrobním stroji. Díky předdefinovaným cyklům a dialogovému způsobu zadávání informací do stroje se jedná o poměrně snadný způsob, jak získat NC program, a to i pro středně složité obrobky. Poslední možností je použití CAM software. CAM programy používají pro generování drah nástrojů model obrobené součásti, tak jako je tomu na obr. 2.3 vpravo. Je nutné mít technologa, ovládajícího daný CAM software, který připraví NC kód a ten se poté nahraje do obráběcího stroje. Pro složité obrobky a víceosé stroje je však použití CAM softwarů výhodnější a často jedinou cestou, přestože existuje mnoho cyklů pro programování víceosých a komplexních operací. CAM software uvnitř pracuje pouze s vnitřními daty nástrojových drah tzv. CL (Cutter Location) daty. Tato data nejsou NC program a stroj s nimi neumí pracovat. Je nutné tedy tato CL data přeložit do NC programu, kterému stroje rozumí. K této operaci se využívá postprocesoru. Cesta

NC programu od modelu po vyrobenou součást je podstatně složitější a je podrobněji popsána v další kapitole. [1]



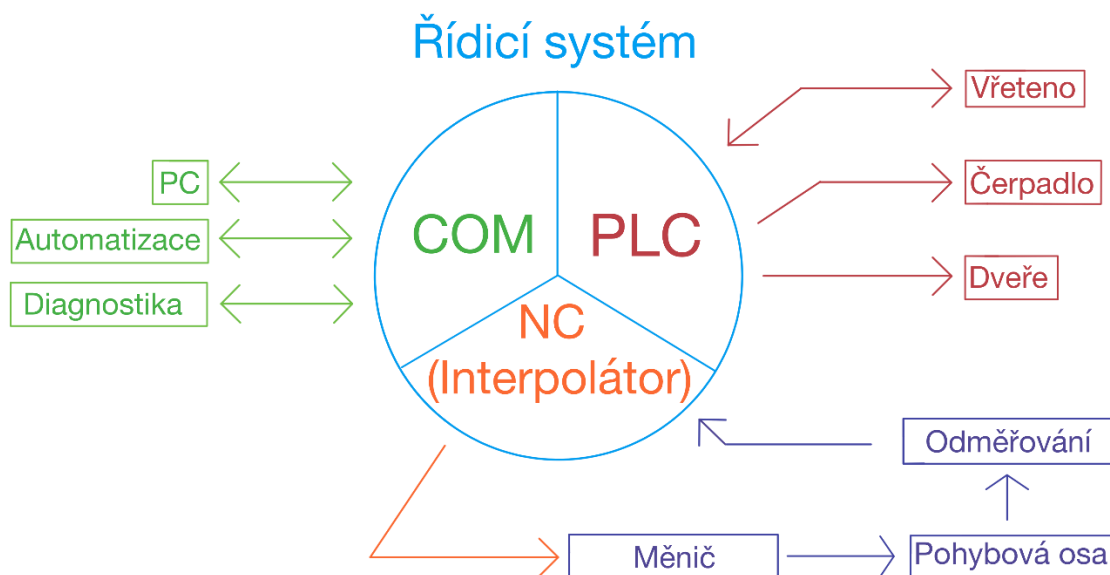
Obr. 2.3: Dílenské programování [6] (vlevo), prostředí NX CAM (vpravo)

## 2.4 Postprocessor a řídicí systém

Než vůbec dojde k jakémukoliv pohybu stroje, musí NC kód projít několika procesy. Pokud se tvoří manuálně nebo pomocí dílenského programování, je NC program rovnou hotov a připraven k odbavení. Při tvorbě programu pomocí CAM softwaru je prvním krokem tvorba operací v prostředí CAM. Následuje přeložení interních CL dat na NC program. Tento překlad provádí postprocessor. Po přeložení se NC program již může nahrát do řídicího systému stroje. Postprocesory jsou vytvářené na míru danému stroji, liší se také pro různé řídicí systémy, jelikož pracují s různou syntaxí. Mezi nejznámější řídicí systémy patří např. Sinumerik, Heidenhain nebo Fanuc.

Řídicí systém se skládá z tří hlavních částí (COM, PLC a NC). COM (Communication) část zajišťuje komunikaci s okolním prostředím stroje. PLC (Programmable Logic Controller) část zajišťuje ovládání tzv. agregátů. Většina M příkazů je adresována právě této části, řídí tedy například otáčky a směr vřetene, upnutí obrobků nebo zapnutí čerpadla pro chladicí kapalinu. Pro obrábění jsou však podstatné pohyby nástroje a obrobku. Tyto pohyby řídí NC část a jsou prováděny strojními osami, a to buďto lineárními nebo rotačními. Lineární strojní osa se skládá z lineárního vedení, nejčastěji kuličkového pohybového šroubu a určitého pohonu. Pohonem zde nejčastěji bývají servomotory a využívá se zapojení buďto do otevřené nebo uzavřené smyčky. Zapojení do uzavřené smyčky znamená, že pohon je neustále zpětně korigován odměřováním a zná

svou aktuální pozici. Při použití otevřené smyčky naopak pohon dostane pouze povel, o kolik jednotek se má posunout, ale jestli došlo ke správnému posunu se již nedozví, a tak nadále pracuje s tím, že dosáhnul zadané polohy, přestože se například kvůli vůlím nachází o několik milimetrů jinde. Rotační strojní osy jsou moderně poháněny prstencovými motory, hlavně díky jejich prostorové úspornosti. Další možností pohonu rotační osy je využití servomotoru se šnekovou převodovkou nebo jiným převodem. Pohonné jednotky pracují na základě pulzů. Tyto pulzy vytváří na základě NC programu třetí část řídicího systému, kterou označujeme NC a nachází se v ní interpolátor. Interpolátor, dle rozdílu aktuální pozice v souřadném systému od pozice požadované v řádku NC kódu, vypočte o kolik se jednotlivé osy musí pohnout a předá tuto informaci řídicím obvodům pohonů strojních os. Zde je důležité zmínit, že pokud má dojít k pohybu více než jedné osy zároveň, nejedná se o čistě lineární pohyb, ale dráha je interpolována mezi počátečním a koncovým bodem. Nástroj se tedy nepohybuje přesně po požadované dráze, ale aproximuje tuto dráhu lineárními pohyby, jejichž koncové body leží v určité tolerované vzdálenosti od požadované křivky. [7] Obr. 2.4 znázorňuje, z jakých hlavních částí se řídicí systém skládá.



Obr. 2.4: Skladba řídicího systému



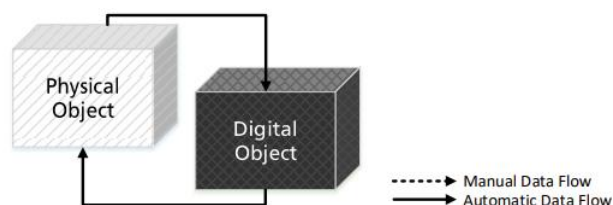
## 3 Rešerše možností simulace obrábění s predikcí strojního času

Tato kapitola popisuje, jaké možnosti má uživatel k dispozici pro simulaci obráběcích procesů. Jsou zde popsány druhy digitálních dvojčat a jaké další přístupy byly použity pro predikci strojních časů jinými autory.

### 3.1 Digitální dvojče

Digitální dvojče (angl. Digital Twin) je digitální model reálné entity. Tento přístup k digitalizaci výrobních procesů dokáže přinést zlepšení produktivity a například usnadnit práci údržby. Problém je s často špatným použitím klasifikace použitého digitálního modelu v dané aplikaci. Průmyslově jsou uznávané tři úrovně digitalizace entity. [8]

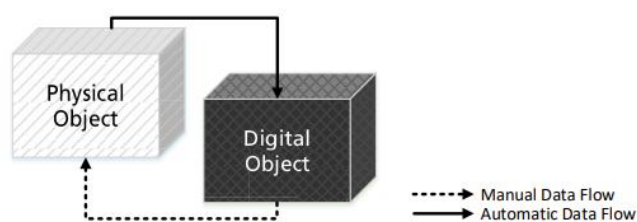
Nejsložitějším modelem je Digital Twin. Jedná se o digitální dvojče, tedy model, který je schopen obousměrně automaticky komunikovat se svým reálným protějškem. Schematicky je toto chování zobrazeno na obr. 3.1. Dokáže zobrazovat a vyhodnocovat vstupy z reálného prostředí a téměř v reálném čase zpětně regulovat a řídit reálný objekt. Při aplikaci na obráběcím stroji dokáže digitální dvojče na základě vstupu ze sensorů měřících deformaci stroje, například se změnou teploty, vyhodnotit, jaký dopad to bude mít na obráběnou součást a pokud by docházelo k větším odchylkám výroby, než je dovoleno, dojde zpětně signálem do reálného stroje ke korekci této skutečnosti. Implementace digitálního zrcadlení v nejvyšším stupni je však velmi náročná. Je potřeba velký výpočetní výkon a také vysokorychlostní komunikace mezi reálným a digitálním světem. [8]



Obr. 3.1: Datový tok v Digital Twin [8]

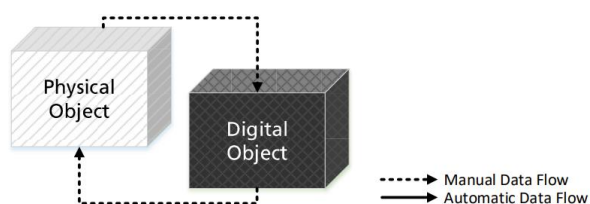
O něco nižším stupněm digitalizace je Digital Shadow (digitální stín). Tato úroveň propojení dokáže automaticky přenášet data z reálné entity do virtuálního

modelu, zpětná vazba probíhá pouze manuálně. Je možné data z reálného světa téměř v reálném čase zobrazovat a vyhodnocovat, nikoli regulovat reálný proces. Digitální strana umí maximálně doporučit úpravy procesu, které je potřeba zhodnotit a eventuálně manuálně provést na reálném procesu. Tento stupeň implementace se často používá pro monitorování linek a strojů. Pokud dojde k nějaké poruše, je možné se i na dálku podívat na digitalizovaný proces a přesně zjistit, kde nastal problém včetně vizualizace. Datový tok při využití této úrovně digitalizace popisuje obr. 3.2. [8]



Obr. 3.2: Datový tok v Digital Shadow [8]

Nejnižším stupněm digitalizace reálné entity je Digital Model (digitální model). Jedná se o zrcadlenou entitu reálného světa, která však není nijak automaticky propojena s reálným objektem. Veškerá data v obou směrech je nutné přenášet manuálně, jak je ukázáno na obr. 3.3. Je podstatně snazší na implementaci, výpočetní výkon a propustnost komunikace. Do této klasifikace spadá i simulační model obráběcího stroje, jenž je tématem této práce. Data jsou načtena z řídicího systému reálného stroje a manuálně zadána do virtuálního modelu. Pokud by se ve virtuálním prostředí na základě simulace ukázalo, že je možné stroj lépe optimalizovat, lze data do řídicího systému stroje opět zadat. Pro tento typ simulačních modelů je tato úroveň plně dostačující, jelikož se jedná hlavně o vizualizaci výrobního procesu, odhalení kolizí a přesnějšího odhadu strojního času, není potřeba automatického přenosu dat mezi dvojčaty. [8]



Obr. 3.3: Datový tok v Digital Model [8]



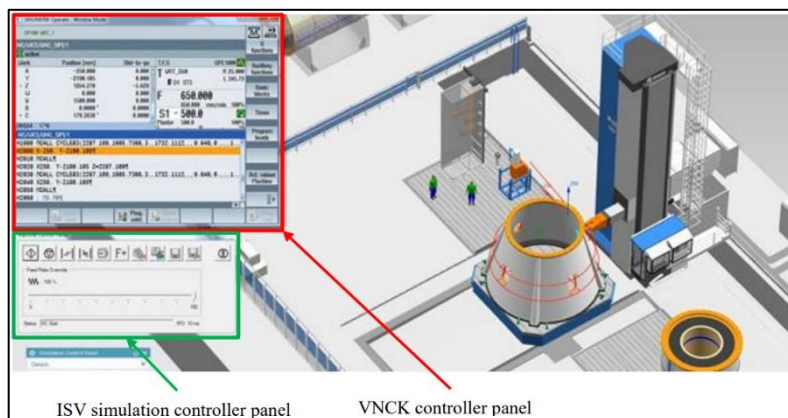
## 3.2 Druhy simulací

Dostupné simulační softwary umožňují rozdílné úrovně simulací. Nejjednodušším typem simulace je TPS simulace (Tool Path Simulate), jenž je založena pouze na drahách nástroje uvnitř prostředí CAM software a prakticky všechny CAM softwary tuto simulaci umožňují. Při spuštění tohoto typu simulace nedochází k žádnému generování NC programu. Veškerá simulace běží pouze na interních CL datech CAM prostředí. Zde se zpravidla simuluje pouze pohyb nástroje a obrobku, eventuálně upínacích prvků nebo přípravků. Je možné simulovat obrábění i s modelem stroje, jelikož je simulace založená na CL datech, není simulace korektní. Lze hlídat kolize těchto prvků, nikoli však kolize se strojem, jelikož model stroje v tomto případě není brán v úvahu. Tento typ nezohledňuje fyzikální možnosti stroje a strojních os. Každá strojní osa je charakterizována několika parametry – například: rozsahem, maximální rychlostí, zrychlením, ryvem a obecnou přesností polohování. Jelikož simulace počítá s tím, že na zadanou rychlost posuvu se stroj dostane ihned nebo s nějakým obecným zrychlením, které však většinou nesouhlasí s reálným obráběcím strojem. Výsledkem je nepřesná simulace, zvláště co se strojního času týká. [1, 9]

Pokud je žádoucí provádět přesnou simulaci, je nutné použít software, který umožňuje simulaci virtuálního obráběcího stroje, a to i s jeho fyzikálními parametry. Tato varianta simulace využívá emulátoru řídicího systému a díky tomu lze odbavovat NC programy pro provedení korektní simulace. Korektní nastavení emulátoru ŘS je předmětem této práce. Tento typ simulace není v CAM systémech příliš rozšířený, ale například v Siemens NX je obsažena pod názvem CSE (Common Simulation Engine) simulace. Díky tomu, že je při použití tohoto typu simulace v simulačním prostředí nahrán i zjednodušený model obráběcího stroje, lze kontrolovat kolize v celém pracovním prostoru, a to i kolize stroje se strojem samotným. Tato simulace bere v úvahu také kinematické vlastnosti jednotlivých strojních os. Při spuštění CSE simulace dojde nejdříve k vygenerování NC kódu přeložením vnitřních CL dat postprocesorem. Samotná simulace je poté řízena získaným NC kódem. Lze také simulovat obráběcí procesy z externích NC kódů. Jelikož je brán ohled na fyzikální vlastnosti strojních os, ale jsou zde zanesené i vlivy postprocesoru a interpolátoru,

výsledná simulace je mnohem blíže realitě. Pokud jsou nastaveny shodné hodnoty na virtuálním stroji jako na stroji skutečném, jsou vypočtené strojní časy mnohem blíže realitě. Toho se mimo jiné využívá při optimalizaci nastavení obráběcích strojů. [1, 9]

Nejvíce pokročilou simulací je VNCK (Virtual Numerical Control Kernel). Grafická simulace probíhá v CAM systému nebo ve specializovaném prostředí pro simulace obráběcích procesů (např. Siemens NX). Souběžně je spuštěn virtualizovaný řídicí systém, stejný jako na reálném obráběcím stroji. Ten se stará o interpolaci drah, PLC funkce a vše ostatní, co dělá řídicí systém na reálném stroji. Náhled do takové simulace lze vidět na obr. 3.4. Komunikace mezi grafickou simulací a řídicím systémem je zajištěna modulem ISV (Integrated Simulation and Verification). Vzhledem k těmto skutečnostem je tento typ simulace velmi náročný na vytvoření a přípravu. Přesnost simulace i odhadu strojních časů je však velmi vysoká a lze ji považovat za přesný obraz reálného stroje. [1, 9, 10]

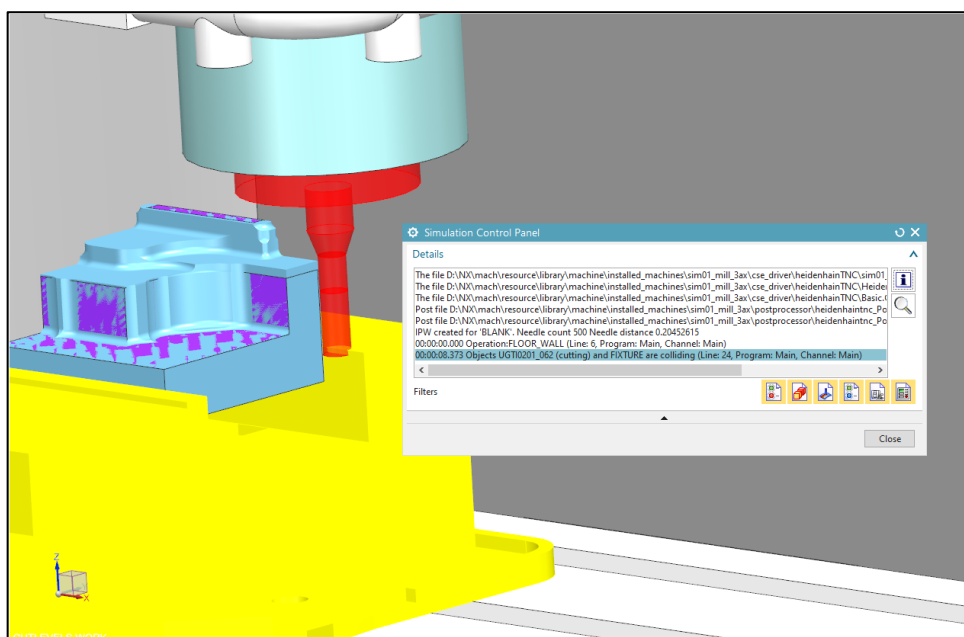


Obr. 3.4: Simulace obráběcího stroje VNCK [10]

### 3.3 Výhody použití simulací

S rostoucí komplexností obráběcích strojů roste i jejich cena. Použití adekvátní simulace obráběcího procesu dokáže odhalit chyby, které by mohly poškodit nebo zničit části stroje, nástrojů, nástrojových držáků, upínacích prvků a drahých polotovarů. Oproti základní simulaci uvnitř CAM prostředí řízené CL daty, je pokročilejší simulace řízená NC programem (CSE simulace) mnohem přesnější a blíže realitě. Je to dáno tím, že tato vyšší úroveň simulace bere v úvahu kinematické parametry jednotlivých strojních os a dokáže odhalit i chyby

vzniklé v postprocesoru či řídicím systému. Odhalená kolize nástroje a upínacího prvku při CSE simulaci je zobrazena na obr. 3.5. Možnost eliminovat zmíněné kolize, je jedním z hlavních důvodů pro použití simulace obrábění na počítači. Mezi další výhody patří například možnost odhalit problémy s vyrobiteľností obráběných dílců, a to ať už zvolenou technologií, či strojním vybavením dané firmy. Lze se tedy vyhnout zbytečným výdajům, které by vedly pouze ke zmetkům. Další ekonomická výhoda vzniká při zavádění nové součásti do výrobního programu. S novou součástí přichází nový NC program, často i nová konfigurace nástrojů a upínacích přípravků. Bez použití simulačního softwaru pro verifikaci NC programu s virtuálním strojem je potřeba provést tuto verifikaci přímo na reálném obráběcím stroji. To je prováděno například tak, že se NC program odbavuje s pomalejšími posuvy nebo po blocích. To přináší nežádoucí čas, kdy výrobní stroj nevyrobí. Při této verifikaci však stále může dojít k poškození nebo zničení nástrojů, upínacích prvků, polotovarů nebo dokonce strojů. Pokud proces verifikace proběhne bez potíží, je to relativně malé zdržení, ale pokud se během verifikace ukážou nějaké chyby, proces najetí výroby nové součásti se značně komplikuje. Toto už je povážlivé zdržení, které může být velmi nákladné. Ke značnému zkrácení této periody, při které výrobní stroj nic neprodukuje, lze použít virtuální simulace výrobních procesů. Takový přístup dokáže zamezit mnoha finančním ztrátám. [1, 11]



Obr. 3.5: Odhalení kolize nástroje a upínky v CSE simulaci



Mezi další výhody pokročilých simulací obráběcích procesů patří například virtuální kontrola obrobenej součásti. Software porovná rozměry obrobenej součásti na virtuálním stroji s původním CAD (Computer Aided Design) modelem a určí odchylky. Jelikož se při reálném obrábění nástroj nikdy nepohybuje absolutně přesně po generované dráze, ale využívá interpolace, může docházet k podřezání nebo naopak k nedořezání materiálu v daných místech. Díky tomu, že pokročilé simulace zohledňují kinematiku stroje a jsou řízené NC programem, nikoli CL daty (data vygenerovaných nástrojových drah v CAM prostředí), lze tyto jevy odhalit, ještě před spuštěním reálného stroje. Neposlední výhodou je (při správném nastavení simulačního software) možnost s relativně velkou přesností určit strojní čas pro výrobu dílce. Možnost simulování svého stroje je však atraktivní i pro firmy, které stroje vyrábějí. Díky simulaci celého stroje na určitém testovacím dílci lze odhalit velké množství chyb, jak v software části obráběcího stroje (postprocesor, interpolátor, nastavení strojních os), tak i konstrukční problémy obráběcího stroje. Pomocí simulačních prostředí lze také reálné obráběcí stroje optimalizovat a ladit tak, aby pracovaly v optimálním režimu, dle požadavků zákazníka. Pokročilé simulace pomáhají přiblížit se co nejvíce reálnému obrábění, odstranit chyby vzniklé například v CAM programech, optimalizovat proces obrábění, a to aniž by se musel zapnout stroj či přerušit jeho práce. [1, 9, 11]

### 3.4 Možnosti predikce strojních časů

Tato kapitola se zabývá možnostmi predikce strojních časů, které byly popsány v odborných člancích a pracích. Nabízí se hned několik možností, které se liší schopnostmi využití a náročností podkladů. V následujících kapitolách jsou popsány tři přístupy.

#### 3.4.1 Využití neuronových sítí

Výpočetně nejsložitější postup pro predikování strojního času je využití právě umělých neuronových sítí, strojového učení a umělé inteligence. Jedná se o specializované řešení, které se zaměřuje čistě na jeden aspekt virtuálního obrábění. Tento způsob je popsán v [12]. V uvedené práci bylo pro predikci strojního času a s tím spojené produktivity použita metoda ANN (Artificial Neural Network – Umělá neuronová síť). Tato technologie výpočtu je na pozadí velmi



složitá. Vychází z předem známých dat reálných časů obrábění a parametrů, při kterých takových časů bylo dosaženo. Na základě těchto znalostí, které se postupně samy vylepšují a obohacují (Machine Learning – Strojové učení), poté dochází k odhadu strojního času. Ve zprávě [12] je popsáno zkoušení mnoha nastavení a predikovaný čas se blížil reálnému, s odchylkou v řádech desítek sekund, což zobrazuje Tab. 3.1. [12]

Tab. 3.1: Výsledky metody ANN [12]

No.	Spindle speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of cut (mm)	Cycle time (min)	ANN cycle time	Error (%)
1	95	132	0.2	26.4	25.71	0.0069
2	565	200	0.2	38.7	41.01	-0.0231
3	950	98	1	15.7	15.96	-0.0026
4	24100	1360	1	35	35.62	-0.0062
5	24050	1390	0.4	5	5.31	-0.0031
6	35000	1750	0.2	8.02	8.36	-0.0034
7	40000	2120	3	12	11.91	0.0009
8	40500	2200	1.5	3.5	2.92	0.0058
9	20000	900	1.5	8.3	7.52	0.0078
10	10095	4040	1	14.7	12.56	0.0214
11	8514	5110	1	12.3	12.01	0.0029
12	12038	4820	0.4	3.6	3.02	0.0058
13	13403	5360	0.4	3.5	3.02	0.0048
14	11196	3360	1.5	4.2	3.5	0.007

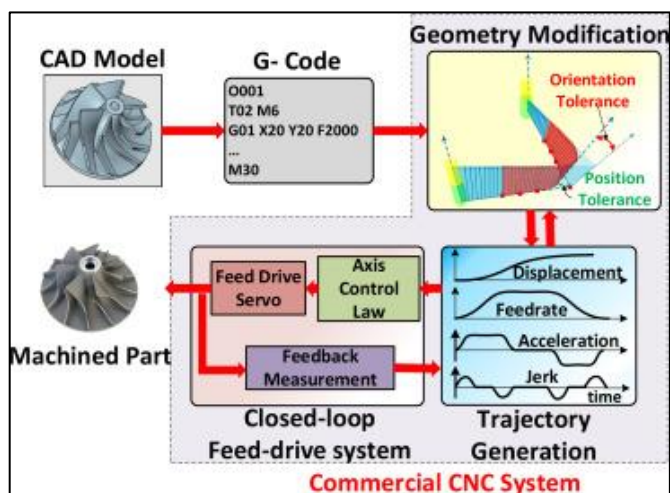
### 3.4.2 Virtuální CNC

Dalším přístupem, pro předvídání strojních časů, který byl publikován, je možnost využití virtuálního řídicího systému. Tento přístup je popsán v článku [13]. Jedná se opět o specializované řešení pro predikci strojních časů a dynamického chování stroje, které však neumožňuje například hlídat kolize. Velké odchylky při odhadech strojních časů vznikají právě v řídicím systému, kdy dochází ke čtení příkazů z NC programu a následné interpolaci. Způsoby řízení jednotlivých pohonů a s tím spjatých veličin jsou díky své složitosti a podstatnosti pro řídicí systém velmi střeženým tajemstvím jednotlivých výrobců řídicích systémů. V práci popisující tento způsob [13] bylo nutno vytvořit a naprogramovat virtuální řídicí systém, což vyžaduje komplexní softwarový vývoj. O to hůř, že tento virtuální řídicí systém musí pro co nejvyšší přesnost obsahovat, stejně jako je tomu u reálného, různé způsoby řízení a limitování os a stejně tak i komplexní

dělení drah nástrojů a vyhlazování. Použitím této metody se lze odhadem přiblížit k reálnému času s vysokou přesností. Přesnost však velmi záleží na komplexnosti vyvinutého ŘS (řídícího systému). Výsledky použití této metody ze zprávy [13] zobrazuje obr. 3.6. Schéma metody lze vidět na obr. 3.7. [13]

	3-Axis tool path	5-Axis tool path
Predicted	58 min 46 s	5 min
Measured	56 min 12 s	4 min 50 s

Obr. 3.6: Porovnání reálného a odhadnutého strojního času [13]



Obr. 3.7: Schéma toku dat virtuálního CNC [13]

### 3.4.3 Simulační model stroje

Posledním publikovaným přístupem je využití virtuálního simulačního modelu stroje. Z těchto tří zmíněných přístupů se jedná o nejuniverzálnější a také nejdostupnější řešení, jelikož je v mnoha případech dostupné v softwaru, který uživatel vlastní. Také jako jediný disponuje grafickou interpretací pohybu stroje a možností odhalovat kolize. Co se týká náročnosti na potřebné podklady, tak je potřeba mít k dispozici 3D model stroje, reálné kinematické parametry strojních os nebo přístup do ŘS daného stroje a postprocesor. Lze tedy pozorovat, že se





jedná o řešení pro daný stroj. Tento přístup byl použit v práci [1]. Zde autor vytvářel virtuální model stroje a pracoval s kinematickými parametry, na rozdíl od této práce, se však autor zabýval optimalizací reálného stroje, a ne přímo predikcí strojních časů.

### 3.5 Softwarové řešení pro tvorbu simulačních modelů

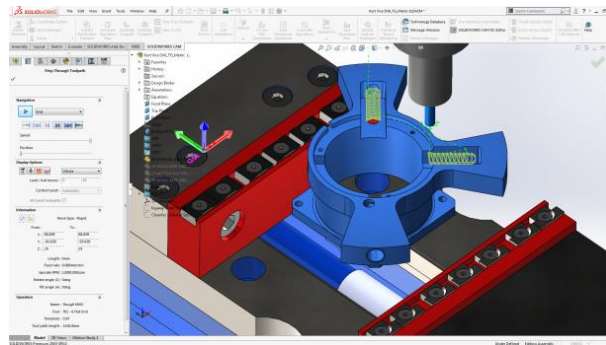
V dnešní době je snaha kompletní workflow zákazníka implementovat do jednoho softwarového řešení od jednoho výrobce. Takové řešení přináší hned několik výhod. Zaprvé ekonomickou, jelikož veškeré softwarové vybavení dodává jeden výrobce, tím pádem lze získat lepší cenovou nabídku. Druhou značnou výhodou je, že se vše od návrhu výrobku (CAD) přes návrh technologie výroby, vytvoření technologických podkladů (např. NC program) a simulace procesů výroby provádí v jednom prostředí. Tímto se softwarová řešení, která lze použít pro tvorbu simulačních modelů dělí na dva směry. Prvním směrem jsou právě integrovaná řešení, kdy je celý proces výroby zastřešen jedním software řešením (tzv. PLM – Product Lifecycle Management). Druhým směrem jsou softwary, které spadají spíše do specializovaného spektra a zabývají se především verifikací, optimalizací a simulací obráběcích procesů. [14, 15, 16]

#### 3.5.1 CAD/CAM software a PLM řešení

Výrobci CAD/CAM software je velké množství. Lze je rozdělit na dvě skupiny – software umožňující nativně simulovat obráběcí procesy na vyšší úrovni než CL dat a ty, které tuto možnost nemají.

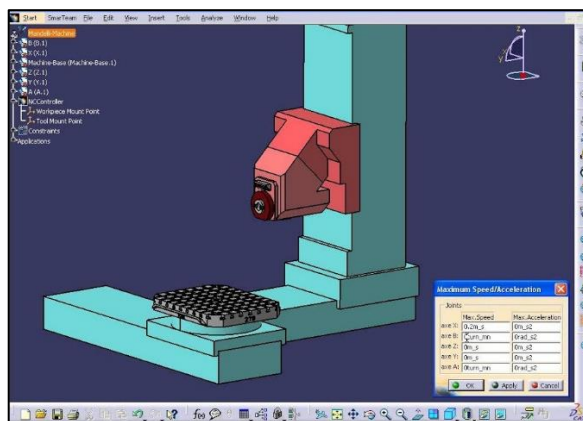
Mezi ty zástupce, kteří standartně neumožňují pokročilé simulace výrobních procesů patří například softwarová sada Autodesk Inventor nebo SolidWorks CAM od společnosti Dassault Systemes. Oba tyto programy umožňují nativně simulace řízené pouze CL daty. SolidWorks umožňují zadat hodnoty, které ovlivňují simulaci, jako například max. rozjezd os nebo maximální rychlost. Tato data však slouží pouze k vygenerování upozornění, že je například nastavena rychlost vyšší, než kterou stroj zvládne, nebo že je požadováno obrábění ve větším rozsahu, než který stroj umožňuje. Inventor je na tom ještě hůře, jelikož neumožňuje ani takovou funkci. Co se týká kontroly kolizí, tak díky absenci 3D modelu stroje umožňují takovou kontrolu jen mezi nástrojem, obrobkem a upínacími prvky. Vzhledem k tomu, že ani jeden z těchto softwarů neumožňuje

provádět simulace založené na NC programu, nejsou vhodné pro predikování strojních časů. Náhled do prostředí SolidWorks CAM je na obr. 3.8. [15, 17, 18]



Obr. 3.8: Prostředí SolidWorks CAM [18]

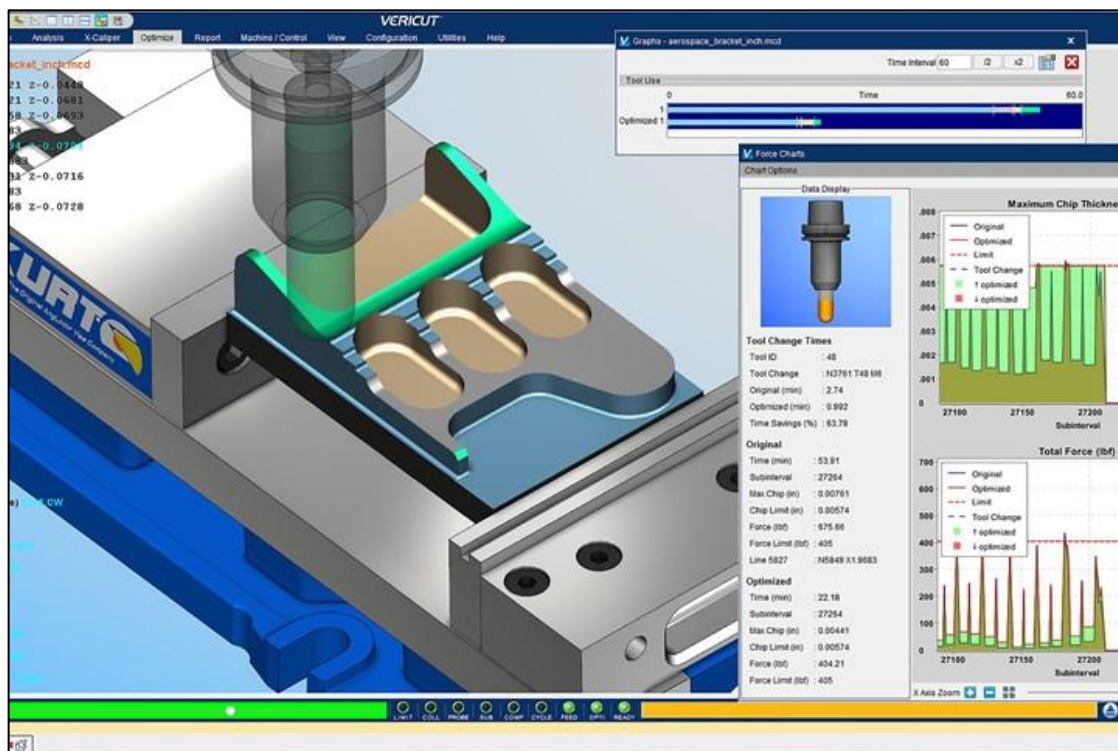
Do druhé skupiny, která již umožňuje pokročilé simulace obráběcích procesů, spadá několik produktů. Od již zmíněného výrobce Dassault Systemes sem patří software CATIA v5. Siemens má zástupce hned dva, a to Solid Edge a NX. Nejdříve co mají tyto software společné. Všechny umožňují pokročilé simulace obráběcích procesů řízené NC programem, včetně grafické interpretace stroje, nástroje a upínacích prvků. Konfigurovatelné jsou také kinematické parametry jednotlivých strojních os. Zde se začínají ukazovat první rozdíly. CATIA umožňuje nastavovat pouze maximální rychlost a zrychlení jednotlivých os. Jak vypadá prostředí CATIA v5 ukazuje obr. 3.9. Siemens oproti tomu u obou svých zástupců umožňuje nastavit parametrů mnohem více, kromě těch zmíněných ještě maximální ryv, Kv faktor, přesnost polohování. Mezi jednotlivými produkty od Siemens z hlediska možností není nijak velký rozdíl. Hlavním rozdílem je, že NX je mířen na velké společnosti s vysokými nároky, oproti SolidEdge je tedy jádro tohoto programu rychlejší, co do výpočtů a vizualizace. [14, 16, 19, 20]



Obr. 3.9: Prostředí Machine Tool Builder CATIA V5 (2014) [20]

### 3.5.2 Specializovaná softwarová řešení

Do této kategorie jsou zařazeny softwary, které nejsou primárně CAD/CAM programy, ale spíše se zaměřují na simulace obráběcích procesů. Mohou být do různé míry integrovatelné do CAM prostředí nebo se jedná o úplně nezávislé programy. Zpravidla nabízí tři hlavní funkce – verifikaci, optimalizaci a simulaci NC programu. Pod verifikací si lze představit schopnost odhalovat chyby v NC programu, ale také možnost odhalovat kolize. Optimalizace nabízí automatické nebo poloautomatické úpravy NC programu, tak aby byl proces výroby co nejefektivnější. Zástupci jsou Vericut, MachineWorks, NCSIMUL či ICAM. Jelikož jsou tato softwarová řešení velmi podobná a liší se jen v detailech, jsou popsána hromadně. Simulovat lze celé obráběcí stroje, a u některých zástupců i aditivní či hybridní výrobu, ba dokonce i simulace práce s kompozitními materiály – to vše řízené NC programem. Nabízejí tedy možnost simulace na úrovni CSE, obsahující kinematické parametry jednotlivých strojních os. Obrázek 3.10. ukazuje prostředí softwaru Vericut. [21, 22, 23, 24]



Obr. 3.10: Simulace obrábění s hlídáním řezných sil v prostředí Vericut [25]



## 3.6 Výpočet strojních časů

Čas, potřebný na výrobu jedné součásti, je velmi důležitá veličina, zvláště z ekonomického hlediska výroby. Tento celkový čas se dále dělí na čas hlavní a vedlejší. Hlavní čas popisuje dobu, po kterou je nástroj v kontaktu s obrobkem a je odebírána tříska. Vedlejší čas je vše ostatní potřebné k výrobě. Spadá sem upínání nástrojů, obrobků, manipulace s obrobky atd. Celková doba, která je potřeba na výrobu jedné součásti se nazývá jednotkový strojní čas. Z ekonomického hlediska je snaha vedlejší časy co nejvíce snižovat, ať už zlepšením ergonomie práce, nebo použitím manipulačních prostředků. Ke snížení těchto vedlejších časů přispívá i použití CNC obráběcích strojů. [26]

Problematika výpočtu těchto časů je poměrně komplikovaná a závisí mimo jiné i na použitých strojích. Dříve, když se využívaly konvenční obráběcí stroje, strojní a vedlejší časy vypočítával, nebo určoval technolog v technologickém postupu. Nejpřesnějším způsobem získání strojních i vedlejších časů byl, a do jisté míry stále je, experiment. Jde o praktické měření časů, jak dlouho trvají jednotlivé úkony pro vyrobení jednoho dílce při reálném obrábění, upínání a manipulaci s obrobkem. Pokud není možné provést experiment, lze vedlejší časy určit dle tabulek pro vedlejší časy (tyto tabulky však vznikaly způsobem experimentu). Pro technologický postup součásti vyráběné na konvenčním stroji lze strojní čas počítat pomocí vzorců. Pro danou technologii (např. soustružení, frézování atd.) jsou definované vzorce, díky kterým lze strojní čas jednotlivých úseků vypočítat. Přestože se vztahy liší pro různé technologie, všechny vychází ze stejného principu. Pokud je známá dráha, kterou musí nástroj urazit a rychlost, kterou se bude pohybovat, lze určit čas, nutný pro uražení této dráhy. Ukázkový příklad, k výpočtu strojního času při frézování, je níže. [2, 26]

### 3.6.1 Manuální výpočet strojního času

Je dán polotovar o šířce 40 mm a délce 100 mm. Pomocí frézovací hlavy o průměru 60 mm je potřeba frézovat vrchní část dílce. Jelikož je průměr nástroje větší než šířka obráběné plochy a pro zjednodušení je uvažováno možné 100% využití průměru nástroje, stačí tuto plochu přejet pouze jednou. Pokud je přímo definován posuv za minutu, jedná se o dostačující parametr. Pokud by byl definován posuv na zub, je nutné dále znát počet zubů nástroje a jeho otáčky,



k určení posuvu za minutu. Zde je definován pro jednoduchost přímo posuv za minutu  $f = 250 \text{ mm/min}$ . Dále je nutné rozlišit, zda se jedná o operaci hrubovací, či operaci na čisto. Pokud se jedná o frézování na čisto, musí nástroj pracovním posuvem přejet celou délku obrobku. Při hrubování je přednostní, co nejrychlejší odebrání velkého množství materiálu. V tomto konkrétním případě by tedy stačilo, aby nástroj přejel konec obrobku svou osou a už by mohl dál pokračovat rychloposuvem. Nyní je potřebné získat celkovou délku dráhy nástroje. Ta se skládá z vlastní délky obráběné plochy, délky nájezdu a délky přejezdu. Délky nájezdu a přejezdu jsou nutné, jelikož nelze rychloposuvem přijet přímo na začátek obráběné plochy a zároveň je nutné, zvláště při dokončování definovat určitou délku přejezdu nástroje za obrobenou plochu. V tomto případě je zvolena hodnota délky nájezdu  $l_n = 5 \text{ mm}$  a délka přejezdu  $l_p$  je definována jako polovina průměru nástroje. Parametr  $l_p$  je tedy roven  $30 \text{ mm}$ . Celková délka dráhy se určí dle rovnice (1):

$$L = l + l_n + l_p = 100 + 5 + 30 = 135 \text{ mm}, \quad (1)$$

kde:  $l$  je délka obráběné plochy,  $l_n$  je délka nájezdu před plochou a  $l_p$  je délka přejezdu za plochou. Všechny proměnné jsou v mm.

Vztah pro výpočet strojního času, při hrubování čelní frézou je:

$$t_s = \frac{L}{f} = \frac{135}{250} = 0,54 \text{ min}, \quad (2)$$

kde  $L$  je celková délka dráhy v mm a  $f$  je posuv v mm/min.

### 3.6.2 Řešení v softwaru

CAM systémy odhadují strojní čas v závislosti na komplexnosti použité metody. Pokud je použita metoda verifikace operace uvnitř CAM systému (řízený CL daty), je výpočet času velmi podobný manuálnímu výpočtu. Není tedy brán ohled na kinematické parametry strojních os, časové parametry řídicího systému a další vlivy ovlivňující finální čas. U CNC strojů se považuje za relevantnější čas cyklu (Cycle time), který odpovídá jednotkovému strojnímu času. Jedná se o čas od zmáčknutí tlačítka pro spuštění cyklu po jeho dokončení. Je tedy patrné, že tento čas je ovlivněn více faktory než posuvem a délkou dráhy, kterou je potřeba obrobit. Je zde nutné brát v úvahu faktory, například jak dlouho trvá výměna



nástrojů nebo jaká je časová prodleva roztočení vřetena. Jak vlastně probíhá výpočet u nejjednodušší možné simulace, a to simulace uvnitř CAM software, řízené CL daty? Pokud je požadován pohyb rychloposuvem (maximální rychlostí stroje) je považována změna polohy za okamžitou, tím pádem čas na vykonání tohoto pohybu je nulový. Stejně je tomu tak při výměně nástroje, v simulaci dojde k přehození nástrojů okamžitě a čas, který je na toto požadován v reálném procesu není započítán. Při lineární interpolaci musí stroj nejdříve z nějaké rychlosti (například nulové) pomocí daného zrychlení akcelarovat na rychlost odpovídající požadovanému posuvu. Výpočet cycle time při simulaci uvnitř CAM software však počítá s tím, že posuvové rychlosti je dosaženo okamžitě. Toto jsou největší zdroje chyb při odhadování času cyklu CNC stroje při simulaci prováděné na úrovni CL dat.

### 3.7 Kinematické parametry v Siemens NX CAM

Díky svým možnostem simulací obráběcích procesů v Siemens NX lze virtuální modely do vysoké míry konfigurovat. V této sekci jsou ukázány nastavitelné parametry, které mohou být použity ke zpřesnění výpočtu strojních časů. Prvně je nutné se v Siemens NX přepnout do modulu Machine Tool Builder. Poté se klikne na příslušnou strojní osu pravým tlačítkem myši a zvolí se možnost Edit Axis. V okně (viz obr. 3.11), které se otevře, lze v kategorii Dynamic Properties nalézt konfigurovatelné kinematické parametry strojní osy. Pokud nejsou hodnoty těchto parametrů známy z reálného stroje, lze je najít v parametrech řídicího systému. Níže jsou popsány jednotlivé nastavitelné parametry a v Tab. 3.2 jsou nalezené proměnné z řídicího systému Sinumerik 840D a HEIDENHAIN TNC640 odpovídající těmto parametrům (u TNC640 nebyly parametry ověřeny – nemusejí vést na správné výsledky).

Dynamic Properties	
Max Velocity [mm/s]	500.0000
Max Acceleration [mm/s^2]	4000.000
Max Deceleration [mm/s^2]	4000.000
Jerk Limit [mm/s^3]	-1.0000
Jump Velocity [mm/s]	0.0000
Kv	0.0000
Fine Precision [mm]	0.0100
Coarse Precision [mm]	0.0100

Obr. 3.11: Tabulka pro konfiguraci kinematických vlastností

### Nastavitelné parametry v Siemens NX CAM:

**Max. Velocity** – Maximální rychlost, kterou je schopna daná strojní osa vyvinout při souvislém pohybu. Pokud je volána programová funkce rychloposuvu, pohybuje se osa touto rychlostí. [27]

**Max. Acceleration (Deceleration)** – Maximální zrychlení(zpomalení), které je pro regulátory strojních os nastaveno. Zrychlení je časová derivace rychlosti a vyjadřuje, jak rychle lze změnit rychlost. [27]

**Jerk Limit** – Limit Rychlosti strojní osy. Rychlost je veličina popisující změnu zrychlení, matematicky se jedná o časovou derivaci zrychlení. [27]

**Jump Velocity** – Zde je definice trochu složitější. V Siemens NX má tento parametr jednotku mm/s, řídicí systém Sinumerik 840D však žádnou takovou proměnnou neobsahuje. Nejblíže souvisí parametr pod proměnnou MD32310 – \$MAX\_ACCEL\_OVL\_FACTOR, jedná se ale o bezrozměrný parametr, který popisuje, jak lze překročit hodnotu maximálního zrychlení v rámci jednoho systémového cyklu (IPO cycle). Hodnotu potřebnou pro zadání do prostředí NX lze získat z následujícího vztahu:

$$\text{Jump velocity [mm/s]} = \$MAX\_AX\_ACCEL \text{ [m/s}^2\text{]} * 1000 * (\$MAX\_ACCEL\_OVL\_FACTOR - 1)[-] * \$IPO\_CYCLE\_TIME[s], [28] \quad (3)$$

kde \$IPO\_CYCLE\_TIME je takt interpolátoru, číselná proměnná je MD10071. Ostatní zúčastněné proměnné již byly popsány. [27, 28]



**Kv** – Kv faktor – Z pohledu automatického řízení se jedná o zesílení polohové regulační smyčky. Popisuje odchylku dosažitelné polohy od požadované polohy v závislosti na rychlosti pohybu. Z toho vyplývá, že lze určit jakou maximální rychlostí se stroj může pohybovat, aby stále byla splněna podmínka přesnosti. [27]

**Coarse Precision** – Hrubá přesnost. Určuje toleranci od přesné dráhy nástroje. Pokud se nástroj ocitne v této toleranci, je blok, který vyvolal tento pohyb, považován za odbavený. Zde se jedná o méně přesnou toleranci. [27]

**Fine Precision** – Stejně jako předchozí, jen tolerance je menší. [27]

Tab. 3.2: Přehled proměnných pro řídicí systémy Sinumerik 840D a TNC640

Parametr v NX	Sinumerik 840D	HEIDENHAIN TNC 640
Max. Velocity	MD32000 - \$MAX_AX_VELO [27]	400302 – MP_maxFeed [29]
Max. Acceleration (Deceleration)	MD32300 – \$MAX_AX_ACCEL [27]	400305 – MP_maxAcceleration [29]
Jerk Limit	MD32431 – \$MAX_AX_JERK [27]	401703 – MP_axPathJerk [29]
Jump Velocity	MD32310 – \$MAX_ACCEL_OVL_FACTOR [27, 28]	X
Kv	MD32200 – POSCTRL_GAIN [27]	400801 – MP_kvFactor [29]
Coarse Precision	MD3600 - \$STOP_LIMIT_COARSE [27]	X
Fine precision	MD36010 - \$STOP_LIMIT_FINE [27]	X



### 3.8 Výměny nástrojů

Výměny nástrojů jsou dalším úsekem, kde může dojít k rozdílu mezi odhadnutým a reálným strojním časem. V CSE simulaci v prostředí Siemens NX lze tento problém řešit dvěma způsoby. Pokud virtuální model stroje obsahuje mechanismy pro výměnu nástrojů, lze tyto mechanismy (zásobník, manipulátor nástrojů) simulovat. Uvnitř prostředí Machine Tool Builder v NX lze přidat pohyblivé vlastnosti jiným než strojním osám (např. dveře pracovního prostoru, manipulátor nástrojů atd.). Poté lze tyto součásti ovládat přes podprogramy, jako je například podprogram pro výměnu nástrojů (Obr. 3.12). Výměna nástrojů je poté animována a po zadání časového údaje pro pohyb jednotlivých součástí, se přibližuje reálnému času. Pokud není k dispozici 3D model mechanismu obstarávající výměnu nástrojů (nebo není potřeba, aby byl simulován) lze čas přiblížit tím, že se čas pro výměnu nástroje vloží pevně do podprogramu, který ho zajišťuje v simulaci, v podobě časové pauzy. Po odbavení tohoto bloku simulace čeká zadanou prodlevu, a tím simuluje čas potřebný k provedení úkonů.

```
ELSE
  G0 G53 Z=R505
ENDIF

G0 G53 X=R501 Y=R502
G0 G53 V=R504 ←

##LANGUAGE AC
INT nToolID;
nToolID = getElement("$TC_TP1",getVariable("$P_TOOLP"));

IF (nToolID > 0);
  STRING strCarrierTool;
```

Pohyb osou V reprezentující pohyb ramena pro výměnu nástrojů

Obr. 3.12: Podprogram výměny nástrojů s pohybem zásobníku

### 3.9 Analýza nastavení kinematických parametrů v ŘS Sinumerik 840D

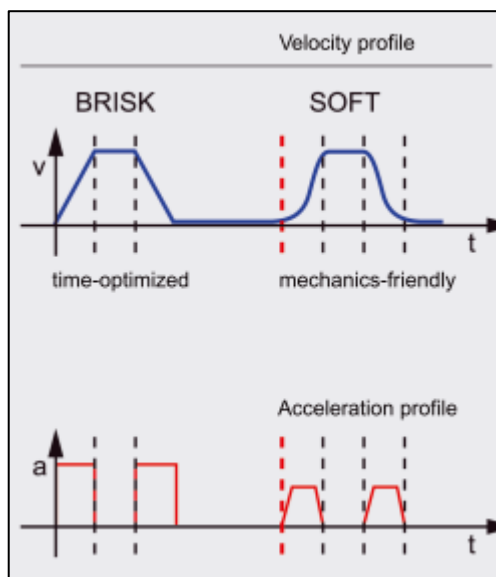
Mezi další vlastnosti, které dokáže CSE simulace postihnout patří kinematické chování řídicího systému. Simulace založená na CL datech neobsahuje emulátor ŘS a tím pádem neumožňuje zahrnout tyto funkce. V následujících řádcích jsou popsány vybrané funkce pro plánování drah, které obsahuje ŘS Sinumerik 840D.



První funkcí je G60. Tato funkce říká ŘS, že je žádoucí, aby stroj zastavil po každém řádku NC programu. Kritérium pro považování aktuálního řádku za odbavený je dáno doplňkovými funkcemi k G60. První kritérium udává G601 a znamená Vyšší přesnost (Fine Precision). Řádek je v tomto případě považován za odbavený, když se aktuální pozice přiblíží pozici požadované s určitou odchylkou definovanou v ŘS nebo jeho emulátoru. Druhou doplňkovou funkcí je G602. Zde je chování stejné, jako v předešlém případě, jen tolerance je větší. Poslední kritériální funkcí je G603. V případě této funkce je řádek považován za odbavený, když je rychlost všech os rovna nule - stroj stojí. [30]

Druhou skupinou funkcí je skupina G64. Tyto funkce alternují předešlou skupinu G60 a vzájemně se vylučují. Oproti předešlému chování je zde naopak požadována co největší plynulost stroje, to znamená zamezení jeho zastavení, pokud to není absolutně nevyhnutelné. Při řízení pomocí G64 ŘS pracuje s Lookahead (načítání řádků dopředu) a tím rozhoduje, kdy dojde k zastavení a kdy bude pouze snížena rychlost. Tento způsob řízení je lepší z hlediska životnosti strojů, ale může vykazovat nižší přesnost na tvarově složitějších dílcích. Funkce G64 je v Sinumerik 840D obsažena v několika variantách. Základní funkce G64 představuje režim řízení pohybu po dráze se snižováním rychlosti podle přetížení. G641 je opět režim řízení pohybu po dráze ale s přechodovými zaobleními. Toto zaoblení udávají kritéria ADIS a ADISPOS. První kritérium platí pro dráhové pohyby (G1, G2..). ADISPOS platí pro rychloposuv (G0). Pokud tato kritéria nejsou programována chová se G641 jako G64. G642 je režim řízení pohybu po dráze s přechodovými zaobleními při dodržení definované tolerance. Další varianty jsou G643, G644 a G645. Jelikož nejsou často využívány, nejsou zde popsány. Informace o jejich funkcích lze dohledat v manuálu [30].

Dvě další často používané funkce jsou SOFT a BRISK. Při programovaném BRISK se osy pohybují maximálním zrychlením nastaveném v ŘS. Naopak při programovaném SOFT je brán v potaz ryv stroje (osy se pohybují spojitým zrychlením). Druhé chování je mnohem mírnější na mechanické části stroje, ale může způsobit prodloužení strojních časů. Porovnání SOFT a BRISK je na obr. 3.13.



Obr. 3.13: Chování funkce SOFT a BRISK [30]

Mezi pokročilejší příkazy spadá cyklus 832 (vysokorychlostní obrábění) a kompresory NC bloků. Cyklus 832 optimalizuje řízení rychlosti na základě zadaných parametrů. Prvním parametrem je tolerance od křivky. Následuje druh obrábění, kde se rozlišují čtyři volby: vypnuto, hrubování, semifinish a dokončování. Posledním parametrem je tolerance orientace u 5-ti osých strojů. Z kombinace nastavení těchto parametrů ŘS řídí rychlosti posuvů tak, aby bylo obrábění co nejefektivnější. Kompresory slouží ke snížení počtu řádků v NC programu. Jelikož z CAM systému mohou vycházet velmi dlouhé NC programy s mnoha řádky, které však často mají jen velmi krátkou trajektorii, může nastat problém s rychlostí odbavování jednotlivých řádků. Kompresory tyto řádky dokážou nahradit polynomiální funkcí ve formě jednoho řádku, který obsahuje stejnou pohybovou informaci, avšak ve tvaru delší souvislé trajektorie. Toto působí kladně na rychlost obrábění a jakost povrchu. Kompresory se liší svou komplexností. Nejjednodušším a také nejstarším kompresorem je COMPON následovaný COMPCAD a COMPCURV a nakonec COMPSURF. Podrobný popis těchto kompresorů lze dohledat v manuálu [30].



### 3.10 Shrnutí rešerše

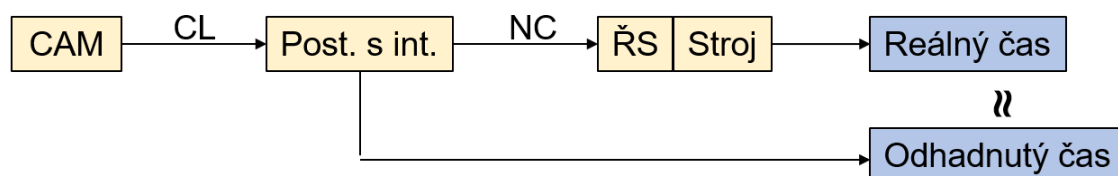
Rešerše popisuje znalosti potřebné k řešení problematiky, mezi které patří například tvorba, skladba a odbavování NC kódu. Dále byly zmapovány možnosti simulačních modelů v softwarových řešeních dostupných na trhu, včetně Siemens NX. Rešerše také analyzuje nastavitelné parametry v prostředí NX a zmiňuje příslušné parametry z řídicích systémů. V neposlední řadě byly zmapovány aktuální odborné zdroje zabývající se touto problematikou a bylo zjištěno, jakým postupem problematiku řešili a jakých výsledků dosáhli autoři jednotlivých přístupů. Z tohoto průřezu odbornými zdroji vyšlo najevo, že se odborníci spíše zabývají řešeními, která umožňují čistě jen predikování strojních časů, jako je například virtuální řídicí systém nebo využití neuronových sítí a strojového učení.

## 4 Návrh variant řešení predikce strojního času

V této kapitole jsou navrženy možnosti řešení problematiky predikce strojních časů. Jednotlivé možnosti jsou poté zhodnoceny a vysvětleny jejich přednosti a zápory. Nakonec je zvolena varianta, která je následně řešena.

### 4.1 Interpolátor v postprocesoru – Varianta A

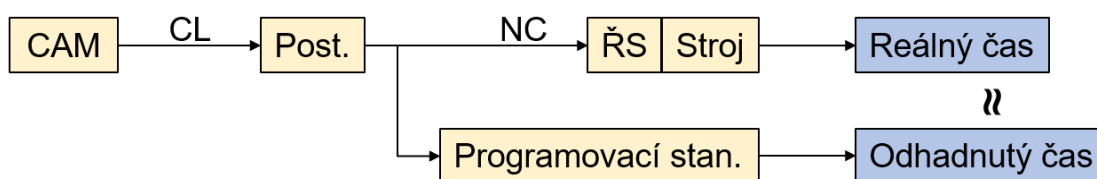
Jelikož je výsledný pohyb strojních os řízen interpolátorem, je zřejmé, že právě interpolátor vnáší do odhadu strojního času velké nejistoty. Díky tomu se vždy liší časový odhad v CAM prostředí a reálný strojní čas. Variantou pro predikci strojního času by bylo tento interpolátor integrovat do postprocesoru. Postprocesor by tedy kromě funkce překládání CL dat na NC program zároveň interpoloval pohyby v tomto NC programu a z hodnot posuvů a parametrů převzatých z reálného stroje vypočítal strojní čas. Podobný přístup byl použit v práci [13], kde byl využit virtuální ŘS, obsahující samozřejmě i interpolátor. Jednoznačnou výhodou je vysoká přesnost odhadu této metody závislé však na komplexnosti interpolátoru, jeho podobnosti s reálným strojem a nastavenými parametry. Tímto přicházejí komplikace. Jelikož interpolátor je velmi složitá část ŘS, výrobci těchto systémů si ji pečlivě střeží. To znamená, že se nejedná o veřejně dostupný kód, který by stačilo implementovat do postprocesoru. Pro využití této metody by byl potřeba náročný softwarový vývoj, na jehož konci by vzniklo jádro řídicího systému podobné tomu obsaženému v komerčním ŘS. Dále by se toto jádro implementovalo do postprocesoru, jehož složitost by mnohonásobně vrostla, což by mělo negativní vliv na výpočtový čas při postprocesingu. Další neméně významnou nevýhodou, je neschopnost vizualizovat obráběcí proces, či kontrolovat kolize procesu. To, jak by vypadal tok dat při použití této aplikace, je zobrazeno na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Varianta A – Interpolátor v postprocesoru

## 4.2 Využití řídicího systému – Varianta B

Další možností je využití standartně dostupných doprovodných softwarů od výrobců ŘS. V případě řídicího systému Heidenhein TNC640 je dostupná tzv. programovací stanice. Tato stanice obsahuje jádro ŘS, tím pádem dokáže simulovat NC program. Stanice dále zvládá graficky interpretovat kinematiku obráběcího stroje i kontrolovat kolize. Dvě poslední zmíněné vlastnosti jsou však uživatelsky nepřívětivé zvláště při porovnání s možností simulačního modelu. Oproti tomu, při správně přenesených parametrech z reálného stroje lze dosáhnout velmi vysoké přesnosti predikce strojního času. Je to dáno tím, že jádro ŘS obsažené v programovací stanici je shodné s jádrem obsaženým v reálném stroji. Tato varianta by byla použitelná, pokud by se jednalo o výrobní podnik s malým množstvím strojů a všechny by ideálně používaly stejný ŘS. Jakmile by narůstal počet strojů, a hlavně potom různorodost ŘS, vznikl by problém s odbavováním kódu pro predikci času. Je to dáno tím, že pro každý ŘS by byla potřeba určitý podpůrný software, jako je programovací stanice TNC. Toto je náročnější jednak finančně, jelikož je potřeba vlastnit větší množství licencí, ale také na personál. CAM programátor musí navíc znát prostředí každé této „programovací stanice“ a vědět, jak ji konfigurovat a pracovat s ní tak, aby mohl spolehlivě odbavit připravený NC kód pro získání odhadu strojního času. Z tohoto důvodu se tato varianta nejeví jako velmi výhodná. Schématické zobrazení této varianty ukazuje obr. 4.2.

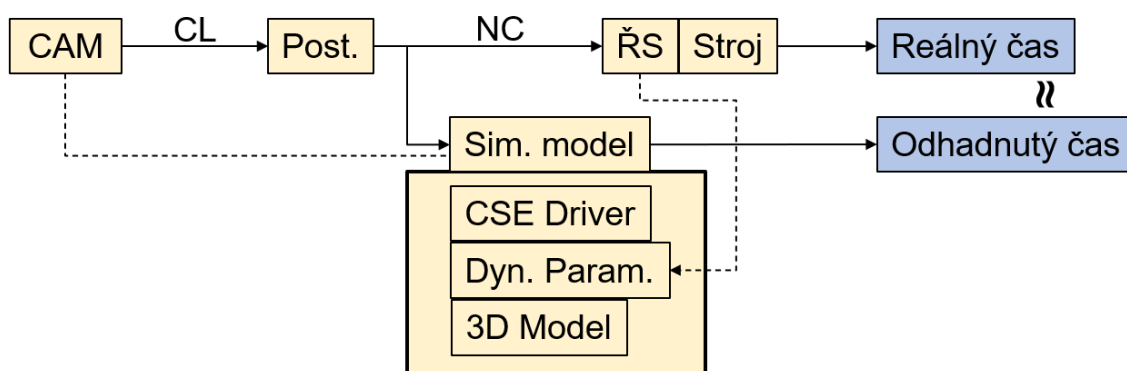


Obr. 4.2: Schéma - Varianta B – Využití ŘS

## 4.3 Simulační model – Varianta C

Jak již bylo řečeno pro přesnou predikci strojního času je potřeba NC program odbavit v prostředí co nejbližším reálnému stroji. Toto umožňuje Siemens NX přímo v prostředí NX CAM. Lze využít tzv. CSE simulace, která jak bylo řečeno dříve, je řízena NC kódem a lze v ni nastavovat parametry strojních os. Z toho vyplývá, že Siemens NX obsahuje v základu jádra předních řídicích systému

(Heidenhain, Sinumerik, Fanuc), tím pádem odpadá potřeba složitého software vývoje jako ve variantě A. Možnost konfigurovat kinematické parametry umožňuje dále zpřesnit odhad pro daný stroj. Jelikož se jedná o simulaci obráběcího procesu, nikoli specializovaný nástroj pro predikování strojního času, grafická interpretace procesu je samozřejmostí, stejně tak kontrola kolizí, která je snadno definovatelná. Toto všechno je navíc snadno ovladatelné a konfigurovatelné přímo v grafickém prostředí Siemens NX CAM. Dále je, díky provázanosti simulace a CAM nastavení, mnohem snazší kontrola kolizí, jelikož nástroje a geometrie polotovarů a obrobků jsou již definovány v CAM prostředí. V neposlední řadě je mnohem jednodušší využití této metody v případě použití různorodých ŘS. Emulátory ŘS (tzv. CSE driver) jsou obsaženy v NX, tím pádem není potřeba přeskakovat mezi programy. Když je simulační model vytvořen, stačí ho jen načíst a odbavit NC program. Tvorba probíhá také v Siemens NX. Tato jednoduchost použití a nenáročnost na ostatní software, ať už koupený nebo vytvořený, je značnou výhodou a převažuje nad variantou B. Blokové schéma této varianty je zobrazeno na obr. 4.3.



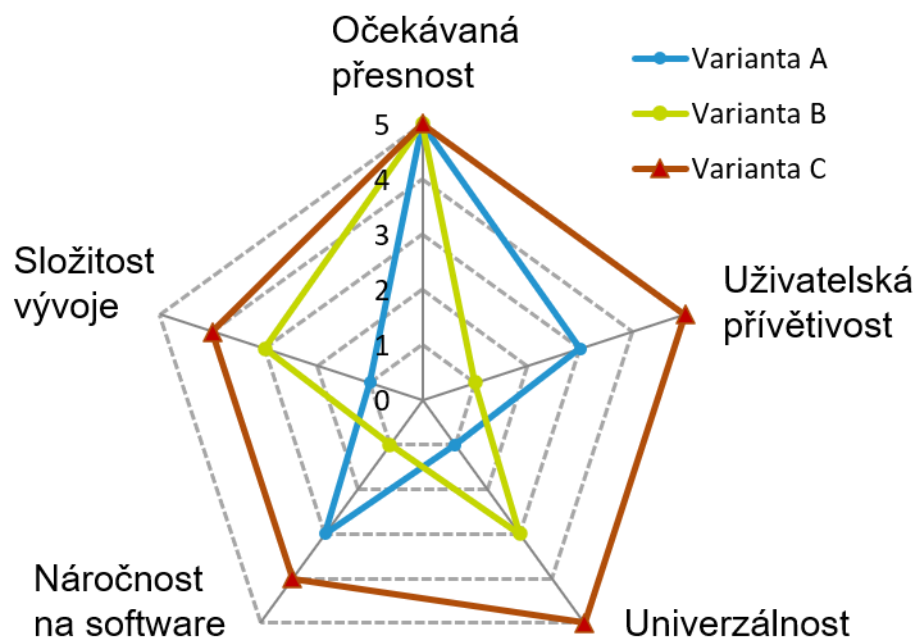
Obr. 4.3: Schéma varianty C s tokem dat

#### 4.4 Výběr varianty

Navržené varianty jsou popsány výše a jejich vzájemné porovnání je zobrazeno v tab. 4.1 a graficky interpretováno obrázkem 4.4. Z Tab. 4.1 vyplývá, že varianta C je při stejné očekávané přesnosti univerzálnější, nabízí lepší uživatelskou přívětivost a to celé s nižšími nároky na software a vývoj. Na základě těchto kladů je zvolena varianta C, tedy využití simulačního modelu s emulátorem ŘS. V následující části práce je popsáno řešení této varianty.

Tab. 4.1: Porovnání variant řešení

Varianta	Očekávaná přesnost	Uživatelská přívětivost	Univerzálnost	Náročnost na software	Složitost vývoje
A	Vysoká	Střední	Nízká	Střední	Vysoká
B	Vysoká	Nízká	Střední	Vysoká	Střední
C	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Nízká - Střední	Nízká - Střední



Obr. 4.4: Pavučinový graf porovnávající varianty řešení



## 5 Tvorba simulačního modelu stroje MAS SP 430 s emulátorem ŘS

Tato kapitola představí stroj, jehož simulační model bude vytvořen, dále popisuje testy citlivosti jednotlivých parametrů a způsobů řízení a nakonec samotnou tvorbu simulačního modelu včetně úprav emulátoru ŘS.

### 5.1.1 Představení stroje

Stroj, jehož simulační model je vytvářen, nese označení SP 430. Výrobce je společnost KOVOSVIT MAS. Jedná se o soustružnicko-frézovací centrum, které se dodává ve velkém množství konfigurací. Na pracovišti Ústavu výrobních strojů a zařízení FS ČVUT se nachází verze SP 430Y/2 A11. Tato verze je osazena osou Y pro horní nástrojovou hlavu a dvoukanálovým řízením, umožňujícím ovládání spodní nástrojové hlavy. Pohled na stroj je na obr. 5.1.



Obr. 5.1: KOVOSVIT MAS SP 430 [31]

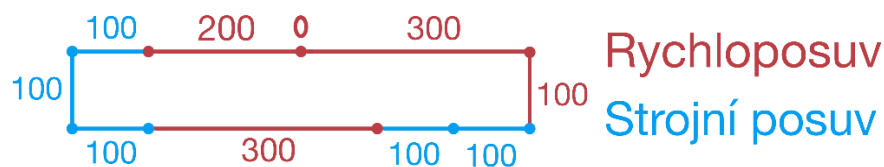
Spodní nástrojová hlava v případě tohoto konkrétního stroje není osazena a je nahrazena testovacím přípravkem pro měření řezných sil. Vřeteno lze přepnout do režimu osy C, což v kombinaci s naháněnými nástroji v horní nástrojové hlavě od výrobce Duplomatic dává stroji možnost 4osého obrábění. Horní nástrojová hlava má dvanáct pozic pro nástroje. Maximální průměr soustružení je roven 550 mm a maximální délka obrábění činí 1100 mm.

## 5.2 Testy citlivosti

Před samotnou tvorbou simulačního modelu byly provedeny testy za účelem zjištění, s jakými parametry simulační model pracuje a jak reaguje na jejich změnu. Stejně tak bylo testováno, jaké způsoby řízení a další pokročilé funkce (například cyklus 832 a kompresory bloků) jsou podporovány simulačním

modelem. Testy byly prováděny na vzorovém stroji v NX CAM s názvem sim01\_mill\_3ax\_sinumerik\_mm s ŘS Sinumerik 840D. Jedná se o stejný ŘS, jaký používá SP 430, jehož simulační model bude vytvářen.

Při testování schopností simulačního modelu byla použita řada NC programů. Pro zkoušení, které parametry jsou brány v úvahu, a jaký dopad na simulaci má jejich změna byly použity pouze jednoosé dráhy. Nejdříve byl programovaný pojezd o pár milimetrů, poté postupně přidány rychloposuvy, zastavování a změna směrů. Nejdříve byl změřen výchozí čas projetí dráhy. Následně se měnil vždy jen jeden parametr najednou, a to jak do záporného smyslu, tak do smyslu kladného. Porovnání časů je uvedeno v Příloze č.1 a Příloze č.2.



Obr. 5.2: Příklad dráhy pro test citlivosti

Dalším krokem byla analýza podpory stylů řízení a pokročilých funkcí. Toto bylo provedeno na rovinné dráze (viz obr. 5.2). Opět bylo provedeno výchozí měření času pro projetí dráhy a následně se místo změny parametrů měnily programové funkce určující styly plánování drah a pokročilé funkce.

Výsledky těchto testů jsou následující. Simulační model pracuje se všemi parametry, které lze nastavit vyjma Jump Velocity. To je dáno tím, že pro využití tohoto parametru je nutný aktivní profil řízení dráhy TrapezoidalJump, přičemž standardně není implementována funkce umožňující aktivaci tohoto typu řízení dráhy. Nejdůležitějšími nastavitelnými parametry jsou: Maximální rychlost osy, maximální zrychlení, následně Kv faktor a také limit ryvu. V případě rychlosti je odezva na změnu lineární, v případě Kv je odezva nelineární, takže se chyba v odhadu času může zvětšovat neúměrně špatně zadanému Kv faktoru. Parametry Coarse a Fine precision jsou důležité, pokud se hojně využívá způsobu plánování dráhy Exact stop. Právě plánování drah má velký dopad na strojní čas. Simulační model s ŘS Sinumerik dle těchto testů podporuje mnoho typů plánování drah. Přehled programových funkcí a jejich podpora simulačním modelem jsou znázorněny v tab. 5.1. Těmito testy bylo zjištěno, že pokud není

v NC programu použita funkce pro modifikaci plánování drah simulace se řídí dle chování G60 G601 (tzn. Exact stop, fine precision). Funkci G60 G602 přísluší parametr Coarse Precision. V případě stroje SP 430 bylo posléze zjištěno, že hodnota maximálního ryvu je natolik vysoká, že se neprojeví v chování stroje. Nezáleží tedy zda je programováno SOFT nebo BRISK. Emulátor ŘS v NX není navržen tak, aby pracoval s Cyklem 832 ani s kompresory (např. COMCAD, COMPCURV atd.). S těmito poznatky je možné zhruba odhadnout s jakou přesností bude simulační model pracovat a celkově s čím je kompatibilní a s čím nikoliv.

Tab. 5.1: Podpora funkcí plánování drah v simulačním modelu

Funkce	Podpora	Funkce	Podpora
G64	ANO	G60 G601	ANO
G641	NE - SHODNÉ s G64	G60 G602	ANO
G641 ADIS	NE - SHODNÉ s G64	G60 G603	ANO
G642	NE - SHODNÉ s G64	SOFT	ANO
G643	NE - SHODNÉ s G64	BRISK	ANO
G644	NE	KOMPRESORY	NE
G645	NE	CYCLE 832	NE

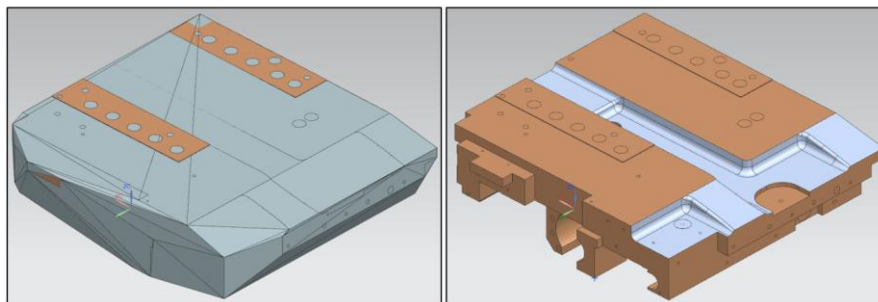
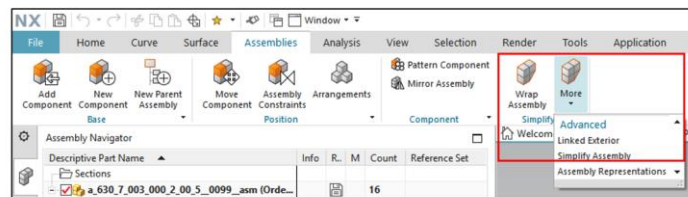
## 5.3 Simulační model

V této kapitole je popsán postup, jehož pomocí je možné vytvořit simulační model zvoleného stroje. Je zde vysvětlen postup v prostředí Machine Tool Builder a nakonec jsou zmíněny úpravy emulátoru ŘS.

### 5.3.1 Podklady pro simulační model

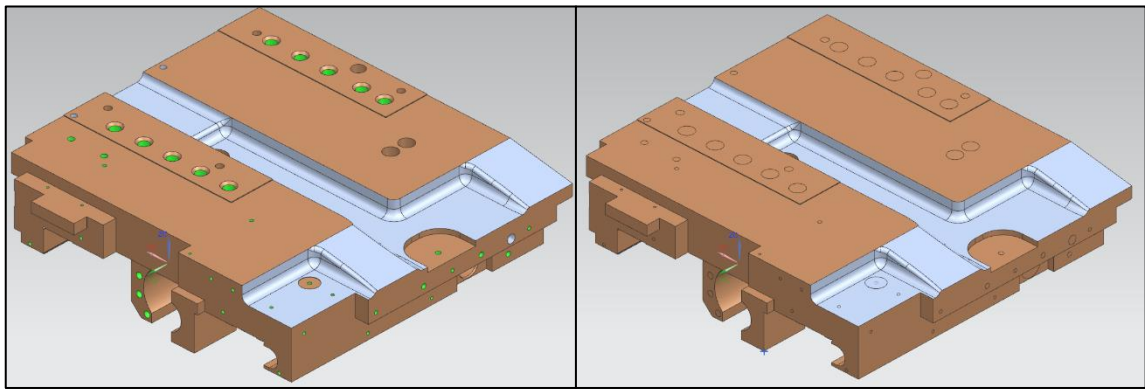
Nyní lze začít připravovat podklady pro simulační model. 3D model tohoto stroje je k dispozici na Ústavu výrobních strojů a zařízení a poskytnut byl výrobcem stroje. Model je však potřeba optimalizovat pro tvorbu simulačního modelu. Jelikož se jednalo o detailní model stroje a jeho částí, celková velikost modelu byla velmi vysoká. Navíc zde chyběla velká část nosné struktury stroje. Nejprve bylo potřeba jednotlivé části modelu zjednodušit a dodělat chybějící komponenty. Při provádění těchto úprav byly nejprve odstraněny komponenty, které nejsou vidět nebo nejsou podstatné včetně spojovacího materiálu. Jen vymazání těchto částí velmi zrychlilo načítání modelu do pracovního prostředí a celkovou práci s ním. Stále však obsahoval mnoho komponent s vysokou úrovní detailů, které nejsou pro simulační model důležité. Dalším krokem je

zjednodušení těchto částí. Zjednodušení lze provádět manuálně, což je však velmi časově náročné nebo je možné využít nástrojů obsažených v Siemens NX, jako Wrap Assembly, Linked Exterior a Simplify Assembly. Všechny tyto funkce jsou dostupné v modulu modelování na záložce Assemblies v oddělení Simplify. Wrap Assembly v tomto případě není moc vhodná, jelikož její výstup je složen z mnoha polygonů a celkově odstraní detail ve vysoké míře. Součást je v tomto případě jakoby obalena do folie. Tento způsob je vhodný například pokud je potřeba předat třetí straně hrubý model výrobku pro představu zástavbových rozměrů. Funkce Linked Exterior dokáže vytvořit model bez kruhových děr a vnitřních detailů. Smaže vnitřní plochy a vytvoří vzduchotěsný model. Poslední funkcí je Simplify Assembly. Jak již název napovídá je určena primárně pro sestavy. Výstupem z této funkce je jeden model, který vznikne spojením všech součástí a odstraněním vnitřních ploch. Tato funkce také umožňuje přenesení ploch bez kruhových děr. Kde tyto funkce nalézt a jak vypadají vzniklé modely je zobrazeno na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Nahoře lokace funkcí, vlevo Wrap Assembly, vpravo Linked Exterior

Pomocí těchto funkcí (obzvláště Linked Exterior) byly jednotlivé komponenty stroje zjednodušeny do podoby, která je vhodná pro simulační model. Snížením detailu těchto částí došlo opět ke zrychlení práce s tímto modelem. Rozdíl mezi původní komplexní součástmi a součástmi zjednodušenou ukazuje obr. 5.4. Posledním bodem bylo dodělání chybějících částí. Tyto součásti byly vymodelovány, jako jednoduché modely a vloženy do celkové sestavy stroje. Jednalo se hlavně o lože a strukturu spojující osu Y a X. Upravena byla také struktura soustavy, pro zjednodušenou orientaci. Např. vytvoření podsestavy obsahující všechny díly krytování stroje. Díky tomu je poté snadné v simulačním modelu stroje přepínat viditelnost celého krytování.



Obr. 5.4: Původní součást (vlevo) a součást po zjednodušení (vpravo)

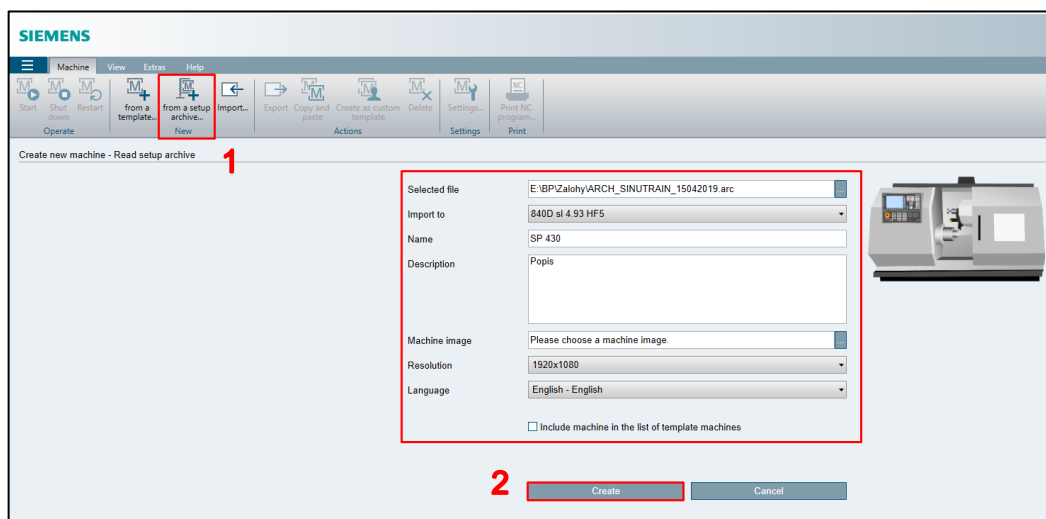
Dalším podkladem pro tvorbu simulačního modelu jsou kinematické parametry jednotlivých os. Tato data lze získat přímo z řídicího systému stroje. Tato cesta je jednoduchá, ale znamená na určitou dobu omezení chodu stroje. Pro tuto práci byly kinematické parametry získány ze zálohy řídicího systému. Záloha obsahuje kompletní zrcadlení parametrů řídicího systému konkrétního stroje v daný okamžik. Tyto zálohy se zpravidla vytváří, pokud je potřeba provádět nějaké úpravy v ŘS, jako například ladění jednotlivých strojních os pro optimální pohybové charakteristiky. Určité změny mohou kompletně zabránit funkci ŘS. V případě, že by provedené změny vedly k nějaké chybě, nebo by ŘS přestal fungovat kompletně, lze se vrátit do výchozího stavu přehráním dat ze zálohy. Záloha ŘS má příponu souboru .acr .

V případě této práce bylo potřeba zálohu ŘS otevřít a listovat strojními daty. Mimo jiné k tomuto účelu lze použít software Sinutrain od společnosti Siemens. Tento program je určen k výuce a validaci programů pro Sinumerik. Funkčností se podobá programovací stanici TNC pro ŘS Heidenhain TNC. Uvnitř prostředí



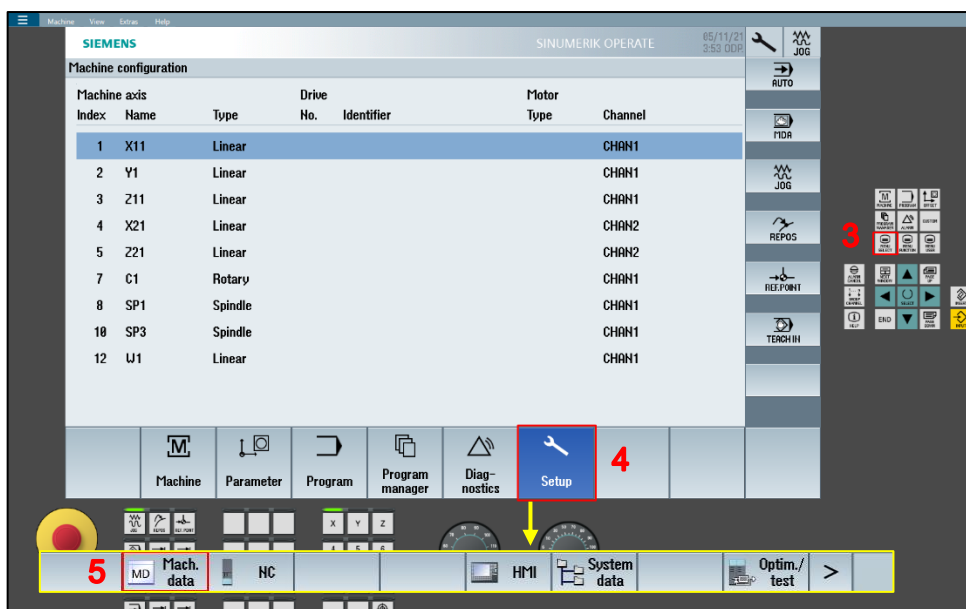
Sinutrain lze spustit virtualizovaný řídicí systém Sinumerik, který je konfigurovatelný pro konkrétní stroj. V tomto prostředí je poté možné vést výuku ovládání panelu ŘS bez potřeby přímo fyzického řídicího systému, odbavovat a verifikovat NC programy nebo například testovat reakce ŘS na změny strojních parametrů. Důležitou vlastností programu Sinutrain je možnost načítat zálohy ŘS a z nich vytvořit virtualizovaný systém, který má shodné parametry s reálným strojem, jehož záloha byla načtena. Tato funkce však nespadá do základní licence Sinutrain a je obsažena ve zvláštním doplňku pro načítání archivu. Pro získání strojních dat ze zálohy ŘS SP 430 byla tato licence zapůjčena Ústavem výrobních strojů a zařízení pod ČVUT FS. Postup, jakým způsobem lze získat kinematické parametry ze zálohy ŘS je následující.

Nejdříve je nutné vytvořit nový stroj ze zálohy. Na základní obrazovce prostředí Sinutrain v horní liště na kartě Machine v sekci New zvolit možnost from a setup archive (1). V okně, které se otevře vyplnit název a popis stroje pro identifikaci, volitelně náhledový obrázek a vybrat soubor se zálohou. Volby potvrdit tlačítkem Create (2). Nyní proběhne vytvoření virtuálního řídicího systému ze zálohy, což může trvat několik minut. Tyto kroky jsou zobrazeny na obr. 5.5.



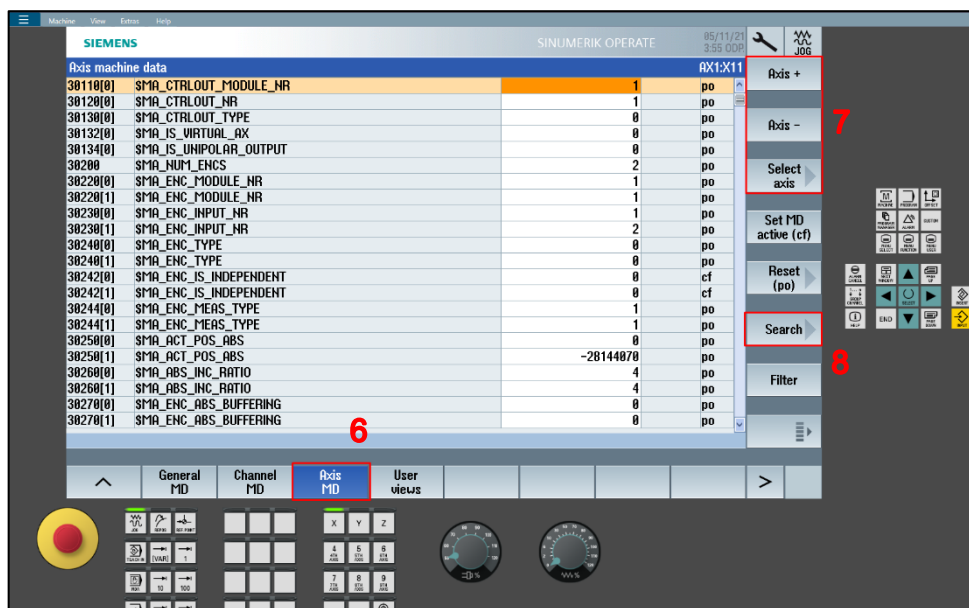
Obr. 5.5: Vytvoření stroje ze zálohy v Sinutrain

Na úvodní obrazovce se nyní zobrazuje dříve vytvořený stroj, který lze spustit pomocí tlačítka v pravém dolním rohu dlaždice se strojem. Inicializace prostředí stroje může chvíli trvat. Poté co se načte prostředí virtuálního ŘS lze přistoupit k získání kinematických parametrů. Postup je shodný i v případě, že se tyto parametry získávají přímo ze stroje. V pravé části obrazovky kliknout na tlačítko Menu select (3), poté ve spodní liště obrazovky ŘS zvolit Setup (4). Zobrazí se přehled všech konfigurovaných os daného stroje, jakého jsou typu a k jakému kanálu jsou tyto osy přiřazeny. Toto může posloužit ke snadnějšímu přehledu os v dalších fázích. Dále ve spodní softwarové liště zvolit Mach. data (5), viz obr. 5.6.



Obr. 5.6: Navigace v prostředí virtualizovaného ŘS pro kroky 3 až 5

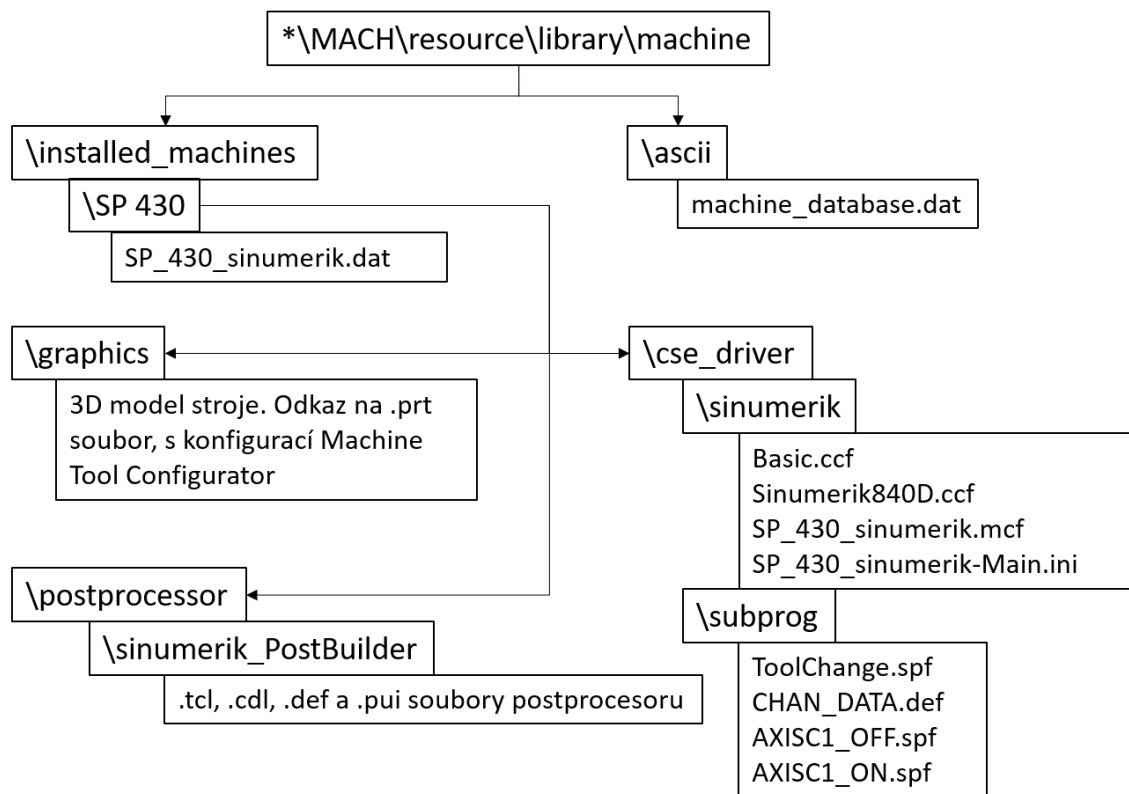
Na následující obrazovce je zapotřebí přepnout zobrazení na Axis MD, pomocí tlačítka ve spodní software liště (6). Tato obrazovka již obsahuje veškeré strojní parametry pro strojní osy. Mezi jednotlivými osami se lze pohybovat pomocí soft tlačítek Axis+ a Axis- nebo vybrat konkrétní osu ze seznamu pomocí soft tlačítka Select axis (7). Mezi jednotlivými parametry lze listovat pomocí posuvníku na pravé straně obrazovky ŘS nebo mezi nimi vyhledávat pomocí soft tlačítka Search, napravo (8). Poslední kroky jsou zobrazeny na obr. 5.7. Parametry, jejichž hodnoty je potřeba získat jsou popsány v kapitole 3.7. Tyto hodnoty lze pro přehlednost vypsát například do Excel tabulky nebo je rovnou nastavovat do simulačního modelu v prostředí Machine tool builder.



Obr. 5.7: Navigace v prostředí virtualizovaného ŘS pro kroky 8 až 10

Nakonec ve zkratce k implementaci simulačního modelu do Siemens NX. Všechna data simulačního modelu je žádoucí uložit do jedné složky. Tato složka, která obsahuje i vzorové stroje, je umístěna na cestě počínající složkou s nainstalovaným NX. Další cesta je následující \*\\MACH\\resource\\library\\machine\\installed\_machines. V této složce se nacházejí soubory k jednotlivým simulačním modelům a jsou rozděleny do složek podle názvu stroje. V každé složce stroje se nacházejí tři složky obsahující tři části simulačního modelu, tak jak bylo řečeno dříve. Dále se zde nachází datový soubor sloužící pro směrování na správné soubory uvnitř těchto složek. Struktura souborového systému s obsahem jednotlivých složek a datovými typy je na obr. 5.8. V tomto případě jsou uvedeny soubory pro ŘS Sinumerik, pokud by existoval simulační model s různými ŘS, jen by se přidaly soubory obsahující data pro daný ŘS a změnily by se názvy souborů a složek, tak aby odpovídali danému ŘS.



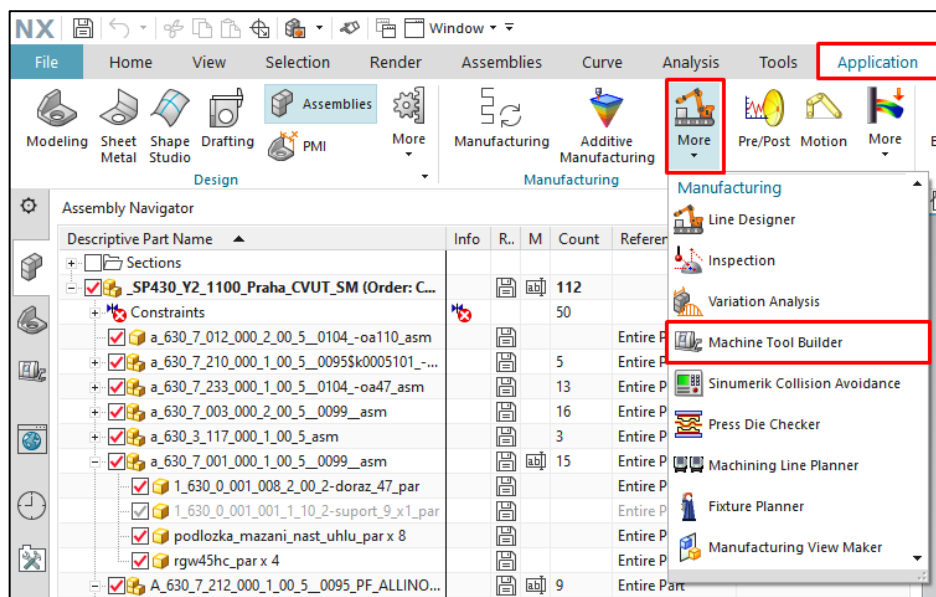


Obr. 5.8: Souborová struktura simulačního modelu

Aby byl simulační model přístupný v knihovně strojů prostředí NX, je potřeba přidat nový stroj do této knihovny. Toto lze provést úpravou souboru `machine_database.dat` na cestě `*\\machine\\ascii`. V tomto souboru jsou všechny dostupné stroje v prostředí NX CAM. Přidáním nové řádky s názvem daného stroje, typem ŘS a správnými cestami souborů, se v NX stroj zobrazí v knihovně a lze ho využít při simulaci.

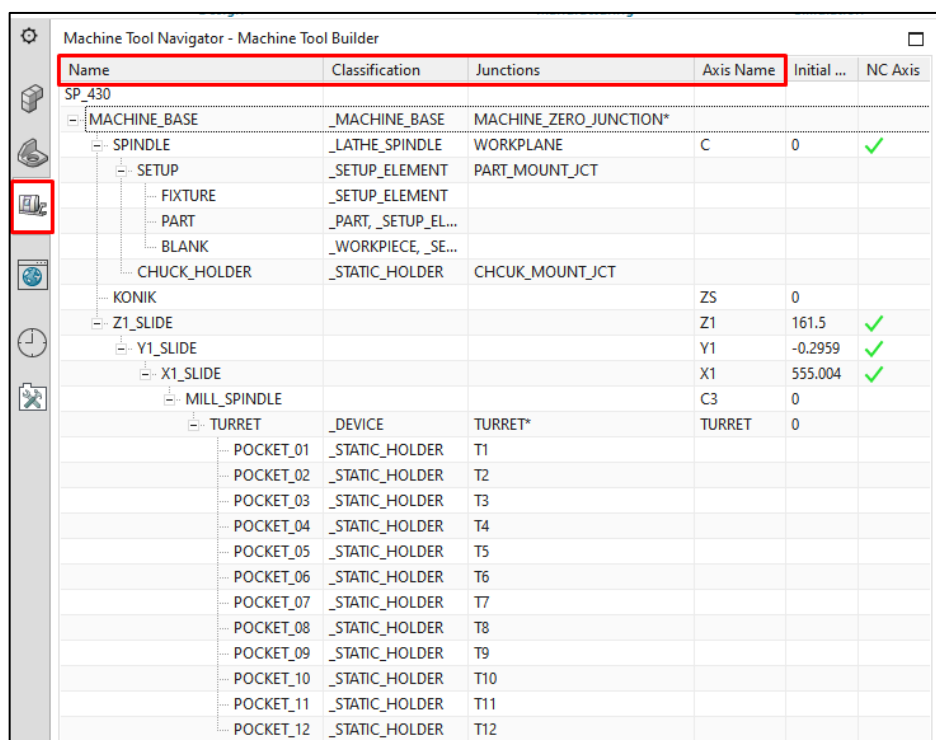
### 5.3.2 Machine tool builder

V této kapitole je popsán postup tvorby části simulačního modelu v prostředí Machine tool builder. Nejprve je potřeba otevřít připravený model stroje. Poté v horní liště karet vybrat záložku Application a v sekci Manufacturing, pod tlačítkem More zvolit možnost Machine Tool Builder. Tímto se NX přepne do modulu Machine Tool Builder (MTB) a lze přejít ke tvorbě struktury modelu. Spuštění modulu MTB je zobrazeno na obr. 5.9.



Obr. 5.9: Spuštění modulu MTB v prostředí NX

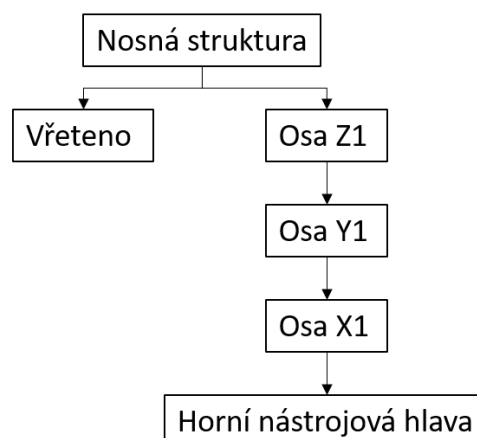
Po přepnutí do modulu MTB se v levém seznamu karet objeví nová ikonka Machine Tool Navigator, která po kliknutí ukáže hlavní obrazovku celého modulu. Zde se bude zobrazovat celá struktura simulačního modelu, tak jak lze vidět na obr. 5.10. V záhlaví je vidět několik sloupců. Mezi ty nejdůležitější patří: Name, Classification, Junctions a Axis Name. Sloupce lze libovolně konfigurovat nebo přidat několik dalších.



Obr. 5.10: Obrazovka Machine Tool Navigator

Nyní k samotné tvorbě simulačního modelu. V případě obráběcího stroje se začíná nosnou konstrukcí stroje (ložem, rámem) a postupuje se přes osy až po akční prvky (vřetena, nástrojové kapsy). Důležité je podotknout, že pokud se pohne mateřská součást, tak stejný pohyb vykonají i součásti podřazené. První komponentou, kterou je potřeba definovat je Machine Base. Jedná se o nosnou strukturu stroje, která je nehybná. V nabídce vyvolané pravým tlačítkem myši v okně Machine Tool Navigator zvolit možnost Insert – Machine Component. V následující nabídce je potřeba vybrat součásti v 3D modelu, které reprezentují danou komponentu. V dalším výběru je potřeba definovat Junction (uzel, počátek souřadného systému) s klasifikací MACHINE\_ZERO. Tento uzel je povinný pro každý simulační model, jelikož představuje strojní nulu stroje a definuje souřadný systém. V případě tohoto konkrétního modelu je tento uzel umístěn do osy vřetena na plochu, o kterou se opírá sklíčidlo.

Před dalším postupem je dobré si rozmyslet, jakým způsobem je stroj složen. Jak již bylo zmíněno dříve, spodní nástrojová hlava není osazena a osy X2 a Z2 se používají pro experimentální účely (nejsou podstatné pro tuto práci). Stejně tak nebude řešena funkčnost koníku. Kinematická struktura stroje se tedy od základu větví do dvou směrů. První je zakončen hlavním vřetenem a leží přímo na základně stroje. Druhá větev je zakončena horní nástrojovou hlavou a se základnou ji spojují osy X1 Y1 a Z1. Pro přehlednost je toto schematicky zobrazeno na obr. 5.11.

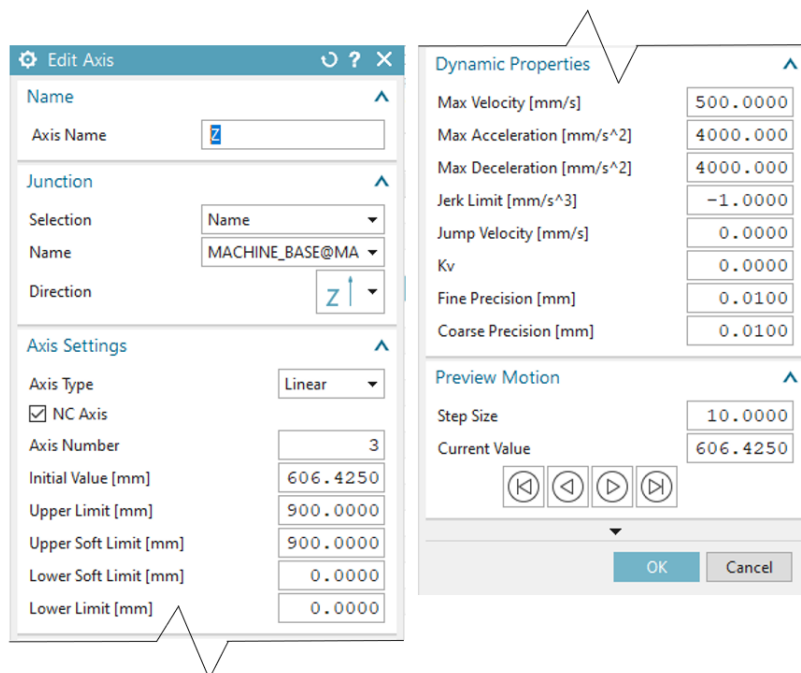


Obr. 5.11: Kinematická struktura po zjednodušení



Vytvoření první větve s vřetenem je jednoduché. Postup definování komponent je stále stejný, takže dále budou popsány pouze specifické volby u jednotlivých součástí. Důležité je nové komponenty vkládat pod správné mateřské součásti, v případě vřetena je mateřskou komponentou Machine Base. Po vložení komponenty je potřeba v kategorii Classify Component zvolit možnost `_LATHE_SPINDLE` a v oddělení Junctions vytvořit uzel se shodnou orientací, jako je strojní nula, přičemž klasifikace tohoto uzlu je Lathe Work Plane Z/X. Dalším krokem je vložit pomocí kontextové nabídky osu (Axis) do komponenty vřetena. Jelikož je toto první nastavení osy, bude postup popsán podrobněji. Nejprve je potřeba definovat název osy, ale pozor, na tomto názvu záleží, jelikož je název osy použit pro identifikaci v komunikaci s CSE driverem. Název této osy je C. V sekci Junction se volí uzel, který definuje vztažné osy pro pohyb a také směr tohoto pohybu. Vzhledem ke konfiguraci stroje je zde zvolen uzel Machine Zero. Díky dřívější orientaci tohoto uzlu je osa z shodná s osou rotace vřetena. V roletkovém menu Direction je zvolena možnost -Z. Směr záporné osy Z je důležitý. Volba směru závisí na tom, čím osa hýbe. Pokud pohybuje nástrojem, volí se kladná varianta příslušné osy, pokud však osa pohybuje obrobkem (jako je tomu v tomto případě), volí se osa záporného smyslu. Další kategorií voleb je Axis Settings. Zde je první volbou typ osy – Spindle (vřeteno). Dále je potřeba zaškrtnout políčko NC Axis. To říká, že se jedná o řízenou osu, která očekává nějaká data z interpolátoru. Samozřejmě je možné mít na stroji několik pomocných os, například pro pohyb koníkem, otevírání dveří nebo pohyb prvků výměníku nástrojů. Tyto osy jsou však řízeny PLC částí stroje a nejedná se o numericky řízené osy. Další volba je Axis Number (Číslo osy). Toto číslo se zvyšuje automaticky s tím, jak se osy plní do simulačního modelu. Není příliš důležité, ale lze ho použít pro přístupování na jednotlivé osy. Poslední volby této kategorie charakterizují rozsahy os. Initial Value udává v jaké poloze se nachází model komponenty ve vztahu ke strojní nule a rozsahu osy. Soft Limits udávají rozsah osy omezený měkkým limitem – softwarovým. Hard limits oproti tomu udávají rozsah osy omezený hardwarovou zarážkou. Poslední kategorií voleb jsou kinematické vlastnosti (Dynamics Properties) dané osy. Zde se nastavují hodnoty maximální rychlosti, zrychlení, ryv, atd., specifické pro danou osu, které, v případě této práce, byly získány ze zálohy ŘS. Popis jednotlivých parametrů

s jejich ekvivalenty proměnných ŘS je uveden v kapitole 3.7. Pohled do okna s nastavením strojní osy simulačního modelu je na obr. 5.12.



Obr. 5.12: Okno nastavení strojní osy v MTB

Pod komponentu vřetená je potřeba vložit ještě dvě součásti. Jednou z nich je komponenta bez 3D objektu, která tvoří rozhraní pro upínání sklíčidel. Klasifikace této komponenty je `_STATIC HOLDER` a uzel definovaný v této součásti je klasifikace `None`, má počátek ve středu plochy, o kterou se opírá sklíčidlo a osa X směřuje z pracovního prostoru stroje. Druhou komponentou nacházející se pod vřetenem je další komponenta bez 3D modelu. Jedná se o komponentu `Setup` (příprava). Zde je potřeba vybrat klasifikaci součásti jako `_SETUP_ELEMENT` a vytvořit uzel s orientací shodnou s orientací strojního souřadného systému. Klasifikace uzlu je opět `None`. Tento uzel je důležitý, jelikož určuje umístění obrobku po načtení simulačního modelu do CAM prostředí obrobku. Pod `setup` se musí ještě vložit 3 komponenty, které nebudou mít 3D modely a, u kterých však již nebude potřeba vytvářet uzly, protože si ho přeberou z mateřské součásti, která byla vytvořena v předchozím kroku. První součástí je `FIXTURE` s klasifikací `_SETUP_ELEMENT`, reprezentující upínající prvky (např. pro kontrolu kolizí). Další komponentou je `PART` reprezentující finální obrobek. Klasifikace je `_SETUP_ELEMENT` a `_PART`. Poslední je `BLANK` s klasifikací



\_SETUP\_ELEMENT a \_WORKPIECE. BLANK reprezentuje polotovar součásti. Tímto je definice první větve hotova.

Druhá větev je o něco složitější, nicméně postup vkládání komponent a os je shodný s tím, co bylo popsáno dříve. Vložení os Z1, Y1 a X1 bude tedy přeskočeno. Pod osu X1 je vložena komponenta s žádnými vyplněnými volbami (MILL\_SPINDLE). Do této komponenty se vloží osa s názvem C3, typem osy Spindle a uzlem jehož jméno má klasifikaci Tool Mount (Bude definováno v následujícím kroku). Orientace osy je nastavena +X. Tato komponenta s osou se stará o funkčnost naháněných nástrojů. Další komponenta je vložena pod MILL\_SPINDLE a jmenuje se TURRET. Tato komponenta představuje revolverovou část horní nástrojové hlavy a obsahuje uzel pro upínání nástrojů. Klasifikace komponenty je \_DEVICE a Device ID je Turret. Uzel se nachází na rozhraní mezi rotorem a statorem nástrojové hlavy, s počátkem v ose rotace revolveru a s osou X v ose rotace revolveru směřující v kladném směru osy Z. Osa Y uzlu má stejnou orientaci jako strojní osa X. Shodnost těchto orientací je důležitá kvůli správnému fungování korekcí nástrojů. Název tohoto uzlu je TURRET a klasifikace Tool Mount. Do komponenty TURRET se vloží osa se shodným názvem. V kategorii Junction se vybere uzel komponenty TURRET a směr +X. Typ osy je Rotary Unlimited, nejedná se o NC osu. Ostatní volby nejsou potřeba měnit. Teď už zbývá jen definovat jednotlivé pozice pro nástroje v revolverové hlavě. To se udělá dvanácti komponentami vloženými pod TURRET. Nastavení první komponenty je následující. Název POCKET\_01, klasifikace \_STATIC HOLDER a v kategorii Holder Details nastavit Holder ID 1 a Working Angle na 0. Dále je zapotřebí definovat uzel T1 s počátkem ve středu rozhraní VDI50 a na dosedací ploše (čelo revolveru), orientace osy X uzlu je v kladném směru strojní osy Z a osa Y uzlu směřuje do středu revolveru. Tímto způsobem lze definovat zbývající kapsy s rostoucími čísly v názvu komponenty, názvu uzlu a Holder ID. Working Angle roste po 30°. Finální vzniklá struktura je na obr. 5.10. Tímto je simulační model v modulu Machine Tool Builder hotový. V další kapitole jsou popsány úpravy CSE driveru pro tento konkrétní stroj.

### 5.3.3 Emulátor řídicího systému (CSE driver)

Tato kapitola popisuje kroky, které je potřeba provést ke zprovoznění simulačního modelu. Jak bylo řečeno dříve, CSE driver (emulátor ŘS) je software

pozadí simulačního modelu a stará se o přeložení NC kódu na příslušné pokyny pro simulační model. Siemens NX obsahuje několik kompletních simulačních modelů s různými kinematikami a ŘS, které lze použít pro simulace. Pomocí úprav lze však možné tyto vzorové emulátory přizpůsobit na jiný stroj. V Siemens NX 1899 není k dispozici vzorový simulační model odpovídající SP 430. Jako výchozí CSE driver je v tomto případě použit CSE driver stroje sim11\_turn\_2ax\_sinumerik. Jedná se o 2osý horizontální soustruh s revolverovou nástrojovou hlavou. Je tedy relativně blízko stroji SP 430 a tím, že byl zmíněný vzorový stroj označený jako výchozí pro SP 430 hned na začátku, nutné úpravy budou vcelku malé, jelikož plno názvů v simulačním modelu bylo zvoleno tak, aby odpovídalo právě tomuto CSE driveru. CSE driver lze samozřejmě vytvořit úplně od začátku, nicméně je to náročné a zpravidla se využívá úpravy některého ze vzorových strojů. Pro úpravy souborů .MCF a .CCF je potřeba software Machine Configurator. Ostatní soubory patřící pod driver lze upravovat v textovém editoru.

Pro identifikaci věcí, které bude potřeba upravit je nejsnazší vygenerovat NC kód postprocesorem pro daný stroj a zkusit ho odsimulovat. Je možné též využít nástroj Check syntax v okně Execution window během spuštěné simulace v NX. Na obr. 5.13 jsou zobrazena klíčová místa v NC programu, pro které je potřeba přizpůsobit CSE driver.

N220 AXISC1_ON - aktivuje osu C1
N430 T2 D2 - výměna nástrojů
N530 G0 CA1=DC(0.0) - polohování osy C1
N550 S3=1061 M3=3 - otáčky frézovacího vřetená
N3360 AXISC1_OFF - deaktivuje osu C1

Obr. 5.13: Místa v NC programu vyžadující úpravu CSE driveru

Jako první je potřeba vyřešit volání podprogramu AXISC1\_OFF (resp. AXISC1\_ON). Na reálném stroji tento podprogram po zavolání manipuluje s mechanismem mezi vřetenem a jeho pohonem. V případě AXISC1\_OFF dochází k přepnutí osy C na vřetená a v případě AXISC1\_ON je osa C přepnuta do režimu polohového řízení osy. Stejně chování je potřeba provést i v simulačním modelu. Jelikož se jedná o podprogram je řešení snadné. Do

složky subprog se vloží dva soubory s příponou .SPF jejichž názvy odpovídají voláním v NC programu. Obsah obou podprogramů je na obr. 5.14.

AXISC1_ON	AXISC1_OFF
##LANGUAGE AC	##LANGUAGE AC
SetSpindleMode("C","axis");	SetSpindleMode("C","dstop");
##LANGUAGE NATIVE	##LANGUAGE NATIVE
ret	ret

Obr. 5.14: Obsah podprogramů pro přepínání chování osy C

Následující nutnou úpravou je změna interpretace osy C. V NC programu pro SP 430 je tato adresována jako CA1. S touto interpretací původní CSE driver nezvládá pracovat a úprava postprocesoru není žádoucí. Jelikož na stroji SP 430 není zároveň přítomna osa C a CA1, lze toto chování vyřešit pro simulační model snadno přidáním řetězce DEFINE CA1 AS C do inicializačního souboru pro kanál (přípona .ini). Tato úprava provádí přepis mezi NC programem a simulačním modelem. V NC programu je volána adresa CA1, ale simulační model ji vidí jako C. Pokud by však nebylo možné považovat osu CA1 za osu C, třeba tím, že by osa C řídila protivřeteno, bylo by nutné použít python parser (překladač) pro CSE driver a upravit jeho lex a yacc soubory, tak aby dokázali pracovat s tvarem CA1.

Podstatná úprava se týká výměny nástrojů. Zde je potřeba provést změny na dvou místech, a to v Machine Configuratoru a v podprogramu výměny nástrojů. Standardní výměna nástrojů je volána adresou T(číslo nástroje) M6, přičemž adresa T navolí požadovaný nástroj a M6 poté zavolá výměnu nástroje. Takto je to řešeno i v původním CSE driveru, ale u SP 430 je výměna volána pouze pomocí adresy T. Úprava v Machine tool builder řeší tento problém je následující. Po otevření .MCF souboru driveru na záložce Commands najít v kategorii Adresses adresu T a zahájit její úpravu pomocí tlačítka Edit Metacode. Na konec metakódu vložit funkci CallSubProg s parametrem „ToolChange“ (viz obr. 5.15), metakód uložit a zavřít. Tímto bude po přečtení adresy T zavolán podprogram na výměnu nástroje. Nyní k editaci zmíněného podprogramu. Ten lze nalézt ve složce subprog a lze ho upravit v textovém editoru. Jelikož na stroji



SP 430 nedochází k najetí na nějaký bod v souřadném systému (dojde k výměně nástroje, tam kde se nachází hlava), je tuto funkčnost potřeba přenést do simulačního modelu. Odjezd lze snadno eliminovat smazáním nebo zakomentováním řádku G0 G53 X=R501 Z=R502. Jelikož v simulačním modelu je definován uzel s klasifikací Tool mount v ose rotace revolverové hlavy, je potřeba přidat proměnnou, popisující poloměr, na kterém se nacházejí upínací kapsy pro nástroje. V případě hlavy osazené na stroji SP 430 je to složitější díky tomu, že nástroje nejsou uspořádány v kruhu, ale v šestiúhelníku. Liché kapsy mají vzdálenost k ose rotace 200 mm, přičemž sudé 230 mm. Do podprogramu je vložena podmínka vyhodnocující číslo kapsy a přiřazující proměnné R102 příslušnou hodnotu (viz obr. 5.16). Toto souvisí s další úpravou týkající se korekce nástroje, která je popsána v následujícím odstavci.

```
73 </IfCommand>
74 <Command>
75 <Name>SetVariable</Name>
76 <Param>"$P_TOOLNO"</Param>
77 <Param>getVariable("$P_TOOLP")</Param>
78 </Command>
79 <Command>
80 <Name>CallSubProg</Name>
81 <Param>"ToolChange"</Param>
82 </Command>
83 </Execute>
84 </Metacode>
```

Obr. 5.15: Úprava adresy T v Machine Configuratoru

```
ToolChange - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
$@ 698 00
; Set the tool change position values in metric X,Y,Z
R501=500.0
R502=700.0

; check the activ unit and change values if inch is in use
; 3 for G700
IF ($P_GG[13] == 1 OR $P_GG[13] == 3)
  R501 = R501 / 25.4;
  R502 = R502 / 25.4;
ENDIF
;G0 G53 X=R501 Z=R502

##LANGUAGE AC
INT nToolID;
nToolID = getArrayElement("$TC_TPI",getVariable("$P_TOOLP"));
move (AXIS, "TURRET", (nToolID-1)*360.0/12.0, 0.15);
STRING strCarrierTool;
strCarrierTool=getCarrierTool ("Turret", ITOS(nToolID));
setNextTool (strCarrierTool, "Turret");
activateNextTool ("Turret");

INT podm;
IF (nToolID == 1);
  podm = 1;
ENDIF;
IF (nToolID == 3);
  podm = 1;
ENDIF;
IF (nToolID == 5);
  podm = 1;
ENDIF;
IF (nToolID == 7);
  podm = 1;
ENDIF;
IF (nToolID == 9);
  podm = 1;
ENDIF;
IF (nToolID == 11);
  podm = 1;
ENDIF;
IF (podm == 1);
  setArrayElement ("SR",102,200);
ELSE;
  setArrayElement ("SR",102,230);
ENDIF;

##LANGUAGE NATIVE
D1
ret
```

Obr. 5.16: Úpravy podprogramu Tool Change

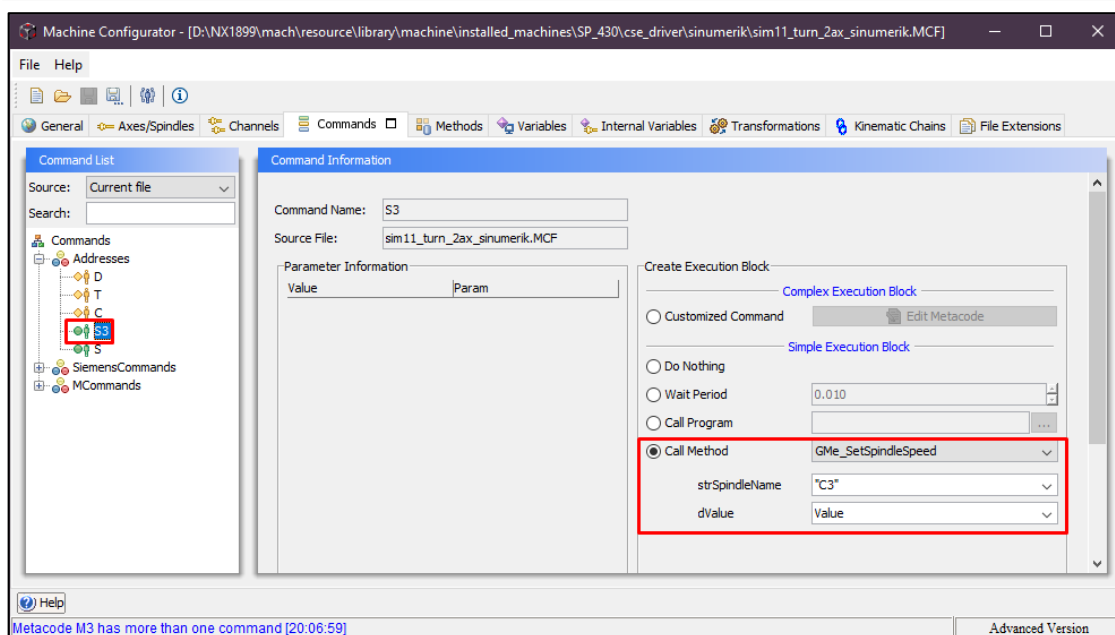
Při spuštění simulace v tomto stavu, by nástroj nejezdil na souřadnice, které jsou požadované. To lze opravit pomocí Machine Configurator na záložce Methods úpravou metody GMe\_ActivateToolCorrection, která je volána adresou D. Dříve zmíněnou metodu je potřeba upravit tak, aby odpovídala obrázku 5.17. Parametry get(x)Correction() načtou ze souboru to.ini korekce nástroje, přičemž L je pro délkovou (1. korekce), Q je druhá korekce a Z je třetí korekce. Lze zde vidět proměnnou R102 charakterizující vzdálenost kapsy nástroje od osy rotace revolverové hlavy, která se přičítá k druhé korekci nástroje. Parametry get(x)GeoAxis() udávají směr posuvu. First odpovídá ose X, second ose Y a Third ose Z. Tato úprava spolu s orientací uzlu Tool mount zajistí správný pohyb nástroje v simulaci, a to ať už se jedná o soustružnický či frézovací.

```
1 <?xml version='1.0' encoding='UTF-8' ?>
2 <Method xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi
3 <Name>GMe_ActivateToolCorrection</Name>
4 <Execute>
5 <Command>
6 <Name>DisplaceOrigin</Name>
7 <Param>"$TOOL"</Param>
8 <Param>FALSE</Param>
9 <Param>getThirdGeoAxis ()</Param>
10 <Param>getLCorrection ()</Param>
11 </Command>
12 <Command>
13 <Name>DisplaceOrigin</Name>
14 <Param>"$TOOL"</Param>
15 <Param>FALSE</Param>
16 <Param>getFirstGeoAxis ()</Param>
17 <Param>getQCorrection ()+getArrayElement ("$R",102)</Param>
18 </Command>
19 <Command>
20 <Name>DisplaceOrigin</Name>
21 <Param>"$TOOL"</Param>
22 <Param>FALSE</Param>
23 <Param>getSecondGeoAxis ()</Param>
24 <Param>getZCorrection ()</Param>
25 </Command>
26 </Execute>
27 </Method>
```

Vzdálenost kapsy od osy rotace hlavy

Obr. 5.17: Úprava metakódu GMe\_ActivateToolCorrection

Jelikož stroj podporuje poháněné nástroje v nástrojové hlavě, je tuto funkci potřebné zajistit i v simulačním modelu. Ze strany CSE driveru stačí přidat na záložce Commands v kategorii Adresses adresu s názvem S3. Funkce této adresy nastavit na Call Method s názvem metody GMe\_SetSpindleSpeed a parametry „C3“ a value. Toto nastaví hodnotu otáček z NC programu pro osu C3, což je vřeteno naháněných nástrojů. Konfigurace adresy v Machine Configuratoru je na obr. 5.18.



Obr. 5.18: Přidání adresy S3

Ve zkratce zde jsou uvedeny úpravy emulátoru ŘS, které pomáhají zpřesnit predikci času soustružnických operací. Nejprve se jedná o pauzu pro roztočení vřetena pomocí M-funkce M3 a M4. Zde je úprava snadná. Pomocí známé hodnoty zrychlení a požadovaných otáček lze určit, za jak dlouho by bylo těchto otáček dosaženo. Simulace bude po tuto dobu čekat (viz Příloha č.3 A). V praxi je však častější používat konstantní řeznou rychlost a v tom případě není pauza po M-funkci dostačující. Je potřeba upravit část programu, která se stará právě o konstantní řeznou rychlost, a opět určit čas, jak dlouho má simulace čekat, tak aby se blížila co nejvíce reálnému stroji. V případě tohoto konkrétního stroje jsou otáčky považovány za dosažené s tolerancí 10 %. V případě implementované funkce do simulačního modelu je rozhodující hodnota pro odbavení této funkce rozdíl 50 ot/min. Jakým způsobem je toto řešeno na reálném stroji, popisuje Příloha č.3 B a funkci implementovanou do simulačního modelu Příloha č.4.

Posledním zpřesněním je nastavení doby trvání pro výměnu nástrojů. z katalogu k nástrojové hlavě lze vyčíst, že otočení o 30° (1 pozici) trvá 0,15 s. Tuto hodnotu je potřeba vynásobit hodnotou o kolik pozic se má hlava otočit a přičíst časovou konstantu pro odemčení a uzamčení rotace hlavy. Tato funkce je k náhledu v Příloze č.5.



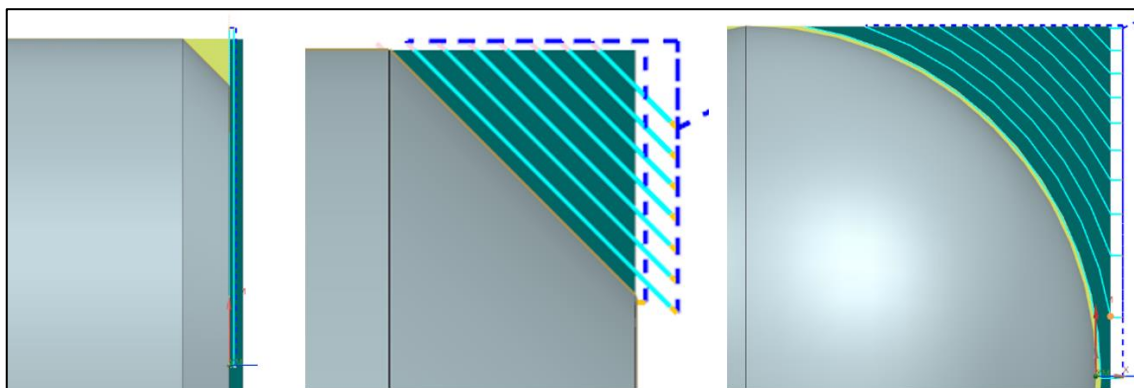
## 6 Ověření simulačního modelu pro predikci strojních časů

S hotovým simulačním modelem stroje zbývá připravit testovací dráhy nástrojů a ověřit přesnost predikce strojních časů pomocí experimentu. Ten se skládá ze dvou částí. Získání strojního času z reálného stroje a ze simulačního modelu. Pro názornost budou NC programy simulovány i v nižším typu simulace (TPS) založené na CL datech. Nakonec se výsledky vyhodnotí.

### 6.1 Testovací dráhy nástrojů

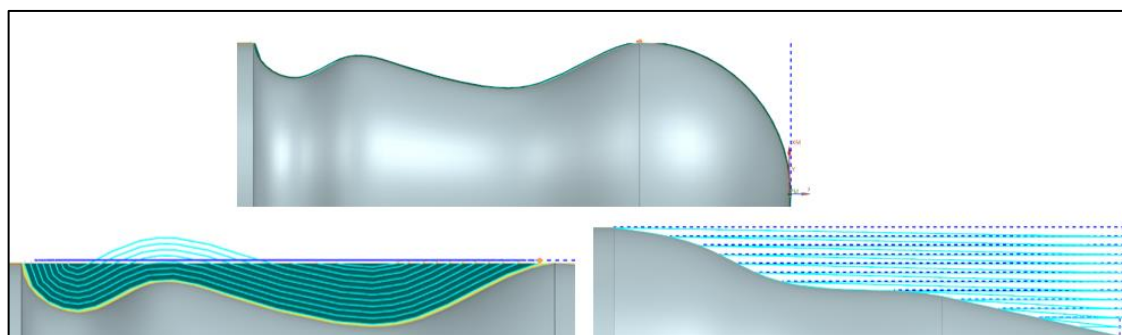
Pro provedení experimentu určující přesnost predikce strojních časů je potřeba připravit NC programy. Tyto NC programy by měly pokrývat co nejvíc možností stroje SP 430. Nejprve bylo připraveno několik ručně psaných NC programů pro otestování jednotlivých os a rozdílů mezi G64 G601 a G602 na stejné dráze. Pro otestování jednotlivých os je programovaná dráha složena z rychloposuvů a strojních posuvů, přičemž dochází ke změně směru. Pro měření odchylky při různých způsobech plánování dráhy byla navržena dráha s mnoha krátkými úseky, změnami posuvů a zastaveními. Několika opakováními této dráhy bylo dosaženo času s nějakou vypovídající hodnotou. V případě všech těchto drah bylo vřetenem zastaveno.

Pro vytvoření složitějších drah je vhodné využít CAM modulu. Jelikož SP 430 umožňuje krom soustružení také frézovat, je potřeba ověřit obě možnosti. Nejprve operace soustružnické. Nejjednodušší operací je zarovnání čela, následované sražením hrany. Jedná se o krátké operace, v případě čela jednoosé, v případě sražení interpolují osy dvě. Další dráhou je hrubování kulové plochy. Tato dráha byla odbavena dvakrát, jednou s konstantní řeznou rychlostí (což je v praxi častější) a jednou s konstantními otáčkami. V případě konstantní řezné rychlosti se značně projeví dynamika soustružnického vřeteně. Náhled na tyto tři operace je vidět na obr. 6.1.



Obr. 6.1: První tři soustružnické dráhy

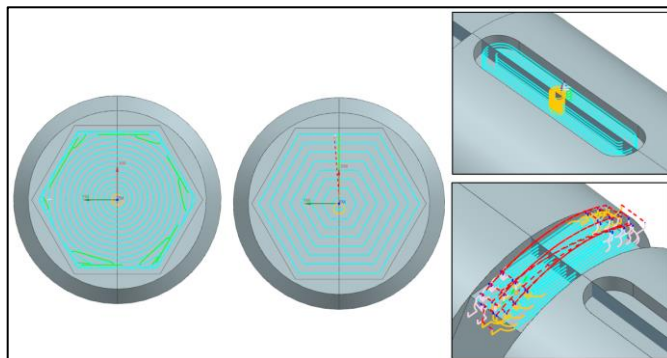
Následující dráhy jsou opět soustružnické, ale jedná se o delší a náročnější dráhy. První takovou drahou je hrubování tvarové kontury. Spojením této tvarové plochy s dříve použitou kulovou plochou vznikne delší kombinovaná tvarová plocha, jejíž dokončovací operace je další testovací dráha. Předposlední soustružnickou drahou je hrubování tvarové plochy pod úhlem (kužel). Zde se jedná o časově delší operaci, která ukáže odchylku na delší dráze. Poslední operací v kategorii soustružení, je souhrnný test soustružení. Ten je složen ze tří dříve zmíněných drah spojených do jedné dráhy, včetně výměny nástrojů. Jedná se o kombinaci hrubování tvarové a kulové plochy a poté jejich dokončení. V případě všech těchto drah byla použita konstantní řezná rychlost. Dráhy jsou na obr. 6.2.



Obr. 6.2: Zbývající soustružnické operace

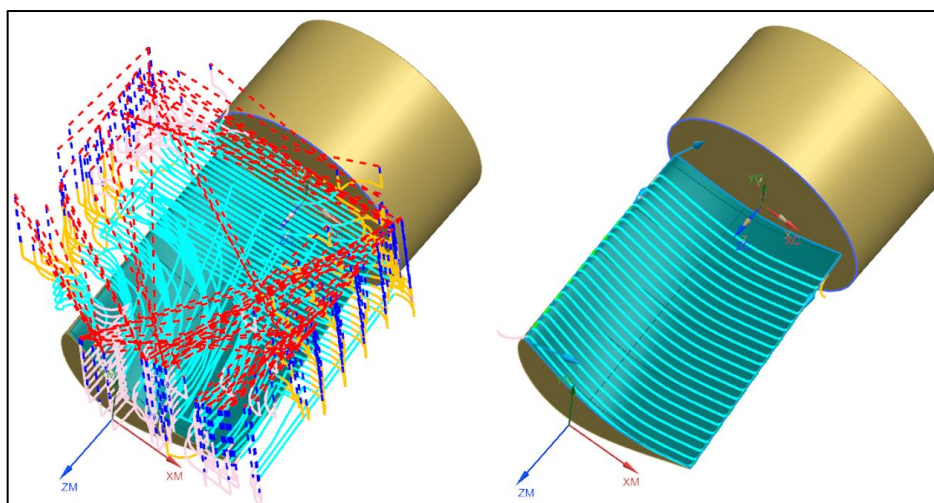
Aby bylo pokryto co nejvíc možností stroje, je potřeba připravit také dráhy frézovací. První kategorie frézovacích operací obsahuje 2D a 2,5D obrábění. Spadá sem výroba pero drážky a výroba vnějšího šestihranu pomocí radiálního naháněného nástroje. Další dvě dráhy využijí axiálně orientovaný poháněný nástroj, pomocí kterého se na čele součásti vytvoří kapsa ve tvaru šestihranu.

Tato dráha bude vytvořena pomocí dvou strategií, a to kapsování a adaptivním obráběním. Tyto dráhy jsou zobrazeny na obr. 6.3.



Obr. 6.3: 2D a 2,5D frézovací operace

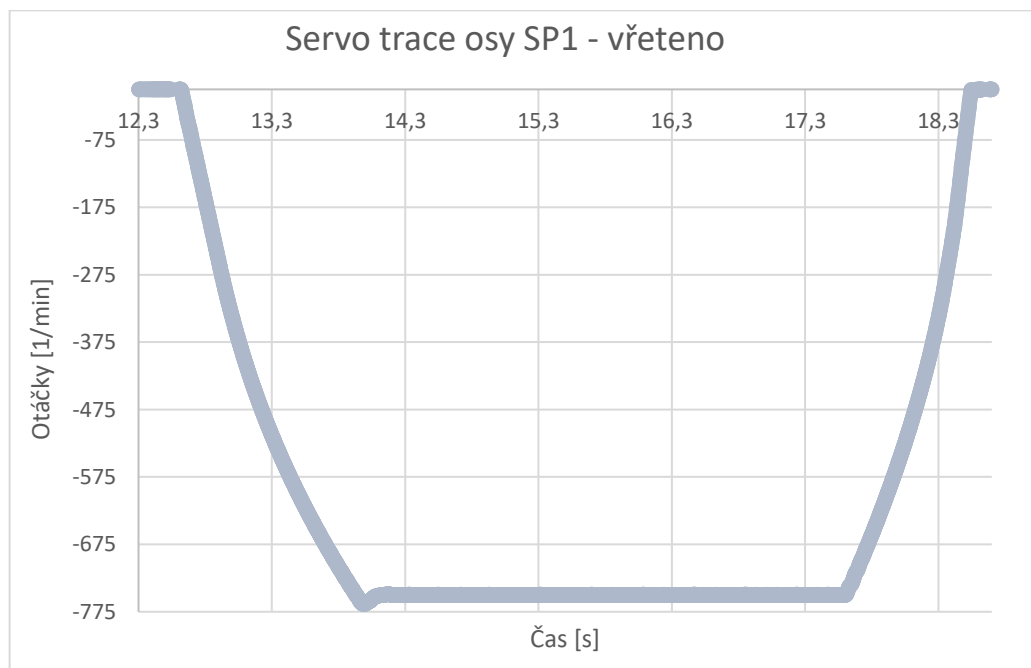
Stroj SP 430 umožňuje i 4osé obrábění. Pro vyzkoušení takového typu obrábění byla zvolena část lopatky. Na tomto dílci byly vytvořeny tři dráhy. Jedna hrubovací tříosá, jedna operace dokončovací tříosá a dokončovací operace, která využívá 4osé interpolace. Tříosá dokončovací operace byla připravena ve třech variantách: bez speciálních funkcí, s aktivním cyklem 832 a s kompresorem COMPCURV. Oba nástroje jsou upnuty radiálně. V případě všech frézovacích operací nebylo frézovací vřeteno zapínáno. Na stroji nebyl k dispozici nástrojový držák pro radiální nástroje a efekt na strojní čas z roztáčení malého vřetena a nástroje byl zanedbán. Jak vypadají dráhy na lopatkovém dílci je vidět na obr. 6.4. Nakonec byly připraveny dvě dráhy nástrojů pro test pevných cyklů. Jedna dráha obsahovala 10 vrtacích cyklů a druhá 10 závitovacích cyklů.



Obr. 6.4: Operace na lopatce

## 6.2 Měření času na stroji

Získání časů pro jednotlivé dráhy na stroji je snadné. Na stroji byl posunut nulový bod do prostoru tak, aby se eliminovala možnost kolize. Poté se jeden po druhém odbaví připravené NC kódy. Jelikož má každá dráha jiný výchozí a koncový bod najelo se vždy na první pohybový řádek dané dráhy a program se zastavil. Poté se znovu aktivoval program, tím došlo k resetování počítače času a celá dráha se odbavila souvisle až dokonce. Override potenciometr je potřeba nastavit na 100%, aby nedocházelo ke zkreslení času. Získaný čas byl poté zanesen do tabulky. Jak bylo již dříve řečeno, nějaké dráhy se odbavovaly bez otáček vřetena. Nastavení jednotlivých programů je zmíněno v předešlé kapitole. Při testu vlivu cyklu 832 se objevila chyba, která zamezila odbavení této dráhy. Příčinou této chyby je zřejmě limitace ŘS na tomto konkrétním stroji. Pro správné postižení dynamiky soustružnického vřetena byl naměřen servo trace této osy. Jak vypadá závislost otáček za minutu v závislosti na čase při roztočení vřetena na 750 ot/min a zastavení je vidět na obr. 6.5. Hodnoty otáček jsou záporné kvůli použití otáček proti směru hodinových ručiček. Roztočení trvá 1,6 s a zastavení 0,9 s. Časy jednotlivých drah jsou uvedeny v části vyhodnocení experimentu v Tab. 6.1 a 6.2.



Obr. 6.5: Servo trace osy SP1 (vřetena)



### 6.3 Měření času v simulaci

Pro porovnání s reálnými časy zjištěné měřením na stroji je potřeba získat časy ze simulačního modelu. Metodika zde byla stejná jako v předešlém případě, jen se program nerestartoval po najetí do referenčního bodu, ale je pozastavil a čas, který stroj potřeboval k dojetí z výchozího bodu simulace na referenční bod se odečetl od celkového času. Při tomto měření byly načteny přímo programy, které byly odbaveny na stroji. Je nutné zajistit co největší podobnost podmínek experimentu, takže pokud se na reálném stroji netočilo vřeteno, je to nutné dodržet i v simulaci. Získané časy byly opět zaneseny do tabulky. V případě soustružnických drah, při kterých se otáčelo vřeteno, byly naměřeny časy dva. Jeden bez postižené dynamiky vřetena a druhý s touto funkcí aktivovanou.

### 6.4 Vyhodnocení možnosti predikce strojního času

Se známými časy, jak ze simulace, tak z reálného stroje je potřeba tyto výsledky porovnat a určit, zda je simulační model spolehlivý způsob predikce strojního času. V následující Tabulce 6.1 jsou uvedeny výsledky testu frézovacích operací. Jak lze vidět predikované časy získané ze simulačního momentu jsou téměř identické s časy reálnými. Odchytky 1 s jsou zanedbatelné, jelikož mohou vzniknout zaokrouhlením času, který byl odečítán na celé sekundy. Jediná větší odchylka vznikla u dráhy s použitou adaptivní strategií, a to 4 s (1,3%). Toto může naznačovat, že při velkém počtu kruhových interpolací může docházet k odchylkám. Odchylka 1,3% je však přijatelná. Další větší odchylka vznikla v testu tříosých operací, a to konkrétně 2 s (2,8%). Poslední větší odchylku lze pozorovat při testu závitovacích cyklů, a to konkrétně 4 s (2,5%) opět se jedná o přijatelnou odchylku.



Tab. 6.1: Výsledky experimentu - frézovací dráhy

Dráhy	Popis	Čas reálný [s]	Čas simulace [s]	Delta [s]	Delta v [%]
<b>Frézování</b>					
Pero drážka	2,5osé	177	178	1	0,6%
Vnější 6HR	2osé	540	539	-1	-0,2%
Lopatka hrubo	3osé	517	518	1	0,2%
Lopatka finish	4osé	184	183	-1	-0,5%
Čelo 6HR kapsa	2,5osé kapsování	161	161	0	0,0%
Čelo 6HR adaptivní	2,5osé adaptivní	320	324	4	1,3%
3osa_1	bez funkcí	72	74	2	2,8%
3osa_2	Cyklus 832	73	74	1	1,4%
3osa_3	COMPCURV	73	74	1	1,4%
Vrtací cyklus	Cyklus 82	94	92	-2	-2,1%
Závitovací cyklus	Cyklus 84	158	162	4	2,5%

V Tabulce 6.2. jsou uvedeny výsledky experimentu se soustružnickými operacemi. Tři dráhy, jež byly odbaveny bez otáčení vřetene byly navrženy k porovnání vlivu plánování drah. Zde je vidět že odchylky jsou minimální, jedná se však o krátké dráhy. Kdyby dráhy byly delší, a programované posuvy byly větší, odchylka by pravděpodobně byla větší. ŘS má rozdílné parametry zrychlení a ryvu pro režim G64 a G60, které se však projeví při vysokých rychlostech. Simulační model je nastaven na parametry G64. U zbývajících operací hraje roli dynamika vřetena. Odchylky simulace, která neřešila vlastnosti vřetena jsou hlavně v případě krátkých drah markantní. Například u operace „hrubování polokoule“ je rozdíl časů 8,8%. Je to dáno tím, že nástroj několikrát přejíždí z velkého průměru na malý a po kulové dráze opět stoupá. Na reálném stroji nástroj čeká, dokud není dosaženo požadovaných otáček s tolerancí 10%. Simulační model v tomto případě jede bez zastavení. Proto byla do sim. modelu přidána funkce (popsáno v kapitole 5.3.3.), která tyto vlastnosti postihuje. Z výsledků vyplývá, že tato funkce snížila odchylku přibližně o polovinu. Maximální finální odchylka (s aktivní funkcí pro zpřesnění) simulačního modelu od reálného času je 9,5% (původní odchylka činí 23,8%), přičemž se jedná o dráhu s celkovou délkou 21 sekund. Odchylky na delších drahách jsou mnohem menší. Celkově jsou odchylky predikce přijatelné a predikovaný čas lze považovat za spolehlivý.



Tab. 6.2: Výsledky experimentu - soustružnické dráhy

Dráhy	Popis	Čas reálný [s]	Čas simulace [s]	Delta [s]	Delta v %	Čas s dyn. vřet. [s]	Delta s dyn. vřet. [s]	Delta s dyn. vřet. v %
<b>Soustružení</b>								
Čelo	1osé	21	16	-5	-23,8%	19	-2	-9,5%
Sražení	2osé	19	16	-3	-15,8%	18	-1	-5,3%
Hrubování polokoule	2osé	68	62	-6	-8,8%	71	3	4,4%
Hrubování kontury	2osé	204	202	-2	-1,0%	203	-1	-0,5%
Dokončení kontury	2osé	60	58	-2	-3,3%	60	0	0,0%
Hrubování dlouhé	2osé	511	502	-9	-1,8%	503	-8	-1,6%
Jedn_dr_G64	1osé G64	59	59	0	0,0%			
Jedn_dr_G601	1osé G60 G601	66	66	0	0,0%			
Jedn_dr_G602	1osé G60 G602	64	63	-1	-1,6%			
Hrubování polokoule	2osé konst. Ot.	48	44	-4	-8,3%	46	-2	-4,2%
Souhrnné	Komplexní test 2 osé	319	311	-8	-2,5%	319	0	0,0%

Nakonec je zde pro ilustraci uvedeno porovnání mezi TPS simulací (řízená CL daty), CSE simulací (řízená NC programem) a reálným časem. Porovnání bylo provedeno u čtyř vybraných frézovacích a čtyř vybraných soustružnických operací. Z výsledku v Tab. 6.3 lze pozorovat, že odchylky strojních časů jsou podstatně větší při použití simulace řízené CL daty, oproti použití simulace s emulátorem řídicího systému řízené NC programem. V případě soustružení vykazuje simulace řízená CL daty maximální odchylku 48,5%, zatímco čas predikovaný simulací stejné operace (Hrubování polokoule) založené na NC programu má odchylku od reálného času pouze 4,4%. V případě frézování je výsledek stejně jednostranný. Nejhuře dopadla čtyřosá operace Lopatka finish. Zde odchylka TPS a reálného času činí 19,6%, přičemž při použití CSE je odchylka pouze 0,5%.

Tab. 6.3: Porovnání simulace CL dat a NC programu

Dráha	Čas v TPS simulaci [s]	Čas v CSE simulaci [s]	Čas reálný [s]	Delta TPS a reálného času [%]	Delta CSE a reálného času [%]
<b>Soustružení</b>					
Sražení	14	18	19	-26,3%	-5,3%
Hrubování polokoule	35	71	68	-48,5%	4,4%
Hrubování kontury	195	203	204	-4,4%	-0,5%
Souhrnne	272	319	319	-14,7%	0,0%
<b>Frézování</b>					
Pero drážka	193	178	177	9,0%	0,6%
Čelo 6HR kapsa	160	161	161	-0,6%	0,0%
Lopatka hrubo	485	518	517	-6,2%	0,2%
Lopatka finish	148	183	184	-19,6%	-0,5%

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že simulační model s emulátorem řídicího systému je správně nakonfigurován a poskytuje spolehlivý způsob pro predikci strojních časů s dostatečnou přesností. Takto nastavený simulační model lze využít pro predikování strojních časů.



## 7 Závěr

Po získání přehledu v oblasti zaměření práce, tedy simulačních modelů a predikce strojního času různými přístupy, byla provedena analýza současných přístupů k predikování strojního času.

Z této analýzy vyplynulo, že neexistuje žádná práce, která by využívala simulační model pro predikci strojního času. Dále byl proveden průzkum dostupných softwarových řešení pro tvorbu a užití simulačních modelů na trhu. Zde lze tato řešení rozdělit na integrované funkce v CAD/CAM potažmo komplexních PLM systémech (např. Siemens NX) a na specializované programy pro verifikaci, optimalizaci a simulaci obráběcích procesů (sem spadá například Vericut).

Dále byla provedena analýza nastavitelných kinematických parametrů simulačního modelu v systému Siemens NX a k těmto parametrům dohledány odpovídající proměnné ŘS Sinumerik 840D a Heidenhain TNC 640. TNC a Sinumerik jsou velice rozdílné ŘS a jelikož je NX od stejného výrobce jako Sinumerik, jsou parametry simulačního modelu připraveny právě pro stroje s ŘS Sinumerik.

Následoval návrh variant řešení, jež jsou – Interpolátor v postprocesoru, Využití ŘS (jeho doprovodných programů) a Simulační model. Z těchto návrhů byl vybrán právě simulační model, jelikož se jedná o nejuniverzálnější řešení, které navíc nevyžaduje náročný softwarový vývoj.

Následovalo provedení testů citlivosti, které ukázaly, s jakými parametry doopravdy simulační model pracuje a jak reaguje na jejich změny. Byla také ověřena podpora programových funkcí například plánování drah. Pomocí softwaru Sinutrain, byly ze zálohy ŘS stroje získány kinematické parametry jednotlivých os.

Dále byl v prostředí Machine Tool Builder vytvořen simulační model stroje SP 430 s řídicím systémem Sinumerik 840D, od výrobce Kovošvit MAS. Upraven byl i emulátor ŘS, tak aby pracoval s NC programem, který tvoří postprocesor pro tento stroj. Další úpravy emulátoru byly provedeny za účelem zahrnutí



kinematických parametrů soustružnického vřetena a tím zpřesnění predikce strojního času.

Jelikož bylo potřeba ověřit, s jakou přesností simulační model pracuje byly připraveny testovací dráhy pro experiment. Pomocí experimentu bylo potřeba zahrnout co nejvíc možností stroje a jelikož se jedná o soustružnicko-frézovací centrum, znamenalo to připravit dráhy nejen soustružnické, ale také frézovací. Celkově experiment obsahuje dráhy využívající od jedné do čtyř os.

Výsledky experimentů byly zaneseny do tabulek a u frézovacích operací je maximální odchylka 2,8 % na dráze, která trvala 72 s to činí odchylku 2 s, což je přijatelný výsledek. U frézovacích operací však nehraje roli nastavení kinematických parametrů soustružnického vřetena. U soustružnických operací, při kterých docházelo k otáčení vřetena, byla odchylka větší. Úpravou emulátoru ŘS se však tyto odchylky podařilo snížit přibližně na polovinu a v některých případech odstranit úplně. Největší odchylka i po úpravě emulátoru činí 9,5%, avšak na dráze dlouhé pouze 21 s. Všechny delší dráhy mají odchylku značně menší. Například souhrnný test i s výměnou nástrojů, trvající 319 sekund, má shodný čas se simulací. Nakonec byla porovnána simulace řízená CL daty a simulace s emulátorem ŘS řízená NC programem. Z tohoto porovnání bylo ověřeno, že simulace CL dat není vhodná pro predikci strojního času a je zapotřebí vždy využívat simulaci s emulátorem řídicího systému tak, jak bylo ukázáno v této práci.

Celkově jsou výsledky velmi dobré a lze říci, že tento přístup je možné použít pro predikci strojních časů. Další možnosti pro zlepšení by zahrnovaly přesnější výpočet času čekání na roztočení vřetene, nebo vývoj funkce, která by dokázala přepínat mezi parametry, se kterými pracuje simulační model na základě aktivního režimu plánování drah. Celkově je přesnost predikce dostačující a je možné tuto metodu aplikovat v praxi.



# Seznamy

## Seznam literatury

- [1] HÁJÍČEK, Zdeněk. *Testování virtuálního NC stroje v prostředí PLM systému NX*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni - Fakulta strojní. Vedoucí práce Jan Hnátík
- [2] BRYCHTA, J., R. ČEP, J. NOVÁKOVÁ a L. PETŘKOVSKÁ. *Technologie II. 2. díl*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] PETRUŠKA, Jakub. *Třískové obrábění* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=83858](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83858). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Milan Kalivoda.
- [4] MCKECHNIE, Glenn. *Univerzální hrotový soustruh* [online]. 2006 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Soustruh#/media/Soubor:HwacheonCentreLathe\\_460x1000.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Soustruh#/media/Soubor:HwacheonCentreLathe_460x1000.jpg)
- [5] CNC soustruh. *Pilart* [online]. [cit. 2020-12-9]. Dostupné z: <https://www.pilart.cz/produkt/robustni-CNC-soustruh-s-pohanenymi-nastroji-AVIAturn-63M-1189/>
- [6] Dílenské programování. *OneIndustry* [online]. [cit. 2020-9-12]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/wp-content/uploads/2019/04/upr-PC3.jpg>
- [7] HUŠEK, Jan. *Mechanické parametry obráběcího stroje a jejich vliv na výpočet strojního času*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České Vysoké Učení technické v Praze - Fakulta Strojní. Vedoucí práce Tomíček Jan.
- [8] KRITZINGER, W., M. KARNER, G. TRAAR, J. HENJES a W. SIHN. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *Science Direct* [online]. 2018 [cit. 2020-11-25]. ISSN 2405-8963. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>
- [9] HART, Derek a Jan HOMOLA. Pokročilé simulace obrábění v prostředí NX CAM. *Konstrukter.cz* [online]. 2015 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/pokrocile-simulace-obrabeni-v-prostredi-nx-cam/>
- [10] JANDA, P., Z. HÁJÍČEK a P. BERNARDIN. *Implementation of the digital twin methodology* [online]. 2019 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: doi:10.2507/30th.daaam.proceedings.072
- [11] VESELÝ, J., M. SULITKA a J. SMOLÍK. Simulace CNC obrábění. *MM* [online]. 2011, 28.06.2011, 2011(7) [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-cnc-obrabeni.html>



- [12] GELMEREANU, C., L. MORAR a S. BOGDAN. Productivity and Cycle Time Prediction Using Artificial Neural Network. *Procedia Economics and Finance* [online]. Elsevier, 2014, 2014 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00626-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00626-1)
- [13] ALTINTAS, Y. a S. TULSYAN. Prediction of part machining cycle times via virtual CNC. *CIRP Annals* [online]. Elsevier, 2015, 28. 4. 2015, 64(1) [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.100>
- [14] NX [online]. Siemens [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>
- [15] SolidWorks [online]. Dassault Systemes [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.solidworks.com/>
- [16] Dassault Systemes: Catia [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: [https://www.3ds.com/products-services/catia/?wockw=card\\_content\\_cta\\_1\\_url%3A%22https%3A%2F%2Fblogs.3ds.com%2Fcatia%2F%22](https://www.3ds.com/products-services/catia/?wockw=card_content_cta_1_url%3A%22https%3A%2F%2Fblogs.3ds.com%2Fcatia%2F%22)
- [17] Inventor CAM [online]. Autodesk [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/inventor-cam/overview?plc=PDCOLL&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1#internal-link-what-s-in-the-collection>
- [18] SolidWorks CAM. In: *SolidWorks Blog* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://1fx31e15jiza3cawtu3myqsw-wpengine.netdna-ssl.com/solidworksblog/wp-content/uploads/sites/2/2018/10/Rest-Machining-Image-1-615x346.png>
- [19] Solid Edge [online]. Siemens [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://solidedge.siemens.com/en/>
- [20] CATIA V5 Machine Tool Builder. In: *Digital Manufacturing Solutions* [online]. 2014 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://migrate.4dmsco.com/solutions/catia/catia-v5-plm-express-cat/catia-v5-plm-express-manufacturing/catia-v5-machining/catia-v5-machine-tool-builder/>
- [21] Vericut [online]. CGTech [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.cgtech.com/products/about-vericut.html>
- [22] MachineWorks [online]. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.machineworks.com/>
- [23] NCSIMUL [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://www.ncsimul.com/>
- [24] ICAM [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://icam.com/>



[25] CHTech's OptiPatch and Force Modules Prove Complementary. In: *Modern Machine Shop* [online]. Modern Machine Shop, 2020, 18. 11. 2020 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/cgtechs-optipath-and-force-modules-prove-complementary>

[26] KALNAŠI, Radoslav. *Ekonomická analýza obráběcího procesu* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=56967](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56967). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jaroslav Prokop.

[27] *Parameter Manual, Machine Data and parameters, Sinumerik 840D* [online]. In: . Siemens, 01/2015 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/587/109476587/att\\_845204/v1/LIS1s\\_L\\_0115\\_en\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/587/109476587/att_845204/v1/LIS1s_L_0115_en_en-US.pdf)

[28] Sinumerik CSE Jump Velocity parameter. In: *Siemens: Digital Industries Software* [online]. Siemens, 2020 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/question/0D54O00006LUK5y/sinumerik-cse-jump-velocity-parameter>

[29] *TNC 640: Technical manual*. Heidenhain, 2015.

[30] *SINUMERIK 810D/840D Manual, Tool and Mold Making*. [online]. 2007 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: [https://support.industry.siemens.com/cs/document/28787329/sinumerik-840d-840di-810d-802d-sl%3A-tool-and-mold-making\(3-axes\)?dti=0&lc=en-CZ](https://support.industry.siemens.com/cs/document/28787329/sinumerik-840d-840di-810d-802d-sl%3A-tool-and-mold-making(3-axes)?dti=0&lc=en-CZ)

[31] Nosná struktura stroje SP 430 Y2/A11. *Kovosvit* [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/sp-430-p13.html#pracovni-prostor>

[32] RYBÍN, J. *Automatické řídicí systémy*. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00694-8.

## Seznam použitého softwaru

Siemens NX 1899  
Siemens Sinutrain Operate  
Siemens Machine Configurator  
CIMCO Edit 8  
Notepad++  
Microsoft Excel  
Microsoft Word





## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Vlevo konvenční soustruh [4], vpravo CNC soustruh [5] .....	13
Obr. 2.2: Příklad NC programu.....	14
Obr. 2.3: Dílenské programování [6] (vlevo), prostředí NX CAM (vpravo) .....	15
Obr. 2.4: Skladba řídicího systému .....	16
Obr. 3.1: Datový tok v Digital Twin [8].....	17
Obr. 3.2: Datový tok v Digital Shadow [8].....	18
Obr. 3.3: Datový tok v Digital Model [8].....	18
Obr. 3.4: Simulace obráběcího stroje VNCK [10] .....	20
Obr. 3.5: Odhalení kolize nástroje a upínky v CSE simulaci .....	21
Obr. 3.6: Porovnání reálného a odhadnutého strojního času [13] .....	24
Obr. 3.7: Schéma toku dat virtuálního CNC [13] .....	24
Obr. 3.8: Prostředí SolidWorks CAM [18].....	26
Obr. 3.9: Prostředí Machine Tool Builder CATIA V5 (2014) [20] .....	26
Obr. 3.10: Simulace obrábění s hlídáním řezných sil v prostředí Vericut [25] ..	27
Obr. 3.11: Tabulka pro konfiguraci kinematických vlastností .....	31
Obr. 3.12: Podprogram výměny nástrojů s pohybem zásobníku.....	33
Obr. 3.13: Chování funkce SOFT a BRISK [30] .....	35
Obr. 4.1: Varianta A – Interpolátor v postprocesoru .....	37
Obr. 4.2: Schéma - Varianta B – Využití ŘS .....	38
Obr. 4.3: Schéma varianty C s tokem dat .....	39
Obr. 4.4: Pavučinový graf porovnávající varianty řešení .....	40
Obr. 5.1: KOVOSVIT MAS SP 430 [31] .....	41
Obr. 5.2: Příklad dráhy pro test citlivosti.....	42
Obr. 5.3: Nahoře lokace funkcí, vlevo Wrap Assembly, vpravo Linked Exterior	44
Obr. 5.4: Původní součást (vlevo) a součást po zjednodušení (vpravo) .....	45
Obr. 5.5: Vytvoření stroje ze zálohy v Sinutrain .....	46
Obr. 5.6: Navigace v prostředí virtualizovaného ŘS pro kroky 3 až 5 .....	47
Obr. 5.7: Navigace v prostředí virtualizovaného ŘS pro kroky 8 až 10 .....	48
Obr. 5.8: Souborová struktura simulačního modelu .....	49
Obr. 5.9: Spuštění modulu MTB v prostředí NX.....	50
Obr. 5.10: Obrazovka Machine Tool Navigator .....	50
Obr. 5.11: Kinematická struktura po zjednodušení.....	51
Obr. 5.12: Okno nastavení strojní osy v MTB.....	53
Obr. 5.13: Místa v NC programu vyžadující úpravu CSE driveru .....	55
Obr. 5.14: Obsah podprogramů pro přepínání chování osy C .....	56
Obr. 5.15: Úprava adresy T v Machine Configuratoru .....	57
Obr. 5.16: Úpravy podprogramu Tool Change .....	57
Obr. 5.17: Úprava metakódu GMe_ActivateToolCorrection .....	58
Obr. 5.18: Přidání adresy S3.....	59
Obr. 6.1: První tři soustružnické dráhy .....	61
Obr. 6.2: Zbývající soustružnické operace .....	61
Obr. 6.3: 2D a 2,5D frézovací operace.....	62



Obr. 6.4: Operace na lopatce .....	62
Obr. 6.5: Servo trace osy SP1 (vřetena) .....	63

## Seznam tabulek

Tab. 3.1: Výsledky metody ANN [12] .....	23
Tab. 3.2: Přehled proměnných pro řídicí systémy Sinumerik 840D a TNC640	32
Tab. 4.1: Porovnání variant řešení .....	40
Tab. 5.1: Podpora funkcí plánování drah v simulačním modelu.....	43
Tab. 6.1: Výsledky experimentu - frézovací dráhy .....	65
Tab. 6.2: Výsledky experimentu - soustružnické dráhy .....	66
Tab. 6.3: Porovnání simulace CL dat a NC programu.....	67

## Seznam příloh

### Textové přílohy:

Příloha č. 1: Tabulka testů citlivosti na změnu kinematických parametrů	str. P2
Příloha č. 2: Tabulka testů chování funkcí pro plánování drah	str. P3
Příloha č. 3: A: Funkce pro simulaci čekání při roztáčení vřetene B: Chování při konstantní řezné rychlosti na reálném stroji	str. P4
Příloha č. 4: Chování při konstantní řezné rychlosti v emulátoru ŘS	str. P5
Příloha č. 5: Funkce pro simulaci otáčení nástrojové hlavy	str. P6

### Elektronické přílohy:

NC\_programy.zip  
Testovací\_dilce.zip  
Video\_simulace.mp4

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

Přílohy



## Příloha č. 1

Tabulka testů citlivosti na změnu kinematického parametru

Změna	Rychlost [mm/s]	Zrychlení [mm/s <sup>2</sup> ]	Jerk [mm/s <sup>3</sup> ]	Jump velocity [mm/s]	KV	Fine [mm]	Coarse [mm]	Získaný čas [s]	Delta proti základu [%]
Základ	500	3000	1000000000	4,8	3	0,01	0,04	3,3	0,00
Rychlost-50%	250	3000	1000000000	4,8	3	0,01	0,04	5,43	64,55
Rychlost-10%	450	3000	1000000000	4,8	3	0,01	0,04	3,51	6,36
Zrychlení-50%	500	1500	1000000000	4,8	3	0,01	0,04	3,72	12,73
Zrychlení-10%	500	2700	1000000000	4,8	3	0,01	0,04	3,33	0,91
Jerk-50%	500	3000	500000000	4,8	3	0,01	0,04	3,3	0,00
Jerk-99%	500	3000	100000000	4,8	3	0,01	0,04	3,3	0,00
Jump Velo.-50%	500	3000	1000000000	2,4	3	0,01	0,04	3,3	0,00
Jump Velo.-99%	500	3000	1000000000	0,048	3	0,01	0,04	3,3	0,00
KV-50%	500	3000	1000000000	4,8	1,5	0,01	0,04	3,75	13,64
KV-10%	500	3000	1000000000	4,8	2,7	0,01	0,04	3,33	0,91
Fine Pr.-50%	500	3000	1000000000	4,8	3	0,005	0,04	3,33	0,91
Fine Pr.-10%	500	3000	1000000000	4,8	3	0,009	0,04	3,3	0,00
Fine Pr.+10%	500	3000	1000000000	4,8	3	0,011	0,04	3,27	-0,91
Fine Pr.+50%	500	3000	1000000000	4,8	3	0,015	0,04	3,27	-0,91
Fine Pr.+100%	500	3000	1000000000	4,8	3	0,02	0,04	3,24	-1,82
Coarse Pr.-50%	500	3000	1000000000	4,8	3	0,01	0,02	3,3	0,00
Coarse Pr.+50%	500	3000	1000000000	4,8	3	0,01	0,06	3,3	0,00



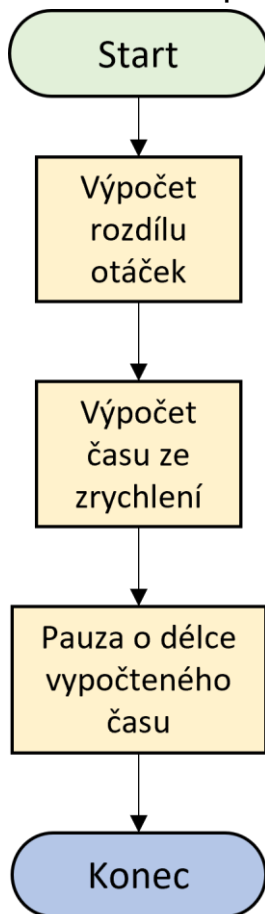
## Příloha č. 2

Tabulka testů chování funkcí pro plánování drah

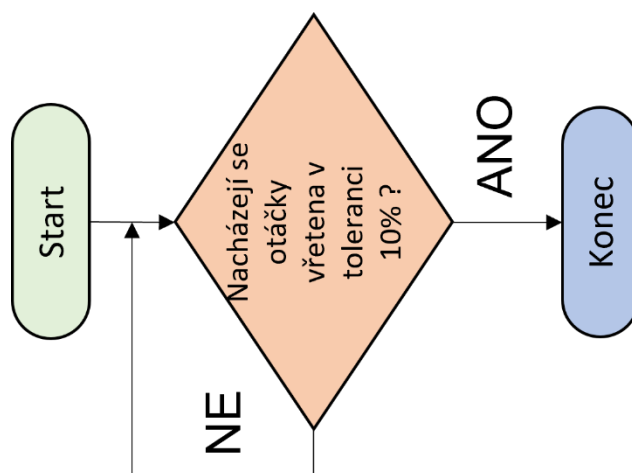
Programová funkce	Získaný čas	Delta oproti základu
	[s]	[%]
Základ	10,06	0,00
G60	10,06	0,00
G60 G601	10,06	0,00
G60 G602	9,66	-3,98
G60 G603	8,81	-12,43
G64	8,52	-15,31
G641	8,52	-15,31
G641 ADIS 0,5	8,52	-15,31
G641 ADISPOS 0,5	8,52	-15,31
G642	8,52	-15,31
G643	8,52	-15,31
G644	0	-100,00
G645	0	-100,00
SOFT	10,06	0,00
BRISK	10,06	0,00
G64 (Fine Prec. +100%)	8,52	-15,31
G60 (Fine Prec. +100%)	9,86	-1,99
G64 BRISK	8,52	-15,31

### Příloha č. 3

#### A: Funkce pro simulaci čekání při roztáčení vřetene



#### B: Chování při konstantní řezné rychlosti na reálném stroji



## Příloha č. 4

### Roztáčení vřetene při konstantní řezné rychlosti v emulátoru ŘS





## Příloha č. 5

### Funkce pro simulaci otáčení nástrojové hlavy

