

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Testování virtuálního NC stroje v prostředí PLM systému NX

Autor: **Bc. Zdeněk HÁJÍČEK**

Vedoucí práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

Prohlášení o autorství

Prohlašuji tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohláším, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tento projekt byl podporován společností ITS s.r.o. Siemens partner a společností Sahos a.s.. Společnost ITS poskytla softwarové zajištění a konzultační podporu ze stránky programování v prostředí PLM systému NX CAM. V rámci studií programování virtuálních NC strojů zprostředkovala zahraniční školení v Siemens PLM, kde bylo získáno potřebné know-how v oblasti tvorby CSE simulátorů. Jako konzultant v problematice programování postprocesorů byl pan Bohumil Dvořák. Společnost Sahos a.s. je zaměřena na výrobu víceosých CNC frézovacích center na obrábění kompozitu a umělého dřeva. Ve výrobním závodě byla dlouhodobě poskytnuta kompletní výrobní podpora pro samotný výzkum. Jako konzultant v problematice kybernetiky a řízení strojů byl Ing. Radim Šimek Ph.d.. Celý proces testování byl testován na CNC frézovacím stroji Dynamic No. 261 a systém výstupního řešení byl navržen k implementaci do společnosti.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Hájíček	Jméno Zdeněk		
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení Ing. Hnátík, Ph.D.	Jméno Jan		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Testování virtuálního NC stroje v prostředí PLM systému NX			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN

CELKEM	83	TEXTOVÁ ČÁST	60	GRAFICKÁ ČÁST	4
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	<p>Cílem této diplomové práce bylo zefektivnění optimalizace pětiosého CNC centra Sahos Dynamic No. 261 a navrhnout optimální výstupní technologické testování. Návrhem řešení bylo využít pokročilých technologických simulací v PLM systému NX. Byla vytvořena virtuální maketa CNC stroje řízená reálným NC kódem. Maketa se skládá z řídicího driveru, postprocesoru, kinematiky a knihoven nutných pro implementaci simulátoru do prostředí NX CAM. Byla navržena metodika optimalizace pohonů a technologie. Díky této navržené metodice významně klesla časová i ekonomická náročnost celého procesu.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	<p>Virtuální CNC stroj, optimalizace, testování, NC program, parametry pohonů, NX CAM, CSE simulace, řídicí driver, postprocesor, kinematika, Mercedes test, Okuma test</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Hájíček	Name Zdeněk	
FIELD OF STUDY	N3201 “Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname Ing. Hnátík, Ph.d.	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Testing virtual NC machine in the environment PLM NX		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES

TOTALLY	83	TEXT PART	60	GRAPHICAL PART	4
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	<p>The main target of this diploma work was to streamline the optimization of five-axis CNC tool machine Sahos Dynamic No. 261 and to propose optimal technological output testing. The solution was to use advanced simulation technology in PLM NX. It was created a virtual CNC tool machine controlled by NC code. Virtual tool machine consists of a motion driver, postprocessor, kinematics and libraries for implementation of the simulator environment NX CAM. It was proposed methodology of optimization drives and technology. Temporal and economic cost of the process was significantly decreased with this proposed methodology.</p>
KEY WORDS	<p>Virtual CNC tool machine, optimization, testing, NC program, parameters of drive, NX CAM, CSE simulation, motion driver, postprocessor, kinematic, Mercedes test, Okuma test</p>

Obsah

1. Úvod	1
2. Uvedení do problematiky NC strojů a zařízení	2
2.1. Řízení obráběcích strojů.....	2
2.1.1. Co znamená NC.....	2
2.1.2. Výhody CNC řízených strojů	3
2.1.3. Pohybové mechanismy CNC strojů.....	3
2.2. Programování NC strojů.....	3
2.2.1. NC program	3
2.2.2. Pravoúhlý souřadnicový systém	4
2.2.3. Druhy programování	5
2.3. Uvedení do problematiky CAM.....	6
2.4. Prostředí NX CAM 8.5.....	7
2.5. Simulace a řízení CNC obráběcích strojů	7
2.5.1 CNC stroj jako komplexní mechatronický systém.....	8
2.5.2. Interpolace NC kódu řídicím systémem stroje	9
2.5.3. Řízení pohonů stroje.....	10
2.5.4. Virtuální makety strojů pro pokročilé simulace obrábění	11
2.6. Simulace v prostředí NX CAM 8.5	12
2.6.1. Integrovaná simulace a verifikace (Integrated Simulation and Verification).....	13

2.6.2.	Simulace řízená pohony (Common Simulation Engine)	14
2.6.3.	Tvorba kinematiky NC stroje (Machine Tool Builder)	15
2.6.4.	Tvorba řídicího driveru (Machine Configurator)	17
2.6.5.	Knihovny simulátoru	19
2.6.6.	Simulace řízená virtuálním řídicím systémem (Virtual NC Controller driven) .	19
2.6.7.	Tvorba postprocesoru (Postprocessing)	20
2.7.	Uvedení do problematiky testování frézovacích center v osách XYZ.....	22
2.7.1.	Testovací dílec Mercedes	22
2.7.2.	Testovací dílec Okuma	22
2.7.3.	Testovaná součást.....	24
2.8.	Uvedení do problematiky optimalizace strojů.....	24
2.8.1.	Ziegler-Nicolsonova metoda optimalizace	25
2.8.2.	Teorie definovaných parametrů pro virtuální optimalizaci NC strojů	27
3.	Rozbor testovaného stroje	30
3.1.	Popis testovaného stroje Dynamic No. 261.....	30
3.1.1.	Technické parametry stroje	30
3.1.2.	Přesnost stroje Dynamic	32
4.	Tvorba virtuální makety Dynamic No. 261.....	33
4.1.	Tvorba kinematiky v prostředí NX Machine Tool Builder.....	34
4.2.	Tvorba postprocesoru	35
4.3.	Tvorba řídicího driveru	36

4.4.	Princip virtuálního testování NC stroje	37
4.5.	Tvorba testovací technologie v prostředí NX CAM	40
4.5.1.	Vyhodnocení virtuální optimalizace pohonů NC stroje	41
4.5.2.	Vyhodnocení technologické (CAM) optimalizace (PM1).....	43
4.6.	Mercedes test.....	45
4.6.1.	Mercedes test optimalizovaného stroje (PM1)	45
4.6.2.	Konstrukční úprava stroje.....	47
4.6.3.	Test stroje s provedením gantry.....	47
4.6.4.	Mercedes test na provedení gantry	49
5.	Technicko-ekonomické hodnocení	55
5.1.	Časová úspora Mercedes testu.....	55
5.2.	Časová úspora na testování NC stroje	55
5.3.	Ekonomické hodnocení	56
5.3.1.	Náklady spojené s optimalizací stroje	57
5.3.2.	Výroba Mercedes testu	58
6.	Závěr	59
	Literatura	61
	Seznam obrázků.....	63
	Seznam tabulek.....	65

Seznam příloh

**Příloha č. I - Testovací dílec profilů Mercedes pro provedení bez systému Gantry
a příslušný operační list**

**Příloha č. II - Testovací dílec profilů Mercedes pro provedení se systémem Gantry
a příslušný operační list**

Příloha č. III - Testovací dílec Mercedes a příslušný operační list

Příloha č. IV - Testovací dílec Okuma a příslušný operační list

Seznam zkratk

CAD – Computer Aided Design (systém počítačové podpory při konstruování)
CAM – Computer Aided Manufacturing (systém počítačové podpory výroby)
PLM – Product Lifecycle Management (správa životního cyklu výrobku)
CL data – Cutter Location data (data koncových poloh pohybu nástroje)
CNC – Computer Numerical Control (počítačové číslicové řízení)
ISO- International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro standardy)
NC – Numerical Control (numerické řízení)
MKP – Metoda konečných prvků
ISV – Integrated Simulation and Verification
CSE – Common Simulation Engine
VNCK – Virtual NC Kernel
IPW – In Proces Workpiece
CCF – Controller Configuration File
MCF – Machine Configuration File
HMI – Human Machine Interface
MCS – Machine Coordinate System
WCS – Workpiece Coordinate System
CMM – Coordinate Masuring Machine
PM – Parametry
Nsw – Cena softwaru
Nsm – Náklady na službu pořízení simulátoru
Hsi – Hodinová sazba inženýra
Hst – Hodinová sazba technologa
Hss – Hodinová sazba stroje
Tpův – doba původní optimalizace stroje
Npův – Náklady na optimalizaci bez použití navrženého postupu
Ttd – Doby výroby testovacího dílce profilů Mercedes
Ntsd – Náklady na výrobu testovacího dílce profilů Mercedes
Topt – Doba optimalizované technologie
Nopt – Náklady na optimalizaci s použitím navrženého postupu
Tmerpův – Čas na výrobu neoptimalizovaného Mercedes testu
Tmeropt – Čas na výrobu optimalizovaného Mercedes testu

1. Úvod

Hodnocení obrábění je nejobecněji možno provádět na sledování kvality povrchu a času obrobení při požadované přesnosti obrobené plochy. Uspokojivý obrobek zpravidla vzniká jako kompromis právě těchto kritérií. Přičemž jejich váhu určuje výrobce stroje či požadavek na finální obrobek. [13]

V praxi je obvykle nutné provádět množství testovacích obrábění, jejichž prostřednictvím je hledáno vhodné nastavení NC generátoru (CAM), řídicího systému stroje, popřípadě stroje samotného. Všechny tyto složky mají vliv na finální obrobek. Závěrem z této úvahy je, že na jednom stroji při různém nastavení lze dosáhnout různých kvalit povrchu. Například vhodným nastavením interpolátoru CNC řídicího systému či i jen pouhou optimalizací NC dat v prostředí CAM.

Bohužel cesta k nalezení vhodného optimálního nastavení stroje či dat je značně zdlouhavá, zejména při zavádění nového výrobku do výroby či optimalizaci nového obráběcího stroje. Tak jako neexistuje univerzální typ stroje pro libovolnou skupinu obrobků, tak neexistuje ani univerzální nastavení řídicího systému a strategie tvorby NC programu. Tento fakt nejvíce vystupuje do popředí při frézování tvarově složitých dílců, jako je například výroba forem. [6]

Technologické limity stroje nejsou jenom rozjezdové hodnoty os, nýbrž také přesnost a rychlost polohování vřetene. A právě kombinace těchto dvou parametrů dělá stroj produktivním. Nalezení ideální kombinace je velice zdlouhavé. Tato práce je v odborné praxi nazývána jako optimalizace stroje.

Díky vzniku této problematiky přední výrobci CAM systému vytvářejí různé druhy technologické simulace. Jsou prvotně určené pro simulaci výstupního NC kódu z prostředí CAM. Cílem této diplomové práce je pokusit se najít nové uplatnění tohoto nástroje a to při samotném vývoji obráběcího stroje. Idea tohoto projektu je testovat a zároveň tím optimalizovat obráběcí stroj již ve fázi samotného návrhu. Jde o testování technologických vlastností navrženého stroje na virtuální úrovni. Výrobní podnik, který obráběcí stroj vyrábí, dostane představu o hlavních technologických limitech stroje již v samotném 3D návrhu.

Projekt vznikl v dlouhodobé spolupráci ze společností Industrial Technology Systems s.r.o., která je partnerem společnosti Siemens v oblasti PLM software. Společnost poskytla kompletní softwarové zázemí a zahraniční školení v oblasti simulace NC strojů v prostředí NX CAM. Praktickou aplikaci umožnila společnost Sahos a.s. která byla zároveň zadavatelem technického problému. V této společnosti se práce zaměřovala hlavně na vývoji frézovacího centra Dynamic 261.

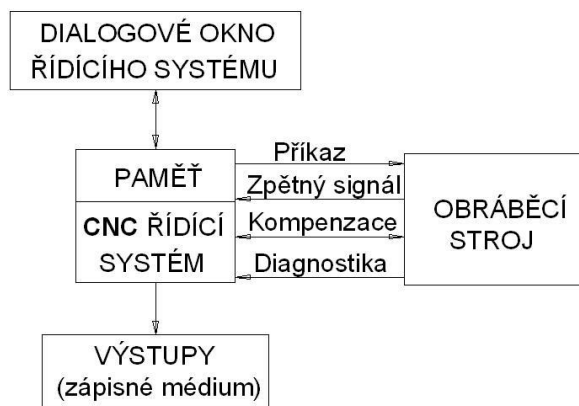
2. Uvedení do problematiky NC strojů a zařízení

2.1. Řízení obráběcích strojů

2.1.1. Co znamená NC

Český ekvivalent pro NC (Numerical Control) je číslicové řízení, tedy metoda řízení pomocí čísel. Moderní řídicí systémy obráběcích strojů mají vlastní vestavěný počítač. Tudíž se místo NC označují jako CNC (Computer Numerical Control).

Rozdíl mezi NC a CNC stroji je následující. NC stroje postrádaly vlastní paměťové médium s programem a operační paměti. Z toho důvodu byl program načítán sekvenčně z děrného pásku či štítku. Zpracovávan byl tedy pouze jen jeden blok. V případě CNC je vždy část programu načítána do operační paměti řádově okolo tisíce bloků napřed. Systém sleduje program dopředu a tím je schopen reagovat rychleji. U NC nebyl možný zásah do programu přímo u obráběcího stroje. Kdežto CNC stroje obsahují zpravidla vestavěný počítač se zápisným médiem (harddisk) na kterém se ukládají NC data. Dialogové okno řídicího systému umožňuje okamžité zásahy do běhu programu i průběhu jeho používání. Ukázka porovnání obou řízení viz diagramy (Obr. 2.1) a (Obr. 2.2).



Obr. 2.1 Jednoduché schéma CNC řízení obráběcího stroje



Obr. 2.2 Jednoduché schéma NC řízení obráběcího stroje

Obráběcí stroje jsou natolik automatizované, že většina činností co vykonávala obsluha u konvenčního stroje je plně nahrazena NC řízením. Příkazem z programu jsou řízeny pohyby posuvů, vřetena, výměny nástrojů a jiné.

2.1.2. Výhody CNC řízených strojů

Automatizace výroby - Obsluha má minimální vliv na výrobní proces. Většina nebo celý cyklus může probíhat automaticky. To přináší snížení počtu chyb, zkrácení výrobního času, zvýšení přesnosti atd.

Zaručená opakovaná přesnost výroby – Je ovlivněna kvalitou výrobního programu a technologického postupu, opotřebením nástrojů, kvalitou materiálu a dalšími faktory.

Pružnost výroby - Přizpůsobivost novému výrobku (seřízení, upnutí výrobku, výměna nástrojů a nahrání nového programu) je zpravidla velice rychlá.

2.1.3. Pohybové mechanismy CNC strojů

Pohybové mechanismy CNC strojů se pohybují v takzvaných osách. Mohou konat lineární nebo otočné pohyby. Jednotlivé osy jsou řízeny servopohonem, umožňujícím pohyb po určité dráze s velkou přesností a rychlostí. Jako zpětná vazba o poloze os slouží odměřovací mechanismy polohy. Počet jednotlivých os je dán konstrukčním uspořádáním každého stroje. Základem řízení obráběcích strojů je řídicí systém. Zpracovává informace o pohybu nástroje a jeho rychlosti, o pohybu obrobku a jejich rychlosti posuvu, spouštění pomocných funkcí apod.

2.2. Programování NC strojů

2.2.1. NC program

V NC programu je definováno obrábění obrobku. Jsou zde uvedeny cílové body polohy nástroje, rychlosti otáček nástroje a rychlosti posuvů. Rovněž musí být v programu uvedeny informace o poloměru a délce nástroje – ty jsou především v tabulce nástrojů, v samotném programu být nemusí.

Zápis programu k řízení stroje může být psán ve dvojím tvaru. A to v absolutním tvaru, kde jsou polohy nástroje vztaženy k jedinému počátku souřadnic. Toto programování je do programu zadáváno funkcí G90. Dalším způsobem je tvar přírůstkový (inkrementální).

Řízení pohybu nástroje po přírůstcích znamená zadávat souřadnice po určitých krocích. Příslušná funkce kódu je G91.

Většina CNC systémů používá adresátovou formu zápisu. Program se skládá ze sledu příkazů a každý příkaz se skládá ze slov, jež obsahují adresu a číselnou hodnotu.

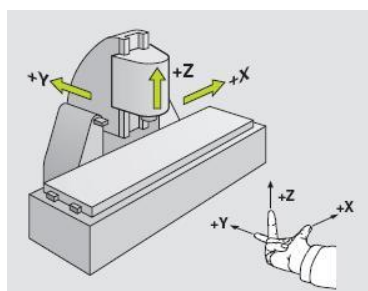
Formát bloku může obsahovat následné adresy N*** G*** X*** Y*** I*** J*** S*** T*** M***

Adresy	Význam
A,B,C	otáčení okolo osy x,y,z
D,H	paměť korekce nástroje
E,F	posuvy
G	funkce obsluhy dráhy
I,J,K	interpoláční parametr, nebo stoupání závitu
X,Y,Z	pohyby ve směru osy x,y,z
M	přídavné funkce
N	číslo věty, bloku
P,Q,R	třetí pohyb rovnoběžný s osou x,y,z
S	otáčky vřetene
T	nástroj číslo
U,V,W	sekundární pohyb rovnoběžný s osou x,y,z
%	začátek programu i stop při opakovaném nastavování programu

2.2.2. Pravoúhlý souřadnicový systém

K obrobení obrobku na frézce se obecně vychází z kartézského (pravoúhlého) souřadnicového systému pevně umístěného na obrobku. Skládá se ze tří na sebe kolmých os X,Y,Z, které jsou rovnoběžné se souřadnicovým systémem stroje. Ke správnému určení os slouží mnemotechnická pomůcka pravé ruky.

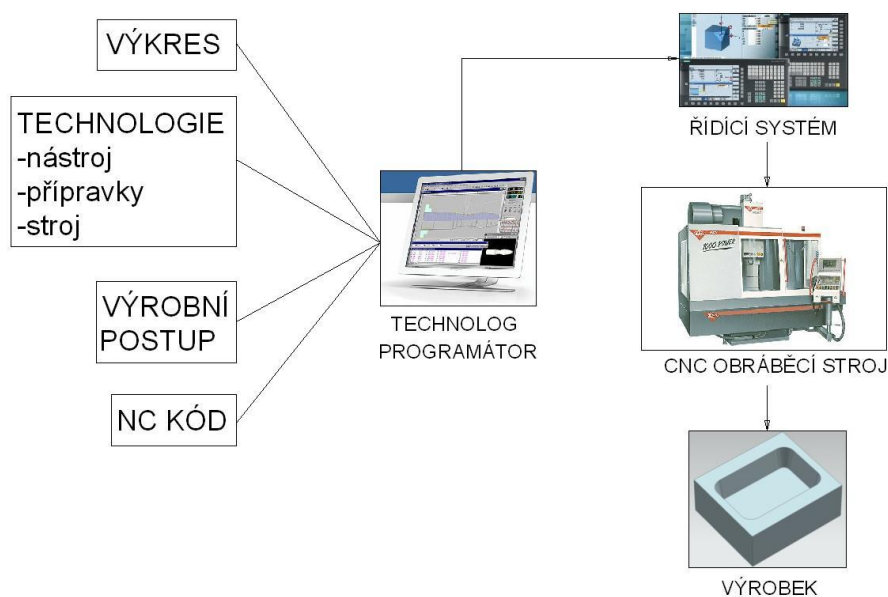
Představíme-li si prostředníček pravé ruky směřující ve směru osy nástroje od obrobku k nástroji, pak ukazuje ve směru kladné osy Z, palec ve směru kladné osy X a ukazováček v kladném směru Y. [3]



Obr. 2.3 Pravoúhlý souřadnicový systém [2]

2.2.3. Druhy programování

Ruční programování je základní způsob programování. Programátor vytváří program bez pomoci jakýchkoliv podpůrných programů. Programuje přímo v příslušném programovacím kódu. Je zejména vhodné pro jednoduché výrobky, které neobsahují žádné složité tvary. Bohužel tato metoda je náročná na výpočet drah a zdlouhavá. Hrozí zde větší riziko chyby a následné kolize nástroje s obrobkem, upínacím mechanismem či strojem samotným.



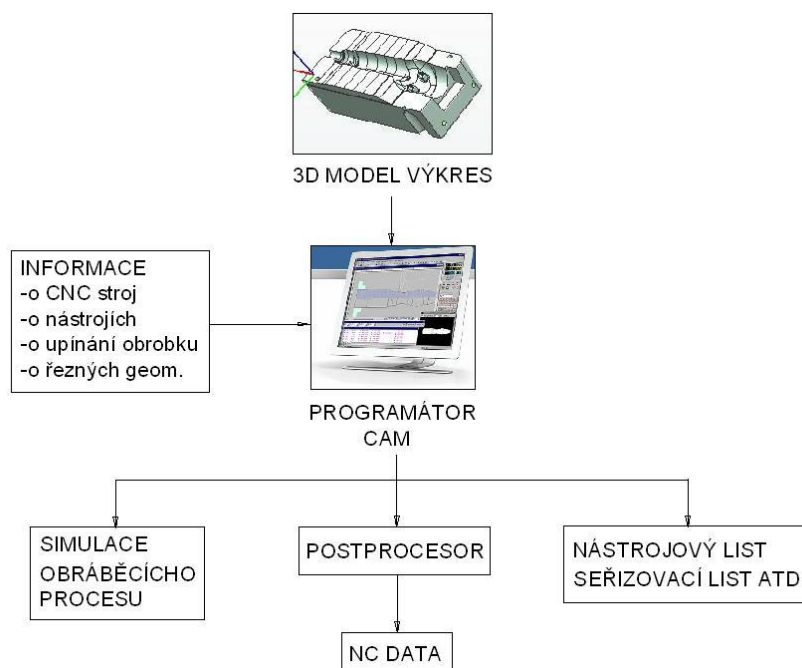
Obr. 2.4 Princip ručního programování NC strojů

Dílenské programování - je interaktivní programování. Toto programování provádí přímo obsluha stroje na dílně v tzv. dialogovém okně řídicího systému stroje viz (Obr. 2.5). Využívají se programovací cykly a další funkce. Zvyšuje se tím rychlost programování. Většina z velkých výrobců řídicích systémů používá pro tento druh programování i vlastní programovací jazyk. Jako společným jazykem je ISO kód. Příkladem je firma Heidenhain, Siemens nebo Fanuc.

Automatické programování - je moderní přístup k programování samotnému. Programování geometricky složitých tvarů vyžaduje vysoké znalosti matematiky a geometrie. Proto byl pro programátora vyvinut výpočtový software CAM. Tato zkratka znamená Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba. Používá se pro řízení, automatizaci výroby jako jsou CNC obráběcí stroje a roboti.

NC program tvoří programátor na PC za pomoci podpůrných CAM programů. Je tak možná rychlá a kvalitní tvorba NC programů. CAM obsahuje prvky, jako jsou fotorealistická simulace obrábění, vyhledávání a předcházení kolizí atd. [3]

CAM programátor musí pro vytvoření technologie znát informace o obrobku (povrch, přesnost atd.) a polotovaru. Tyto informace obdrží od zadavatele z výrobního výkresu nebo 3D CAD modelu. Výsledkem jeho práce jsou NC data, seřizovací listy, nástrojové listy, informace o nulových bodech atd.

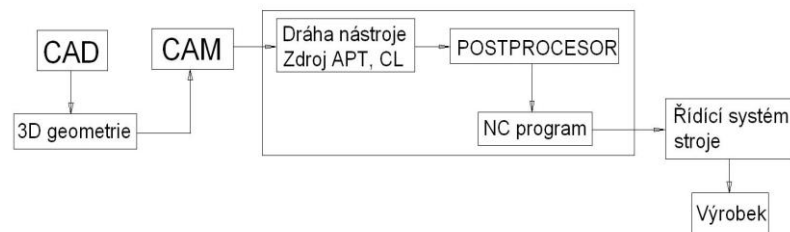


Obr. 2.5 Princip automatického programování

2.3. Uvedení do problematiky CAM

Dnešní CAD/CAM umožňují rozsáhlou správu dat týkající se každého výrobku. Snížení nákladů a zkrácení výrobních časů je nesporné. Programátor obdrží od konstruktéra 3D model (solid), který je navržen v CAD softwaru. CAD konstruktér vytváří výkresovou dokumentaci, sestavy, pevnostní výpočty atd. Po navržení požadovaného dílce odešle data CAM programátorovi. Programátor navrhne technologii výroby, vytvoří seřizovací, nástrojové listy, listy přípravků a polotovarů.

Po správném generování drah nástroje vytváří CAM vlastní APT nebo CL data. Jsou to data o polohách dráhy nástroje v souřadnicích stroje. Je nutné tyto APT, CL data dále zpracovat a vytvořit NC kód. K tomu slouží Post Processor. Je nutné Post Processor správně naprogramovat kvůli správnosti NC dat viz. kapitola 4.4. *Vytváření NC dat.*



Obr. 2.6 Zařazení CAM programu v procesu přípravy výroby

2.4. Prostředí NX CAM 8.5

NX CAM je technologický software vycházející z velkého CAD/CAM systému Siemens PLM software NX. Slouží pro tvorbu a generování NC kódů pro CNC stroje a jeho simulaci. Podporuje operace jako je vrtání, 2½ osé frézování, soustružení, tříosé frézování, drátové řezání, synchronizace, verifikace obrábění, pětiosé frézování a pokročilé technologické simulace. Jako každá CAM aplikace využívá postprocesor, který zajišťuje přeložení generovaných drah nástroje pro daný obráběcí stroj a jeho řídicí systém. Proto NX obsahuje aplikaci s názvem Post Builder, ve kterém je možné generovat vlastní postprocesory. Problematika navrhování základního postprocesoru je blíže popsána v kapitole 2.6.7. *Postprocessing.*

2.5. Simulace a řízení CNC obráběcích strojů

Při obrábění tvarových dílců se zvyšují nároky především na kvalitu NC dat a jejich interpolace a odpovídající dynamické vlastnosti pohonů obráběcího stroje. V posledních přibližně patnácti letech se v oblasti matematického modelování vlastností strojů pozornost zaměřuje na vývoj virtuálních modelů. Tyto modely umožňují relevantní simulaci chování stroje se zahrnutím významných jevů a vlastností. V současnosti je navržen modelový přístup, který dovoluje simulovat dráhové řízení nástroje a predikovat kvalitu a čas obrábění.

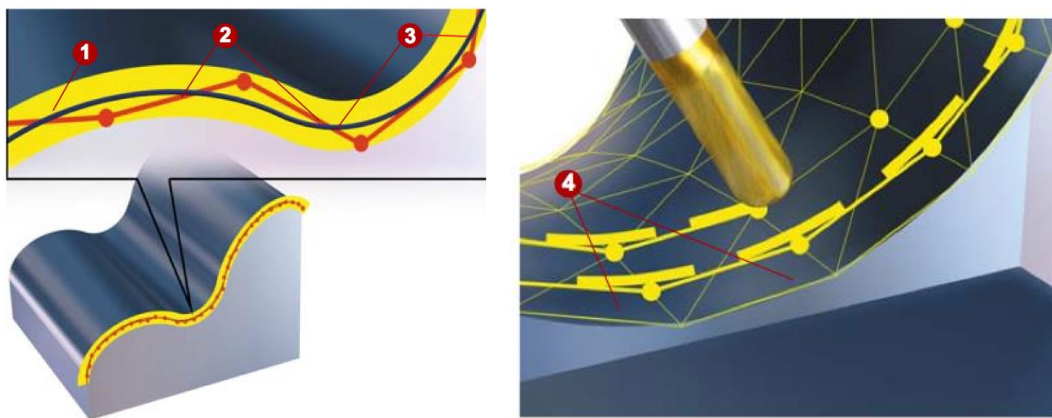
Představen je virtuální model stroje, který slouží k simulacím obrábění a tím může pomoci výrazně snížit časovou a ekonomickou náročnost zavádění tvarově složitých obrobků do výroby. [1]

2.5.1 CNC stroj jako komplexní mechatronický systém

V konstrukci obráběcího stroje se vzájemně propojuje mechanický systém s numerickým řízením pohonů. Další nedílnou součástí tohoto řetězce je zpracování vstupních dat NC kódu v řídicím systému stroje. Vzájemná interakce těchto faktorů má zásadní vliv na výsledné chování NC stroje. Simulace poskytuje propojení všech těchto prvků, ale na výsledný povrch mají vliv i další faktory, například samotný řezný proces nebo mechanická odezva konstrukce na dynamické vlivy díky řeznému procesu. Přičemž deformační chování rámu můžeme predikovat se znalostí zatížení celé soustavy díky matematickému výpočtu metodou konečných prvků (MKP). MKP analýzy jsou v dnešní době využívány zejména při návrhu mechanických součástí obráběcích strojů.

Na samém počátku stojí konstrukční návrh dílce v prostředí CAD. Následuje technologická příprava výroby v prostředí CAM. Do CAM systému musíme zahrnout také vlastní postprocesor pro daný druh stroje. Již při samotném výstupu CL dat z CAM systému dochází k prvním odchylkám v přesnosti od ideálního povrchu dílce, a to především nastavením limitů přesnosti lineárních úseků nahrazující ideálně hladký povrch 3D dílce. Tyto odchylky jsou zobrazeny na (Obr. 2.8). NC kód zpracovává řídicí systém a i ten díky další přesnosti svého interpolátoru ovlivňuje NC data z CAM systému.

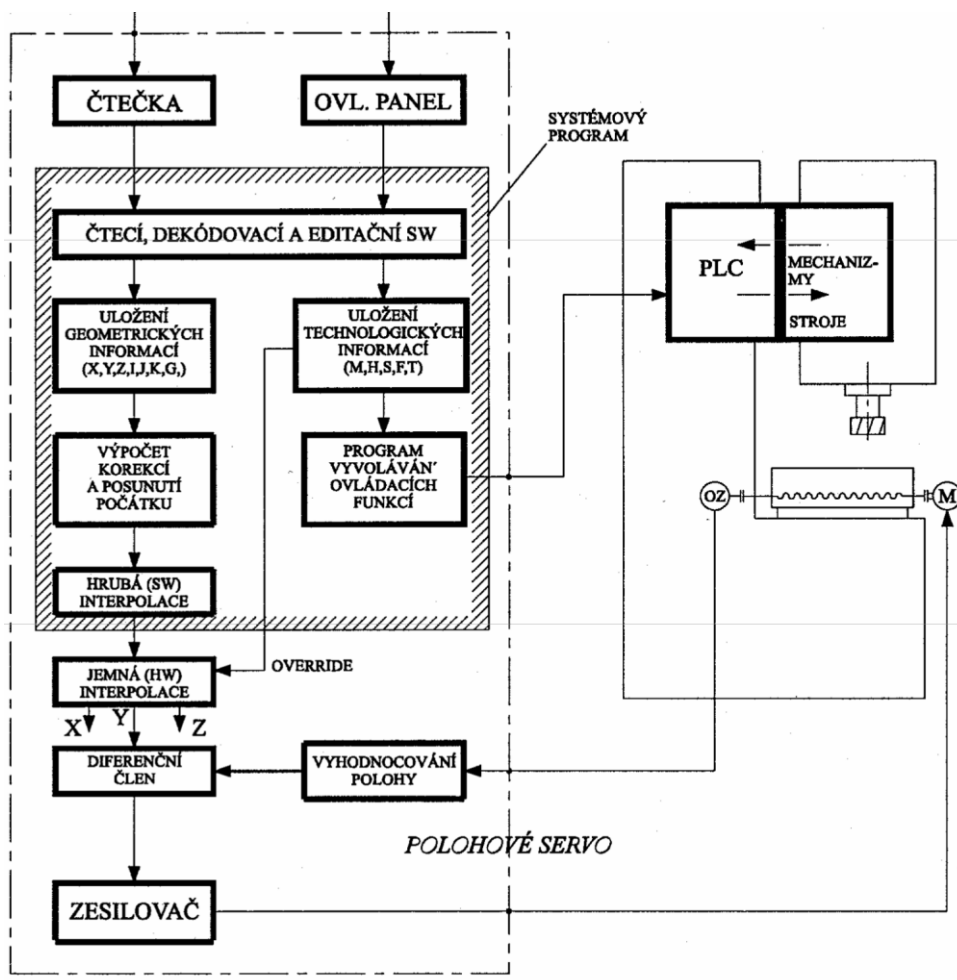
Následně řídicí systém odbaví NC kód ve formě žádané polohy nástroje ovšem také ovlivněné dynamickými vlastnostmi samotného řízení pohonů. Toto vše úzce souvisí s vlastní konstrukcí obráběcího stroje. Jak již bylo řečeno, mechanická stavba stroje přímo ovlivňuje také výsledné chování pohybu stroje. Například plynulost chodu ovlivňuje i vlastní frekvence mechanické soustavy.



Obr. 2.7 Přesnost lineárních úseků nahrazujících hladký povrch [3]

2.5.2. Interpolace NC kódu řídicím systémem stroje

NC data vstupují do řídicího systému obráběcího stroje a zde jsou nadále zpracovávána interpolátory v časově parametrizovaná data. Interpolátor vysílá data o požadované poloze přes diferenční člen. Odměrování osy vysílá zpětnou vazbu o skutečné poloze zpět do diferenčního členu a zde se vyhodnocuje jejich rozdíl. Rozdíl je regulační odchylka, která po zesílení a transformaci vytváří akční veličinu.



Obr. 2.8 Schéma struktury řízení NC stroje [14]

Interpolátor řídicího systému zpracovává rozsáhlá data z CAM systému. Tyto data jsou prokládána idealizovanou křivkou, aby výsledný pohyb byl plynulý. Kdyby k tomuto nedocházelo, stroj by musel projíždět všemi zlomovými body tvořené krátkými lineárními úseky. V praxi to znamená, že motory os se budou snažit z prvního bodu maximálně akcelarovat na požadovaný posuv a opět maximálně brzdit do následujícího bodu. V každém zlomovém bodě by vznikala nulová rychlost.

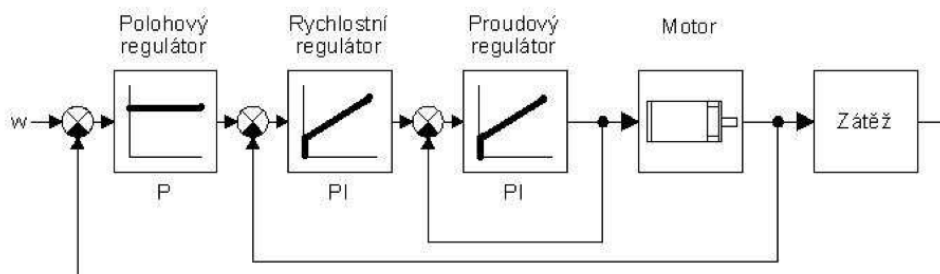
Pro představu, jedna lineární úsečka může být řádově v desetinách i setinách milimetru. Na takto krátkých úsecích motory os nikdy nedosáhnout svého maximálního zrychlení. Výsledný pohyb je značně nestabilní a především pomalý. Při neustálém rozjíždění a brždění po takto krátkých lineárních úsecích nelze nikdy dosáhnout kvalitního povrchu, jak v požadované přesnosti, tak i v čase.

Proto jednou ze základních funkcí interpolátoru je dopředné načítání bloků NC kódu. Tato funkce se nazývá Lookahead, pohled vpřed. Díky této funkci je ve zlomových bodech definováno toleranční pásmo, které umožňuje plynulý chod kódu. Bloky na sebe navazují s dostatečným předstihem a nedochází k projíždění bodů, kde vzniká nulová rychlost. Nic méně díky tolerančnímu pásmu dochází k další odchylce od vstupních dat o polohách nástroje.

V této chvíli je možné považovat NC kód za dostatečně kvalitní a připravený na odbavení z řídicího systému. Nicméně v případech zejména tvarově složitých povrchů nebývá toto řešení zcela dostačující. Proto většina výrobců vybavuje své systémy o další pokročilé funkce. Řídicí systémy TNC Heidenhain využívají funkci filtrace vstupních dráhových dat pomocí takzvaných HSC filtrů. Jedná se o další toleranční pásmo, podle kterého jsou parametrizovány tyto filtry. Systémy Sinumerik jsou vybaveny obdobnou funkcí kompresorů. Přičemž dochází k dopřednému načtení bloků a jejich nahrazení za polynomiální funkci. Tato funkce je definovaná pomocí tolerančního pásma kolem zlomových bodů. [13]

2.5.3. Řízení pohonů stroje

Osy dnešních NC strojů jsou zpravidla poháněny kuličkovými šrouby nebo hřebeny. Jako pohon slouží střídavé synchronní servomotory s permanentními magnety. Tyto servomotory jsou řízeny časovými průběhy z interpolátoru řídicího systému. Jsou připojeny na proudové, rychlostní a polohové regulátory. Tyto regulátory slouží k řízení a ladění osových pohonů. Hledáním ideálních parametrů těchto regulátorů se provádí takzvaná optimalizace. Jedná se o nastavení filtrů, zrychlení, Jerku, rychlostní konstanty KV atd.



Obr. 2.9 Princip zařazení regulátorů se zpětnovazebním řízením [16]

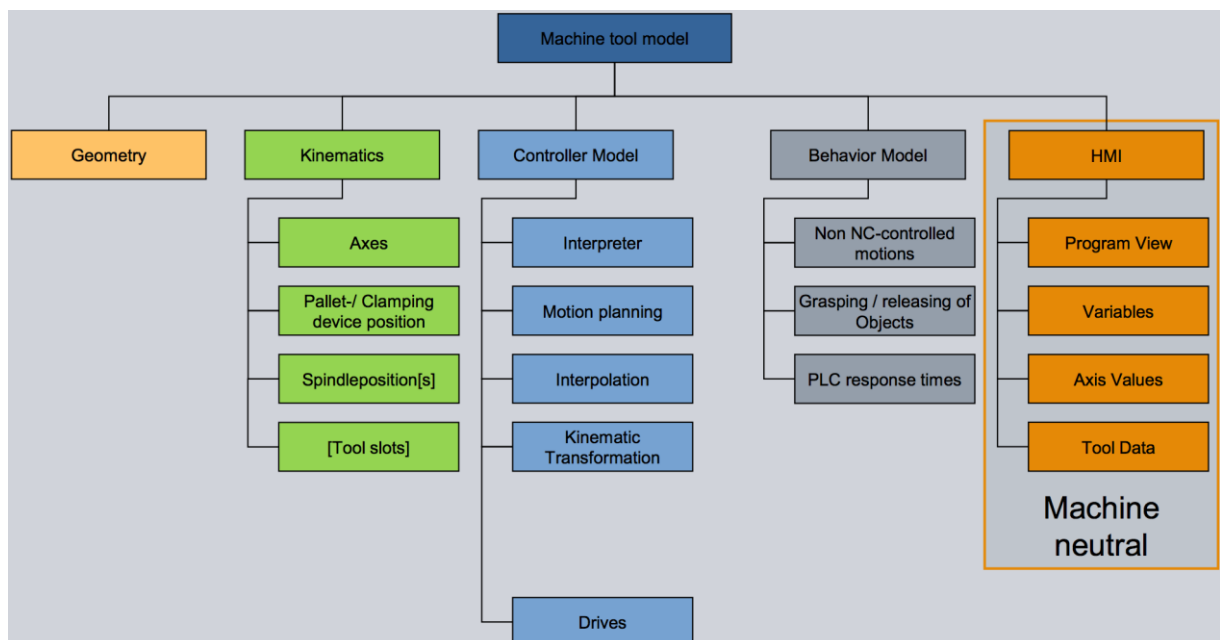
Při virtuální optimalizaci a testování NC stroj je důležité také brát v úvahu poddajnou konstrukci stroje. Pokročilá technologická simulace tento vliv nebere v potaz. Proto musíme chápat tuto simulaci jako idealizovaný stav. K tomuto stavu se softwarový inženýr, při reálné optimalizaci, snaží co nejvíce přiblížit.

2.5.4. Virtuální makety strojů pro pokročilé simulace obrábění

Virtuální makety stroje obecně umožňují simulovat vlastnosti propojeného systému řízení stroje, jeho pohonů a nosné struktury. Složitost vychází vždy ze sledovaných požadavků. V technologickém prostředí CAM nesledujeme nosné vlastnosti konstrukcí strojů, a proto používáme makety bez výpočtů MKP. Stejně tak technologické makety obsahují jen základní nastavení parametrů NC stroje.

Jde především o využití virtuálního řídicího systému, reálné kinematiky, postprocesoru a simulace řízené vlastním NC kódem. Tato simulace je řízena odbaveným NC kódem přes virtuální řídicí systém Siemens VNCK, je tedy zahrnut vliv interpolátoru řídicího systému. Díky tomuto můžeme odbavovat NC kód v takzvaném režimu off-line.

K tomuto PLM software NX CAM využívá externí programy. Ty se používají pro tvorbu driverů makety Machine Configurator. Pro tvorbu postprocesoru Post Builder a pro tvorbu kinematiky Machine Tool Builder. Celá maketa je uložena v knihovnách CAM systému a je zapotřebí rovněž tyto knihovny editovat v textovém editoru.



Obr. 2.10 Obecné schéma celé struktury virtuální makety NC stroje [15]

Vysvětlení anglických pojmů z Obr. 2.10

Machine tool model – Model NC stroje

Geometry – Geometrie modelu

Kinematics/Axes – Kinematika NC stroje / osy NC stroje

Pallet/Clamping device position – Palety / upínací zařízení

Spindleposition – Pozice vřetene

Controller Model – Model řídicího systému

Interpreter – Interpreter NC kódu

Motion Plannig – Plánování pohybu os stroje

Interpolation – Interpolace pohybů os

Kinematic Transformation – Kinematická transformace pohybů

Drivers – Ovladače (drivery pohonů)

Behavior Model – Chování modelu

Non NC-controlled motions – Pohyby neřízené NC kódem (neřezné pohyby v prac. Prostoru)

Grasping/releasing of Objects – Uchopení/uvolnění objektů

PLC response times – Časová odezva PLC

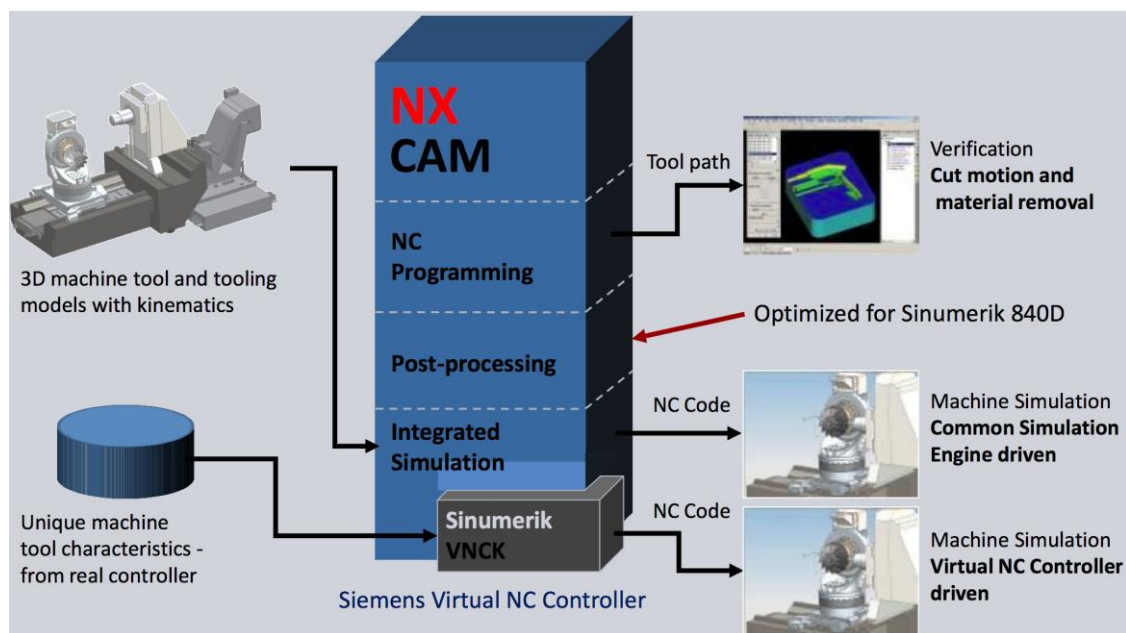
HMI – Operátorské rozhraní

Program View / Variables – Zobrazení programu /proměnné

Axis Values / Tool Data – Hodnoty pohybu os / Data nástroje

2.6. Simulace v prostředí NX CAM 8.5

Z obrázku (Obr. 2.11) je patrná struktura virtuální makety pro CAM systém NX. Samotný systém ve kterém probíhá simulace se skládá ze základních třech prostředí: NC programování nástrojových drah, postprocessingu a integrované simulace. Vstupem do simulace je 3D maketa NC stroje s přesně definovaným řídicím systémem. Na výstupu ze simulátoru jsou ISV, CSE a VNCK simulace.



Obr. 2.11 Propojení simulací virtuální makety NC stroje [15]

Vysvětlení anglických pojmů z Obr. 2.11

3D machine tool and tooling models with kinematics – 3D maketa NC stroje s vlastní kinematikou

Unique machine tool characteristics from real controller – Jedinečné vlastnosti obráběcích strojů a reálného řídicího systému

NC Programming – NC programování

Post-processing – Překládání vnitřních dat polohy nástroje na NC kód

Integrated Simulation – Integrovaná simulace

Tool Path – Dráhy nástroje

Verification – Verifikace (ověření)

Cut motion and material removal – Řezné pohyby a odebírání materiálu

Optimized for Sinumerik 840D – Optimalizováno pro Sinumerik 840D

NC Code – NC kód

Machine Simulation – Simulace NC stroje

Common Simulation Engine driven – Simulace řízená driverem pohonů

Virtual NC Controller driven – Simulace řízená virtuálním řídicím systémem

2.6.1. Integrovaná simulace a verifikace (Integrated Simulation and Verification)

Integrated Simulation and Verification (nadále již ISV simulace). Je založená na generování pohybu celého stroje pouze na základně vytvořených CL dat. Tyto data nejsou reálný NC kód a můžeme zde posoudit pouze chování stroje řízeného po generovaných drahách. Simulace bohužel nezahrnuje vedlejší pohyby stroje. Ovšem využívá odpovídající geometrie stroje s příslušnými rozjezdy i nulovými body.

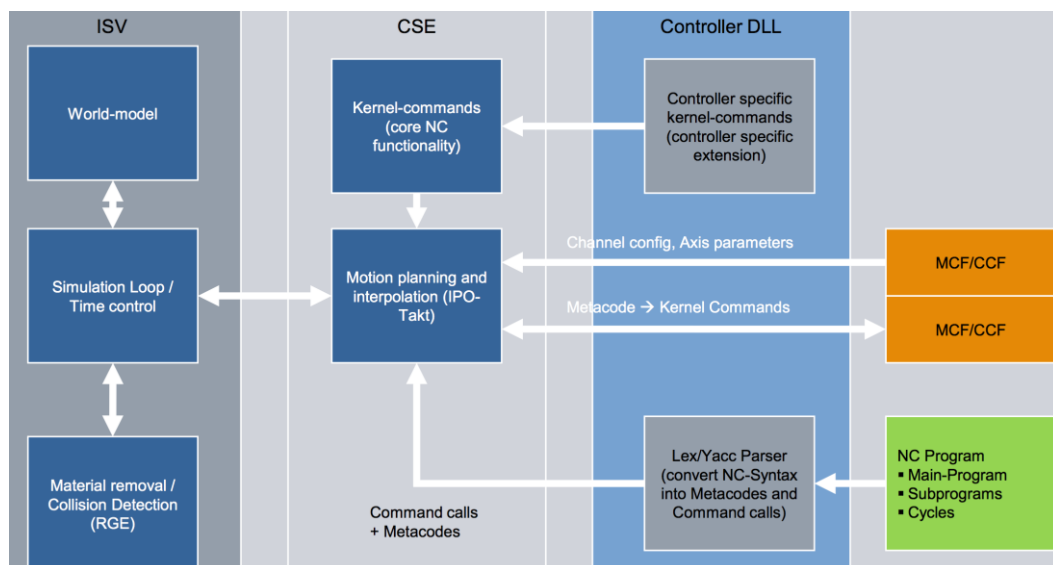
Díky této simulaci můžeme testovat, zdali nástroj či nástrojová hlava není v kolizi s takzvanými kolizními prvky. Kolizním prvkem nemusí vždy být jen samotné upínače obrobku, ale i stroj samotný. Vyložení obrobku hraje velkou roli v případě obrábění těžko dostupných ploch pod různými úhly. Musíme brát v potaz, že i samotné rotační osy mají své limy. Tyto limity musí být správně definovány při samotné tvorbě kinematiky virtuální makety v prostředí Machine Builder. ISV simulace je zásadní pro ověření správných pohybů pomocí CL dat pro prostředí CSE simulace s vlivem postprocesoru.

Programátorovi umožní rychle digitálně ověřit dráhy nástroje a pohyby obráběcího stroje. Tím značně urychluje samotné odladění NC kódu. Zrychlené odladění přispívá i ke zkrácení nevýrobních časů samotného stroje. Tato simulace je v praxi nejrozšířenější zejména díky nižší ceně než CSE simulace. Je ideální pro testování a optimalizaci nové technologie, zejména pro pětiosé obrábění. Zpravidla jsou pohyby u pětiosého obrábění složité a pracovní prostor stroje je omezen.

2.6.2. Simulace řízená pohony (Common Simulation Engine)

Common Simulation Engine (dále již jen pod zkratkou CSE simulace) je nadřazená technologická pokročilá simulace v obrábění. Jedná se o další nadstavbu simulací v prostředí NX CAM. Je rozšířena o vliv samotných pohonů stroje a postprocessor. Řízení je definováno takzvanými CSE drivery. Driver obsahuje informace o osách stroje a také o řídicím systému. Jsou zde zanesené jednotlivé kanály, přiřazení příslušných os, podporované cykly a funkce. CSE drivery jsou přesně programovány na každý stroj jednotlivě. Pro programování driverů slouží externí aplikace Machine Configurator viz. kapitola 2.6.4. *Machine Configurator*. Samotná simulace není řízena CL daty, jako je to tomu u ISV, nýbrž přímo NC kódem. Je možné simulovat dráhy v reálném čase přímo výstupním NC kódem vygenerovaným postprocesorem. Proto je postprocessor nedílnou součástí makety. Tento postprocessor musí být finální a odladěný pro výslednou výrobu. Odladěný postprocessor zaručuje reálný pohyb nástroje v pracovním prostoru. Při znalosti pohybu stroje, můžeme také testovat správnost samotného nově vznikajícího postprocesoru, zejména syntaxi, body výměny nástroje, cykly a podobně.

Další způsob je simulovat pouze externí NC kód. Ten může být napsaný ručně, či generovaný v jiném CAM systému s rozdílným postprocesorem. Výhodou je, že takto simulovaný kód můžeme nadále optimalizovat. Kód je do simulátoru načten z uložště na PC, v příslušném jazyce řídicího systému, který je používán ve virtuální maketě. Případné nevyžádané pohyby můžeme editovat v textovém editoru v příslušném formátu dat. CSE simulace externího NC kódu umožňuje také dynamické zobrazení odebíraného materiálu a následnou barevnou analýzu obrobeného povrchu. Máme možnost vygenerování výsledné obrobené součásti jako takzvaný IPW model (In Process Workpiece), který nadále můžeme používat jako polotovar pro následné operace. Toto je vhodné u přepínání obrobku či při použití jiném druhu obráběcího stroje. IPW model je součástí obrobku jako další těleso v sestavě.



Obr. 2.12 Architektura CSE simulace a všech působících členů [15]

Vysvětlení anglických pojmů z Obr. 2.12

World model – Hlavní model

Simulation Loop/Time control – Simulace časové smyčky

Material removal/Collision Detection – Odebírání materiálu/detekce kolizi

Kernel-commands (core NC functionality) – Jádro-příkazy (jádro NC funkce)

Motion planning and interpolation – Plánování pohybů a interpolace

Controller specific kernel-commands (controller specific extension) – Specifikace řídicího systému a jeho příslušné příkazy

Channel config. Axis parameters – Kanál konfigurace osových parametrů

Metacode -> Kernel Commands – Metakód -> Jádra příkazů

Lex/Yacc Parser (convert NC-Syntax into Metacodes and Command calls) – konvertování NC syntaxe do metakódů a volání příkazů

NC Program – NC program

Main program – hlavní program

Subprograms – podprogramy

Cycles – cykly

Command calls + Metacodes – Volání příkazů + metakódů

Hlavními komponenty pro CSE simulaci jsou DLL, CCF a MCF soubory. Parametry DLL souborů obsahují překladače syntaxe jazyka příslušného řídicího systému stroje. Jsou uloženy v knihovnách simulátoru CAM systému.

Controller Configuration Files jsou konfigurační soubory řídicího systému (dále jen CCF soubory). Obsahují chráněné specifické knihovny řídicího systému, které rozhodují o jeho chování. Jsou to zejména všeobecné definice, např.: že kód G0 opravdu znamená zrychlený pohyb rychloposuvu, F posuv, S otáčky vřetene, čtení subprogramů atd.

Machine Configuration Files jsou strojní konfigurační soubory (dále jen MCF soubory). V těchto souborech jsou specifikovány geometrické vlastnosti os, jednotlivé kanály řízení a parametry pohonů stroje. Oproti CCF a DLL souborům MCF nelze obecně přiřadit k standardizovaným vlastnostem řídicího systému podle výrobce. Tyto soubory je nutné přesně specifikovat pro každou kombinaci řídicího systému a geometrické vlastnosti stroje. Pro tuto specifikaci slouží, jak již bylo řečeno dříve, externí Siemens software Machine Configurator.

2.6.3. Tvorba kinematiky NC stroje (Machine Tool Builder)

Jednou z dalších základních vlastností virtuální makety je využití reálné kinematiky stroje. Pro tuto definici slouží modul Machine Tool Builder, který je integrován v prostředí NX. Jedná se o samostatný modul a v prostředí CAM můžeme kinematiku pouze editovat.

Definujeme zde geometrickou strukturu modelu. To znamená, že přiřazujeme jednotlivým komponentám vzájemné vazby, ustanovení a rozjezdy. Díky tomuto simulované pohyby odpovídají reálným pohybům stroje.

Je důležité definovat základní čtyři funkční vztahy budoucí makety. První je definování kinematiky komponenty, kdy tvoříme takzvané k-komponenty. Těmto k-komponentům definujeme umístění v kinematické struktuře stroje. K-komponenty na sebe vzájemně působí jednotlivými vazbami a tím ovlivňují své vzájemné pohyby. Přičemž jednotlivé nadřazené a podřazené komponenty řadíme v kinematickém stromě.

V druhé řadě definujeme k-komponentám řídicí a lokální souřadnicové systémy. Ty jsou orientovány podle nulového souřadnicového systému stroje (nulový bod stroje). Správným navržením osových systémů dosáhneme toho, že budoucí lineární osy se budou pohybovat lineárně a rotační rotovat.

Jako další je definování příslušných os jednotlivých k-komponent. Osy musí vlastnit informaci: o své poloze, podle jakého osového systému jsou definovány, příslušnou hodnotu rozjezdu a jméno osy.

Je důležité tyto parametry mít správně definované, protože jsou v simulaci řízeny NC kódem. A to z důvodu toho, že NC kód obsahuje požadavky na pohyb jednotlivých os v určitém rozmezí.

Posledním krokem je přiřazení jednotlivých k-komponent do příslušné třídy komponent. To znamená přiřadit komponentě zda se jedná o lože, osu či vřeteno stroje. Další je definování takzvaných Setup elementů, přiřadit co je obrobek, polotovár či upínač. Do těchto elementů se budou při simulaci definovat příslušné informace o sestavě obrobků, polotovárů a upínačů.

Name	Classification	Junctions	Axis Name
SAUER_HSC20_CSE			
└ MACHINE_BASE	_MACHINE_BASE	MACHINE_ZERO*	
└└ X_SLIDE			X
└└ Y_SLIDE			Y
└└ Z_SLIDE			Z
└└└ SPINDLE		S*	S
└ A_ROTATE		ROT_JCT_A	A
└ C_ROTATE			C
└└ MAIN_SETUP	_SETUP_ELEMENT	PART_MOUNT_JCT	
└└└ MAIN_PART	_PART,_SETUP_ELEMENT		
└└└ MAIN_BLANK	_WORKPIECE,_SETUP_ELEMENT		
└└└ MAIN_FIXTURE	_SETUP_ELEMENT		

Obr. 2.13 Jednoduchá ukázka struktury kinematiky virtuální makety

2.6.4. Tvorba řídicího driveru (Machine Configurator)

Machine Configurator je aplikace určená pro tvorbu a editaci MCF a CCF souborů. Tyto dva soubory s DLL souborem tvoří řídicí drivery makety. Jedná o objektové programování driverů, které simulují skutečné pohyby NC stroje. Prostředí Machine Configuratoru je rozděleno do devíti podskupin a to General, Axes/Spindles, Channels, Commands, Methods, Variables, Internal Variables, Transformatios a Kinematic chains.

V základním nastavení General nastavujeme takzvané globální informace. Jedná se o druh CSE controller, název stroje, Cycle Time s přiřazeným CCF souborem, Motion precision, Lookahead Line Count. CSE controller musí být vždy exaktně zvolen podle používaného řídicího systému. Konfigurator obsahuje přednastavená makra řídicích systémů Fanuc, Heidenhain TNC a Sinumerik.

Tyto makra obsahují programované parametry či funkce pro příslušný programovací jazyk. Hodnota parametru Cycle Time je první parametrická hodnota pro dobu prováděného cyklu. Funkce Motion Precision je hodnota přesnosti polohování. A Lookahead Line Count je již dříve zmiňovaná funkce dopředného načítání bloků NC kódu. Hodnoty těchto a osových parametrů nalezneme v ARC informačním souboru, pro systémy Sinumerik. Tento systémový soubor obsahuje veškerá softwarová data o obráběcích stroji a implementovaném řídicím systému.

Skupina Axes/Spindles popisuje jednotlivé osy a jejich základní parametry. Tyto definice musí odpovídat reálnému stroji, zejména u složitých strojů. Osy musí vlastnit stejné názvy a unikátní čísla, jako jsou definovány v kinematice makety. Jedná se o řízené osy, které byly definovány v prostředí Machine Tool Builderu. Každé ose či vřetenu přiřazujeme v informačním listu základní vlastnosti a parametry. Jako je například definování rotačních a lineárních os, čísla os, Axis related a Axis dynamics parametry. Axis related jsou parametry limitů os. Každé ose přiřadíme maximální a minimální hard a soft limit s referenčním bodem. Axis dynamic parametry řídí dynamické vlastnosti pohonů osy. Jedná se o maximální rychlost, maximální a minimální zrychlení osy, Fine precision, Coarse precision (známé také jako polohové okno), KV faktor a Jerk. V odborné literatuře můžeme najít také druhý název pro Jerk a to je R_{yv}. Nicméně v odborné praxi se setkáme především s názvem Jerk. I systém Sinumerik, který je využíván pro tuto práci, využívá názvu Jerk. Význam těchto parametrů je vysvětlen v kapitole 2.8.2. *Teorie parametrů pro virtuální optimalizaci NC strojů.*

Skupina Channels popisuje vlastní kanály v řídicím systému. Jednotlivé kanály řídí rozdílné osy a vřetena stroje. Jedná se o pomyslné sloučení dvou řídicích systémů v jeden celek. Proto je opět zásadní dodržet správnou syntaxi kanálů a přiřazených os. Při simulaci se mohou osy prolínat mezi kanály. To nastává například u multi-funkčních center, kdy hlavní vřeteno je přeneseno do skupiny os revolverové hlavy. Z toho je patrné, že vřetena mohou mít i dvě role.

Ve skupině Commands definujeme jaké příkazy jsou obsaženy v řídicím systému. To znamená, že každý používaný příkaz musí být programován samostatně. Příslušná syntaxe je také charakteristická pro každý řídicí systém. Informace o syntaxi čtení programu řádku po řádku jsou obsaženy v DLL souboru.

Příklad čtení zápisu NC kódu ze syntaxi Sinumerik 840D:

```
N10 R123 = 50      ;R123 je R-parametr a 50 je příslušná hodnota
N20 G0 A=R123-5   ;G0 aktivuje rychloposuv, aktivuje se rotační pohyb osy A
                  s definovanou hodnotou R-parametru R123 (50) odečtenou minus 5
```

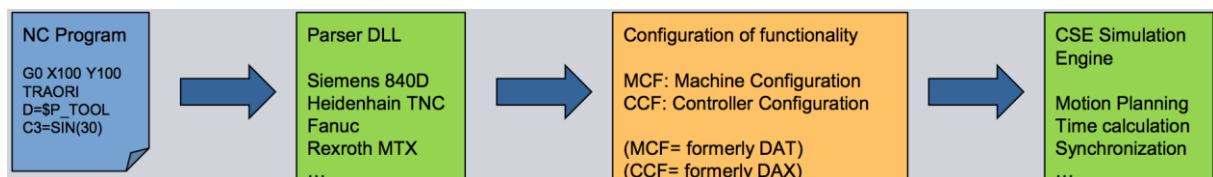
Identifikátor čte NC program řádek po řádku. Řádek N10 obsahuje pouze R-parametr s přiřazenou hodnotou. V souladu s řádkem N20 analyzátor zjistí, že nejprve vykoná pohyb ze skupiny G-kódu. G0 je naprogramována v Commands a to způsobí že, simulace začne volat příkaz G0. Jako druhý příkaz identifikuje následující adresu s přiřazenou hodnotou. Toto vše provádí v souladu s následujícím řádkem N20, kde dojde k otočení osy A. V důsledku toho se vyhodnotí hodnota 45. Poté CSE simulace provede příkaz, tím že volá příkaz G0. O příkaz G0 si žádá v MCF a CCF souboru, následně je příkaz vykonán.

```
N30 A45 ;osa A je natočena o 45 stupňů
```

Řádek N30 ukazuje další cestu, jak naprogramovat osu pohybu v syntaxi Sinumerik 840D. Identifikátor čte konkrétně zadanou hodnotu 45 a provede stejný pohyb jako v řádku N20.

Skupina Methods řídí jednotlivé metody v driveru. Zde nastavujeme veškeré další vlastnosti řídicího systému mimo příkazů. Například v příkazu AXNAME definujeme jména os. Tyto jména musí odpovídat kinematice a postprocesoru. Postprocesor překládá NC kód s určitými příkazy, ty jsou načteny z NC kódu a jsou nadále vyhodnocovány identifikátorem simulace. Pokud je zadán požadavek na otočení osy, a v metodě není osa správně naprogramována, pohyb nebude proveden. Parametry mají své argumenty, které jsou předány příslušné metodě od volajícího příkazu. Podle typu argumentu nabývá parametr metody příslušný typ proměnné.

Na následujícím obrázku (Obr. 2.14) vidíme postupný tok informací. Na počátku je požadavek na pohyb z NC kódu. Příslušný řádek je přečten DLL souborem. Následuje vyhodnocení, přiřazení proměnných a následný příkaz pro vykonání pohybu. Prikázaný pohyb se vykoná v prostředí CSE simulace.



Obr. 2.14 Postupný tok informací v driveru [15]

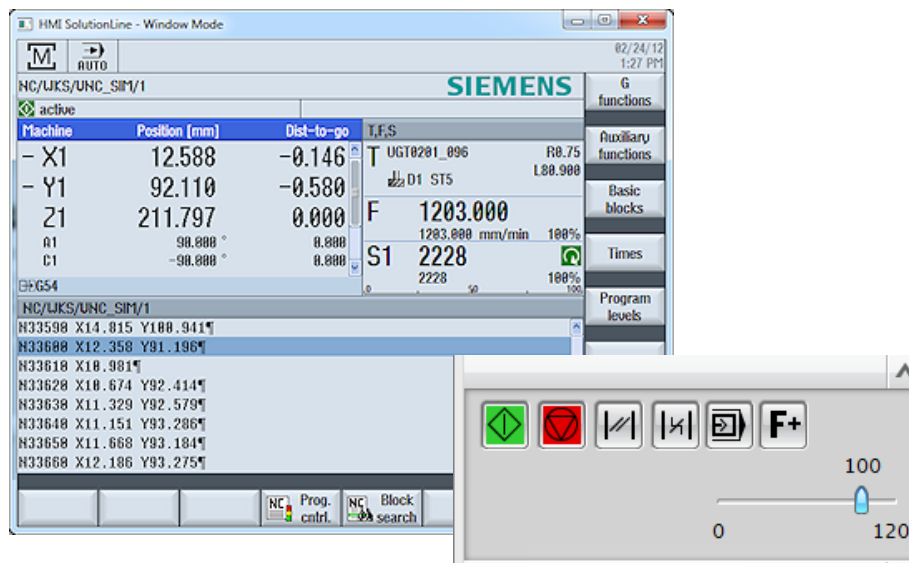
Další skupiny v Machine Configuratoru jsou Variables, Internal Variables, Transformations a Kinematic chains. Ve skupině Variables a Internal Variables jsou zavedeny všechny obsažené variability (proměnné). Jsou zde definovány přiřazením příslušného typu a hodnoty. Nacházejí se zde systémové proměnné, proměnné metod a Variability listeners. Interní variability jsou rozděleny do dvou skupin: globálně proměnné a State attributes. Transformations obsahují definice transformačních cyklů pro příslušný řídicí systém. V kinematic chains jsou definované kinematické vazby v závislosti na transformaci a pohybech os.

2.6.5. Knihovny simulátoru

Virtuální makety jsou integrovány do prostředí NX CAM simulátoru. Navržená maketa je definována v interních knihovnách CAM systému. Skládá se z CSE driveru, grafiky, postprocesoru a datovým souborem. Datový soubor načítá NX simulátor ve kterém jsou zaneseny cesty k požadovaným souborům. CSE driver obsahuje inicializační, MCF, CCF soubory a složku se subprogramy. Grafika obsahuje celou sestavu s jednotlivými díly obráběcího stroje. Z této složky se načítá celý model obráběcího stroje do simulace. Postprocessor obsahuje již zmiňované TCL, PUI a DEF soubory. Ze všech těchto souborů se skládá postprocessor vygenerovaný v aplikaci Post Builder. Tento postprocessor v reálném čase překládá CL data na NC kód, který je nadále odbavován řídicími drivery v CSE simulaci.

2.6.6. Simulace řízená virtuálním řídicím systémem (Virtual NC Controller driven)

Virtual NC Controller driven simulace (dále již jen VNCK simulace) je simulace, která využívá virtuální jádro řídicího systému. Tudiž obsahuje interpolátor, který odbavuje NC kód, jako tomu je při reálném procesu řízení stroje pomocí NC kódu. VNCK obsahuje jádro řídicího systému Sinumerik 840D. Tato simulace je nejpokročilejší simulace co NX simulátor nabízí. Jedná se o další rozšíření obou předešlých simulací ISV a CSE. ISV simulace využívala pouze kinematiku stroje a byla řízena pomocí CL dat. CSE simulace využívá kinematiku stroje, postprocesor, drivery pohonů os a je řízená NC kódem. VNCK simulace využívá kinematiku, postprocesor, drivery, virtuální řídicí systém s interpolátorem a je také řízená NC kódem. Od verze NX 8.5 je VNCK integrováno přímo do NX simulátoru. Simulace využívá veškeré logické funkce, které využívá systém. Součástí simulace je náhled kontrolního panelu Human Machine Interface (HMI) prostředí. Jedná se o uživatelské prostředí stejné, jaké využívá Sinumerik 840D. Ovládání je totožné s ovládáním reálného panelu.



Obr. 2.15 Náhled HMI rozhraní a spuštěného NC programu [5]

2.6.7. Tvorba postprocesoru (Postprocessing)

Jak již bylo v úvodu řečeno, každý CAM software vytváří APT nebo CL data. Jsou to data o polohách dráhy nástroje v souřadnicích stroje. Je nutné tyto APT či CL data dále zpracovat a vytvořit NC kód. K tomu slouží postprocesor. Proto NX obsahuje aplikaci s názvem Post Builder, ve kterém je možné generovat vlastní postprocesory.

NX CAM Express využívá CL data. CL data jsou ve formátu ASCII a jsou normovány normou ISO/DIN. Obsahují následující skupiny informací: hlavičku drah nástroje, hlavičku procedury, definice technických činností, definice souřadnic nutný pro řízení pohybu nástroje, zakončení procedury a zakončení drah nástroje. [4]

Aplikace Post Builder vytváří a edituje postprocesory. Ty se skládají ze tří elementů (souborů), každý je identifikovaný podle jména jednu ze tří přípon. Jméno postprocesoru je Sinumerik_Dymanic, soubory jsou následující:

- Sinumerik_Dynamic.pui ... soubor obsahuje informaci o postprocesoru pro Post Builder
- Sinumerik_Dynamic.tcl soubor určuje bloky. Postprocesor také využívá tento soubor v nabíhacím čase generování NC kódu
- Sinumerik_Dynamic.def ... soubor obsahuje všechny informace pro postprocesor. Zahrnuje formáty, adresy a NC bloky. Tento soubor je používán Post Builderem na postproces dráhy nástroje a tvoření NC kódu.

V úvodním panelu nastavení nastavujeme základní charakter postprocesoru, jako je např. druh obráběcího stroje, počet řízených os stroje, výstupní jednotky, druh řídicího systému s příslušným programovacím jazykem, jméno, popis postprocesoru atd.

Post Builder rozloží nastavení NC programu do pěti různých sekvencí. Obráběcí stroj, Program & dráhy nástroje, Definice NC dat, Výstupní nastavení a Virtuální NC kontrola. Každá karta umožňuje přesné nastavení potřebných výstupů.

V Kartě obráběcího nástroje se nastavují hlavní parametry stroje, jako jsou délky lineárních os, výchozí pozice nástroje, minimální, maximální posuv a multiplikátory os atd.

Karta programu a dráhy nástroje je rozdělena do pěti hlavních dialogových skupin. Jednotlivé skupiny řídí obsah, formát, pořadí NC výstupu a jsou chronologicky řazeny do stromovité struktury. Programování těchto skupin nám umožní editovat NC výstup a příkazy, které jsou generovány v NX CAM generátoru.

Dialogové skupiny:

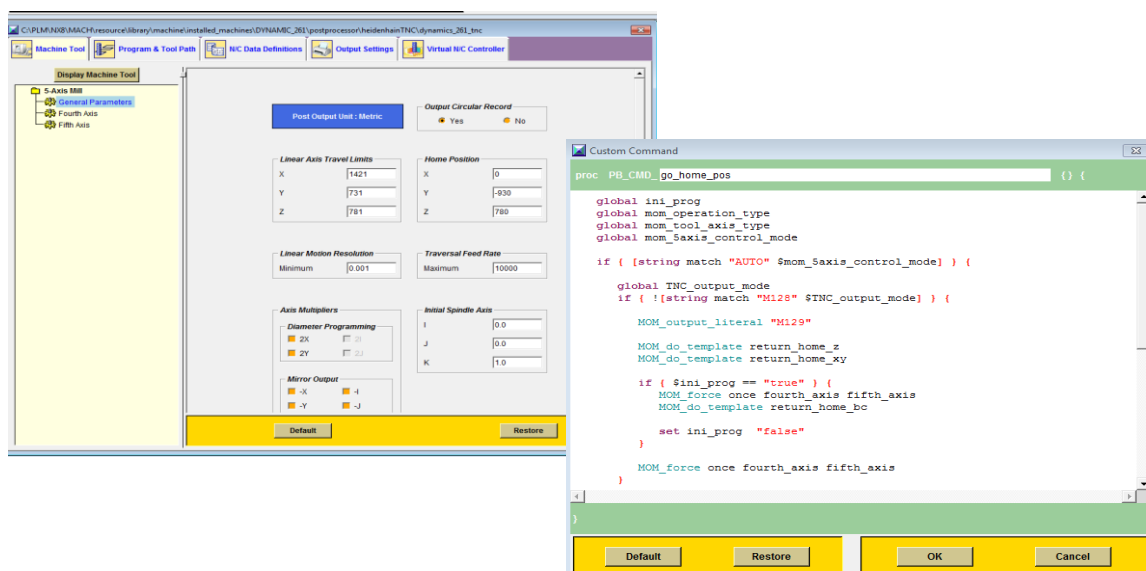
Start pořadí programu zde se nastavuje hlavička programu

Start operace programu zde se nastavují jednotlivé kroky před spuštěním programu (např. výměna nástroje, volání nástroje atd.)

Dráha nástroje zde se nastavuje řízení stroje (např. spuštění chladicí kapaliny), pohyby a cykly

Konec operace programu zde se nastavují úkony při ukončení operace

Konec pořadí programu zde se nastavují úkony při dokončení programu

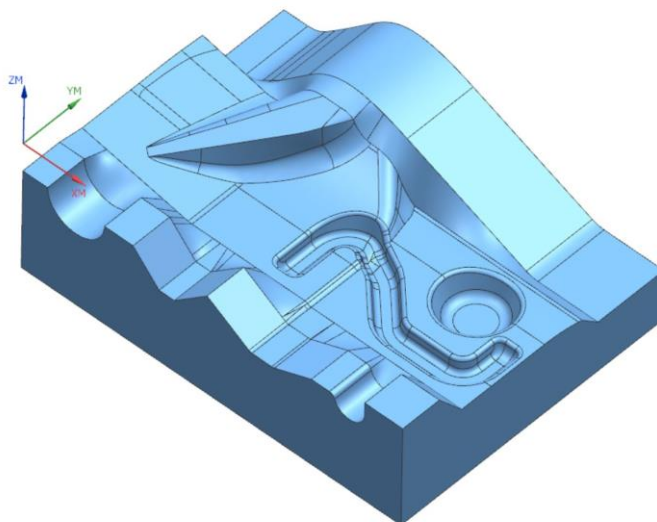


Obr. 2.16 Náhled na prostředí tvorby postprocesoru v aplikaci Post Builder [5]

2.7. Uvedení do problematiky testování frézovacích center v osách XYZ

2.7.1. Testovací dílec Mercedes

Požadavek průmyslu na stále přesnější NC stroje, vznikla v minulosti nutnost rychle a hlavně spolehlivě porovnat kvalitu různých frézovacích NC strojů. Všeobecně rostli nároky na rychlé a objektivní posuzování kvality NC stroje.



Obr. 2.17 Testovací dílec Mercedes

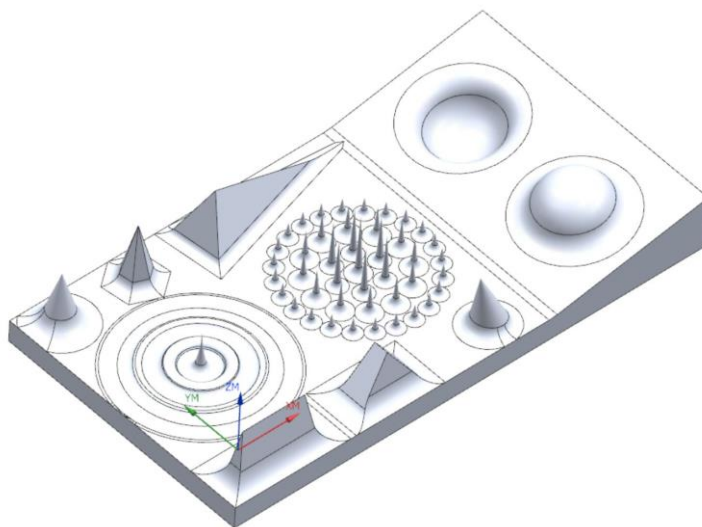
Díl Mercedes je navržen tak, aby obsahoval základní tvary pro tvarové obrábění. Pouhým okem jsou pak patrné nepřesnosti vzniklé na povrchu. Díky tomuto lze posuzovat, zdali dva různé stroje obrábí podle totožného NC kódu, totožných řezných podmínek ve stejné kvalitě a čase. Kritické oblasti jsou především ostré vrcholy, napojení rovné plochy na tvarovou, či hloubené kapsy. Totožné řezné podmínky, nástroj, materiál a NC data jsou pro srovnání zásadní. Rozměry polotovaru jsou v tomto provedení 200x150x70mm.

2.7.2. Testovací dílec Okuma

Nejnovější standard je dnes dílec Okuma. Název je odvozený od výrobce NC strojů Okuma. Nároky tohoto dílce jsou oproti předchůdci Mercedes diametrálně odlišné. Protože moderní stroje jsou dnes, co se týče tuhosti, přesnosti i rychlosti, na jiné úrovni, než stroje řádově před deseti lety. Proto tento dílec vyrobit v co nejkratším čase a co nejpresněji, není pro mnohé méně tuhé obráběcí centra zcela bezproblémové. Okuma obsahuje po stranách různě zkosené pyramidální či kuželové plochy.

Na šikmé ploše se nachází vypouklá a vydutá půlkoule. Uprostřed jsou na soustředných kružnicích situované jehly.

Ty jsou rozloženy podle velikosti. Na vnější roztečné kružnici kužely jsou nejmenší a směrem ke středu se jejich výška navyšuje. Na zbylé rovinné ploše se nachází útvar připomínající padající kapku do vody. Od středového kužele se v soustředných kruzích nachází vlnovitá tvarová plocha.

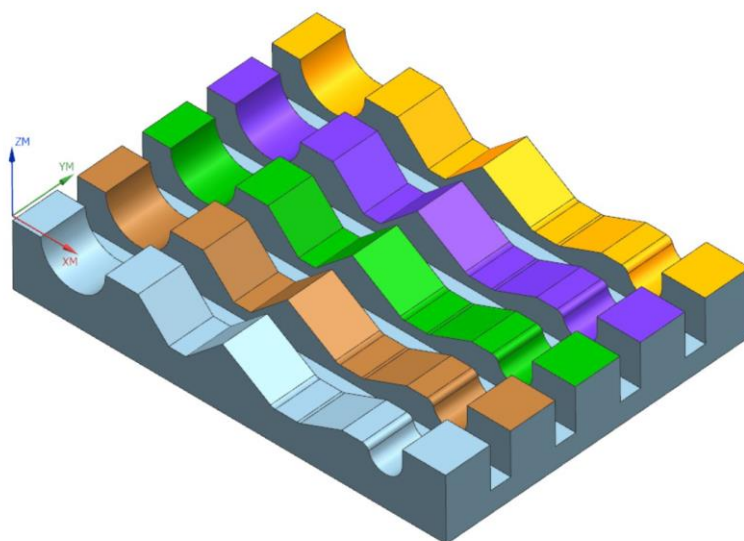


Obr. 2.18 Testovací dílec Okuma

Dílec je oproti Mercedesu navržen značně komplikovaněji. Povrch musí být vyhlazený, hrany ostré, přechody hladké a vrcholy kuželů či hranolů nepodřezané. Především poslední kritérium je velice složité dodržet, protože na výsledné povrchy hran má vliv více faktorů. A to kvalita NC kódu, řezný proces vztažený k obráběnému materiálu, tuhost s dynamikou NC stroje a i samotná optimalizace pohonů. Rozměry dílce jsou 22x121x40mm, obráběné plochy kuželů jsou velice malé (počáteční průměr 1mm). Při nastavení vysoké přesnosti dat v CAM systému dochází ke generování dráhy po velice malých úsečkách. Z tohoto je patrné, že stroj je dynamicky namáhán a v kritické oblasti vrcholů mnohdy dochází k podřezání. Při dokonale odladěném NC programu můžeme adekvátně posuzovat přesnost stroje při předem zadaných požadavcích na obráběcí stroj.

2.7.3. Testovaná součást

Testovaná součást byla z časových důvodů pouze část dílce Mercedes, nicméně je plně dostačující. Jedná se o boční profil složený z rovných, šikmých a rádiusových ploch. Tento tvarový profil byl několikrát zkopírován a vznikl tak nový dílec pro testování a optimalizaci stroje Dynamic (pro tříosé frézování viz Obr. 2.19). Testovací dílec je takto navržen z důvodu obrábění stejného profilu totožnou technologií, ovšem za rozdílných podmínek. Hledáme optimální nastavení parametrů pro řízení stroje a optimální posuv nástroje. Poté zkoumáme obrobený povrch, jak z hlediska přesnosti profilu, tak z obrobeného povrchu. Dva profily mají vždy stejné parametry pro řízení pohonů, řádkování, nástroj a rozdílné jsou pouze hodnoty posuvu osy X. Zkoumáme optimální chování stroje v závislosti na obrobeném povrchu.



Obr. 2.19 Testovací dílec vycházející z části profilu Mercedes

2.8. Uvedení do problematiky optimalizace strojů

Pro optimalizaci strojů jsou obecně navrženy dvě metody- metoda nul a pólů a Ziegler-Nicolsonova metoda. Přičemž metoda nul a pólů vychází z matematického výpočtu idealizovaného modelu mechatronického systému. Tato metoda se v technické praxi příliš nepoužívá, zejména díky její výpočtové a časové náročnosti. Mnohem častěji je využívána metoda Ziegler-Nicolsonova, která je založená na empirických vztazích vyvozených ze zkušeností z optimalizace. Tato metoda je rychlá, přesná a matematicky nenáročná na výpočty. Řídicí systémy mají i funkci automatického ladění těchto prvků, nicméně charakteristiky průběhů nejsou zcela optimální.

2.8.1. Ziegler-Nicolsonova metoda optimalizace

Nejprve nastavujeme proudový regulátor, poté rychlostní a jako poslední polohový regulátor. Toto nastavení regulátorů je základ pro samotný pohyb stroje. Musíme nastavit stroj tak, aby jednotlivé osy jezdili plynule a bez vibrací. Nicméně samotné ladění pohonů, pro co nejlepší povrch obrobku a čas obrábění, je až na samotném konci optimalizace. Jedná se o finální ladění Jerku, KV faktoru, Jumb Ability a další. Bohužel toto již nespadá pod Zigle-Nicolsonovu metodiku, vychází zejména ze zkušeností a znalostí dílčích parametrů. Toto může být velice zdouhavé, řádově i o několik dní než základní ladění regulátorů. Díky virtuálnímu testování NC stroje poslední kroky ladění řešíme na PC.

a) Nastavování proudového regulátoru

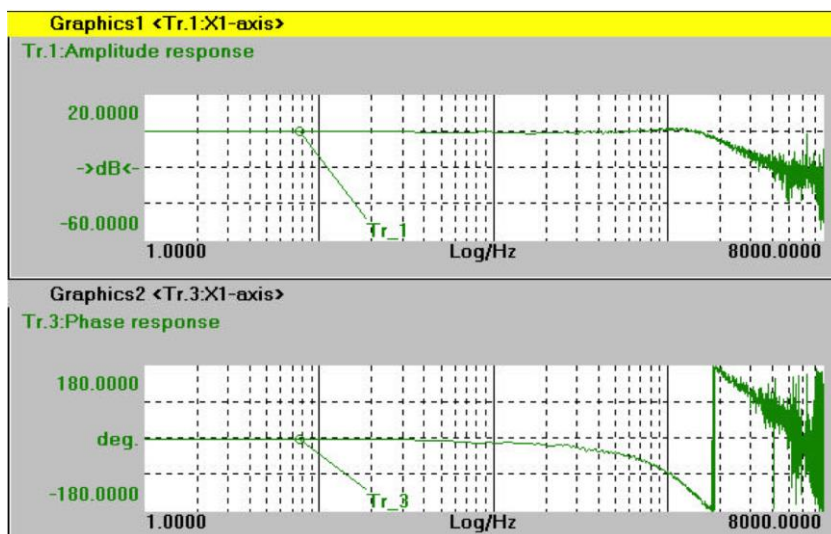
Při nastavování proudového regulátoru nastavujeme dva parametry proporcionální gain (P) a integrační gain (I). Nejprve hledáme optimální hodnotu proporcionální gainu. Proto musíme potlačit vliv integračního gainu, tím že nastavíme hodnotu (I) blížíci se k nekonečnu nebo rovno nule. Tato hodnota je zpravidla pro každý řídicí systém konkrétně specifikována. Nyní hledáme hodnotu P a to skokovým maximálním pulsem motoru. Tím dochází k rozkmitání kinematické soustavy stroje. Na sledovaném grafu se zobrazí akcent kmitů soustavy. Sledujeme amplitudu kmitů a hledáme mez stability systému. Mez stability je ustálená hodnota kmitání soustavy.

Tuto mez stability označujeme hodnotou P_{max} a hledaná hodnota pro řídicí systém P_{req} je 45% z meze stability.

$$P_{req} = P_{max} * 45\%$$

V této chvíli máme připravenou hodnotu proporcionálního gainu, nyní nastavíme integrační gain. Pro toto využíváme Bodeho charakteristiku nebo metodu jednotkového skoku. U Bodeho charakteristiky máme definované mezní hodnoty frekvenční charakteristiky. Podle toho, jak vypadá výchozí křivka v grafu, nastavujeme hodnoty integračního gainu. Limitující je záporná hodnota překmitu třech decibelů. Tuto hodnotu nesmíme přesáhnout a musíme se pokusit o co nejdelší pracovní oblast grafu.

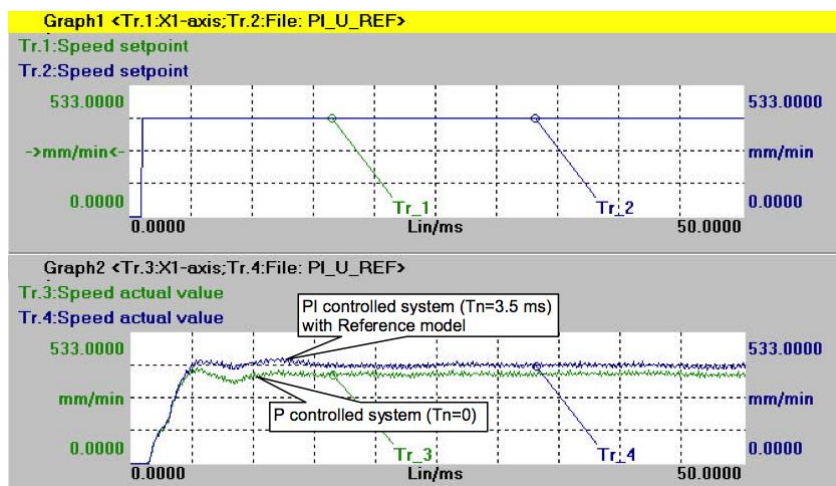
U jednotkového skoku vytvoříme impuls motory do soustavy a poté opět sledujeme křivku grafu. Jde znovu o ladění křivky se snahou dosáhnout co nejmenší referenční odchylky a plynulosti charakteristiky. Jedná se o závislost integračního gainu (v procentech) a času v milisekundách.



Obr. 2.20 Charakteristika optimalizovaného proudového regulátoru [17]

b) Nastavení rychlostního regulátoru

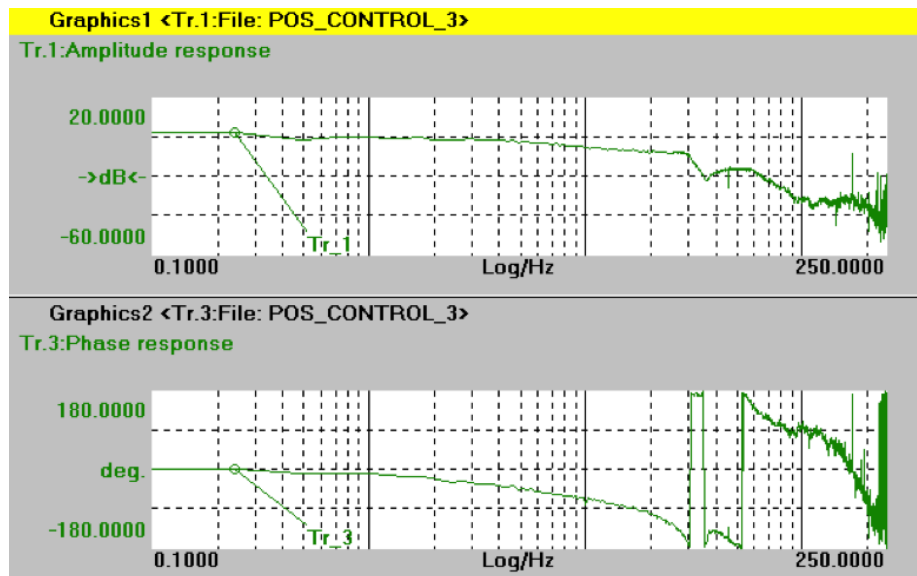
Toto nastavení se řeší opět pomocí Boodeho charakteristiky a jednotkového skoku. Hledáme co nejvíce ideální průběhy, ovšem platí zde jiné limity. U Boodeho charakteristiky je limit překmitu definován $\pm 3dB$ a u jednotkového skoku je hodnota maximálního překmitu +130%.



Obr. 2.21 Charakteristika optimalizace rychlostního regulátoru [17]

c) Nastavení polohového regulátoru

U polohového regulátoru nastavujeme pouze hodnotu proporcionálního gainu (P). Sledujeme skokovou změnu polohy z bodu A do bodu B a její průběh. Opět regulujeme hodnotu P, tak aby se průběh co nejvíce podobal idealizovanému stavu. Důležité je horní mez ideální křivky nepřekmitnout, aby nevznikal další kmitavý pohyb.



Obr. 2.22 Charakteristika polohového regulátoru po optimalizaci [17]

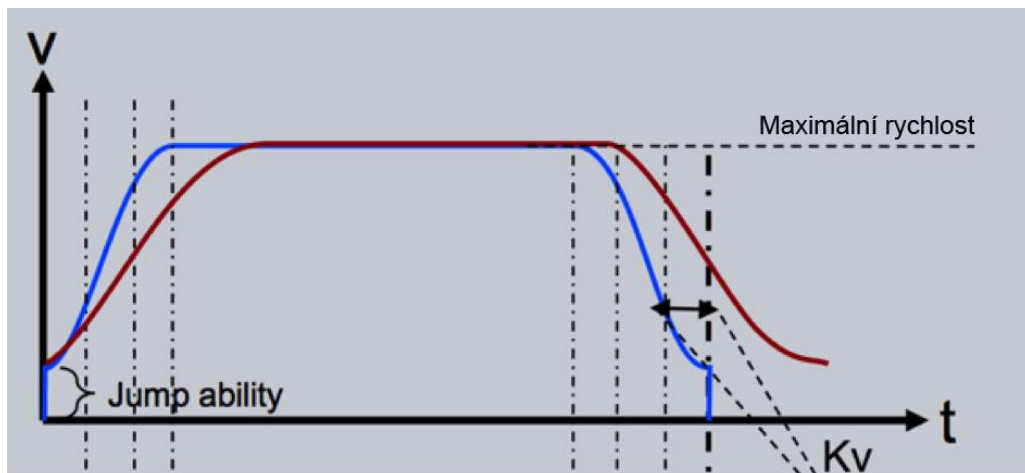
2.8.2. Teorie definovaných parametrů pro virtuální optimalizaci NC strojů

V kapitole 2.6.4. *Machine Configurator* byly zmíněny určité limity a parametry pohonů. Jako první byly Hard limity, to jsou maximální či minimální pevné limity os. Jedná se o maximální rozsahy os, které umožňuje konstrukce stroje. Toto jsou rozsahy os které jsou definovány v Machine Tool Builderu. Jelikož dynamické chování řízení pohonů umožňuje polohování s určitou odchylkou, není možné do těchto krajních mezí polohovat. Mohlo by i případně docházet ke kolizi s pevnými dorazy konstrukce stroje. Tudíž chceme, aby stroj tyto hodnoty nepřesahoval, proto používáme takzvané soft limity. Tyto limity jsou optimálně minimalizovány, aby byl zaručen bezpečný chod stroje. Hlavní rozdíl pro řídicí systém je ten, že hodnota soft limitu může být do jisté míry překročena, ale hodnota hard limitu nikoliv. Při překročení hard limitu řídicí systém vyhodnotí toto polohování jako za chybné a přeruší chod stroje.

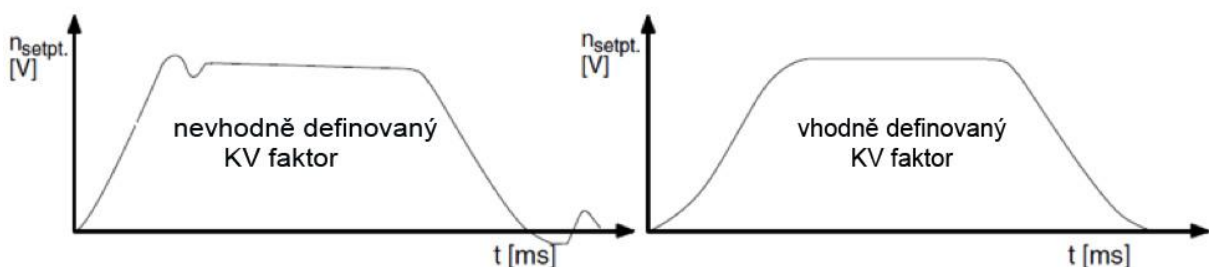
Tento limit je možné editovat úpravou referenčního bodu. Jedná se o případné posunutí ve směru osy o určitou hodnotu odečtenou od referenčního bodu stroje. Maximální rychlost definuje maximální hodnotu rychlosti, kterou se osa stroje může pohybovat v příkaze G0.

Fine a Coarse precision definují hodnotu odchylky od exaktního zastavení osy. Jakmile je provedeno zastavení v požadované toleranci, řídicí systém může přejít na další řádku souřadnic NC kódu a vykoná další pohyb. Díky této toleranci vyhodnotí pohyb jako správný. Pokud zpětná vazba nahlásí odchylku, další pohyb nebude proveden.

KV faktor je čistý parametr pohonů. Ovlivňuje chybu překmitnutí polohování osy, to je rozdíl mezi ideálním a skutečným profilem pohybu.

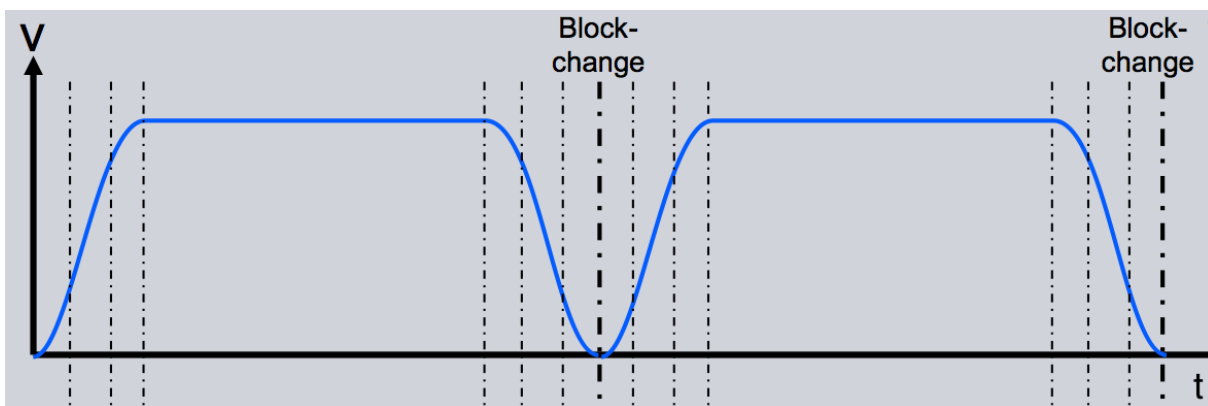


Obr. 2.23 Rychlostní průběh motoru osy s dosažením na maximální hodnotu [15]



Obr. 2.24 Rychlostní průběh motoru osy s dobře a špatně nastaveným KV faktorem [14]

Jerk je omezující hodnota v akceleraci pohonu. Nárůst rychlosti je nutné omezit právě její druhou derivací. Výsledkem je kvadratický rozběh či brždění. Při správném nastavení tohoto parametru nedochází k trhavému pohybu suportů. To značně zklidní chod pohybu stroje a tím i jeho životnost. Řídicí systém používá reflexivní omezení, systém Sinumerik tuto funkci aktivuje pomocí příkazu SOFT a deaktivuje pomocí BRISK. Bez použití tohoto parametru by byly rychlostní průběhy motorů ostré a pouze lineární. To by mělo za následek ostré skoky v celé dynamice NC stroje. Motory by například nedokázali včas ubrzdit pohyb celé osy a docházelo by tak k překmitům od požadované hodnoty. Chod by byl značně trhavý a neplynulý.



Obr. 2.25 Rychlostní průběh osy s omezující hodnotou Jerk [15]

3. Rozbor testovaného stroje

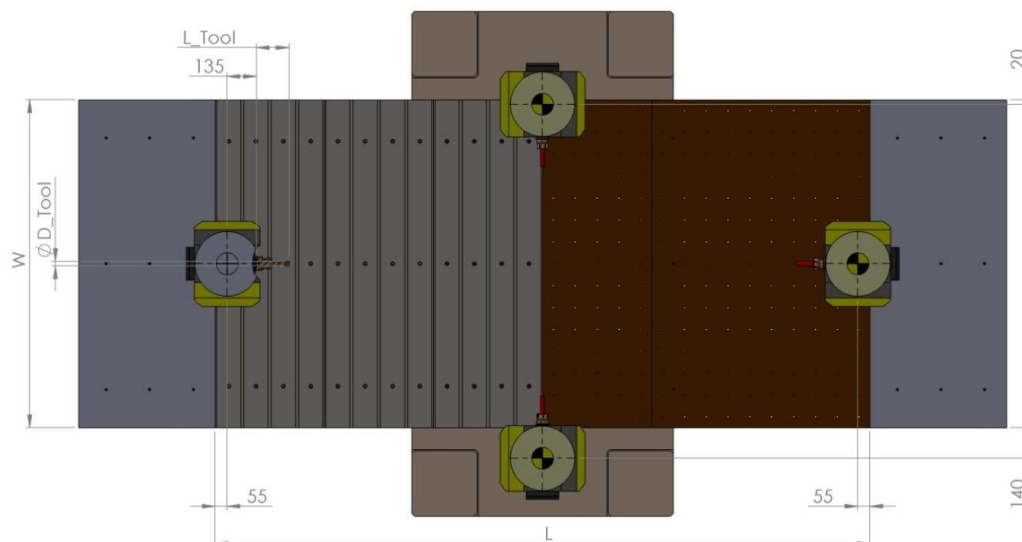
3.1. Popis testovaného stroje Dynamic No. 261

Obráběcí centrum je určeno pro plošné a tvarové obrábění frézováním a vrtáním. Uplatní se zejména na obrábění modelů, forem, kompozitních materiálů. Je ovšem určeno především na produktivní obrábění dřeva, plastů či hliníkových slitin.

3.1.1. Technické parametry stroje

Stroj je v pětiosém provedení osazen automatickou naklápěcí hlavou HS 662 (5 NC osy X, Y, Z, A, C). Ta umožňuje rychlé a přesné naklopení vřetena pro indexované obrábění ve třech osách nebo plynulé pětiosé obrábění. Hlava je standardně vybavena pneumatickým zamykacím systémem pro zpevnění osy A, které se uplatní zejména při indexovaném obrábění hliníkových slitin.

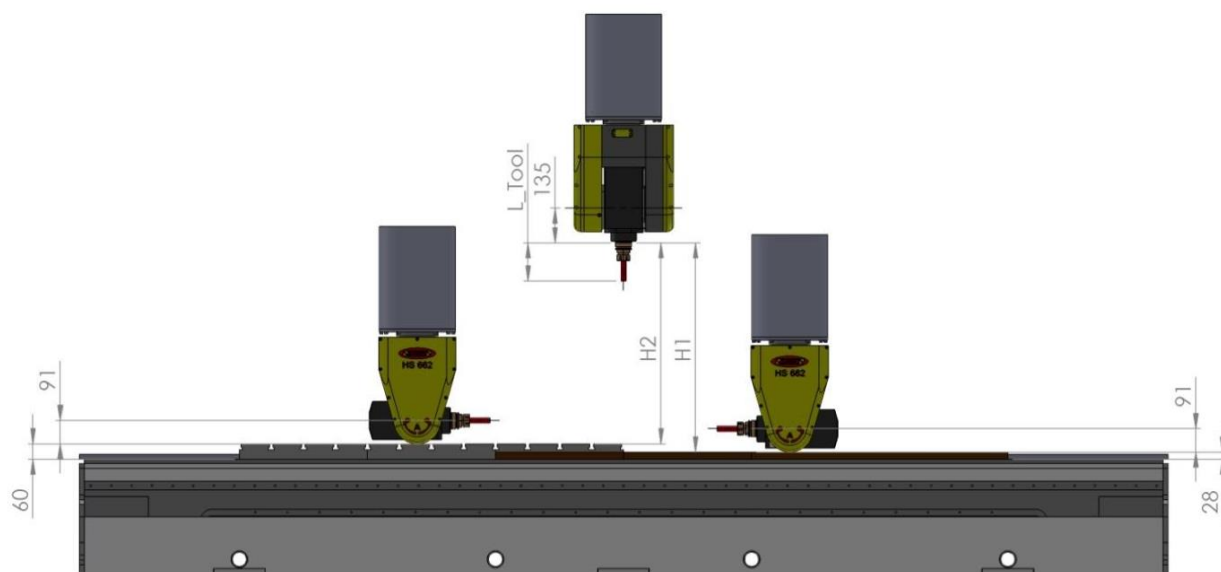
Stroj má rozsah pohybu v ose $A = \pm 110^\circ$ a v ose $C = \pm 400^\circ$. Dosahuje maximální rychlosti v ose A a C $13\,000^\circ/\text{min}$. Servomotor vykazuje kroutící moment v ose A roven $1,5\text{ Nm}$ a v ose C $5,2\text{ Nm}$. Provozní otáčky jsou $0 - 24\,000\text{ ot/min}$. Výkon vřetene je 12 kW při točivém momentu $15,3\text{ Nm}$. Upínací kužel pro nástroje je HSK F63. Pracovní délka stolu L je $3\,000\text{ mm}$ a šířka W je rovna $1\,500\text{ mm}$.



Obr. 3.1 Rozměrové schéma stroje Dynamic v rovině XY [18]

Rozjezd osy Z bez použití litinové upínací desky s T-drážkami je H1 rovno 816 mm. Pro rozjezd H2 s použitím upínací desky je dovolená maximální hodnota H2 rovna 784 mm. Rozjezd osy X je roven 1 421 mm a Y 731 mm. Rozjezdem stroje je vždy chápáno rozsah pohybu osy od nulového bodu stroje MCS. A to jak do kladných hodnot, tak do hodnot záporných.

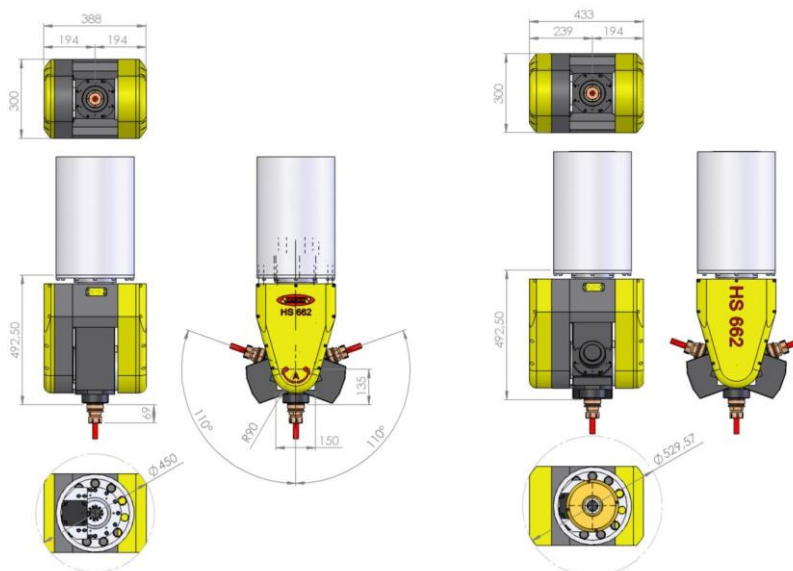
Maximální délka obrobku je doporučována 2 320 mm a maximální šířka 1 050 mm. Byla použita varianta stroje s univerzální ocelovou upínací deskou. Tato deska je opatřena rastrem upínacích závitů M10 a to v rozměrech 100 x 100 mm.



Obr. 3.2 Rozměrové schéma stroje Dynamic v rovině XZ [18]

Neméně důležitá hodnota pro pokročilé simulace NC strojů je také bod výměny nástroje. A to je v ose X = 0, Y = -930 a Z = 780 mm od bodu nulového bodu stroje MCS. Nulový bod stroje se nahází přesně ve středu upínacího stolu stroje. Vřeteno je s vodním chlazením a pneumatickým uvolněním nástroje. Je osazeno keramickými ložisky. Vřeteno může být vybaveno snímačem polohy pro automatické řezání závitů.

Pro pokročilou technologickou simulaci je důležité znát přesné rozměry nástrojové hlavy. Nástrojová hlava HS662 je zobrazena na obrázku (Obr. 3.3) a to bez přímého odměřování a s přímým odměřováním. V našem případě byla použita hlava s přímým odměřováním polohy osy A.



Rozměry HS662 bez přímého odměřování

Rozměry HS662 s přímým odměřováním

Obr. 3.3 Rozměrové limity nástrojové hlavy HS 662 [18]

3.1.2. Přesnost stroje Dynamic

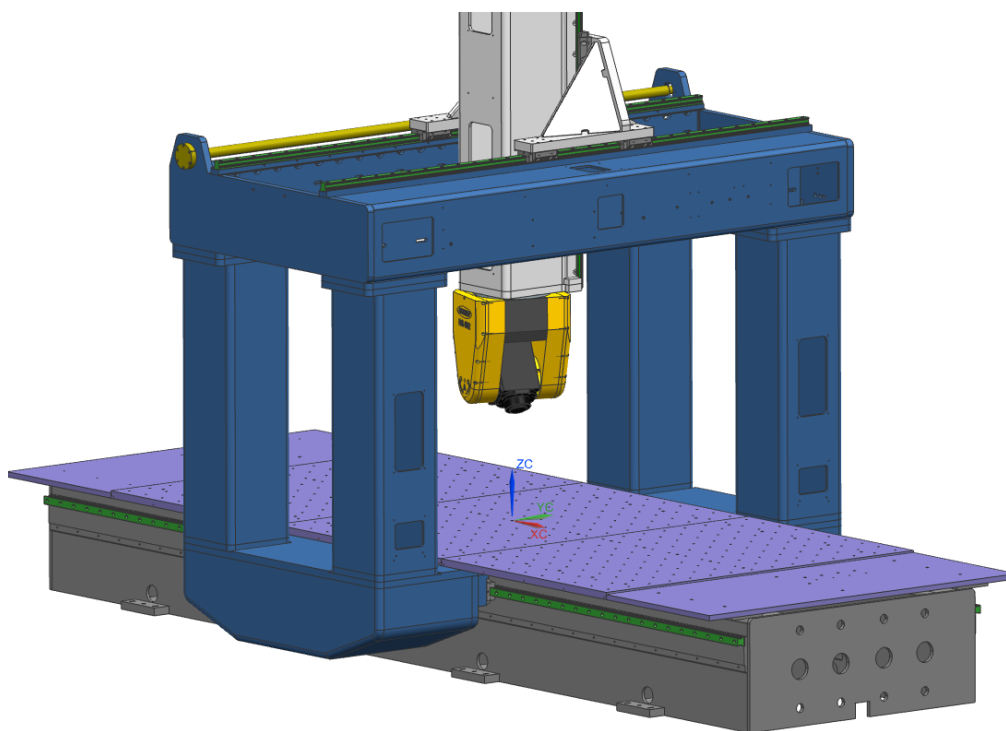
Přímé odměřování rotačních os je osazeno optickými snímači HEIDENHAIN. Snímače jsou osazeny přímo na výstupních hřídelích. Stroj se pohybuje v níže uvedených přesnostech.

Opakovaný nájezd na pozici X/Y/Z (jednosměrný)	± 0,03 mm
Opakovaný nájezd na pozici X/Y/Z (obousměrný)	± 0,06 mm
Opakovaný nájezd na pozici A/C (jednosměrný)	30"
Opakovaný nájezd na pozici A/C (obousměrný)	50
Ujetá vzdálenost X/Y/Z (odchylka od 1000 mm)	± 0,15 mm
Ujetá vzdálenost A/C (odchylka od 90°)	25"
Zrychlení X/Y/Z	3 m/s ²
Zrychlení A/C	300 °/s ²

4. Tvorba virtuální makety Dynamic No. 261

Z důvodu neveřejných interních informací společnosti Siemens PLM software není možné v této diplomové práci více do hloubky konkretizovat kompletní strukturu tvorby virtuálních NC strojů.

Model NC stroje dodala společnost Sahos a.s.. Z důvodu menší výpočetní náročnosti je pro simulaci použita nosná konstrukce stroje. Jedná se o lože, portál, smykadlo, nástrojovou pětiosou A/C hlava a vedení posuvových ploch. Zjednodušování vstupních 3D modelů bylo provedeno v závislosti na pracovním prostoru NC stroje. Veškeré komponenty co se nacházejí v pracovním prostoru, je nutné zanechat. A to z důvodu toho, že slouží zejména jako potenciální kolizní prvky simulace.



Obr. 4.1 Náhled virtuálního NC stroje Dynamic

4.1. Tvorba kinematiky v prostředí NX Machine Tool Builder

Při tvorbě kinematiky je zásadní využívat skutečné rozjezdy a polohy os. Tudiž je důležité se obeznámit s rozměrovou charakteristikou stroje. Uvědomit si, které prvky konstrukce jsou vázány rotační a které lineární vazbou. V neposlední řadě je nutné být obeznámen s výchozí polohou stroje (home position), s bodem výměny nástroje a nulovým bodem stroje. Referenční bod stroje se nachází v souřadnicích X0, Y0, Z780, A0, C0 a nulový bod stroje v souřadnicích X0, Y0, Z0, A0, C0 na středu upínacího stolu. Veškeré tyto hodnoty udává výrobce stroje.

Jednotlivé pole s komponenty jsou vzájemně řazeny ve stromové struktuře. Díky definici polí komponent a jejich řazení podřazená komponenta přejímá kinematické vazby komponenty nadřazené. Pole komponenty nesou jedinečný název, soustavu dílů, klasifikaci součástí, řídicí souřadnicový systém a přiřazenou příslušnou osu komponenty. Přiřazená osa pole komponent obsahuje jedinečný název, směr vůči hlavnímu souřadnicovému systému, nastavení druhu pohybu, iniciační hodnotu a limity. Název osy musí být identický s adresou vyskytující se v NC kódu a řídicím driveru.

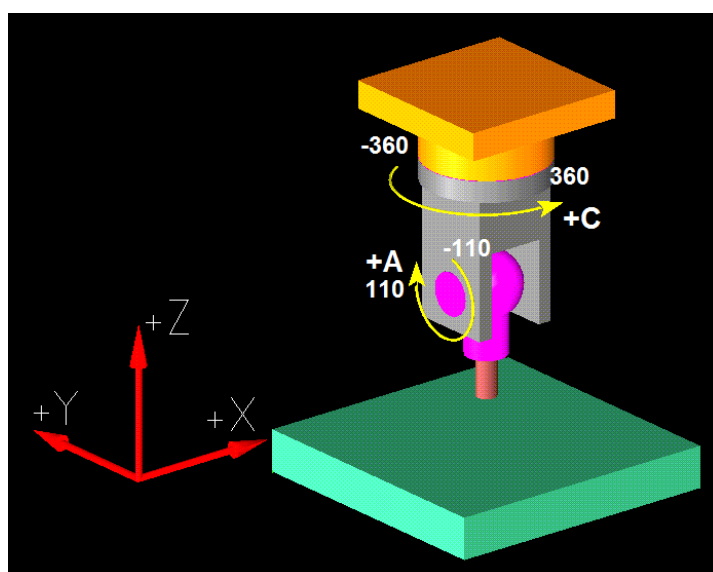
Hlavní komponenta bývá zpravidla nosný rám stroje, od kterého se odvíjejí veškeré kinematické vazby dalších polí komponent. Obsahuje klasifikaci MACHINE_BASE a MACHINE_ZERO. Což je informace o hlavní komponentě a nulovém bodu stroje. Vřeteno stroje je definováno jako klasifikační komponenta DEVICE a TOOL_MOUNT. Což je klasifikace pro zařízení virtuálního NC stroje a klasifikaci vřetene.

Nedílnou součástí makety je takzvaný SETUP_ELEMENT. Setup element obsahuje informace pro budoucí obrobek, polotovar a upínače. Jsou to jednotlivé elementy s vlastní klasifikací. Definované jsou jako PART, WORKPIECE a FIXTURE. Nadřazený SETUP obsahuje informaci o umístění a orientaci souřadnicového systému těchto elementů. Jsou proměnného charakteru a přesná definice obsahujících komponent je definována přímo až při aplikaci simulátoru na simulovanou technologii.

Simulátor má vlastní hlídání kolizních stavů i při neřezných pohybech v pracovním prostoru stroje. Proto vlastní definice upínacích (FIXTURE ELEMENT) elementů je definována dodatečně i v simulátoru.

4.2. Tvorba postprocesoru

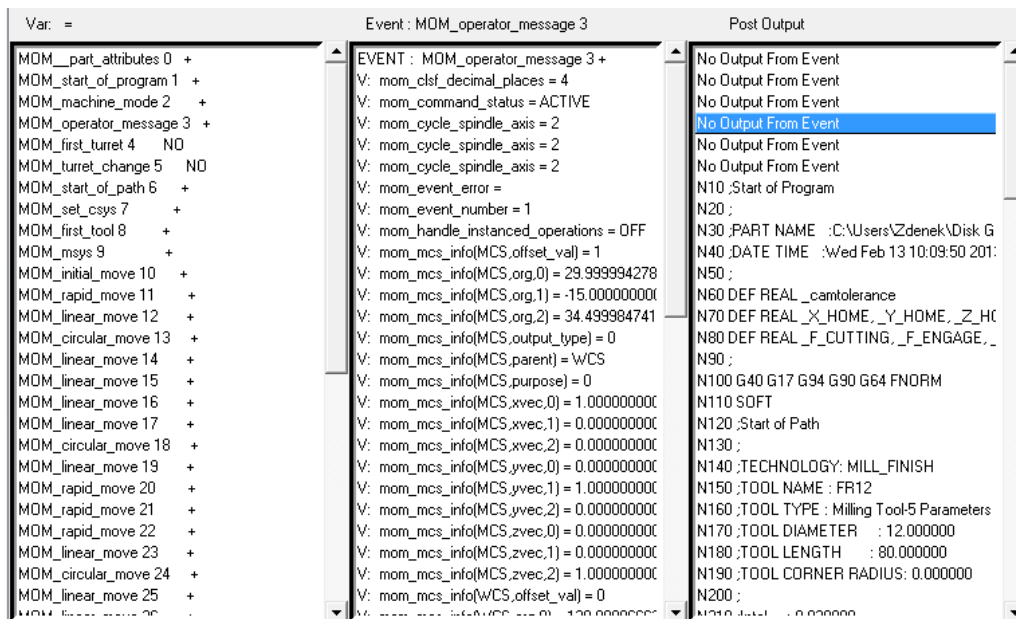
Tvorba samotného postprocesoru probíhala v NX aplikaci Post Builder s následujícím základním rozměrovým nastavením. Rozjezdy lineárních os byly voleny $X=1420$, $Y=950$ a $Z=800$ [mm]. Čtvrtá rotační osa C se nachází v rovině X/Y s limitem os ± 360 stupňů. Pátá rotační osa A se nachází v rovině Y/Z s limitem os ± 110 stupňů. Výstup dat je nastaven v kruhových parametrech I, J, K. To znamená, že výstupní NC kód je možné generovat kruhovými interpolacemi G02 a G03. Což značně zpřehledňuje a především zkracuje samotný kód.



Obr. 4.2 Náhled kinematiky NC stroje z prostředí Post Builder

Syntaxe dialogových skupin programu byla standartní- start celého programu, start operace programu, definice průběhu dráhy, konec operace a konec celého programu. Byly generovány dva hlavní soubory DAT a TCL. Soubor DAT je definiční soubor, který obsahuje vlastní formát NC programu. Soubor TCL obsahuje hlavní procedury činností postprocesingu pro jednotlivé události viz. kapitola 2.6.7. *Postprocessing*. Samotné finální dokončení postprocesoru probíhalo v ruční editaci v textovém editoru Notepad ++. d

Samotné ladění postprocesoru proběhlo v takzvaném odlad'ovacím režimu v prostředí NX CAM. Tento režim slouží pro psaní postprocesorů a především pro řešení případných problémů. Na obrázku (Obr. 4.3) je zobrazen náhled odlad'ovacího okna postprocesoru. V levém sloupci *Var* jsou zobrazeny jednotlivé události v programu. V prostředním okně *Event* jsou vypsané příslušné proměnné vztažené k příslušné události. A v pravém okně *Post Output* se nacházejí příslušné výstupy do NC programu.



Obr. 4.3 Náhled odlad'ovacího okna postprocesoru

4.3. Tvorba řídicího driveru

Řídicí driver byl programován v prostředí Machine Configurator, jeho funkce a struktura byla obecně popsána v kapitole 2.6.4. *Machine Configurator*.

V globálním nastavení driveru (General) byla zvolena šablona CSE řídicího systému Siemens 840D. Čas cyklu byl zvolen 2 [ms], Motion Precision 0,01 [mm] a funkce Lookahead byla nastavena na 200 bloků. Tyto parametry jsou voleny dle standartního nastavení použitého řídicího systému Sinumerik 840D.

V podskupině Axes/Spindles byly definovány použité lineární osy NC X/Y/Z, rotační osy A/C a osa vřeteno S. Nastavení parametrů motorů bylo voleno dle základních výpočtů softwarového inženýra s následujícími hodnotami. Vlastnosti a české názvy dynamických parametrů pohonů jsou popsány v kapitole 2.6.4. *Machine Configurator*.

Parametr pohonů	Jednotka	Původní parametry (PM0)
Max. Speed	[mm/s]	30 000
Max. Acceleration	[mm/s ²]	1 500
Max. Deceleration	[mm/s ²]	1500
Fine Precision	[mm]	0,03
Corse Precision	[mm]	0,05
Jerk	[mm/s ³]	10 000
Jump Ability	[mm/s]	1,5
KV faktor	[-]	0,5

Tab. 4.1 Dynamické parametry pohonů os virtuálního NC stroje

Byl využíván jeden řídicí kanál s názvem *Main*. Jako hlavní řídicí osy byly zvoleny osy X/Y/Z a hlavní vřeteno S. Další podskupiny driveru nebylo ani v průběhu experimentu dále nutno předefinovat. Jinak tomu často bývá u nestandardních geometrií stroje a řídicího systému. Rovněž nebylo nutné zasahovat do nastavení DLL a CCF souboru, které byly použity ze standartní knihovny pro řídicí systém Sinumerik 840D.

4.4. Princip virtuálního testování NC stroje

Princip virtuálního testování byl teoreticky navržen v prvních fázích přípravy technologie pro testovací dílec profilu Mercedes. Tento algoritmus byl navržen na použité konkrétní technologii frézování na tříosých frézovacích centrech od zadávající společnosti. Tento algoritmus může být také v dalších studiích optimalizován kupříkladu na jiný druh použité technologie, např. u použití jiných testovacích dílců, které mohou být komplexnějšího charakteru.

Hlavním principem bylo využití SCE simulace, která se skládá z virtuálních maket a testovací technologie. Obecně lze algoritmus rozdělit do dvou fází virtuálního testování. V první fázi jde o virtuální optimalizaci stroje. Pro tuto optimalizaci byl navržen dílec části profilu Mercedes (Obr. 4.4). Principem virtuální optimalizace je použít předem definovanou technologii a optimalizovat parametry strojů. Díky výpočtu času operací pomocí CL dat dostáváme ideální časovou hodnotu. Tato hodnota není ovlivněna vlastnostmi samotného NC stroje. Změnou předem definovaných parametrů pohonů stroje optimalizujeme virtuální (potažmo skutečný) čas obrábění. Snahou by mělo být dosáhnout co nejkratšího času obrábění při dodržení geometrických přesností profilu a kvality povrchu.

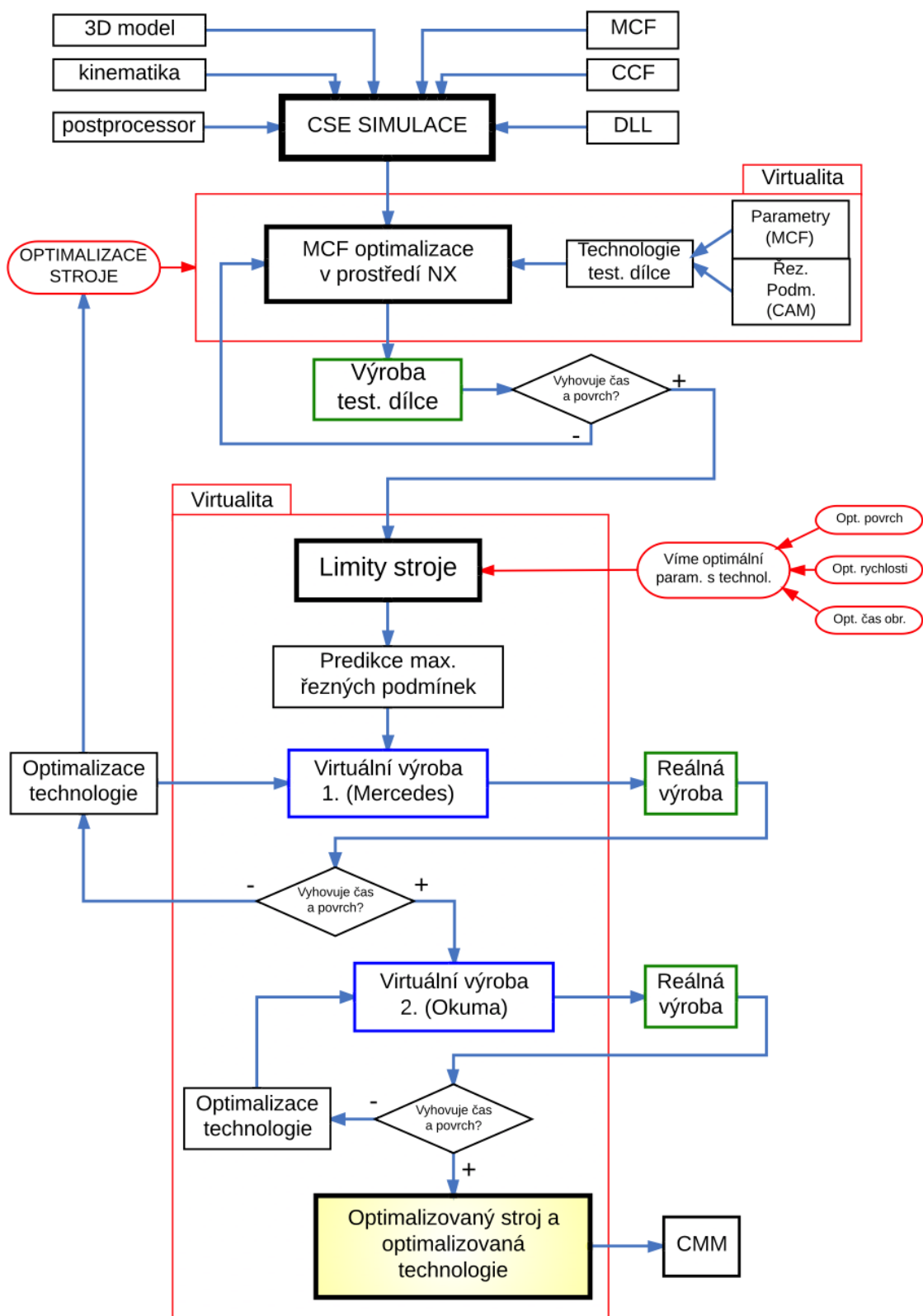
Po navržení testovací technologie a virtuální optimalizaci následovala samotná výroba dílce. Nastává rozhodovací okamžik, kdy se rozhodneme, zdali vyhovuje čas obrábění a obráběný povrch. Uspokojivým výstupem by měl být kompromis mezi časem obrábění a kvalitou obráběného profilu.

Při nedodržení časů či kvality povrchu je třeba navázat na zpětnou vazbu. Zpětná vazba vrací proces do fáze MCF optimalizace stroje a testovací technologie. Po opravě technologie či parametrů pohonu celý proces opakujeme. Díky tomuto kroku predikujeme limity stroje. Jedná se o limity pohonů a použitých řezných podmínek pro danou testovanou součást a materiál. Známe tedy optimální řezné podmínky při dodržení kvalitního povrchu za co nejkratší čas. Na základě těchto zjištění byla navržena technologie pro druhou fázi testování stroje.

Druhá fáze se skládá z virtuálního testování NC stroje pomocí testovacích standardů, jako je například dílec Mercedes a Okuma. Dle složitosti těchto součástí byl experiment rozdělen na virtuální výrobu prvního a druhého stupně. Toto vzniklo z důvodu značné rozdílnosti nároků testovacích dílců viz. kapitola 2.7. *Uvedení do problematiky testování frézovacích center v osách XYZ.*

Po virtuální výrobě prvního stupně nastala reálná výroba dílce Mercedes z umělého dřeva. Nastává rozhodovací cyklus, zdali realita odpovídá virtualitě, to znamená jsme-li spokojeni s časem výroby a povrchem, přistupujeme k výrobě druhého stupně. Pokud ne, vrátíme se k optimalizaci technologie či až k optimalizaci pohonů stroje. Po uspokojivě vyrobeném dílci předpokládáme již pevně stanovené zoptimalizované hodnoty pohonů. Pro další testy tudíž tyto parametry již neměníme.

Po výrobě druhého stupně, testovacího dílce Okuma, jsme schopni jasně stanovit, do jaké míry bylo možno optimalizovat stroj a použitou technologii. Pro zpřesnění veškerých výsledků testování je možné dále obrobky měřit například použitím CMM technologií. Je nutno podotknout, že použití CMM technologie značně časově i finančně prodlužuje celé testování. Vždy záleží na uživateli, do jaké míry bude požadovat detailní analýzu obrobené součásti. Testování stroje bez využití metody CMM trvá řádově v několika hodinách či jedné pracovní směny.



Obr. 4.4 Vývojový diagram pro virtuální optimalizaci a testování NC stroje Dynamic

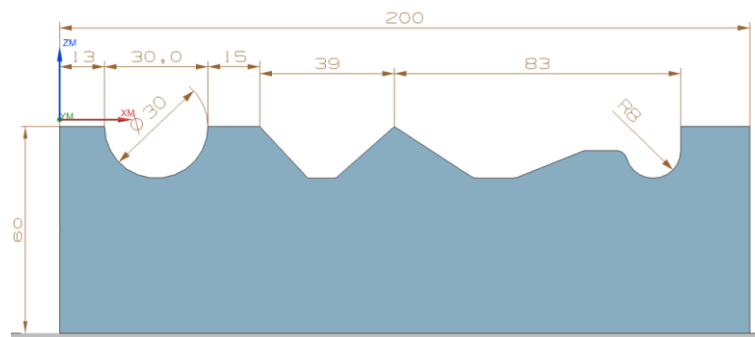
4.5. Tvorba testovací technologie v prostředí NX CAM

Technologie byla navržena v prostředí NX CAM verze 8.5 a jako testovaná součást byl použitý model profilu dílce Mercedes viz. kapitola 2.7.3. *Testovaná součást.*

Výrobní NC program byl rozdělen na tři části: (1.) hrubování profilu hřebenů dílce, (2.) dohrubování a (3.) samotné dokončování profilů. Hrubování s přídkem 0.6 mm bylo provedeno za pomoci monolitní karbidové čelní válcové frézy $D=12$ mm s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřeteny $n=10000$ ot/min, posuvové rychlosti $v_f=5000$ mm/min, $a_p=3,5$ mm, $a_e=45\%$ nástroje. Drážkování mezi jednotlivými profily bylo provedeno pomocí monolitní karbidové čelní válcové frézy $D=10$ mm s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřeteny $n=10000$ ot/min, posuvové rychlosti $v_f=3000$ mm/min, $a_p=5$ mm, $a_e=100\%$ nástroje. Dohrubování s přídkem 0,3 mm bylo provedeno monolitní kulovou frézou $D=8$ mm s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřeteny $n=10000$ ot/min, posuvové rychlosti $v_f=3000$ mm/min, $a_e=2$ mm. Tato operace byla zvolena z důvodu neovlivnění dokončovacích operací, nedostatečným ohrubováním a zanechání značně členitým povrchem. Při zanechání předdokončeného profilu pouze po čelní válcové fréze, by byl povrch členitý a to ve tvaru schodů. Tento povrch by při vyšších dokončovacích posuvech mohl ovlivnit rozkmitání dokončovacího nástroje. Toto by mohlo značně ovlivnit výsledný povrch a tím znehodnotit celou optimalizaci NC stroje.

Dokončování bylo rozděleno na pět operací pro každý jednotlivý profil. Tento princip byl zvolen z důvodu porovnání povrchů profilů a výrobního času jednotlivých vln modelu..

Nástrojem na dokončování byla monolitní karbidová kulová fréza o průměru $D=8$ mm s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřeteny $n=10000$ ot/min, posuvové rychlosti $v_f=1500$ mm/min s milimetrovým řádkováním v rovině X/Y. Materiál obrobku bylo umělé dřevo. Požadovaný čas na obrobení jedné vlny byl stanoven společností Sahos cca 5 min při dosažení co nejkvalitnějšího povrchu. Řádkování frézy, druh nástroje a čas byl stanoven z požadavku výrobce stroje. Cílem bylo dosáhnout optimálních řezných podmínek a nastavení parametrů motorů při dodržení časového kritéria.



Obr. 4.5 Náhled profilu testovacího dílce Mercedes

Celkem byly vyrobeny tři vzorky. První sloužil k virtuální optimalizaci NC stroje a další k optimalizaci řezných podmínek. Dva vzorky pro testování technologie obsahovaly celkem

deset obráběných vln, tudíž deset měřených profilů. Na těchto profilech se testovaly maximální řezné posuvy. Jednotlivé vlny vzorků jsou číslovány od nulového bodu v kladném směru osy Y. Řezné podmínky byly dopředu zvoleny při virtuálním testování a samotná výroba potvrzovala vypočtené časy obrábění ze simulátoru. Výrobou byla zjišťována především hodnota obrobeného povrchu (hodnota Fine).

4.5.1. Vyhodnocení virtuální optimalizace pohonů NC stroje

Jako výchozí parametry byly nastaveny hodnoty z typově podobného stroje. Tato skutečnost lze buď akceptovat, nebo dosadit dle přibližných výpočtů. Ze zkušenosti softwarového inženýra nebyl výpočet pro tento experiment nutný.

Parametr pohonů	Jednotka	Původní parametry (PM0)	Nové parametry (PM1)
Max. Speed	[mm/s]	30 000	30 00
Max. Acceleration	[mm/s ²]	1 500	1 000
Max. Deceleration	[mm/s ²]	1500	1 000
Fine Precision	[mm]	0,03	0,1
Corse Precision	[mm]	0,05	0,5
Jerk	[mm/s ³]	10 000	15 000
Jump Ability	[mm/s]	1,5	1,5
KV faktor	[-]	0,5	2

Tab. 4.2 Původní a změněné parametry pohonů stroje

Jako testovací součást byl požit model hřebenů dílce Mercedes (viz. Obr. 4.5). Polotovar byl o rozměrech 200x150x70mm z umělého dřeva. Byla použita monolitní kulová fréza D=8 mm s počtem zubů Z=2, otáčky vřetene n=10000 ot/min, posuvová rychlost vf=1000 mm/min, ap=3 mm, ae=1 mm a CAM tolerance 0,01 mm.

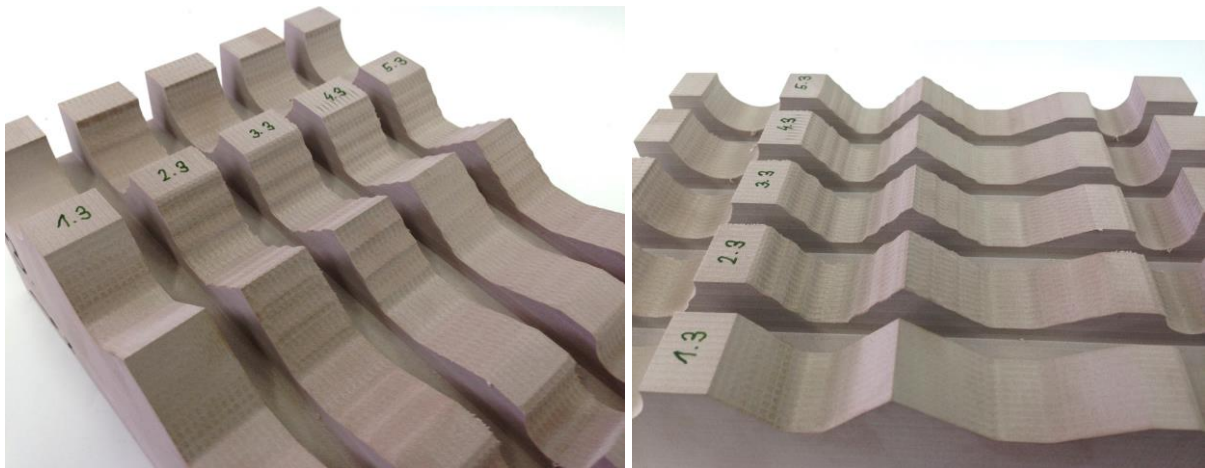
U těchto řezných parametrů, při správně zoptimalizovaném stroji, předpokládáme hladký obrobený povrch. Empiricky byly měněny parametry pohonů a to jak na virtuálním stroji, tak na stroji reálném. Reálnou výrobou byly souběžně kontrolovány výsledky a povrchy obrobku. Na virtuálním stroji byl sledován zejména čas výroby. Barevnou analýzou podřezání či nadbytku materiálu obrobku byl vyhodnocován povrch.

Při simulaci bylo nutno aktivovat cyklus 832, který zahrnuje nastavení Jerků pro požadovaný druh obrábění. V postprocesoru nebyl zprvu volán konkrétní funkce SOFT, která vyvolává použití osových Jerků, protože cyklus 832 toto nastavení Jerků má v sobě obsažené. Nastaly

dva druhy řešení tohoto problému. Buď přeprogramovat řídicí driver, nebo postprocessor. Byla volena varianta zásahu do postprocesoru tak, že před každou operací bylo voláno funkce SOFT.

Tyto parametry byly vyhodnoceny dle nejlepšího dosaženého povrchu obrábění testovací součásti při plynulém a klidném chodu stroje. Chod stroje je důležitým hlediskem zejména pro vyhnutí se kmitání stroje ve vlastní frekvenci. Při kmitání ve vlastní frekvenci je schod stroje značně nestabilní, hlučný a velice nepřesný. Veškeré nežádoucí kmity byly patrné na samotném povrchu obrobku.

Na obrázku (Obr. 4.6) jsou vyobrazeny obráběné profily testovacího dílce. Pátý profil v řadě (5.3) je obrobek s původními parametry pohonů. První profil zleva (1.3) je po postupném ladění parametrů obrobek jako finální s optimalizovanými hodnotami.



Obr. 4.6 Obrobený profil při optimalizaci NC stroje

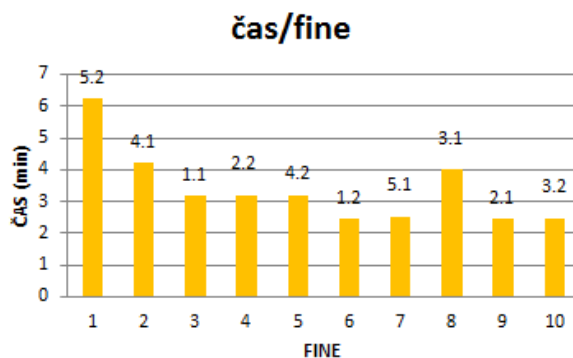
4.5.2. Vyhodnocení technologické (CAM) optimalizace (PM1)

Závislost času a kvality povrchu je z hlediska produktivity výroby nejdůležitější, proto byly vybrány první tři kombinace parametrů dle kvality obrobeného povrchu (hodnota Fine). Produktivní obrábění je doporučováno s posuvem 4000 mm/min a CAM tolerancí 0,002mm. Tyto řezné podmínky jsou spíše vhodné pro dohrubovací operace. Kombinace řezných parametrů 1500 mm/min a 0,04 mm je vhodná pro předdokončování. A to s poměrně krátkým časem obrábění (4,22 min) a kvalitním povrchem (fine=2). Pro dokončovací operace je optimální nastavení 4000 mm/min a 0,02 mm sice s nejdelším časem, ale nejkvalitnějším povrchem. U dokončovací operace je nejkvalitnější povrch prioritou.

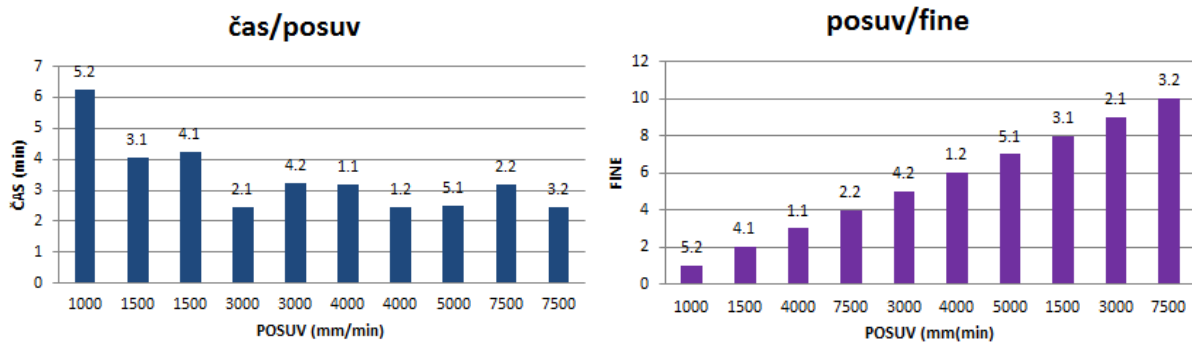
č. profilu	tol. [mm]	vf [mm{min}]	čas [min]	fine
1.1	0,002	4 000	3,19	3
2.1	0,2	3 000	2,44	9
3.1	0,2	1 500	4,04	8
4.1	0,04	1 500	4,22	2
5.1	0,04	5 000	2,52	7
1.2	0,04	4 000	2,45	6
2.2	0,002	7 500	3,18	4
3.2	0,04	7 500	2,45	10
4.2	0,002	3 000	3,21	5
5.2	0,002	1 000	6,25	1

Tab. 4.3 Tabulka naměřených hodnot CAM optimalizace PM1

Zvyšování posuvu nad 4000 mm/min nevedlo ke zvýšení rychlosti obrábění z důvodu krátkých lineárních drah, kde motory nemají možnost plně akcelarovat na plný výkon. Je patrné, že optimální rychlost posuvu, vzhledem k času obrábění, je 3000 - 4000 mm/min.

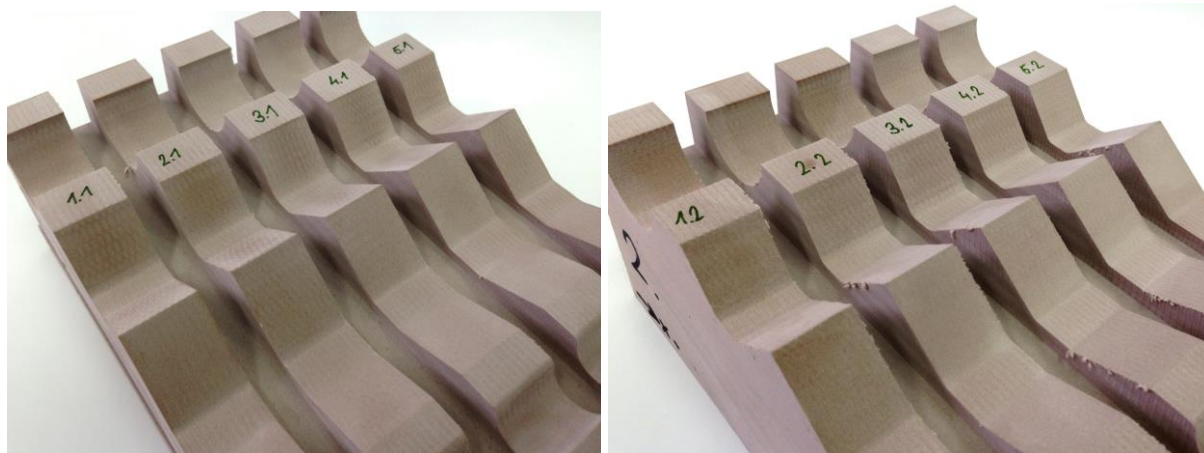


Obr. 4.7 Graf závislosti času obrábění na kvalitě povrchu



Obr. 4.8 Graf závislosti času na posuvu a graf závislosti posuvu a hodnoty fine

Ze závislosti posuvu na kvalitě obrobeného povrchu (fine) vyplynulo, že při zvyšování rychlosti posuvu se lineárně zhoršuje kvalita obrobeného povrchu. Optimální posuv z hlediska kvality povrchu je 1000 - 3000 mm/min.



Obr. 4.9 Náhled obrobených profilů

4.6. Mercedes test

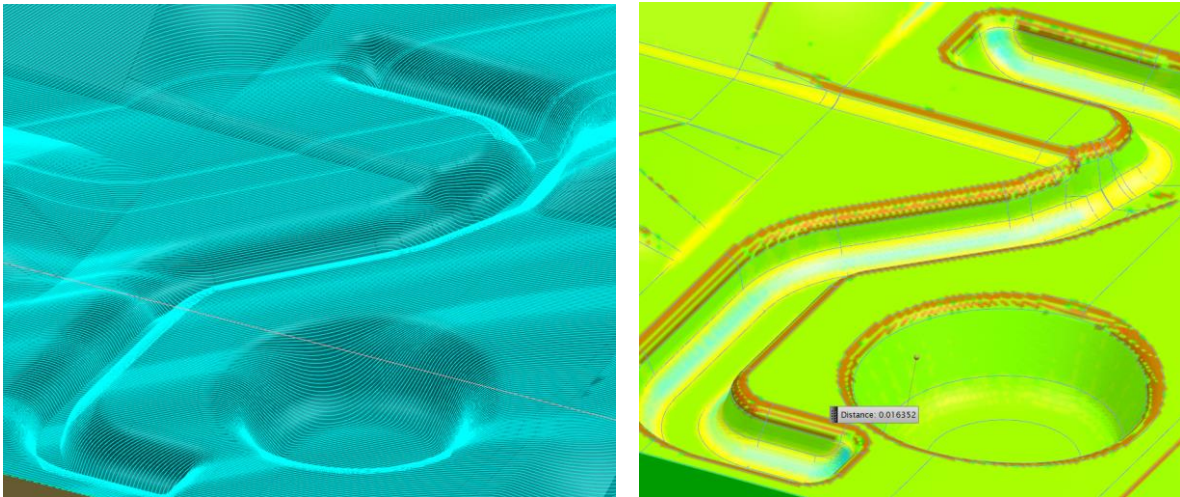
4.6.1. Mercedes test optimalizovaného stroje (PM1)

NC program byl rozdělen na tři části: (1.) hrubování profilu hřebenů dílce, (2.) dohrubování a (3.) samotné dokončování profilu. Kde byly řezné podmínky voleny dle měření testovací součásti profilu Mercedes viz. kapitola 4.6.2. *Vyhodnocení technologické (CAM) optimalizace.*

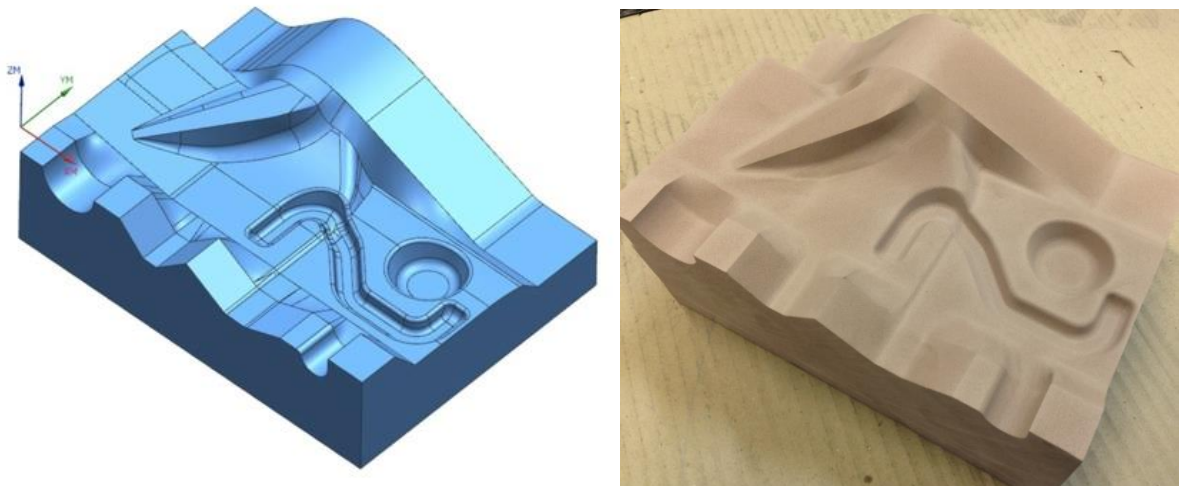
Sražení obvodu dílce bylo provedeno jako první operace. Frézování bylo provedeno bez přídavku za pomoci monolitní karbidové čelní válcové frézy $D=20$ mm s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřetene $n=8000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=3000$ mm/min, $a_p=25$ mm (dvě vrstvy). Hrubování profilu s přídavkem 0.3 mm bylo provedeno za pomoci monolitní karbidové čelní válcové frézy $D=20$ mm s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřetene $n=8000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=4000$ mm/min, $a_p=5$ mm, $a_e=35\%$ nástroje. Dohrubování profilu bylo obrobena s přídavkem 0.2 mm, za pomoci monolitní kulové frézy $D=8$ mm s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřetene $n=8000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=1000$ mm/min, s konstantním bočním krokem $a_e=3$ mm.

Dokončování finální plochy bylo provedeno dle vzoru původního Mercedes testu. Tj. frézování celé finální plochy v jedné operaci, kulovou frézou o průměru 8 mm, s řádkováním 0,5 mm, pod úhlem 45° . Frézování pod tímto úhlem je pro stroj velice nepříznivé, zejména při obrábění strmých ploch. Nastávají zde vysoké nároky na geometrickou přesnost stroje i chvění nástroje. Celý tento tuhostní systém se výrazně promítne do kvality obrobeneho povrchu a času obrábění. Při použití nižších posuvových rychlostí a zvýšení CAM tolerance, dosáhneme kvalitnějšího povrchu, ale čas obrábění roste lineárně viz. Obr. 4.8 *Graf závislosti posuvu obrábění a hodnoty fine.*

Řezné podmínky a nástroj byly následující: Monolitní kulová fréza o průměru 6 mm, s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřetene $n=18000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=1000$ mm/min, konstantním bočním krokem $a_e=0.5$ mm a CAM tolerance $Tol=0,002$ mm.



Obr. 4.10 Vygenerované dráhy profilu Mercedes s příslušnou analýzou povrchu



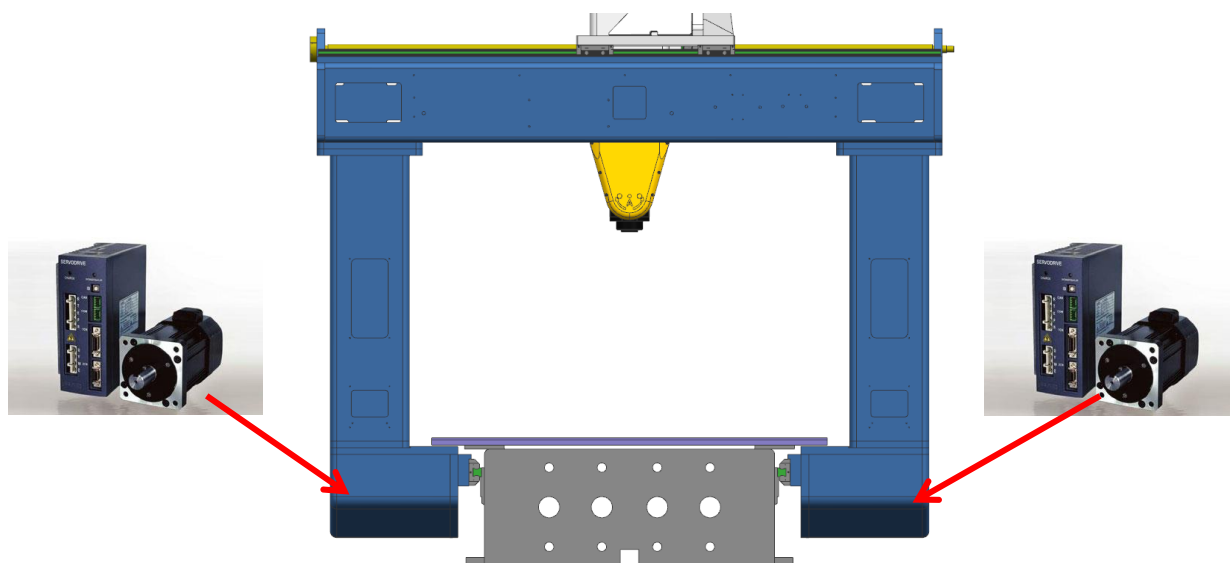
Obr. 4.11 Detail řádkování 1mm na povrchu Mercedes

Virtuální test vypočetl čas obrábění 2h 19 min a skutečný čas byl 1h 59min. Čas obrobeného povrchu neodpovídá požadavkům na Mercedes test. Z tohoto důvodu byl Okuma test proveden pouze na virtuální úrovni. Čas byl vypočten 7h 26min a povrch by byl s nejvyšší pravděpodobností nevyhovující a jehlice podřezané. Z tohoto důvodu Okuma test nebyl na tomto konstrukčním uspořádání stroje proveden.

4.6.2. Konstrukční úprava stroje

Z výše uvedeného testu vyplynulo, že testovaný stroj i při optimálním nastavení pohonů a technologie, nesplní požadavek na kvalitu obrobeného povrchu ani čas obrábění. Z tohoto důvodu vzniká požadavek jak dále zvýšit výkonost stroje. Optimalizace pohonů ani technologie neumožňuje další zlepšení.

Problematika je identifikována v konstrukci stroje. Stroj používá pohánění portálu bez systému gantry. Systém gantry spočívá v uložení hnacích pohonů na obou stranách portálu viz. (Obr. 4.12).



Obr. 4.12 Pohon portálu systémem gantry

Tento systém se vykazuje stabilním a klidným chodem celé sestavy portálu, rychlejším i přesnějším polohováním a především dochází k velké eliminaci vlastní frekvence stroje. Z tohoto důvodu další testy probíhaly na stroji Dynamic již s konstrukční úpravou.

4.6.3. Test stroje s provedením gantry

Z důvodu předpokládané razantní změny charakteristiky NC stroje byl proveden opět test nastavení pohonů stroje. Test byl založen na identickém principu, jako již bylo popsáno v kapitole 4.6.1. *Vyhodnocení virtuální optimalizace NC stroje*. Rozdíl nastal pouze v počtu testovaných profilů, z důvodu zrychlení celého procesu obrábění a následného vyhodnocení.

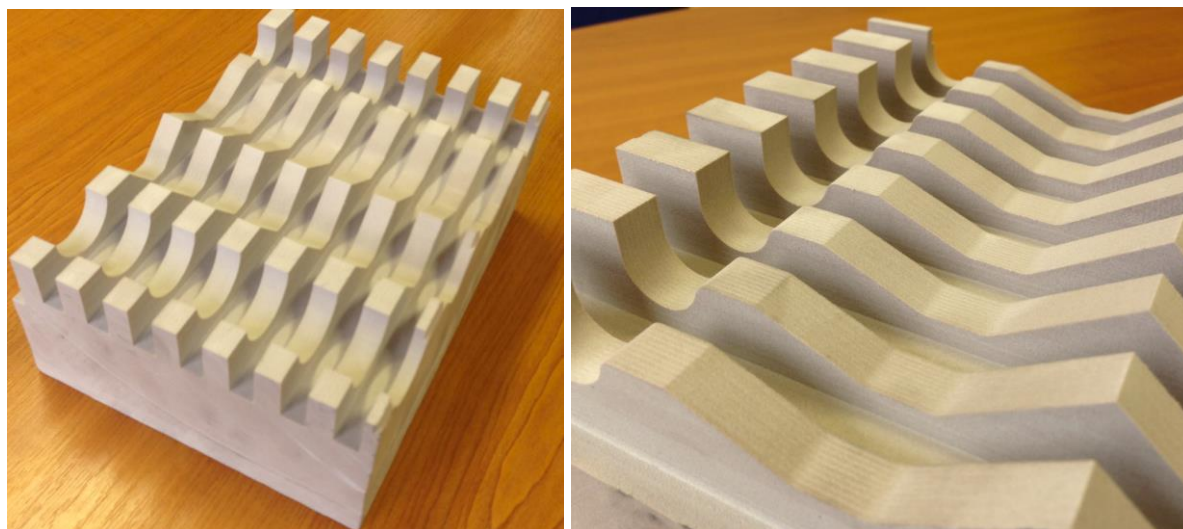
CAM tolerance byla jednotně volena 0,02 mm, otáčky vřetene $n=18000$ ot/min a nástroj byla opět monolitní kulová fréza o průměru 8mm. Předmětem zkoumání byla jen již závislost obrobeného povrchu a posuvu.

č. prof.	vf[mm/min]	čas obr. [min]	č. prof.	vf[mm/min]	čas obr. [min]
1	1000	3,54	5	4000	2,80
2	1500	3,02	6	4500	2,36
3	2000	2,99	7	5000	2,80
4	3000	2,83	8	6000	2,76

Tab. 4.4 Posuvové rychlosti frézování profilu v závislosti na čase obrábění

Tento test dokazuje, že profily při rozdílných posuvových rychlostech, stejné CAM tolerance, aktivováním cyklu 832 s nastavením pro dokončování, nejeví po obrobení značné tvarové odchylky. Z výše uvedené tabulky vyplynulo, že optimální posuvová rychlost je 4500 mm/min, s nejkratším časem obrábění 2,36min při zachování požadované kvality povrchu. Další zvyšování řezné rychlosti nemělo díky nastavení cyklu 832 žádný význam. Naopak mírně narostl čas, z důvodu dodržení tvarové přesnosti. Cyklus 832 při dokončovacím nastavení eliminuje rychlost posuvu, protože prokládá dráhu profilu polynomem prvního, druhého či třetího řádu a dle tohoto polynomu upravuje průběh řízení pohybu jednotlivých os. Bližší teorie v kapitole 2.5.1. *Interpolace NC kódu řídicím systémem stroje.*

Na obrázku (Obr. 4.13) jsou vyobrazeny vyrobené testovací hřebenové profily části dílce Mercedes. Je patrné, že profily jsou identické a na obrobených profilech nejsou znát defekty od vlivů stroje či špatně definované technologie.



Obr. 4.13 Testovací profily vyrobené strojem v povedení gantry

Parametr pohonů	Jednotka	Původní parametry(PM1)	Nové parametry(PM2)
Max. Speed	[mm/s]	30 00	30 00
Max. Acceleration	[mm/s ²]	1 000	1 500
Max. Deceleration	[mm/s ²]	1 000	1 500
Fine Precision	[mm]	0,1	0,01
Corse Precision	[mm]	0,5	0,03
Jerk	[mm/s ³]	15 000	10 000
Jump Ability	[mm/s]	1,5	0,3
KV faktor	[-]	2	2

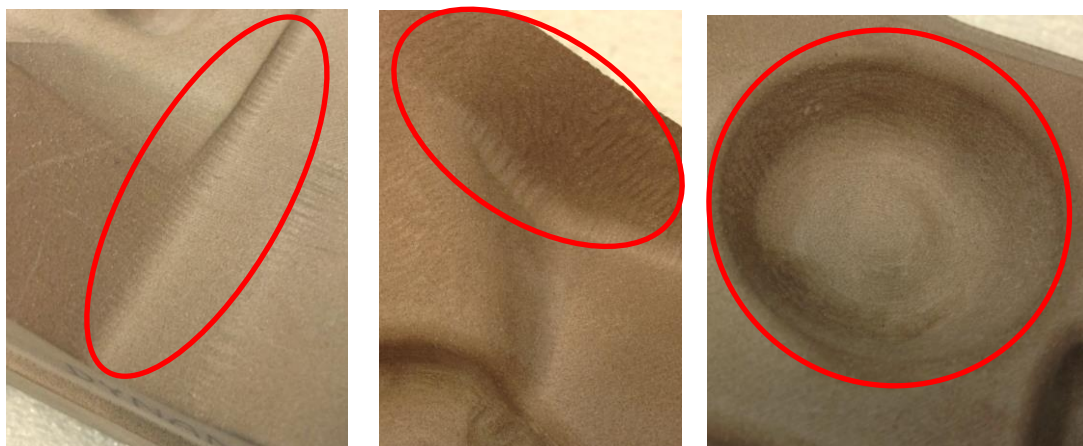
Tab. 4.5 Původní a změněné parametry pohonů stroje v provedení gantry

4.6.4. Mercedes test na provedení gantry

Mercedes test byl společností Sahos již vyráběn a výsledky nebyly zcela uspokojivé. Bylo zapotřebí znovu optimalizovat technologii pro dokončovací operaci. Tento prvotní test byl prováděn na rozdílných parametrech pohonů. Parametry byly v průběhu testování stroje optimalizovány viz. kapitola 4.6.3 Test stroje s provedením gantry.

Původní Mercedes test (1) bez optimalizovaných pohonů a technologie (PM1)

Nastavení pohonů byly ponechány původní viz. kapitola 4.6.3 Test stroje s provedením gantry, tabulka Původní a změněné parametry pohonů stroje v provedení gantry, použité hodnoty Původní parametry (PM1). Hrubovací technologie byla ponechána původní a byla změněna pouze dokončovací operace. Vstupní řezné podmínky a nástroj byly následující: monolitní kulová fréza o průměru 6 mm, s počtem zubů Z=2, otáčky vřetene n=18000 ot/min, posuvová rychlost vf=6000 mm/min, konstantním bočním krokem ae=0.4 mm a CAM tolerance Tol=0,02mm. Tyto hodnoty byly voleny společností Sahos jako referenční. Výpočtový čas z programovacího prostředí CAM byl 22min 51s, ze simulace byl čas vypočten 56min 48ss a skutečný čas obrábění dokončování byl cca 1h 2min. Výrobní čas by do jisté míry přijatelný, nic méně obrobený povrch byl zcela nepřijatelný.

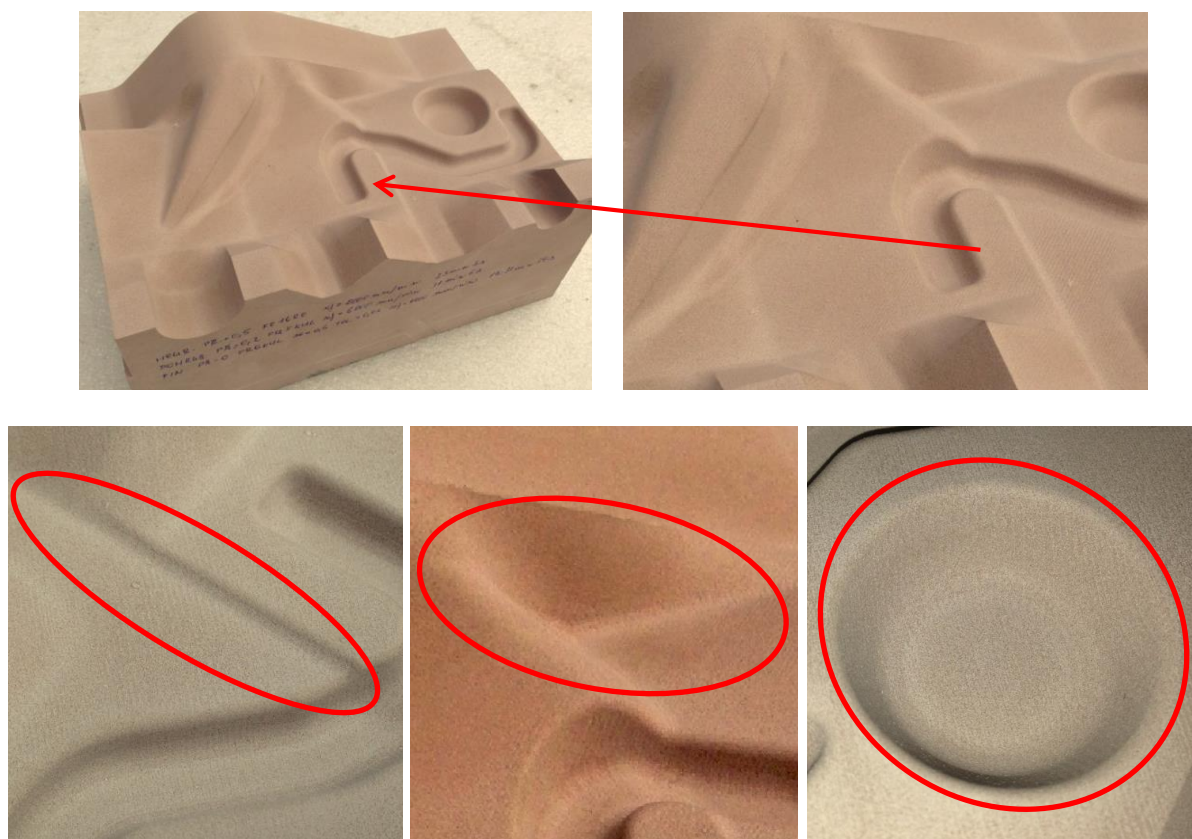


Obr. 4.14 Ukázka povrchů původního mercedes testu bez další optimalizace

První optimalizace technologie Mercedes testu (2) s optimalizovanými pohony (PM2)

Nastavení pohonů byly ponechány původní viz. kapitola 4.6.3 *Test stroje s provedením gantry*, tabulka *Původní a změněné parametry pohonů stroje v provedení gantry*, použité hodnoty *Nové parametry (PM2)*. Řezné podmínky a nástroj byly následující: monolitní kulová fréza o průměru 6 mm, s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřetene $n=18000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=4500$ mm/min, konstantním bočním krokem $a_e=0.5$ mm a CAM tolerance $Tol=0,02$ mm. Výpočtový čas z programovacího prostředí CAM byl 24min 23s, ze simulace byl čas vypočten 1h 20min 42s a skutečný čas obrábění dokončování byl 1h 31min 39s. Obrobený povrch dosahoval vysoké kvality, nenacházely se zde žádné vady podřezáním či nadbytky od negativních vlivů stroje.

Bohužel čas byl příliš dlouhý. Z výsledku bylo zřejmé, že stroj je správně zoptimalizovaný, ale ze strany společnosti byl další požadavek na snížení obráběcího času při zachování kvality povrchu. V této chvíli bylo možné již optimalizovat jen technologii.

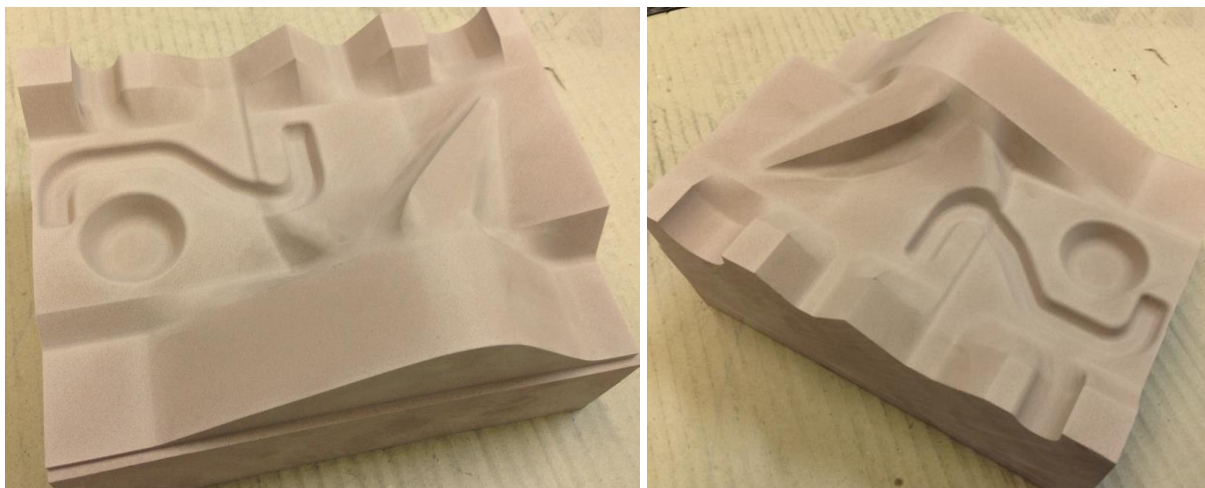


Obr. 4.15 Vyhlazené obrobené povrchy optimalizovaného Mercedes testu

Druhá optimalizace technologie Mercedes testu (3) s optimalizovanými pohony

Řezné podmínky a nástroj byly následující: monolitní kulová fréza o průměru 6 mm, s počtem zubů $Z=2$, otáčky včetně $n=18000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=45000$ mm/min, konstantním bočním krokem $a_e=0.5$ mm a CAM tolerance $Tol=0,06$ mm.

Výpočtový čas z programovacího prostředí CAM byl 18min 17s, ze simulace byl čas vypočten 56min 45s a skutečný čas obrábění dokončování byl 59min 45s. Ukázalo se, že CAM tolerance 0,06mm pro danou aplikaci je zcela dostačující a výsledný povrch je takřka identický s předešlým Mercedes testem (2). Příliš malá CAM tolerance měla za následek celkové zpomalení posuvů. Opět nastavení cyklu 832 pro dokončování kladlo v součtu velké nároky na dodržení trajektorie obrábění. Výsledek byl uspokojivý a vyhodnocen jako finální Mercedes test stroje Dynamic No. 261. Po ukončení testování stroje Mercedes testem, bylo možno přistoupit k náročnějšímu Okuma testu.



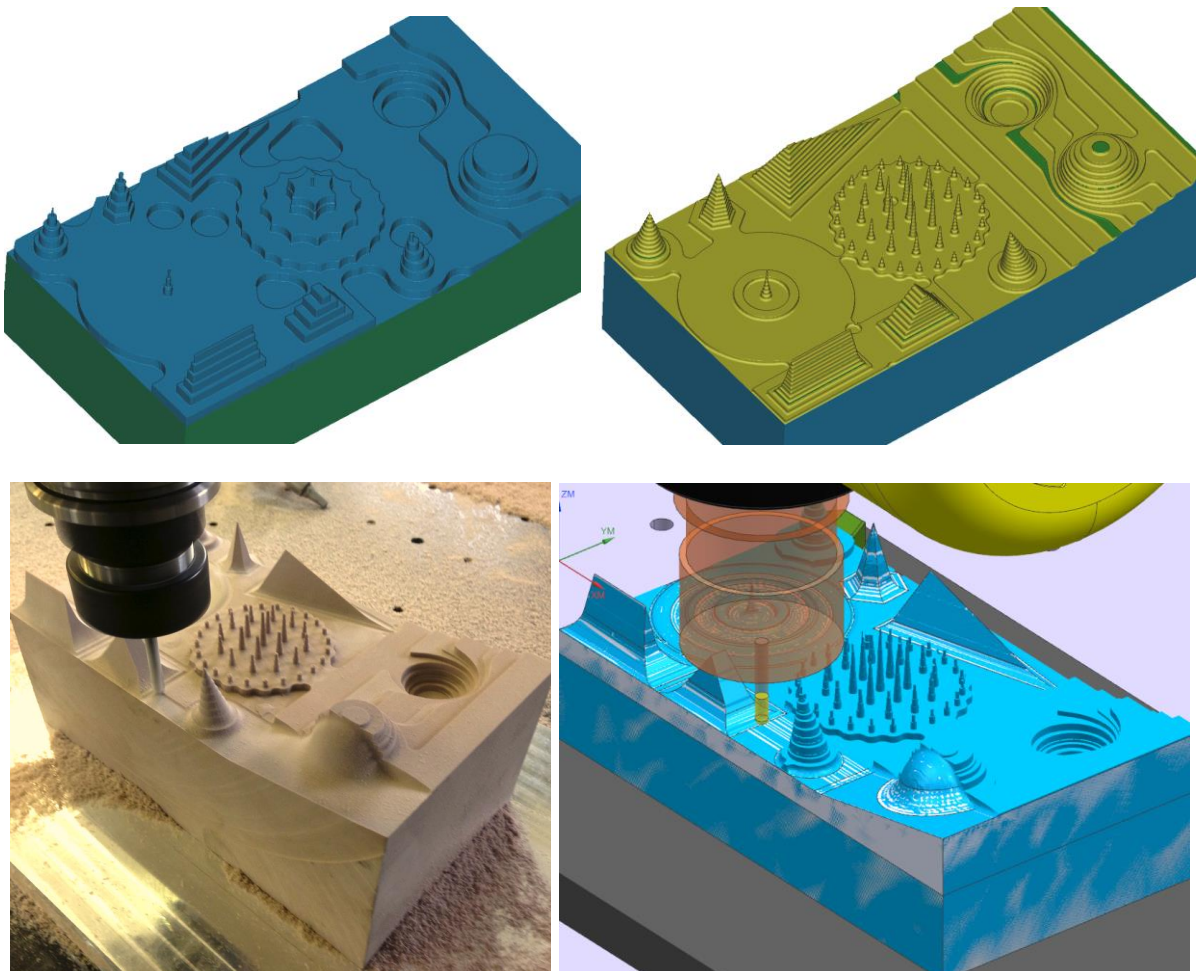
Obr. 4.16 Obrobený Mercedes test (3) po druhé optimalizaci

4.7. Okuma test

U programování Okuma testu bylo nutné zaujmout zcela jiný přístup než u Mercedes testu. Součást je značně tvarově komplikovaná a nelze její finální tvar frézovat na jedu operaci. Proto zde bylo použito hrubování, dohrubování a dokončování je rozděleno podle obráběného úseku.

Hrubování a dohrubování

Hrubování profilu s přídkem 0.4 mm bylo provedeno za pomoci monolitní karbidové čelní válčové frézy $D=16$ mm s počtem zubů $Z=3$, otáčky vřetene $n=18000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=6000$ mm/min, $a_p=5$ mm, $a_e=70\%$ průměru nástroje. Dohrubování profilu bylo obrobena s přídkem 0,4 mm, za pomoci monolitní čelní válčové frézy $D=6$ mm, s rádiusem $R=0$ mm, s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřetene $n=18000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=6000$ mm/min, $a_p=3$ mm a $a_e=50\%$ průměru nástroje.

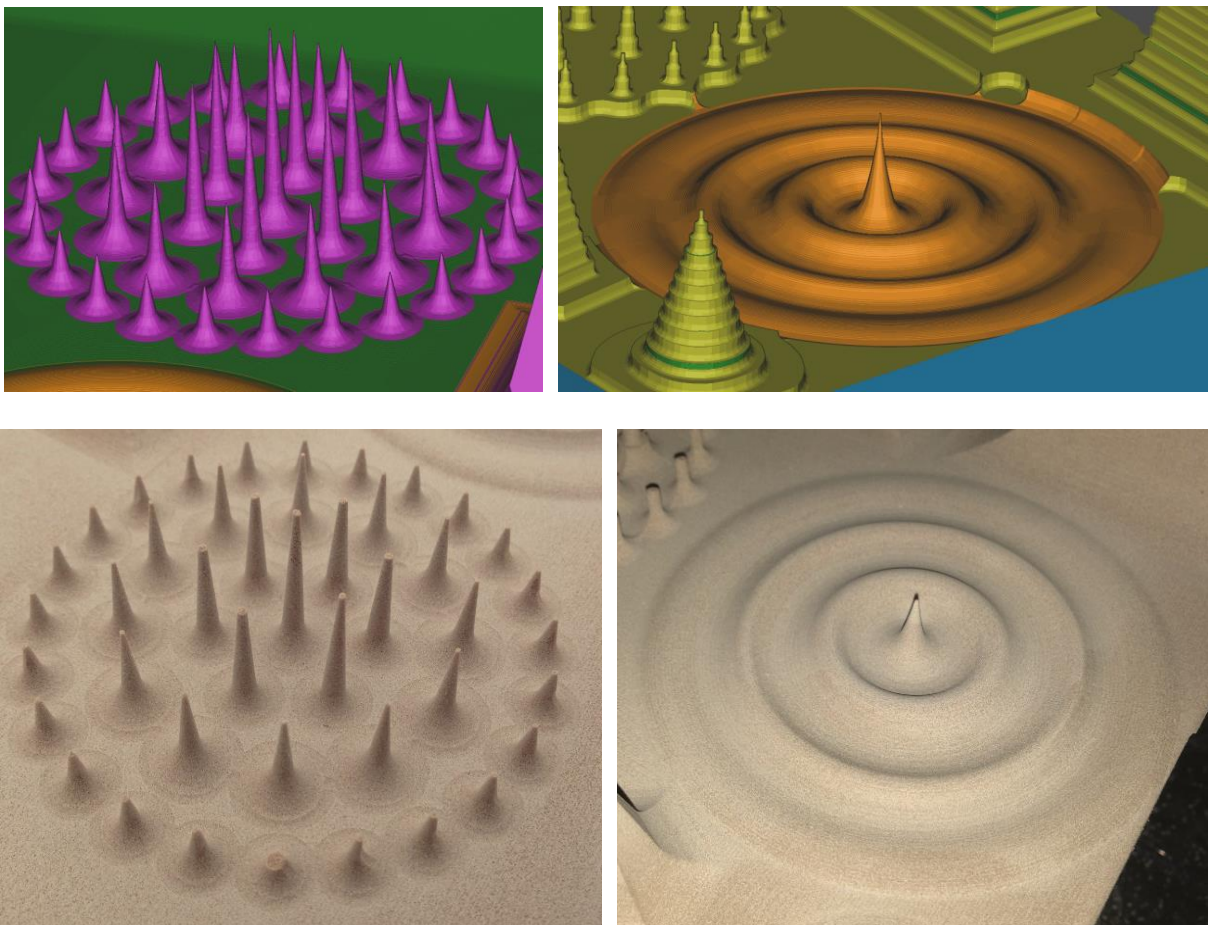


Obr. 4.17 Hrubování, dohrubování a dokončování profilu Okuma testu

Dokončování

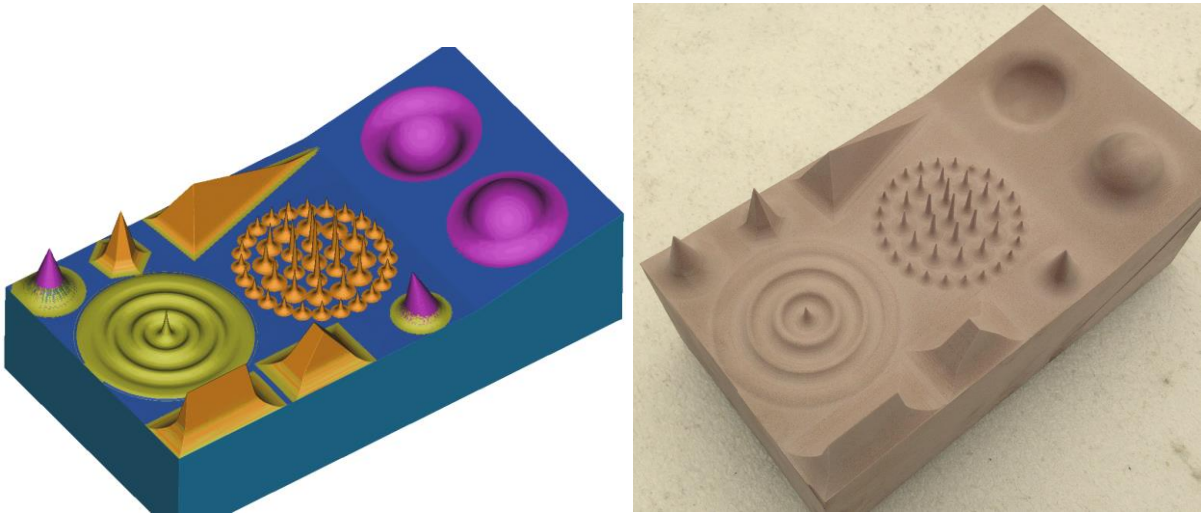
Dokončování bylo rozděleno do následujících oblastí frézování: kapky, hranoly, kužely, dno, dokončení rádiusů, malé soustředné jehlany, dokončení vyduté a vypuklé půlkoule. U všech těchto operací, vyjma dokončení malých soustředných jehlanů, byl použit stejný nástroj, řezné podmínky i CAM tolerance.

Řezné podmínky a nástroj byly následující: monolitní kulová fréza o průměru 6 mm, s počtem zubů $Z=2$, otáčky vřetene $n=18000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=4500$ mm/min, konstantním bočním krokem $a_e=0,6$ mm, s CAM tolerancí 0,05 mm.



Obr. 4.18 Dokončování jehlic profilu Okuma

Řezné podmínky a nástroj pro dokončení malých soustředných jehlanů byly následující: monolitní kulová fréza o průměru 4 mm, s počtem zubů $Z=4$, otáčky vřetene $n=18000$ ot/min, posuvová rychlost $v_f=2500$ mm/min, konstantním bočním krokem $a_e=0,3$ mm, s CAM tolerancí 0,02 mm. Vypočtený čas CAM na sadu dokončovacích operací bylo 19min 36s, skutečný čas obrábění byl 3h 4min 47s. Celkový čas výroby celého dílce Okuma testu byl 3h 43min 41s..



Obr. 4.19 Zobrazení CAM analýzy a vyrobeného Okuma dílce

Obrobený profil dosahoval požadované kvality a čas byl akceptovatelný. Plochy byly hladké bez viditelného poškození. Hrany jehlanů a velkých kuželů byly ostré bez otřepů a viditelného poškození. Vyduté a vypuklé kulové plochy byly hladké a rovněž bez známky podřezání či jiných defektů od procesu obrábění. Kdežto soustředné jehlice byly ulomené a jejich koncový průměr byl cca 0,1-0,5mm. Tyto vrcholky byly poškozeny z důvodu velké křehkosti umělého dřeva, nevyváženého nástroje, nízké tuhosti NC stroje, případně použité technologie. Pro případné další testy by bylo vhodnější použít polotovar z hliníku a vyvážit nástroje. Tento test nebyl v této chvíli prováděn pro porovnávání časů obrábění, ale pro samotné ověření přesnosti stroje. Stroj v Okuma testu obstál a předčil veškeré původní očekávání zadávající společnosti.

5. Technicko-ekonomické hodnocení

Hlavní výhodou celého přístupu této práce je virtuální testování NC stroje, i když není fyzicky vyroben. Průběh vývoje stroje nyní umožňuje efektivní a kontinuální konstrukci v závislosti na technologii. Zkracují se prvotní práce přímo na samotném stroji a tím se mnoho úkonů situuje do fáze příprav projektování stroje. Tímto se významně ovlivňuje časová i ekonomická stránka projektu. Například odhalením nedostatečného výkonu stroje a včasné nápravy v samotném průběhu návrhu či virtuální optimalizace.

Nedílným cílem bylo také ověřit, do jaké míry simulace odpovídají realitě a ověřit navržené řešení v praxi. Již zmíněné širší využití je závislé na implementaci do příslušného výrobního procesu výroby NC strojů. V rámci této práce je vyhodnoceno jen samotné virtuální testování. Jedná se o vyčíslení zjištěné časové a ekonomické úspory.

5.1. Časová úspora Mercedes testu

Na začátku práce stroj nebyl schopen vyrobit Mercedes test v požadovaném čase ani kvalitě. Požadavek byl efektivně optimalizovat stroj i technologii a tím snížit čas na výrobu dílce. Původní čas na výrobu Mercedes dílce v přijatelné kvalitě byl cca 1h 59min. Tento čas je následkem špatné technologie a neoptimálním nastavením pohonů. Virtuální a reálná optimalizace pohonů nastavila optimální nastavení stroje a použité technologie. Opatření ke zlepšení bylo užito stroje s konstrukční změnou (využití systému uložení pohonů Gantry). Po tomto kroku byl výrobní čas 1h 2min. Povrch nebyl ideální, proto byla použita optimalizace pohonů. Po optimalizaci pohonů byl čas 1h 31min. Povrch vykazoval dosud nejlepší kvalitu, ale čas obrábění byl příliš dlouhý. Byla nutná úprava technologie ke snížení času. Díky finální optimalizované technologii byl čas snížen na 59min při zachování kvalitního povrchu bez podřezání či jiných vad vzniklých při procesu obrábění. Po dodržení navrženého postupu s využitím pokročilých technologických simulací byl čas snížen o 50% při dodržení kvalitního povrchu.

5.2. Časová úspora na testování NC stroje

Díky virtuální optimalizaci softwarový inženýr dostává zejména informace o proveditelnosti úkolu. Dopředu můžeme simulovat proces obrábění a virtuálně optimalizovat technologii. Ve chvíli kdy technolog nedosahuje větších časových úspor použitou technologií, může přistoupit k dalšímu virtuálnímu ladění pohonů stroje. Toto provádí nejlépe v úzké konzultaci s softwarovými inženýrem, který daný stroj optimalizoval. Když při změně dostupných parametrů pohonů dojde ke zkrácení času, dochází k zrychlení celého procesu ladění vzájemné vazby technologie versus pohony. Optimalizace pohonů NC stroje bez systému Gantry probíhala cca 24 pracovních hodin.

Při dodržení navrženého postupu byl čas na optimalizaci, i s přípravnými pracemi, 8 pracovních hodin. Ušetřený čas byl zkrácen o cca 65%. Při včasné identifikaci problému, že bude potřeba k požadovaným podmínkám použít systém Gantry, byl by čas práce ladění pohonů zkrácen na cca 5 pracovních hodin. Úspora času by byla již 80% z původních 24 hodin.

Druh úkonu	Původní čas	Optimalizovaný čas	Časová úspora
Mercedes test	1h 59min	0h 59min	50%
Testování NC stroje	24h	8h	65%

Tab. 5.1 Časová úspora testování stroje a Mercedes testu

5.3. Ekonomické hodnocení

Důležitým faktorem v ekonomickém hodnocení navrženého řešení je druh využívaného CAD/CAM systému. Tento postup virtuálního testování NC stroje je navržen pro PLM systém Siemens NX. Jedná se o využití nejvyspělejších funkcí a modulů co tento software v technologických simulacích nabízí. Tudíž pořizovací cena je poměrně vysoká, jedná se zpravidla o více modulů systému a to již může být rozšířeno na komplexní vývojové řešení pro celou společnost. Samotný simulátor je pouze součástí tohoto softwarového řešení. Z tohoto důvodu nelze do hodnocení jednorázově započítat cenu celého softwaru. V případě, že společnost tento software standardně využívá, náklady na virtuální testování jsou výrazně nižší. Z důvodu objektivního hodnocení je uvažováno, že společnost software nevlastní a bude si jej pouze půjčovat na dobu nutnou k testování stroje. Samotný simulátor a jeho obsluhu budou nakupovat jako službu od dodavatele PLM NX.

Doba pro zapůjčení softwaru je odhadnuta na pět pracovních dnů i s případnými prodlevami. Cena měsíčního zapůjčení je přibližně 12 000 Kč včetně implementace do společnosti. Cena na jeden den je 400 Kč, při uvažovanému využití cena zapůjčení v ideálním případě je 2 000 Kč za pět pracovních dnů ($N_{sw} = 2\,000$ Kč). Náklady na službu pořízení simulátoru jsou jednorázové pro konkrétní typ stroje ($N_{sm} = 20\,000$ Kč). Musíme brát v úvahu, že při testování stejného typu stroje odpadají náklady spojené se službou tvorby a implementace simulátoru. Nicméně uvažujeme testování zcela nového stroje a proto cenu započítáváme.

Hodinová sazba softwarového inženýra (H_{si}) činí 1 000 Kč/hod, hodinová sazba technologa (H_{st}) činí 1 000 Kč/hod a hodinová sazba práce na stroji (H_{ss}) činí 1 500 Kč/hod. Do výpočtů nejsou zahrnuty ceny polotovarů a náklady s nimi spojené. Tyto orientační hodinové sazby poskytla společnost Sahos a.s..

5.3.1. Náklady spojené s optimalizací stroje

Jsou vypočítány náklady na optimalizaci stroje bez použití navrženého postupu. Bylo uvažováno, že práce na optimalizaci trvala ($T_{p\u00fuv}$) 24 hodin. Vznikají zde náklady na softwarového inženýra a hodinovou sazbu stroje. Softwarový inženýr tuto práci vykonává zcela sám. Počet hodin je vynásoben součtem nákladů a výsledná cena na optimalizaci je rovna 60 000 Kč.

Náklady na optimalizaci bez použití navrženého postupu ($N_{p\u00fuv}$)

$$N_{p\u00fuv} = (T_{p\u00fuv} * H_{si}) + (T_{p\u00fuv} * H_{ss}) = (24 * 1\ 000) + (24 * 1\ 500) = 60\ 000\ \text{K\u010d}$$

Nejprve jsou vypočteny náklady na výrobu testovacího dílce profilů Mercedes. Uvažujeme dobu výroby $T_{td} = 0,5$ h. Tuto hodnotu vynásobíme hodinovou sazbou stroje a hodinovou sazbou technologa. Dále připočteme hodinu práce technologa na programování dílce a přípravu výroby.

Náklady na výrobu testovacího dílce profilů Mercedes

$$N_{tsd} = N_{tsd} * H_{st} + (T_{td} * H_{ss}) = (0,5 * 1000) + (0,5 * 1\ 500) = 1\ 250\ \text{K\u010d}$$

Pro výpočet nákladů na optimalizaci s použitím navrženého postupu bylo k předešlému postupu nutno připočíst práci technologa. Technolog navrhuje testovací technologii včetně výroby testovacích hřebenů k určení optimálních rezných podmínek. Z této studie vyplynulo, že práce na optimalizaci (T_{opt}) zabere 8 pracovních hodin. Přičemž plných 8 hodin práce je uvažováno pro stroj a strojního inženýra. Pro práci technologa je počítáno 5 odpracovaných hodin na přípravu a provedení testů. Dále je nutno přičíst náklady spojené s výrobou samotného testovacího dílce profilů Mercedes. Výrobu testovacího dílce provádí technolog a doba výroby programu (T_{tsd}) činí 30min. Z níže uvedeného výpočtu je patrné, že náklady na optimalizaci jsou 48 250 Kč při použití navrženého postupu.

Náklady na optimalizaci s použitím navrženého postupu (N_{opt})

$$N_{opt} = T_{opt} * (H_{si} + H_{ss}) + (5 * H_{st}) + N_{tsd} + N_{sm} + N_{sw}$$

$$N_{opt} = 8 * (1\ 000 + 1\ 500) + (5 * 1000) + 1\ 250 + 20\ 000 + 2\ 000 = 48\ 250\ \text{K\u010d}$$

Úspora virtuální optimalizace a testování byla vypočtena rozdílem předešlých dvou výpočtů a rozdíl činí 11 750 Kč na jednom stroji Dynamic.

Úspora s využitím virtuálního testování stroje

$$\text{Úspora} = N_{p\u00fuv} - N_{opt} = 60\ 000 - 48\ 250 = 11\ 750\ \text{K\u010d}$$

Díky použití navrženého postupu s využitím virtuálního stroje byly náklady na optimalizaci stroje sníženy z 60 000 Kč na 48 250 Kč. Teoretická úspora tedy činí přibližně 20%.

Náklady na výrobu jednoho Mercedes testu lze vyčíslit jako počet výrobních hodin vynásoben hodinovou sazbou stroje a softwarového inženýra či technologa. Ve výpočtu je uvažováno účast pouze jednoho pracovníka. V níže uvedeném výpočtu jsou vypočtené náklady na původní neoptimalizovanou technologii i strojem ($N_{p\u00f9v}$) a optimalizovanou technologii (N_{opt}). Přičemž původní výroba Mercedes testu činila cca 2 hodiny a optimalizovaná 1 hodinu finální plochy. Do tohoto výpočtu je nutné zahrnout také čas hrubovacích operací, je uvažována v obou případech 15 min. Do celkové ceny výrobku by se měla připočíst ještě cena za polotovar a jeho přípravu. Tyto hodnoty nebyly známy, a proto nebyly do výpočtu zahrnuty.

5.3.2. Výroba Mercedes testu

Čas na výrobu neoptimalizovaného Mercedes testu ($T_{merp\u00f9v}$) byl 2,25 hod a na výrobu optimalizovaného (N_{meropt}) 1,25 hod.

Náklady na výrobu testovacího dílce profilů Mercedes

$$N_{p\u00f9v} = T_{merp\u00f9v} * H_{ss} + T_{merp\u00f9v} * H_{si} = 2,25 * 1\,500 + 2,25 * 1\,000 = 5\,625 \text{ Kč}$$

$$N_{opt} = T_{meropt} * H_{ss} + T_{meropt} * H_{si} = 1,25 * 1\,500 + 1,25 * 1\,000 = 3\,125 \text{ Kč}$$

Úspora na jednom kusu Mercedes

$$\text{Úspora Mercedes testu} = N_{p\u00f9v} - N_{opt} = 5\,625 - 3\,125 = 2\,500 \text{ Kč}$$

Díky použití navrženého postupu s využitím virtuální ho stroje byly náklady na výrobu testovacího dílce Mercedes sníženy z 5 625 Kč na 3 125 Kč. Teoretická úspora tedy činí přibližně 45% na jeden kus výrobku.

6. Závěr

Díky tomuto netradičnímu přístupu k využití CSE simulací, výrobní společnost může testovat technologické vlastnosti již v průběhu samotného návrhu stroje. Vstupním požadavkem jsou technologické požadavky na NC stroj. Vhodným postupem lze virtuálně zjistit, jak dlouho bude navrhovaný stroj vyrábět testovací dílce. Dílce mohou být například standardy Mercedes, Okuma či specifický dle zákazníka. V relativně krátkém čase lze zhodnotit navrženou konstrukční variantu a včas přistoupit k případným opatřením.

Například v této práci byl odhalen technologický limit stroje a byl řešen konstrukční úpravou systému uložení dvou pohonů Gantry. V případě, že takovýto fakt při návrhu je včas odhalen, je výsledná časová i finanční úspora významná. Nedochozí k výrobě NC stroje bez představ jeho technologických vlastností, nedochází k časové náročné optimalizaci a technologickému testování. Ve chvíli kdy jsou zjištěny problémy a nutnost změnit konstrukci, časová i finanční stránka nápravy je složitá. Tyto aspekty vedou k optimálnímu využití stroje i k včasnému a efektivnímu návrhu.

Cílem této práce bylo přiblížit problematiku řízení NC strojů, využití pokročilých technologických simulací k virtuální optimalizaci s aplikací na danou problematiku. Ve společnosti Sahos a.s. byla řešena problematika zefektivnění procesu optimalizace CNC pětiosého frézovacího centra Dynamic No. 261. Dále bylo navrženo optimální výstupní technologické testování tohoto stroje. K vyřešení úkolu byl navržen postup využití simulací v prostředí PLM systému NX 8.5.

Byl vytvořen takzvaný CSE simulátor, který využívá významných vlastností skutečného stroje. Je řízen reálným NC kódem s využitím základních charakteristik pohonů. Tato virtuální maketa stroje se skládá ze čtyř hlavních částí, které bylo nutno v rámci této práce samostatně naprogramovat. Jedná se o kinematiku stroje, řídicí driver, postprocessor a tvorbu knihoven pro implementaci simulátoru do prostředí NX CAM. Vytvoření kinematiky stroje, bylo programováno v prostředí Machine Tool Builder, programování řídicího driveru bylo provedeno v aplikaci Machine Configurator, k programování postprocesoru byla využita aplikace Post Builder a pro ruční editaci Notepad ++.

Tato maketa (CSE simulátor) byla použita na virtuální optimalizaci a testování NC stroje. Pro samotnou aplikaci byl navržen algoritmus celkového testování prostřednictvím testovacích dílců hřebenových profilů, Mercedes testu a Okuma testu. Bylo zjištěno, že optimální nastavení pohonů stroje má velký význam na výsledný obrobek i čas obrábění. Základní nastavení pohonů probíhá při virtuální CSE optimalizaci. V algoritmu je navržen postup pro zjištění optimální posuvové rychlosti v závislosti na CAM toleranci, takzvaná technologická optimalizace. Díky těmto informacím jsou známy vstupní technologické parametry pro efektivní návrh technologie Mercedes i Okuma testu.

Mercedes i Okuma testy jsou v technické praxi uznávané standardy a jejich kvalitní obrobení v požadovaném čase je pro koncového zákazníka objektivním výstupem.

Ve společnosti Sahos byla provedena sada testů zkoumaného stroje. V průběhu testování byla zjištěna nutnost využití konstrukční úpravy s využitím systému pojezdu Gantry. Díky využití navrženého postupu byl čas na optimalizaci zkrácen z původních 24 hodin na 8 hodin. Náklady spojené s optimalizací a testováním byly sníženy z původních odhadovaných 60 000 Kč na 48 250 Kč. Úspora na testování stroje byla snížena o 20%. Časová náročnost výroby jednoho Mercedes dílce byla po sadě optimalizací snížena z 2 hodina na 1 hodinu. Náklady na výrobu byly sníženy z 5 625 Kč na 3 125 Kč a úspora činí 45% na dílci. Samotná výroba sady testovacích vzorků potvrdila správnost virtuálních výpočtů a navrženou metodiku zpracování.

Literatura

Primární zdroje

- [1] MILLING WITH SINUMERIK: *5-axis machining*. Deutschland: Siemens AG, 2009.
- [2] HEIDENHAIN iTNC 530: *Příručka obsluhy, programování v DIN/ISO*. Deutschland: 2005.
- [3] KOŽMÍN, Pavel. *Disertační práce – Metoda tvorby víceosého postprocesoru*. ZČU, Plzeň: 2004.
- [4] ŠTULPA, Miloslav. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. Praha: BEN-Technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-207-8.
- [5] SIEMENS PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT SOFTWARE, *NX 8.5 Help Library*, USA: 2012.
- [6] POST BUILDING TECHNIQUES: *Student Guide -Post Builder 3.5*. United States of America: UGS Corporation, 2006.
- [7] PRAMET: *Monolitní frézy*: Pramet CZ, 2012.
- [8] PRAMET: *Upínače rotačních nástrojů*: Pramet CZ, 2012.
- [9] MILLING WITH SINUMERIK: *Mold making with 3 to 5-axis simultaneous milling*. Deutschland: Siemens AG, 2011.
- [10] SINUMERIK 840D: *Advanced Programming Guide*. Deutschland: Siemens AG, 2004.
- [11] SINUMERIK 840D/840D: *Výroba nástrojů a forem*: Siemens AG, 2004. OB.Č. 6FC5095-0AB10-0AP0.
- [12] MING, C. LEU a JOSHI AKUL. DEPARTMENT OF MECHANICAL AND AEROSPACE ENGINEERING. *NX5 FOR ENGINEERING DESIGN*. U.S. state of Missouri: Missouri University of Science and Technology, 2008.

Internetové zdroje

- [13] Simulace CNC obrábění. *MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-cnc-obrabeni.html>
- [14] Programování NC strojů. In: [online]. [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://dilna.aeromni.com/download/manual_programovani_CNC.pdf
- [15] *Interní dokumentace společnosti SIEMENS PLM software* [online]. Dostupné z: <http://www.siemens.com/entry/cc/en/>

[16] Novák, Pavel. *Úloha rychlostní smyčky při optimalizaci obráběcího stroje s CNC řízením*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008. Dostupné z:
http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/5337/nov%C3%A1k_2008_dp.pdf
Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

[17] *SINUMERIK 84D/810D SIMODRIVE 611 digital: Start-Up Guide* [online]. Dostupné z:
https://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINUMERIK_SIMODRIVE_04_2010_E/IADC.pdf

[18] Technická specifikace Dynamic No. 261 [online]. [cit. 2013-03-05]. Dostupné z:
http://www.sahos.cz/prezentace/dynamic_cs.pdf

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Jednoduché schéma CNC řízení obráběcího stroj.....	2
Obr. 2.2 Jednoduché schéma NC řízení obráběcího stroje.....	2
Obr. 2.3 Pravoúhlý souřadnicový systém [2]	4
Obr. 2.4 Princip ručního programování NC strojů	5
Obr. 2.5 Princip automatického programování	6
Obr. 2.6 Zařazení CAM programu v procesu přípravy výroby	7
Obr. 2.7 Přesnost lineárních úseků nahrazujících hladký povrch [3]	8
Obr. 2.8 Schéma struktury řízení NC stroje [14].....	9
Obr. 2.9 Princip zařazení regulátorů se zpětnovazebním řízením [16]	10
Obr. 2.10 Obecné schéma celé struktury virtuální makety NC stroje [15]	11
Obr. 2.11 Propojení simulací virtuální makety NC stroje [15]	12
Obr. 2.12 Architektura CSE simulace a všech působících členů [15].....	14
Obr. 2.13 Jednoduchá ukázka struktury kinematiky virtuální makety	16
Obr. 2.14 Postupný tok informací v driveru [15]	18
Obr. 2.15 Náhled HMI rozhraní a spuštěného NC programu [5]	20
Obr. 2.16 Náhled na prostředí tvorby postprocesoru v aplikaci Post Builder [5]	21
Obr. 2.17 Testovací dílec Mercedes	22
Obr. 2.18 Testovací dílec Okuma.....	23
Obr. 2.19 Testovací dílec vycházející z části profilu Mercedes	24
Obr. 2.20 Charakteristika optimalizovaného proudového regulátoru [17].....	26
Obr. 2.21 Charakteristika optimalizace rychlostního regulátoru [17]	26
Obr. 2.22 Charakteristika zoptimalizovaného polohového regulátoru [17]	27
Obr. 2.23 Rychlostní průběh motoru osy s dosažením na maximální hodnotu [15]	28
Obr. 2.24 Rychlostní průběh motoru osy s dobře a špatně nastaveným KV faktorem [14].....	28
Obr. 2.25 Rychlostní průběh osy s omezující hodnotou Jerk [15]	29

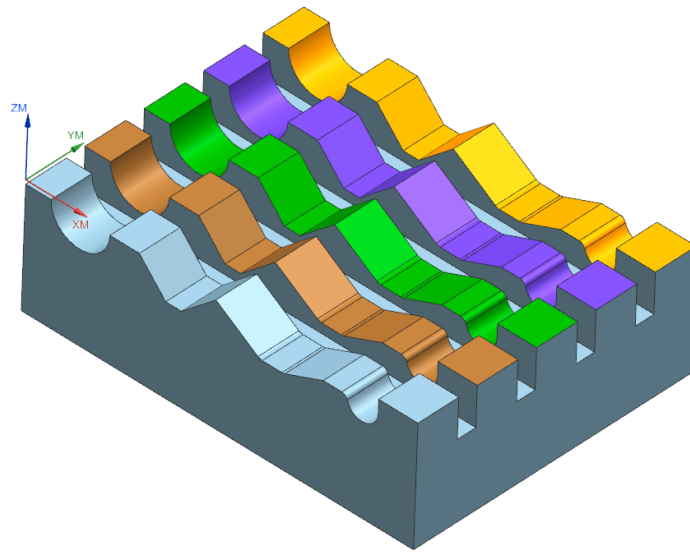
Obr. 3.1 Rozměrové schéma stroje Dynamic v rovině XY [18]	30
Obr. 3.2 Rozměrové schéma stroje Dynamic v rovině XZ [18].....	31
Obr. 3.3 Rozměrové limity nástrojové hlavy HS 662 [18].....	32
Obr. 4.1 Náhled virtuálního NC stroje Dynamic.....	33
Obr. 4.2 Náhled kinematiky NC stroje z prostředí Post Builder	35
Obr. 4.3 Náhled odladovacího okna postprocesoru	36
Obr. 4.4 Vývojový diagram pro virtuální optimalizaci a testování NC stroje Dynamic.....	39
Obr. 4.5 Náhled profilu vln testovacího dílce Mercedes.....	40
Obr. 4.6 Obrobený profil při optimalizaci NC stroje	42
Obr. 4.7 Graf závislosti času obrábění na kvalitě povrchu.....	43
Obr. 4.8 Graf závislosti času na posuvu a graf závislosti posuvu a hodnoty fine	44
Obr. 4.9 Náhled obrobených profilů.....	44
Obr. 4.10 Vygenerované dráhy profilu Mercedes s příslušnou analýzou povrchu	46
Obr. 4.11 Detail řádkování 1mm na povrchu Mercedes.....	46
Obr. 4.12 Pohon portálu systémem gantry	47
Obr. 4.13 Testovací profily vyrobené strojem v provedení gantry.....	48
Obr. 4.14 Ukázka povrchů původního mercedes testu bez další optimalizace	49
Obr. 4.15 Vyhlazené obrobené povrchy optimalizovaného Mercedes testu	50
Obr. 4.16 Obrobený Mercedes test (3) po druhé optimalizaci	51
Obr. 4.17 Hrubování, dohrubování a dokončování profilu Okuma testu	52
Obr. 4.18 Dokončování jehlic profilu Okuma.....	53
Obr. 4.19 Zobrazení CAM analýzy a vyrobeného Okuma dílce	54

Seznam tabulek

Tab. 4.1 Dynamické parametry pohonů os virtuálního NC stroje.....	37
Tab. 4.2 Původní a změněné parametry pohonů stroje.....	41
Tab. 4.3 Tabulka naměřených hodnot CAM optimalizace PM1	43
Tab. 4.4 Posuvové rychlosti frézování profilu v závislosti na čase obrábění.....	48
Tab. 4.5 Původní a změněné parametry pohonů stroje v provedení gantry	49
Tab. 5.1 Časová úspora Mercedes testu	56

PŘÍLOHA č. 1

**Testovací dílec profilů Mercedes pro provedení bez systému
Gantry a příslušný operační list**



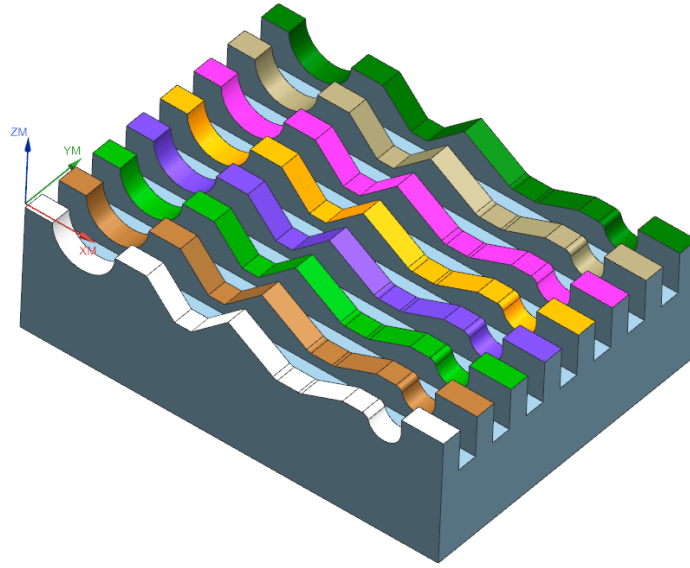
OPERATION LIST BY PROGRAM

PROGRAM NAME : PROGRAM

OPERATION NAME	OPERATION DESCRIPTION	TOOL NAME
1_SROVNANI_STEN	mill_planar/FINISH_WALLS	FR12
1_HRUBOVANI_PROFILU_0.3	mill_contour/CAVITY_MILL	FR12
1_DRAZKOVANI	mill_planar/FLOOR_WALL	FR10
2_HRUBOVANI_PROFILU_0.3	mill_contour/FIXED_CONTOUR	FR8
1_DOKONCOVANI_1	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_2	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_3	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_4	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_5	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8

PŘÍLOHA č. II

**Testovací dílec profilů Mercedes pro provedení se systémem
Gantry a příslušný operační list**



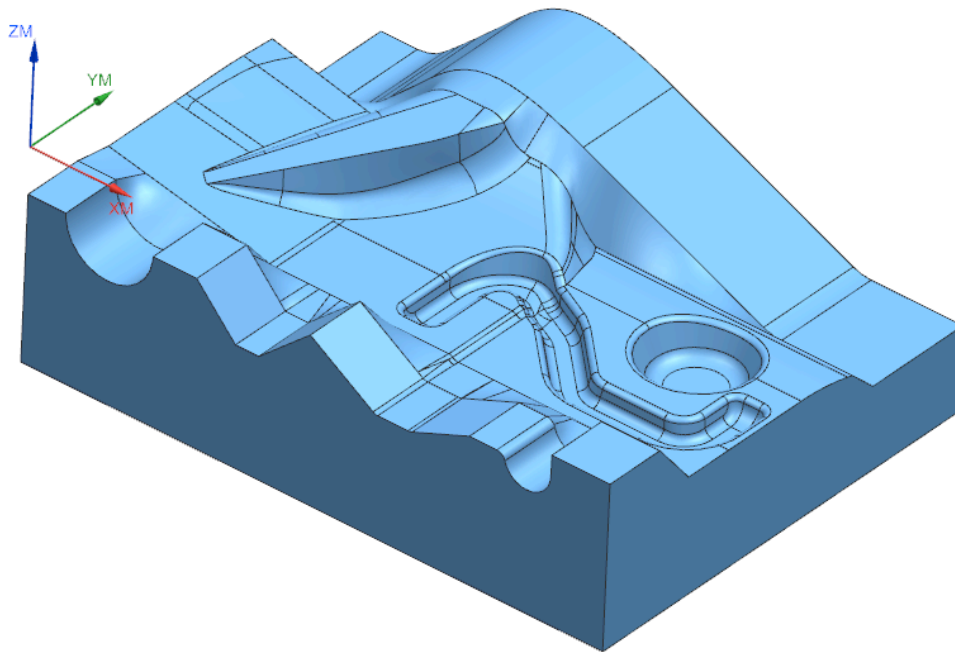
OPERATION LIST BY PROGRAM

PROGRAM NAME : PROGRAM

OPERATION NAME	OPERATION DESCRIPTION	TOOL NAME
1_SROVNANI_STEN	mill_planar/FINISH_WALLS	FR10
1_HRUBOVANI_PROFILU_0.3	mill_contour/CAVITY_MILL	FR10
1_DRAZKOVANI	mill_planar/FLOOR_WALL	FR10
2_HRUBOVANI_PROFILU_0.3	mill_contour/FIXED_CONTOUR	FR8
1_DOKONCOVANI_1	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_2	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_3	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_4	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_5	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_6	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_7	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8
1_DOKONCOVANI_8	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR8

PŘÍLOHA č. III

Testovací dílec Mercedes a příslušný operační list



OPERATION LIST BY PROGRAM

PROGRAM NAME : PROGRAM

OPERATION NAME	OPERATION DESCRIPTION	TOOL NAME
1_HRUB_PRID_0.5	mill_contour/CAVITY_MILL	FR16
1_HRUB_PRID_0.2	mill_contour/REST_MILLING	FR8
1_FIN_PLOCHA	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR6

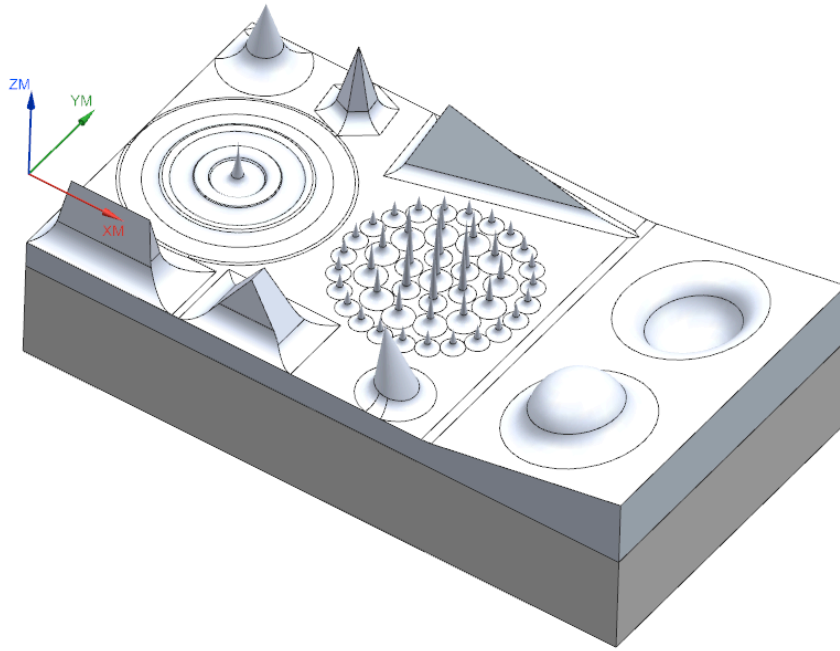
Základní profil pro tvorbu toho dílce poskytlo

Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ

PŘÍLOHA č. IV

Testovací dílec Okuma a příslušný operační list



OPERATION LIST BY PROGRAM

PROGRAM NAME : PROGRAM

OPERATION NAME	OPERATION DESCRIPTION	TOOL NAME
1_HRUB_PRID_0.3	mill_contour/CAVITY_MILL	FR15_R0
2_HRUB_PRID_0.2	mill_contour/REST_MILLING	FR6_R0
2_HRUB_PRID_0.2_HROTY	mill_contour/REST_MILLING	FR6_R0
1_FIN_KAPKA	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR6
1_FIN_HRANOLY	mill_contour/ZLEVEL_CORNER	FR6
1_FIN_DNO	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR6
1_FIN_DNO_HROTY	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR6
2_FIN_RADIUSY	mill_contour/CONTOUR_AREA	FR6
2_FIN_KUZELE1	mill_contour/ZLEVEL_CORNER	FR6
2_FIN_KUZELE2	mill_contour/ZLEVEL_CORNER	FR6
1_FIN_KUZELY_MALE	mill_contour/ZLEVEL_PROFILE	FR4