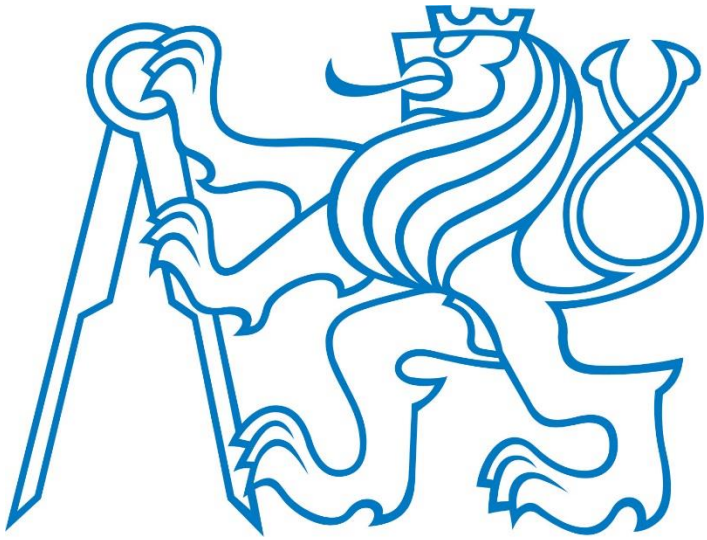
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

REALISTICKÁ SIMULACE OBRÁBĚNÍ V SW POWERMILL

Diplomová práce



Autor: Bc. Vít Hájek

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

Praha 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne ....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval každému, kdo mi při psaní bakalářské práce poskytl svou radu a pomoc. Především pak svému vedoucímu Ing. Janu Tomíčkovi, Ph.D. za odborné rady a poskytnuté konzultace.

Abstrakt

Práce se skládá ze dvou částí. V první části je vypracována rešerše na téma simulací včetně modelu stroje v různých CAD/CAM softwarech. Teoretická část zároveň obsahuje informace o možnostech, potřebných vstupech a způsobu vytvoření modelu v programu Autodesk PowerMill.

V části druhé se práce zabývá tvorbou a adaptací modelu stroje FCM 22 CNC pro použití v softwaru PowerMill, následným testováním v tomto programu a vytvořením úloh pro stroj. Posledním bodem v této práci je diskuze možností rozšíření o sestavu pro frézování v pěti osách a MachineDNA.

Klíčová slova: Simulace, CAM, PowerMill, model

Abstract

This thesis consists of two parts. First part includes information about simulations with machine tool models in various CAD/CAM software. This part also includes information about options and inputs needed for creating machine tool model in Autodesk PowerMill.

Second part consists of creation and adaptation of machine tool model FCM 22 CNC machine for use in PowerMill, testing in this software and creating tasks for the machine. Last part of this thesis is a discussion of extensions for use in 5 axis milling and MachineDNA.

Keywords: Simulation, CAM, PowerMill, model

Obsah

1 Úvod 9
2 CAD/CAM softwary 10
2.1 Simulace v různých CAD/CAM softwarech 10
2.1.1 PowerMill 10
2.1.2 FeatureCAM 12
2.1.3 Fusion 360° 14
2.1.4 Autodesk HSM 15
2.1.5 Siemens NX 17
2.1.6 TopSolid´Cam 18
3 Možnosti a vstupy pro vytvoření modelu stroje 21
3.1 CAD model stroje 21
3.2 Parametry stroje 22
3.3 Souřadnice pro výměnu nástroje 23
3.4 Textový editor a editor zdrojového kódu 23
3.5 Organizace a příprava dat 24
4 Varianta modelu stroje se třemi osami 26
4.1 Úprava modelu FCM 22 CNC 26
4.2 Příprava modelu v softwaru PowerShape 29
4.3 Důležité parametry stroje FCM 22 CNC pro definici kinematiky 30
4.4 Struktura souboru .mtd 31
4.4.1 Popis stroje 32
4.4.2 Popis postprocesoru 33
4.4.3 Definice připojovacích bodů 34
4.4.4 Popis statických součástí stroje 35
4.4.5 Popis pohyblivých částí 36
4.5 Testování v prostředí PowerMill 39
5 Varianta modelu stroje s pěti osami 43
5.1 Úprava modelu FCM 22 CNC 43
5.2 Příprava modelu v softwaru PowerShape 44
5.3 Popis přídavné kolébky 44

5.4 Úpravy souboru .mtd pro frézování v pěti osách 45
5.4.1 Popis stroje 45
5.4.2 Definice připojovacích bodů 47
5.4.3 Popis statických součástí stroje 47
5.4.4 Popis pohyblivých částí v souboru .mtd 47
5.5 Testování v prostředí PowerMill 50
5.6 Vytvoření databáze nástrojů 52
5.6.1 Držák nástrojů 53
5.6.2 Válcové frézy 54
5.6.3 Kulové frézy 55
5.7 Simulace obrábění 56
6 Porovnání pozic reálného stroje a kinematického modelu 64
7 Machine DNA 69
8 Závěr 70
9 Seznam použitých zdrojů 72
10 Seznam obrázků 74
11 Seznam elektronických příloh 76

Seznam použitých pojmů a zkratek

CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba)
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování)
.mtd	typ souboru pro definici kinematiky stroje pro použití v PowerMillu
.dmt	typ souboru, který je načítán souborem .mtd. Soubor modelu součásti
.stp	přenosový formát modelu - step
.TopPkg	výchozí formát modelu vytvořeného v programu TopSolid
CL data	data vytvořená partprogramem CAM softwaru
.x_t	přenosový formát modelu - parasolid

1 Úvod

V této práci se zabývám tvorbou kinematického modelu stroje FCM 22 CNC pro účely simulace v softwaru PowerMill. Hlavním důvodem a přínosem této práce je možnost sledovat pohyby os stroje FCM 22 CNC při obrábění jednotlivých dílců již v předvýrobní etapě. Lze tedy ověřit, zda nedochází ke kolizím nástroje a obráběného dílce či případně kolize stroje s obrobkem nebo příslušenstvím stroje jako jsou například svěráky, upínky a další součásti.

V první části své diplomové práce nastíním pohled do možností simulací jednotlivých CAD/CAM softwarů. A to jak na simulaci obrábění bez použití modelu stroje, tak i s jeho využitím. Zaměřím se především na ty softwary, které jsou v současné době nejpoužívanější, protože na trhu jich v současné době působí velké množství.

Dále zjistím informace, jaké jsou možnosti, potřebné vstupy a jakým způsobem je možné vytvořit model pro použití v softwaru PowerMill.

Druhá část této práce již bude obsahovat postup, kterým jsem vytvořil a adaptoval samotný model stroje FCM 22 CNC. Následně model otestuji v prostředí PowerMill a vytvořím úlohy pro stroj, abych ověřil funkčnost tohoto modelu. Práce taktéž obsahuje vytvoření a využití databáze nástrojů pro usnadnění jejich použití na tomto stroji. Dále vytvořím variantu s přídavnou kolébkou a rotačním stolem pro frézování v pěti osách. Na konci práce se také zmíním o možnosti využití pluginu MachineDNA.

2 CAD/CAM softwary

V dnešní době panuje mezi výrobci CAD/CAM softwarů silná konkurence a výrobci se tedy snaží cílit své CAM softwary na určité skupiny zákazníků. Na trhu se tedy pohybují jak samostatné CAM softwary, tak i složité CAD/CAM systémy s možností použití přídavných modulů, jako jsou například speciální dráhy pro obrábění v modulu VoluMill nebo moduly pro tvorbu forem, plechů či potrubí.

Další podstatný rozdíl mezi těmito softwary je cena, která je dána především složitostí softwaru. Rozdíl ceny samostatného CAM softwaru a CAD/CAM systému může být i více než desetinásobný. Cena je také z velké míry ovlivněna tím, pro jaký stroj software pořizujeme. Velký cenový rozdíl je například mezi CAM softwarem pro frézování ve třech osách a softwarem pro frézování v pěti osách kontinuálně.

2.1 Simulace v různých CAD/CAM softwarech

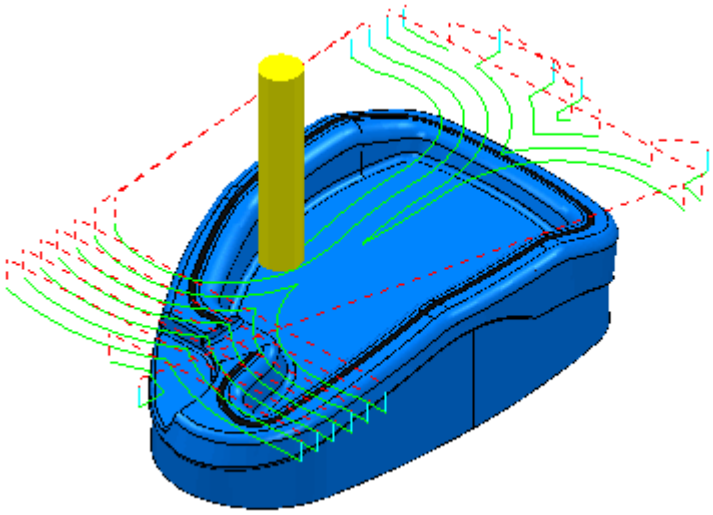
V dnešní době, kdy je strojírenství velmi úzce spojeno s počítačovou technologií, si již téměř nelze představit, že by obráběcí CAM software nedisponoval alespoň základní simulací procesu obrábění. Simulace nám umožňuje zobrazit pohyby nástrojů, stroje a výsledného výrobku ještě předtím, než proběhne samotné obrábění. Jedná se tedy o velmi vhodný nástroj pro analýzu obráběcího procesu a je možné tento proces postupně odlaďovat, dokud nejsme s výsledkem spokojeni. Z ekonomického hlediska nám můžou simulace ušetřit velké množství finančních prostředků. Díky nim jsme totiž schopni odhalit kolize, při kterých by mohlo dojít k poškození strojních součástí, nástrojů, obrobků i zbytečným výdajům při nedostatečném využití materiálu.

2.1.1 PowerMill

PowerMill je první z CAM softwarů od firmy Autodesk. Jedná se o samostatný CAM software, ke kterému je však přiřazen modelovací CAD PowerShape.

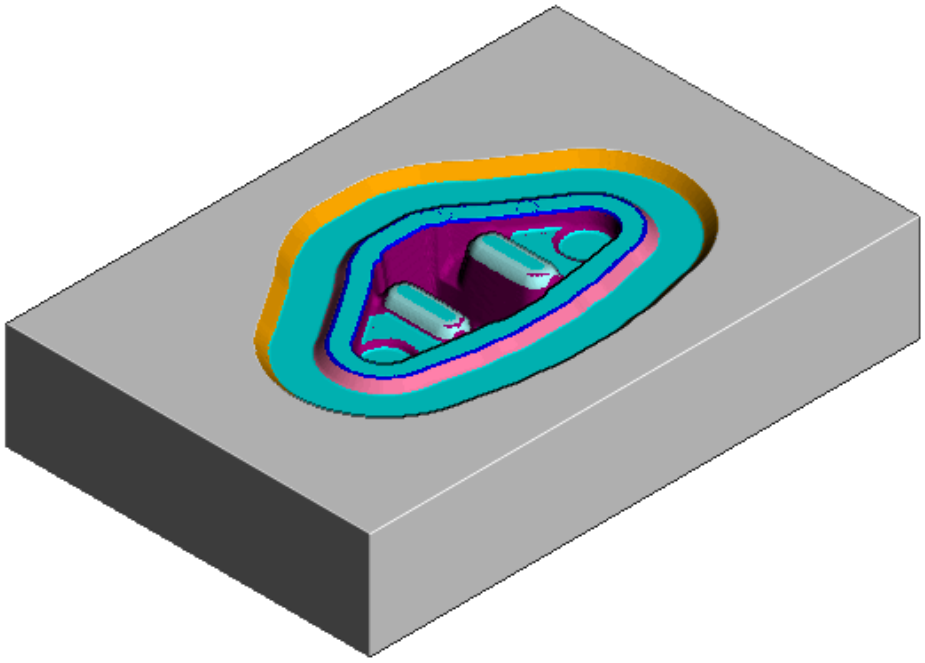
PowerMill obsahuje tři základní simulační módy.

První a nejjednodušší simulací je simulace drah nástroje na vyobrazeném modelu. Barevné rozdělení drah slouží k lepší identifikaci mezi rychloposuvem, posuvem a zdvihem nástroje.



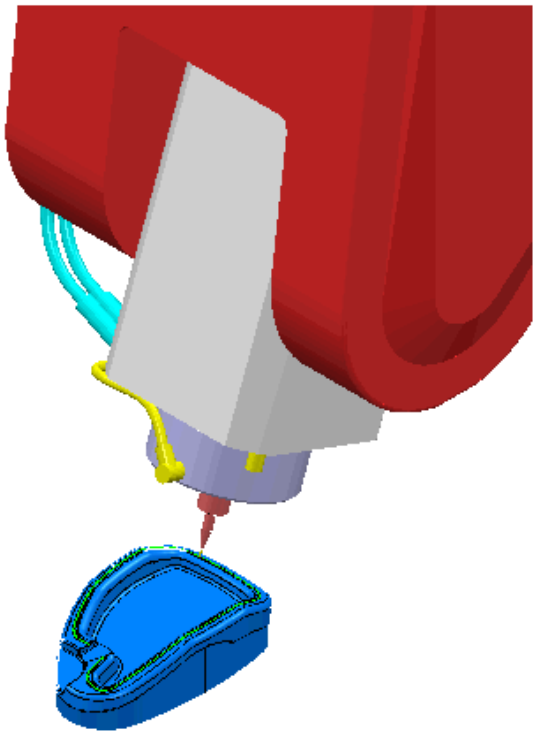
Obrázek 1 - rozlišení drah v PowerMillu [1]

Dalším režimem simulace je tzv. ViewMill, ve kterém už je možné pozorovat výsledek pohybu nástroje na daném polotovaru. Při použití ViewMillu lze přepínat mezi několika režimy zobrazení. Například rotační režim s možností rotace modelu v nízkém rozlišení, statický pro zobrazení ve vysokém rozlišení, stínovaný či duhový, ve kterém jsou jednotlivé dráhy nástroje barevně odlišeny. ViewMill je též možné využít při simulaci kinematiky stroje.



Obrázek 2 - barevné rozlišení obrobených ploch dle nástroje [2]

Třetím simulačním režimem je znázornění obrábění součásti s využitím kinematického modelu stroje. V tomto režimu je možné zobrazit proces obrábění součásti při použití jednodušších tříosých strojů až po víceosá obráběcí centra a obráběcí roboty.

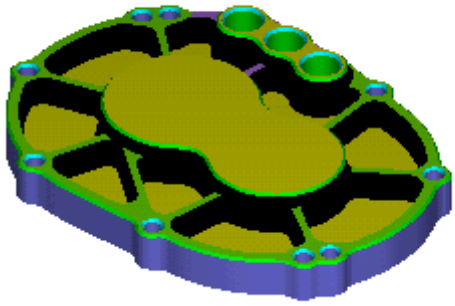


Obrázek 3 - simulace včetně modelu stroje v PowerMillu [3]

2.1.2 FeatureCAM

FeatureCAM vyvíjený firmou Autodesk nabízí tři simulační módy.

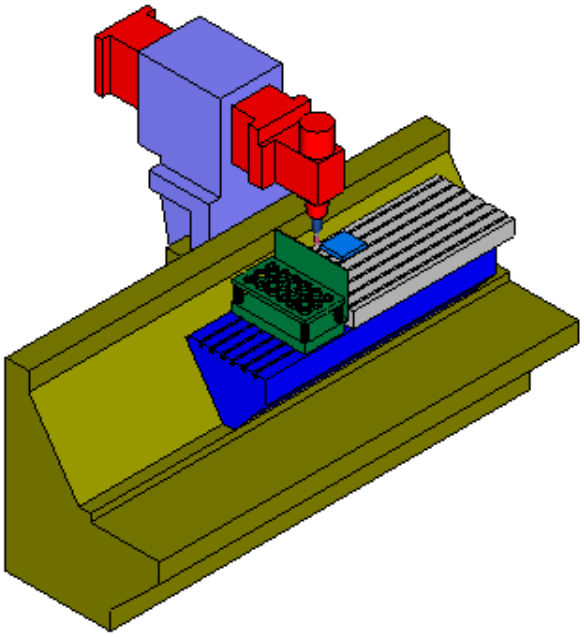
V prvním módu je zobrazena simulace drah nástroje, jakým způsobem se pohybuje vzhledem k vytvořenému dílci. Pro lepší přehlednost simulace slouží různé zbarvení ploch po obrobení různými nástroji.



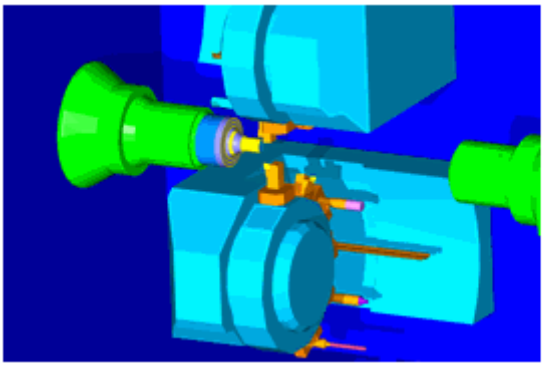
Obrázek 4 - barevné rozdělení ploch dle nástroje [4]

Druhá možnost se od prvního způsobu liší tak, že v simulaci je navíc vidět postupně odebíraný materiál od původního polotovaru. Tento způsob vykreslení je však podstatně náročnější na hardware.

Třetí možností je kompletní simulace obrábění včetně kinematiky modelu stroje. Na obrazovce je tedy možné po nadefinování dílce na modelu stroje pozorovat pohyby upnutého nástroje v pracovním prostoru stroje. V tomto módu je možné vidět případné kolize a chyby mezi pohyblivými částmi stroje, obrobkem a nástrojem. V simulaci je tedy možné definovat i prostředí dílce jako jsou například svěráky, upínky a další komponenty. Do simulace je dále možné přidat více držáků nástroje a pozorovat výměnu nástroje mezi jednotlivými operacemi. Pro lepší přehlednost celé simulace FeatureCAM nabízí i širokou škálu nastavení barev pro jednotlivé součásti a rozhraní. [5]



Obrázek 5 - strojní simulace ve FeatureCAMu [6]

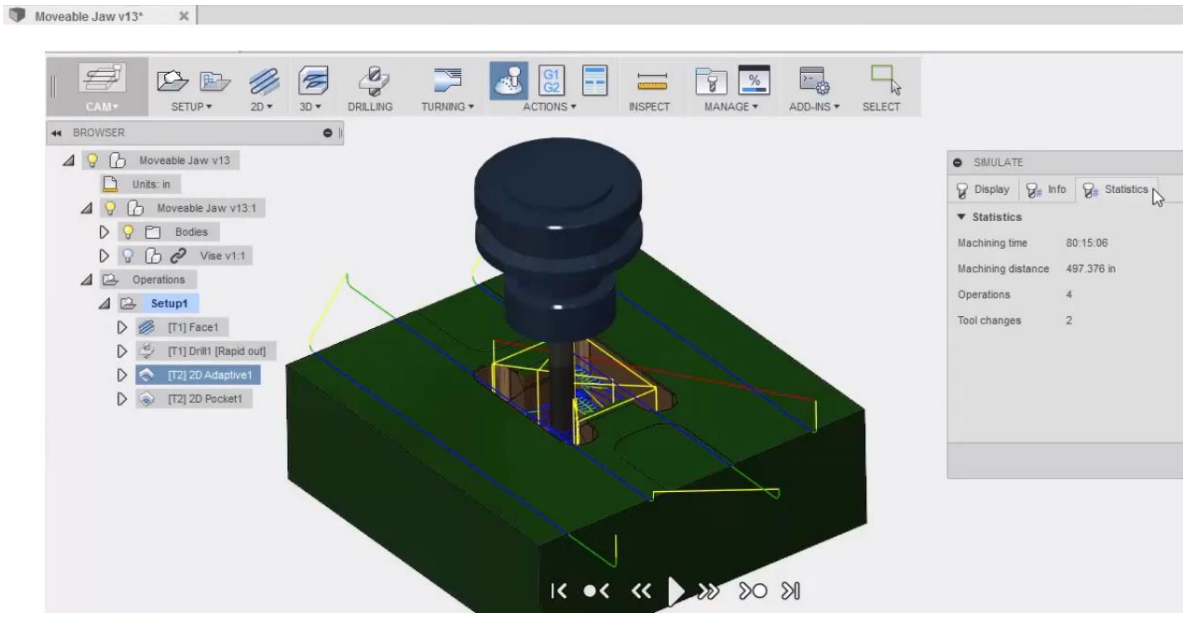


Obrázek 6 - strojní simulace s výměnou nástrojů [6]

V simulaci je též vhodné pomocí nástrojů analýzy součást odměřit, zda rozměry odpovídají požadovaným parametrům.

2.1.3 Fusion 360°

Fusion 360° taktéž od společnosti Autodesk je cloudový software. To znamená, že si veškerá data přebírá z internetu. Tento software při obrábění dokáže zobrazit simulaci dráhy nástroje s upínacím systémem nástroje. V současné době nemá Fusion 360° integrovanou podporu simulace obráběcího stroje, pohyb je tedy limitován na nástroj. Program však disponuje detekcí kolizí nástroje a obrobku. [7]



Obrázek 7 – simulace drah nástroje v programu Fusion 360° [7]

2.1.4 Autodesk HSM

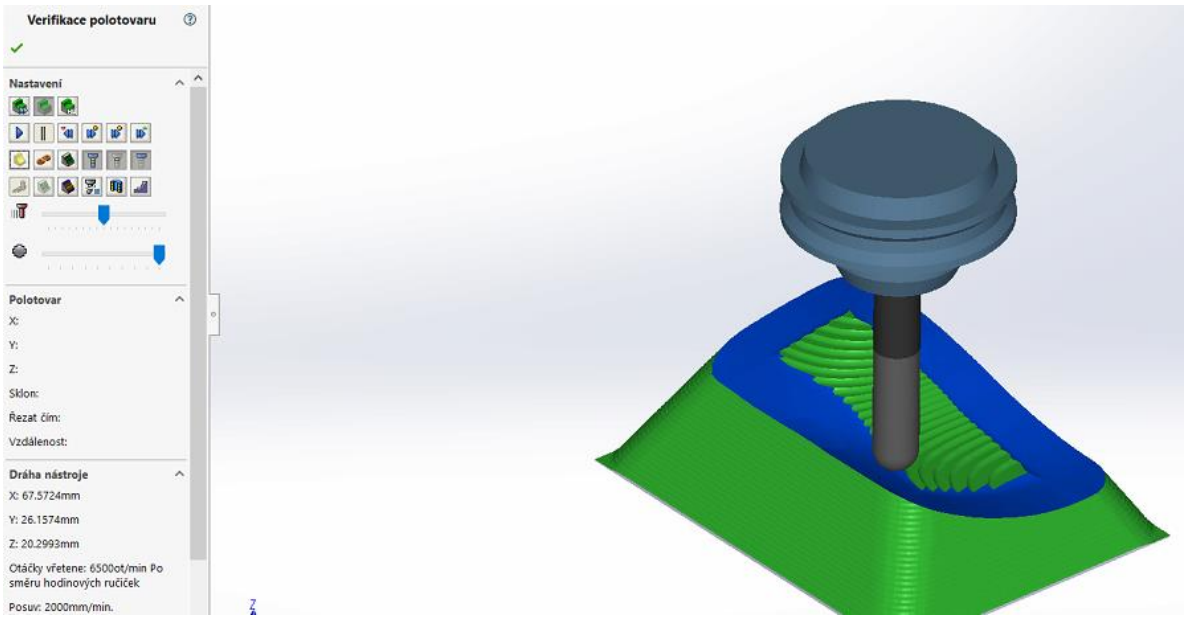
HSM je integrovaný CAM pro použití v softwaru Solidworks, Inventor a Fusion 360°.

Odlišení tohoto CAMu pro tyto jednotlivé softwary je minimální. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že v Solidworks HSM je navíc přístupná i simulace stroje. Jinak se liší především v uživatelském prostředí.

Jako většina CAM softwarů v současnosti obsahuje simulaci drah nástroje, verifikaci obrobku a kinematiku stroje.

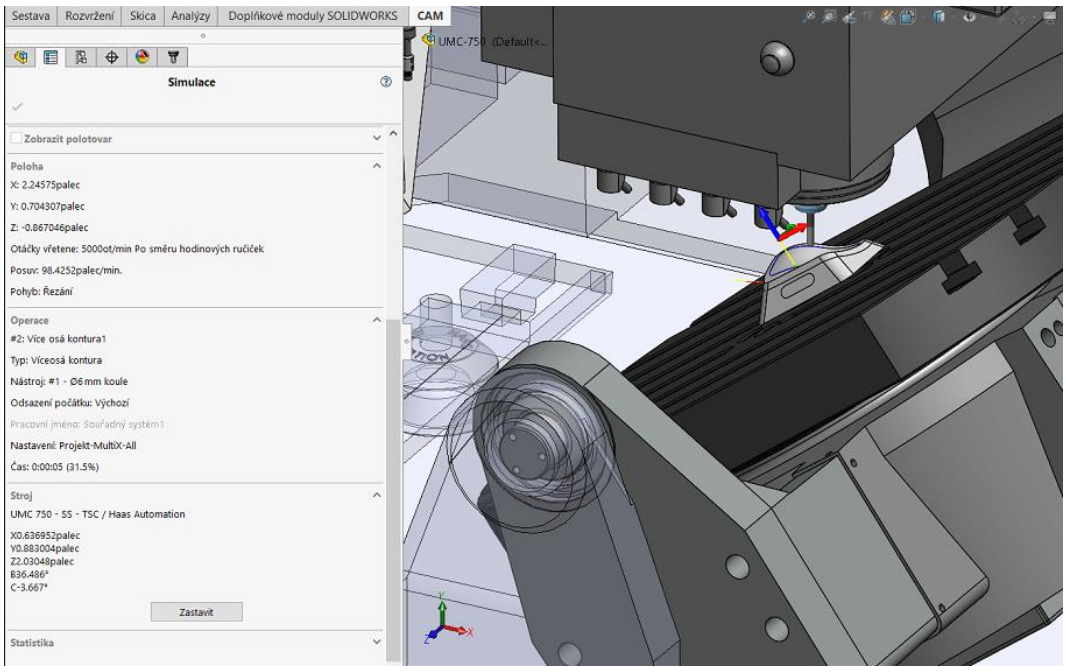
Při simulaci drah nástroje je viditelný pouze nástroj včetně držáku a obrobek s vygenerovanými dráhami odlišenými dle pohybu nástroje (posuv, rychloposuv, zdvihy).

U verifikace je opět viditelný nástroj s držákem, avšak místo drah už je viditelný obráběný polotovar. Je tedy možné porovnat model součásti s modelem obrobeného dílce. Plocha obrobená různými nástroji je vyobrazena odlišnou barvou. [8]



Obrázek 8 - verifikace drah nástroje v programu HSM [8]

Simulace obrábění včetně kinematiky stroje je však v HSM na nižší úrovni, než ve špičkových CAM softwarech. Je možné simulovat pouze frézovací operace. Tudíž není možné v HSM simulovat soustružnické operace. Co se kontroly kolizí týče, software obsahuje kontrolu kolize nástroje a obrobku, zda se neřezná část nástroje nedotýká obrobku, kontrola rozsahu os stroje. Dále je možné v nastavení změnit faktor posuvu os stroje – tento parametr respektuje dynamiku stroje a při jeho změně je možné dosáhnout v simulaci přesnějších strojních časů. [8]



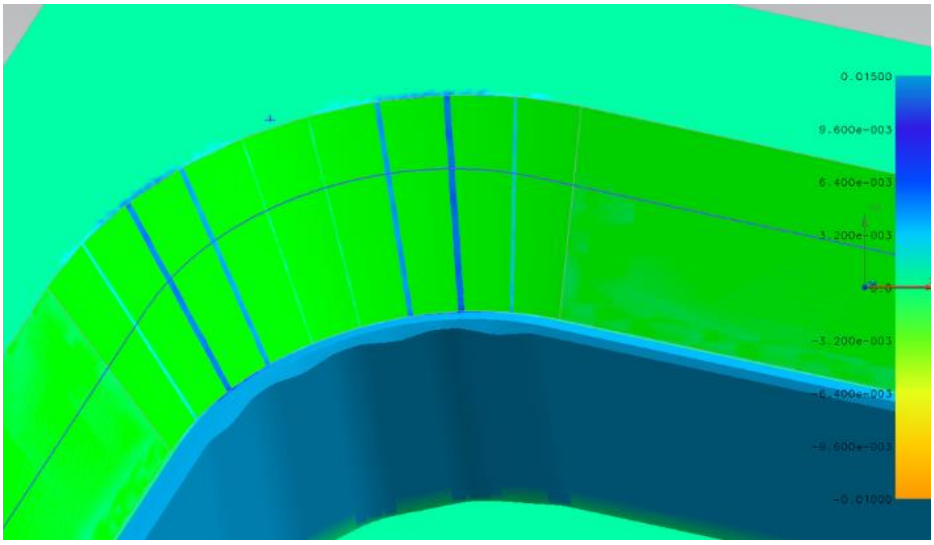
Obrázek 9 - strojní simulace v HSM [8]

2.1.5 Siemens NX

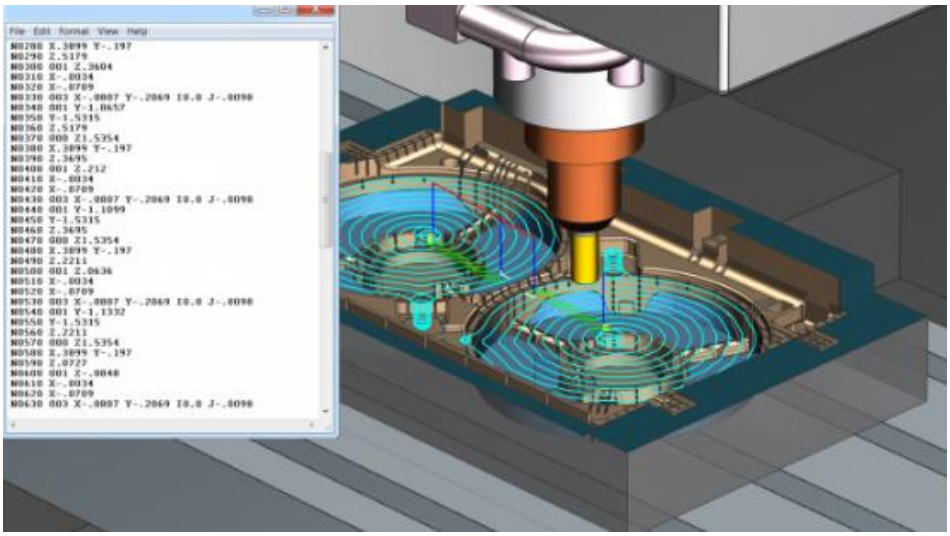
NX je propojený CAD/CAM software od výrobce Siemens. NX je software působící na trhu dlouhou řadu let a řadí se mezi špičkové softwary.

Simulace v tomto softwaru lze rozdělit na několik druhů.

Prvním druhem je simulace drah stroje. Ta obsahuje ověření celého pohybu stroje, a to podle generovaných CL dat. Tato simulace slouží k ověření funkčnosti drah z pohledu kinematiky celého stroje. Tímto způsobem je tedy možné odhalit případné kolize, správnost rozsahu os stroje a ověřit umístění dílce a upínacích zařízení na stroji. Dále je také možné zobrazit odchylku obrobené plochy od modelu součásti.



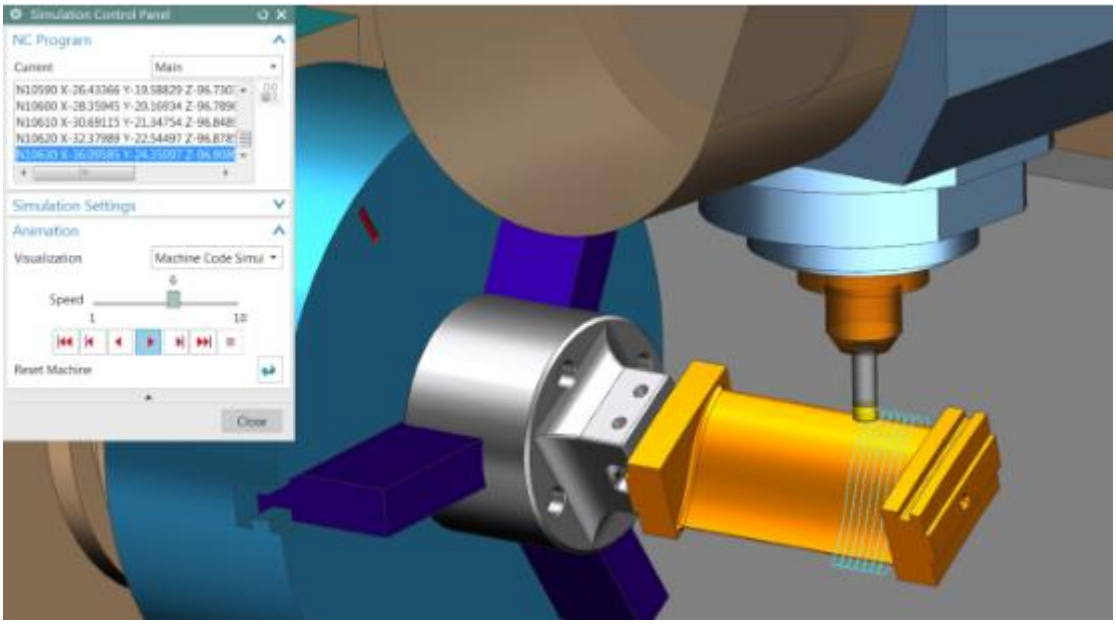
Obrázek 10 - odchylka teoreticky obrobené plochy a modelu [9]



Obrázek 11 - strojní simulace softwaru NX [10]

Druhým stupněm simulace je simulace řízená pohony. Ta je již rozšířena o vliv samotných pohonů stroje a zástupcem řídicího systému je řídicí ovladač simulátoru. Jde tedy o simulaci, která je přímo řízena reálným NC kódem generovaným konkrétním postprocesorem. Dochází tedy ke čtení příslušného NC kódu řídicím ovladačem a pohyby jsou vykonávány blok po bloku, a to včetně vedlejších pohybů os. Další součástí je řízení pomocí vrtacích cyklů. Této simulace se využívá k ověření navržené technologie, ke zpřesněnému vypočtení výrobního času ovlivněného pohony, k ověřování externího NC kódu, k analýze obrobeného povrchu vycházející z pohybu řízených os, a k výrobě virtuální součásti z externího NC kódu.

Třetím a nejvyspělejším stupněm je takzvaná Virtual NC Kernel simulace řízená virtuálním řídicím systémem Sinumerik 840D. Tento druh simulace již obsahuje interpolátor řídicího systému, který odbavuje NC kód. Tak je tomu i při skutečném řízení obráběcího CNC stroje. Tato simulace tedy využívá veškeré logické funkce řídicího systému. Její součástí je HMI panel Sinumerik 840D, jehož ovládání je totožné se skutečným panelem řídicího systému. [11]



Obrázek 12 - verifikace dílce strojní simulace v NX [10]

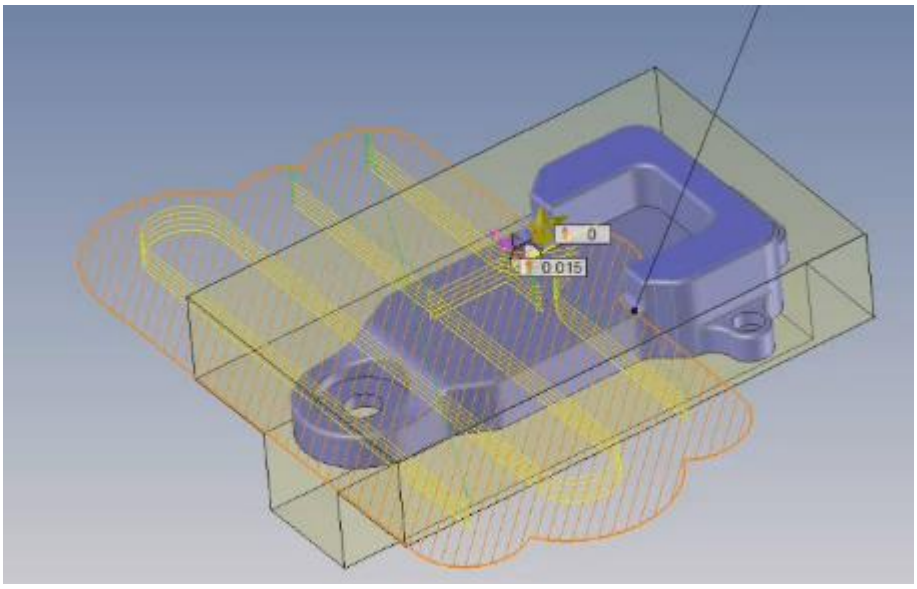
2.1.6 TopSolid´Cam

TopSolid od francouzské společnosti Missler Software patří mezi rozsáhlé CAD/CAM softwary s možností integrace široké nabídky strojírenských modulů. Mezi tyto moduly

patří například speciální dráhy nástroje pro obrábění Topsolid VoluMill, statická a dynamická analýza součástí TopSolid´Fea nebo TopSolid´NCSimul pro ověření NC kódu.

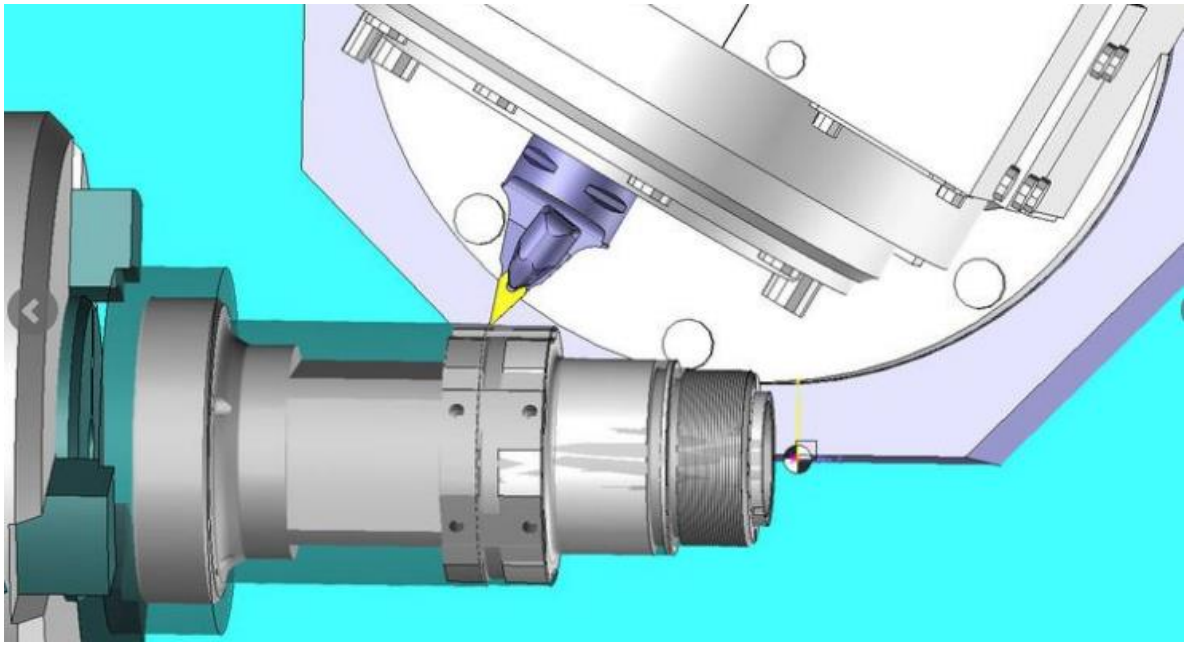
Simulaci obrábění v rozhraní TopSolid´Cam je opět možné rozdělit do několika skupin.

Prvním druhem simulace je simulace drah nástroje. V tomto režimu je viditelný nástroj pohybující se po vygenerovaných dráhách. Nachází se zde i volba simulace odebíraného materiálu, která však výrazně zpomaluje průběh celé simulace.



Obrázek 13 - simulace drah nástroje v programu TopSolid´CAM [12]

Dalším typem simulace je komplexní simulace drah nástroje včetně kinematiky stroje. Lze simulovat frézovací i soustružnické operace od jednoduchých strojů až po víceosá obráběcí centra. Taktéž je možné zobrazit nejen případné kolize jednotlivých částí stroje, ale i kolize držáku nástroje, obrobku i neřezné části nástroje a případných upínacích zařízení.



Obrázek 14 - strojní simulace v TopSolid´CAM [13]

V této strojní simulaci je též velmi vhodná i definice prostředí obráběného dílce. Můžeme tak nadefinovat jednotlivé části upínacího zařízení a po aktivaci těchto částí dojde k přepočtu drah tak, aby se nástroj těmto součástem automaticky vyhnul.

3 Možnosti a vstupy pro vytvoření modelu stroje

Před samotnou tvorbou kinematického modelu stroje pro testování obrábění je vždy nejprve nutné zjistit všechny potřebné informace, které se daného typu stroje týkají.

Mezi tyto požadavky patří:

- CAD model stroje. Model stroje musí obsahovat všechny prvky, které budeme simulovat. Je tedy potřeba mít model vřetena, hlavy stroje, stůl, lože a veškeré další pohyblivé a nepohyblivé prvky
- Parametry stroje
    - Rozsahy jednotlivých os a jejich limity
    - Rozměry
    - Výchozí pozice (vzdálenost mezi stolem a vřetenem)
    - Souřadnice pro výměnu nástroje
- Textový editor a editor zdrojového kódu, jako je například Notepad ++, pro použití se systémem Microsoft Windows [14]

3.1 CAD model stroje

Prvním krokem je tedy zjistit rozměry stroje, abychom vůbec mohli daný stroj virtuálně sestavit.

Tyto rozměry je možné získat přímo od výrobce stroje ve formě technické dokumentace. Kompletní rozměry součástí však často bývá obtížné získat vzhledem k tomu, že výrobci si hlídají své know-how a nejsou ochotni tyto rozměry sdílet.

Ideální možností, jak tyto rozměry získat, je vyžádat si konkrétní 3D model stroje v přenosovém formátu přímo od výrobce. Avšak pokud si o model stroje zažádáme jako o pozdější doplněk po koupi stroje, může se tato varianta značně prodražit. Cena se u moderních strojů řádově pohybuje v tisících euro. Proto je mnohdy vhodnější si o model stroje zažádat ve výběrovém řízení při volbě stroje. Výhodou této varianty jsou velmi přesné rozměry stroje, které však bývají kompenzovány touto vyšší cenou. Další nevýhodou také bývá komplexnost 3D modelu. Model od výrobce mnohdy obsahuje stovky

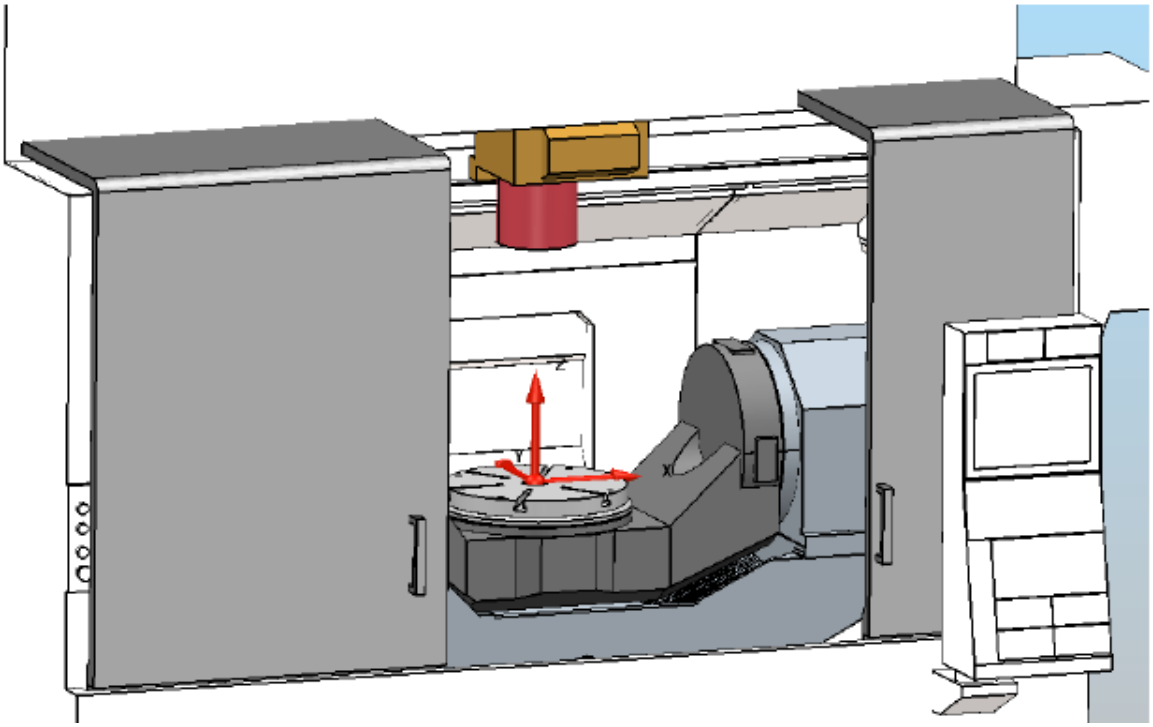
pro simulaci nepodstatných součástí, jako jsou například šrouby, podložky, matice. Tyto součásti většinou neovlivňují pracovní prostor a při simulaci jsou tedy nadbytečné. Je tedy vhodné je odstranit, protože zvyšují hardwarovou náročnost, tudíž simulaci obrábění zpomalují a může dojít ke snížení její plynulosti.

Poslední možností pro získání rozměrů stroje je jejich manuální odměření. Největší důraz přitom musíme klást na co nejpřesnější odměření rozměrů pohyblivých součástí a pracovního prostoru. To z toho důvodu, aby kolize při virtuální simulaci odpovídaly kolizím při obrábění na reálném stroji. Dalším součástem, jako například vnější ochranné kryty a plechy, už nemusíme věnovat takovou pozornost, protože při simulaci přímo neovlivňují pracovní prostor. Tyto součásti lze tedy měřit i s větší odchylkou od skutečné hodnoty.

3.2 Parametry stroje

Rozsahy os a jejich limity potřebujeme z toho důvodu, abychom pohyby stroje v simulaci sjednotili s pohyby os na reálném stroji. Pokud by tyto virtuální rozsahy a limity neodpovídaly skutečnosti, pohyby by byly zkreslené a při simulaci by mohlo docházet ke kolizím, ke kterým ve skutečnosti nedochází a naopak. Tyto parametry os vždy uvádí výrobce v technické dokumentaci stroje. Případně by je bylo možné odměřit pomocí řídicího systému stroje.

Výchozí pozice je pozice, ve které bude začínat každý program v softwaru PowerMill. V sestavě virtuálního stroje je u frézky potřeba nastavit globální souřadnicový systém na dotyk horní plochy stolu ve směru osy Z a na jeho střed v osách X a Y. Všechny ostatní součásti stroje jsou umístěny v návaznosti na tuto polohu. Vřeteno by mělo být umístěno v ose Z v maximální horní poloze nebo ve výchozí pozici, ze které bude začínat každý program pro obrábění. Pro lepší názornost přikládám obrázek správného umístění globálního souřadnicového systému.



Obrázek 15 - příklad správného umístění globálního souřadnicového systému [14]

3.3 Souřadnice pro výměnu nástroje

Dalším důležitým parametrem pro co nejrealističtější simulaci je určení souřadnice pro výměnu nástroje. V této pozici bude automaticky docházet k jeho výměně, kdykoliv bude v programu tato výměna definována. Lze nastavit i čas potřebný pro automatickou výměnu nástroje.

3.4 Textový editor a editor zdrojového kódu

Jako editor zdrojového kódu a textu lze využít například zdarma dostupný Notepad++. Tento soubor obsahuje veškerý souhrn příkazů pro definování kinematiky stroje. Po nadefinování veškeré kinematiky je soubor označen příponou .mtd což doslovně znamená machine tool data.

Konkrétní definicí kinematiky se budu podrobněji zabývat přímo v praktické části diplomové práce.

3.5 Organizace a příprava dat

Pokud tedy již máme vymodelovány všechny součásti stroje, který se chystáme simulovat, je potřeba všechny tyto součásti sloučit do sestavy stroje. Tuto sestavu můžeme vytvořit v libovolném CAD modelovacím softwaru, nebo přímo vytvořit v softwaru PowerShape.

Je důležité, aby se střed globálního souřadnicového systému sestavy [0,0,0], nacházel na horní straně upínacího stolu v ose Z a na středu v osách X a Y. Je to z toho důvodu, aby došlo ke správnému propojení souřadnicových systémů mezi PowerMillem a PowerShapem. Naopak vřeteno by se mělo nacházet ve výchozí pozici například v horní limitní výšce osy Z [0,0,Zmax]. Tuto hodnotu Zmax je dobré si zapamatovat, neboť bude poté použita v souboru definice kinematiky .mtd a jde o pozici upnutí nástroje do vřetena.

Dalším krokem po vytvoření sestavy, jejím správném polohování a nastavení globálního souřadnicového systému je export dat z CAD softwaru, ve kterém byla sestava vytvořena. Pro export je vhodné použít některý z přenosových souborů. Například formát souboru s příponou .stp nebo .x_t. Tento krok lze vynechat, pokud model vytváříme přímo v softwaru PowerShape.

Následuje import přenosového formátu do softwaru PowerShape. Tento krok je důležitý z toho důvodu, že musíme jednotlivé komponenty stroje převést do formátu .dmt. Jedná se o soubor Autodesk Manufacturing triangles, tedy o soubor, ve kterém jsou data ve formě trojúhelníků. Po importu přenosového souboru nám PowerShape zobrazí kompletní sestavu stroje, avšak jednotlivé součásti stroje je nutné nejprve převést do geometrie. Nyní už je možné každou součást zvlášť exportovat do formátu .dmt.

Ještě předtím, než soubor exportujeme do formátu .dmt, je vhodné v možnostech programu PowerShape nastavit toleranci pro převod na trojúhelníky. Čím menší je hodnota tolerance, tím přesnější je výsledný model součásti, ale zároveň se zvyšuje počet trojúhelníků, velikost souboru a výsledná simulace se zpomaluje.

Doporučené hodnoty tolerancí:

- Tolerance o velikosti 0,025 mm se doporučuje pro důležité součásti v režimu simulace. Sem lze zařadit veškeré pohyblivé části například vřeteno, povrch stolu s T drážkami a ostatní pohyblivé části v pracovním prostoru stroje.

- Tolerance o velikosti 0,05 mm se doporučuje pro součásti s lineárním nebo rotačním pohybem. Například součásti pohybující se pouze v osách X, Y a Z.

- Pro ostatní nepohyblivé prvky je doporučená tolerance 0,25 mm.

Pokud však simulace probíhá pomalu či není plynulá, lze tyto tolerance zvýšit. Všechny komponenty stroje ve formátu .dmt by dohromady neměly zabírat více než 5 Mb z kapacity na disku.[14]

4 Varianta modelu stroje se třemi osami

V této kapitole krok po kroku zdokumentuji, jak jsem postupoval při vytvoření kinematického modelu stroje FCM 22 CNC pro použití v CAM softwaru PowerMill.

Jedná se o tříosé vertikální obráběcí centrum od výrobce strojů Slovtos. Tato frézka je umístěna v halových laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

FCM 22 CNC slouží tedy především jako stroj pro praktickou část výuky předmětů, kde si studenti mohou naprogramovat svoji součást a následně ji obrobit.

Kinematický model tohoto stroje jsem se rozhodl vytvořit ve dvou variantách. První varianta obsahuje základní model stroje s možností frézování ve 3 osách – X, Y, Z. Ve variantě druhé bude základní model stroje doplněn o přídavnou kolébku s otočným stolem. Toto rozšíření přidává k základním translačním osám X, Y, Z navíc rotaci kolem osy X díky přídavné kolébce a rotaci kolem osy Z, díky rotačnímu stolu.

Základní model stroje FCM 22 CNC jsem převzal ze závěrečné práce bývalého studenta fakulty strojní pana Štojdla.

Skutečný stroj jsem přeměřil a zjistil několik odchylek modelu od skutečného stroje. Tyto rozměry jsem tedy nejdříve upravil a na modelu stroje provedl několik dalších úprav.

4.1 Úprava modelu FCM 22 CNC

Hotový model stroje pana Štojdla byl vytvořen v prostředí softwaru NX, nicméně já jsem dobře obeznámen s CAD/CAM softwarem TopSolid, model jsem tedy upravoval v TopSolidu. Po importu těchto souborů ze softwaru NX došlo k převodu souborů do prostředí TopSolidu. Nyní je tedy již možná úprava jednotlivých součástí stroje.

Nejprve bylo nutné upravit globální souřadnicový systém celé sestavy stroje, protože jednotlivé osy X, Y, Z neodpovídaly skutečným osám na stroji. Dále se střed globálního souřadnicového systému nacházel mimo horní plochu stolu v ose Z a mimo střed stolu v osách X a Y. Celý souřadný systém jsem tedy pootočil a posunul do správné polohy.

Další úpravou bylo rozdělení některých podsestav modelu stroje na jednotlivé díly. Tento krok je nutný učinit z toho důvodu, že při převodu dat z TopSolidu do parasolidu s příponou .x_t by tyto součásti byly brány jako jeden celek. To je z pohledu pozdějšího definování kinematiky nežádoucí, protože například při spojení vřetena s hlavou stroje by kromě rotace vřetena docházelo i k rotaci hlavy stroje.

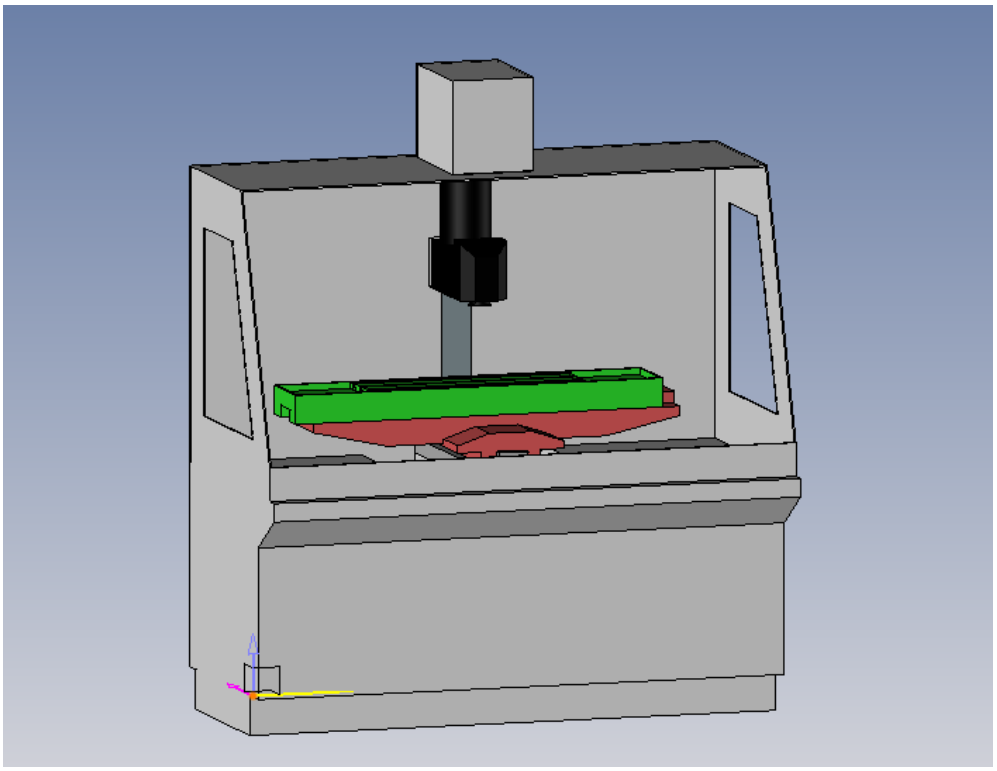
Po rozdělení podsestav na jednotlivé díly podle kinematiky stroje bylo ještě potřeba posunout jednotlivé součásti stroje do správné výchozí polohy. Stůl s T drážkami jsem přesunul tak, aby střed stolu byl umístěn v ose vřetena Z. Vřeteno s hlavou jsem posunul tak, aby upínací bod nástroje byl ve vzdálenosti Z max nad stolem, tedy vzdálen od stolu 380 mm.

Finální úpravou modelu stroje bylo přidání předních a bočních krytů stroje a předních dveří, aby model lépe reprezentoval skutečný stroj.

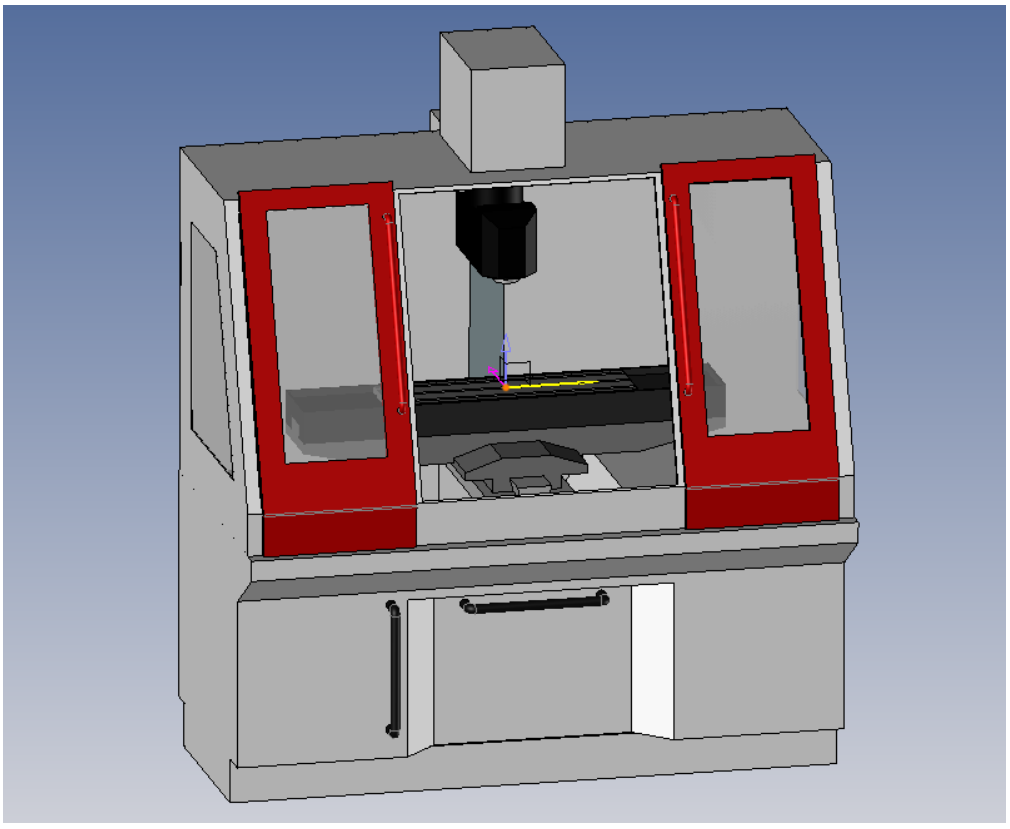
Výsledný model jsem ještě přeměřil v TopSolidu pomocí funkce analýzy geometrie, zda rozměry součástí odpovídají naměřeným hodnotám a zda jsou jednotlivé komponenty ve správné poloze.

Při exportu modelu jsem zkusil použít přenosový formát .stp a formát .x_t. Nakonec jsem se rozhodl použít formát .x_t z toho důvodu, že formát .stp mi následně v programu PowerShape nezobrazil barvy jednotlivých komponent. Tyto barvy však lze později změnit v definici kinematiky v souboru .mtd, proto je možné použít oba tyto přenosové formáty.

Pro porovnání uvádím v následujících obrázcích původní model stroje FCM 22 CNC po importu do TopSolidu, model po úpravě a skutečný stroj.



Obrázek 16 - model FCM 22 CNC před úpravou



Obrázek 17 - model FCM 22 CNC po úpravě

Obrázek 18 - stroj FCM 22 CNC

4.2 Příprava modelu v softwaru PowerShape

Nejprve je nutné do programu PowerShape importovat model stroje v přenosovém formátu .x_t. Po importu se v levé části obrazovky zobrazí strom všech importovaných komponent a uprostřed sestava stroje. Tato sestava je ale pouze zobrazena jako obrysy jednotlivých součástí. Tyto součásti je nutné převést do geometrie, abychom je poté mohli v PowerShapu exportovat do formátu Autodesk Manufacturing triangles s příponou .dmt. To lze jednoduše provést kliknutím pravým tlačítkem myši na vybranou součást a z možností zvolit převést do geometrie. Protože se jedná o poměrně jednoduchý model stroje, zvolil jsem toleranci pro převod na trojúhelníky 0,01 mm. V případě potřeby lze tyto komponenty znovu vyexportovat s vyššími tolerancemi, aby simulace probíhala plynuleji. Změna tolerancí pro export je poměrně jednoduchý proces, protože pozdější definice kinematiky pro daný stroj v souboru s příponou .mtd zůstane zachována. Každou komponentu tedy nyní samostatně převedeme na formát .dmt.

4.3 Důležité parametry stroje FCM 22 CNC pro definici kinematiky

Jak jsem již zmínil v předchozí kapitole, stroj FCM 22 CNC je tříosá vertikální frézka s možností frézování ve třech osách. Hlava stroje vykonává pohyb v ose Z a stůl s T drážkami v osách X a Y. Z pohledu kinematiky nás tedy nejvíce zajímají jednotlivé rozsahy těchto tří os. Stroj nedisponuje automatickou výměnou nástrojů, ty se tedy musí vyměňovat ručně. V kinematice stroje volím jako polohu výměny nástroje v maximální výšce osy Z z toho důvodu, aby bylo nad obrobkem dostatek prostoru pro ruční výměnu nástroje.

Po testování pojezdů jednotlivých os jsem však zjistil, že skutečný limit os je větší, než uvádí výrobce.

Tab. 1 - pojezdy uvedené výrobcem

Pojezdy v jednotlivých osách uvedené výrobcem	
Podélný X	450 mm
Příčný Y	220 mm
Svislý Z	320 mm

Tab. 2 - skutečně naměřené pojezdy

Skutečné pojezdy v jednotlivých osách	
Podélný X	456 mm
Příčný Y	252 mm
Svislý Z	340 mm

Dále jsem zjistil, že pokud globální souřadnicový systém stroje umístím do středu stolu v osách X a Y a na povrch stolu v ose Z, potom hodnoty těchto os nejsou v kladném a záporném směru rovnoměrně rozděleny.

Osa X má vzhledem k tomuto souřadnicovému systému limity -233 mm a +223 mm.

Osa Y má limity -123 mm a +129 mm a osa Z je limitována od +40 mm do +380 mm, kdy +40 mm je vzdálenost povrchu stolu od spodní plochy vřetena.

4.4 Struktura souboru .mtd

Soubor .mtd obsahuje veškerou kinematiku a popis stroje, včetně výměny nástroje. Nejprve je nutné zmínit, že pro správnou funkci musí být soubor .mtd ve stejné složce jako jednotlivé součásti stroje .dmt. Pokud tomu tak není, je nutné v souboru .mtd uvést cestu k požadovaným .dmt souborům.

Po instalaci programu Notepad++, ve kterém bude tvorba souboru .mtd probíhat, je v nastavení nutné přepnout syntaxi na XML. Tato syntaxe je vhodná pro lepší orientaci v textu při zadávání příkazů. Program Notepad++ je zdarma ke stažení.

Soubor .mtd se skládá ze šesti částí:

- Popis stroje (hlavička)
- Popis postprocesoru
- Popis připojovacích bodů stolu a hlavy stroje
- Popis statických prvků
- Popis pohyblivých prvků hlavy stroje
- Popis pohyblivých prvků stolu

Na obrázku je zjednodušený příklad kompozice souboru .mtd

```
<!-- ************************************************** -->
<!-- Machine Tool Manufacturer  : ____________________   -->
<!-- Machine Tool Model         : ____________________   -->
<!-- Machine Tool Type          : ____________________   -->

<!--                When        : ____________________   -->
<!--                Checked By  : ____________________   -->
<!-- ************************************************** -->
```

1

```
<machine xmlns="x-schema:PowermillMachineTool" POST="pmpMultiaxis.*">
```

2

```
  <table_attach_point PART="table" X="0" Y="0" Z="0"/>
  <head_attach_point PART="head" X="0" Y="220" Z="430" I="0" J="0" K="1"/>
```

3

```
<!-- ===== The static parts ===== -->
    <machine_part>

    </machine_part>
```

4

```
<!-- ===== The head ===== -->
    <machine_part>

        <machine_part NAME="head" />
    </machine_part>
```

5

```
<!-- ===== The table ===== -->
    <machine_part>

        <machine_part NAME="table" />
    </machine_part>
</machine>
```

6

Obrázek 19 - zjednodušený příklad souboru .mtd [14]

4.4.1 Popis stroje

Popis stroje slouží jako informativní část souboru .mtd. Je možné zde uvést následující informace:

- Výrobce stroje
- Model stroje
- Typ stroje
- Konfigurace stroje
- Limity jednotlivých os stroje

- Tolerance součástí souborů .dmt
- Jméno osoby, která soubor .mtd vytvořila
- Jméno osoby, která kinematiku stroje testovala
- Případně další důležité informace, které se souboru .mtd týkají

Popis stroje FCM 22 CNC může vypadat například takto.

```
<!--*******************************************-->
<!--            Informace o stroji             -->
<!--*******************************************-->
<!--Výrobce stroje      :Slovtos                 -->
<!--Model stroje        :FCM 22 CNC              -->
<!--Typ stroje          :3-osá vertikální frézka-->
<!--Limity os           :Xmin -233  Xmax +223    -->
<!--                    :Ymin -123  Ymax +129    -->
<!--                    :Zmin +40   Zmax +380    -->
<!--Tolerance součástí  :0.01                    -->
<!--*******************************************-->
<!--        Informace of vytvoření a revizi     -->
<!--*******************************************-->
<!--Vytvořil            :Vít Hájek               -->
<!--Datum vytvoření     :20.11.2018              -->
<!--*******************************************-->

```

Obrázek 20 - popis stroje FCM 22 CNC

<!-- tento příkaz signalizuje začátek komentáře

-- > tento příkaz signalizuje ukončení komentáře

Při použití syntaxe XML je komentář zobrazen zelenou barvou.

4.4.2 Popis postprocesoru

POST je v souboru .mtd velmi důležitá část, protože říká softwaru PowerMill jak má být simulace řízena. V souboru .mtd je potřeba mít zadán správný řetězec postprocesoru, protože ten tomuto souboru říká, jak má být řízen. To, co nám zobrazuje simulace v PowerMillu, je výstup postprocesoru, který půjde přímo do stroje. Bez tohoto řetězce nelze zaručit, že soubor .mtd bude korespondovat s výstupním kódem a nelze použít funkci orientace vektorů.

```
19  <!--*******************************************-->
20  <!--            Postprocesor                   -->
21  <machine xmlns="x-schema:PowermillMachineTool" POST="pmpMultiaxis.*" >
22  <!--*******************************************-->
```

Obrázek 21 - popis postprocesoru

4.4.3 Definice připojovacích bodů

Připojovací bod stolu definuje střed stolu s T drážkami. Protože jsem v PowerShapu střed globálního souřadnicového systému umístil na střed stolu a jeho povrch, bude mít tento bod souřadnice [0,0,0]. Všechny ostatní součásti jsou umístěny vzhledem k tomuto připojovacímu bodu. V souboru .mtd bude v mém případě tento bod definován takto:

```
25  <!--*******************************************-->
26  <!--            Připojovací body               -->
27  <table_attach_point PART="table" X="0" Y="0" Z="0" />
```

Obrázek 22 - připojovací bod stolu

Připojovací bod hlavy definuje připojovací bod nástroje. Souřadnice středu spodní strany vřetena musí odpovídat poloze vřetena vzhledem k souřadnicím [0,0,0] v sestavě stroje. Taktéž je nutné definovat vektory I, J, K, které budou určovat směr upnutí nástroje. V případě vertikální frézky FCM 22 CNC, kdy je směr upnutí nástroje podél osy Z, jsou vektory

I = 0

J = 0

K = 1

V souboru .mtd bude tedy následující řádek definující připojovací bod nástroje zapsán takto:

```
28  <head_attach_point  PART="head" X="0" Y="0" Z="380" I="0" J="0" K="1"/>
```

Obrázek 23 - připojovací bod hlavy stroje

U těchto připojovacích bodů, by neměla být z důvodu správné funkčnosti použita velká písmena pro označení součástí.

4.4.4 Popis statických součástí stroje

V této kapitole se budu věnovat popisu nepohyblivých částí stroje. Nejprve je potřeba zapsat jednotlivé komponenty, aby se v simulaci zobrazovaly. Dále lze pro lepší přehlednost nastavit barvu a průhlednost součástí. Posledním krokem je nastavení detekce kolizí. PowerMill nedetekuje kolize s nepohyblivými součástmi stroje, proto je musíme definovat v souboru .mtd.

Na následujícím obrázku je zobrazen kód pro definici některých částí stroje FCM 22 CNC definovaných jako statické. Pro názornost jsem zde vybral pouze část z nich. Kompletní definice stroje souboru .mtd je přiložena v elektronické příloze práce.

```
<!--Zaklad-->
        <machine_part NAME="zaklad_y">
            <model_list OPACITY="100">
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_3osy/zaklad_y.dmt" />
                    <rgb R="255" G="255" B="255" />
                </dmt_file>
            </model_list>
        </machine_part>
        <machine_part>
            <model_list>
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_3osy/zaklad.dmt" />
                    <rgb R="255" G="255" B="255" />
                </dmt_file>
            </model_list>
        </machine_part>

<!--pojezd_z-->
        <machine_part NAME="pojezd_z" >
            <model_list OPACITY="100">
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_3osy/pojezd_z.dmt" />
                    <rgb R="255" G="255" B="255" />
                </dmt_file>
            </model_list>
        </machine_part>
```

Obrázek 24 - popis statických částí stroje

Příkaz *<machine_part> NAME="zaklad_y">* určuje, že část stroje označená jako zaklad_y bude brána v úvahu při kolizi. Ta by mohla nastat, pokud by obrobek upnutý na stroji byl delší, než je rozměr stolu v ose Y, a tedy by stůl s drážkami přesahoval. To samé jsem definoval i pro součást pojezd_z.dmt. Protože v modelu se vzájemně dotýkají pohyblivé části stroje head.dmt a pojezd_z.dmt, dále pak zaklad_y.dmt a table.dmt, bylo

nutné doplnit následující příkazy, které vypnou kolize v těchto dvou skupinách. Na reálném stroji ke kolizi mezi těmito dvěma skupinami prvků nedochází.

```
29      <collision_exclusion_list>
30          <collision_group>
31              <collision_part NAME="head" />
32              <collision_part NAME="pojezd_z" />
33          </collision_group>
34          <collision_group>
35              <collision_part NAME="zaklad_y" />
36              <collision_part NAME="table" />
37          </collision_group>
38      </collision_exclusion_list>
```

Obrázek 25 - vyjmutí skupin prvků z detekce kolizí

Příkaz *<model_list OPACITY="100">* znamená, že obě součásti zaklad_y.dmt a zaklad.dmt budou mít 100 % neprůhlednost. U dvěří jsem nastavil *OPACITY="80"* a jedná se tedy o 20 % průhlednost. Průhlednost jednotlivých součástí stroje lze přímo upravit v PowerMillu.

Příkaz *<path FILE="FCM22CNC_3osy/zaklad_y.dmt" />* určuje, že součást zaklad_y.dmt je umístěna ve složce FCM22CNC_3osy. V tomto případě je tedy pro správnou funkci nutné, aby byl soubor .mtd uložen v adresáři na stejné úrovni jako složka FCM22CNC_3osy.

Příkaz *<rgb R="255" G="255" B="255" />* přiřazuje jednotlivým součástem barvu podle RGB škály, která se používá u obrazovek. Každé součásti je tedy přiřazena hodnota od 0 do 255 pro červenou, zelenou a modrou barvu. V tomto případě se tedy jedná o barvu bílou.

4.4.5 Popis pohyblivých částí

Tato část obsahuje popis všech pohyblivých částí stroje v souboru .mtd. Tyto pohyby lze rozdělit na pohyb hlavy stroje a pohyb pracovního stolu. Hlava vykonává posuvný pohyb v ose Z a také do této části patří rotace vřetena kolem osy Z. Pracovní stůl se v této tříosé konfiguraci stroje pohybuje v osách X a Y.

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny příkazy pro definici pohybu hlavy stroje

```
<!-- Hlava stroje-->
    <machine_part>
        <axis>
            <control_info ADDRESS="Z" VALUE="380" HOME="380" MIN="40" MAX="380" />
            <simple_linear I="0" J="0" K="1" />
        </axis>
        <model_list>
            <dmt_file>
                <path FILE="FCM22CNC_3osy/hlava_z.dmt" />
                <rgb R="0" G="0" B="0"/>
            </dmt_file>
            <dmt_file>
                <path FILE="FCM22CNC_3osy/vreteno.dmt" />
                <rgb R="200" G="200" B="200"/>
            </dmt_file>
        </model_list>
        <machine_part NAME="head" />
    </machine_part>
```

Obrázek 26 - definice hlavy stroje

Control_info ADDRESS vytvoří osu.

VALUE udává hodnotu vzdálenosti od globálního souřadnicového systému stroje. Je zobrazena v informačním okně stroje, když se stroj nachází ve své výchozí pozici. Jedná se o hodnotu vzdálenosti stolu od připojovacího bodu nástroje (hodnota této vzdálenosti z programu PowerShape).

MIN a *MAX* vyjadřuje limitní vzdálenosti osy od globálního souřadnicového systému stroje.

HOME přidělí novou správnou polohu výchozí pozice, pokud je VALUE nesprávná.

Simple linear definuje, jak se osa pohybuje, pokud se jedná pouze o jeden lineární pohyb. Pohyb je vyjádřen pomocí vektorů I, J, K.

<*machine part*> otevře část souboru .mtd.

<*axis*> a </*axis*> otevře a uzavře popis osy.

<*model list*> a </*model list*> otevře a uzavře výpis součástí modelu.

<*dmt_file*> a </*dmt_file*> otevře a uzavře soubor .dmt.

Uvedu zde ještě několik příkazů, které lze použít, avšak pro tento stroj jsem je nepoužil.

PRIORITY určuje prioritu pohybu os. Hodnoty jsou "*HIGH*" pokud se jedná o vysokou prioritu, *"MEDIUM"* pro prioritu střední a *"LOW"* pro nejnižší prioritu.

Pro definici rotačních součástí stroje lze použít tyto příkazy:

<*Simple rotary* /> definuje pohyb osy, pokud se jedná pouze o rotační pohyb. Je nezbytné definovat střed otáčení a vektor pro definici směru rotace.

X="0" Y="0" Z ="50" jsou souřadnice středu otáčení vzhledem ke globálnímu souřadnicovému systému.

I ="-1" J="0" K="0" určuje směr pohybu. V tomto případě dochází k rotaci kolem osy X v opačném směru.

<*machine_part NAME="head"* na konci bloku *Hlavy stroje* definuje všechny předchozí popsané komponenty hlavy stroje (tedy vreteno.dmt a hlava_z.dmt) a propojí je s PowerMillem a postprocesorem.

Každá osa může obsahovat více pohyblivých součástí stroje. V mém případě se společně s hlavou stroje bude v ose Z pohybovat i vřeteno. Rotace vřetena je již v samotné simulaci zobrazena.

Pro jednotlivé součásti lze použít individuální nastavení barev, avšak pokud chceme definovat průhlednost *OPACITY*, je nutné tento příkaz opakovat u každého výpisu součástí <*model_list*>.

Tímto je tedy kinematika hlavy stroje kompletní a lze přejít k definici kinematiky pracovního stolu frézky. Postup definice pracovního stolu frézky FCM 22 CNC je podobný definici hlavy stroje, protože se taktéž jedná o lineární pohyb os X a Y.

Použil jsem tedy stejné příkazy jako u definice hlavy stroje, a změnil jsem rozsahy os, vektory pohybu, názvy os a součástí, které definují pohyb v ose X a Y a barvy jednotlivých součástí, aby odpovídaly skutečnému stroji.

V následujícím obrázku je zapsán kód pro pohyb os X a Y pracovního stolu.

```
<!-- Pracovní stůl-->
        <machine_part>
            <axis>
                <control_info ADDRESS="Y" VALUE="0" HOME="0" MIN="-123" MAX="129" />
                <simple_linear I="0" J="-1" K="0" />
            </axis>
            <model_list>
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_3osy/pojezd_y.dmt" />
                    <rgb R="100" G="100" B="100"/>
                </dmt_file>
            </model_list>
        <machine_part>
            <axis>
                <control_info ADDRESS="X" VALUE="0" HOME="0" MIN="-233" MAX="223" />
                <simple_linear I="-1" J="0" K="0" />
            </axis>
            <model_list>
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_3osy/stul_xy.dmt" />
                    <rgb R="20" G="20" B="20"/>
                </dmt_file>
            </model_list>
            <machine_part NAME="table" />
        </machine_part>
    </machine_part>
</machine>
```

Obrázek 27 - definice pracovního stolu

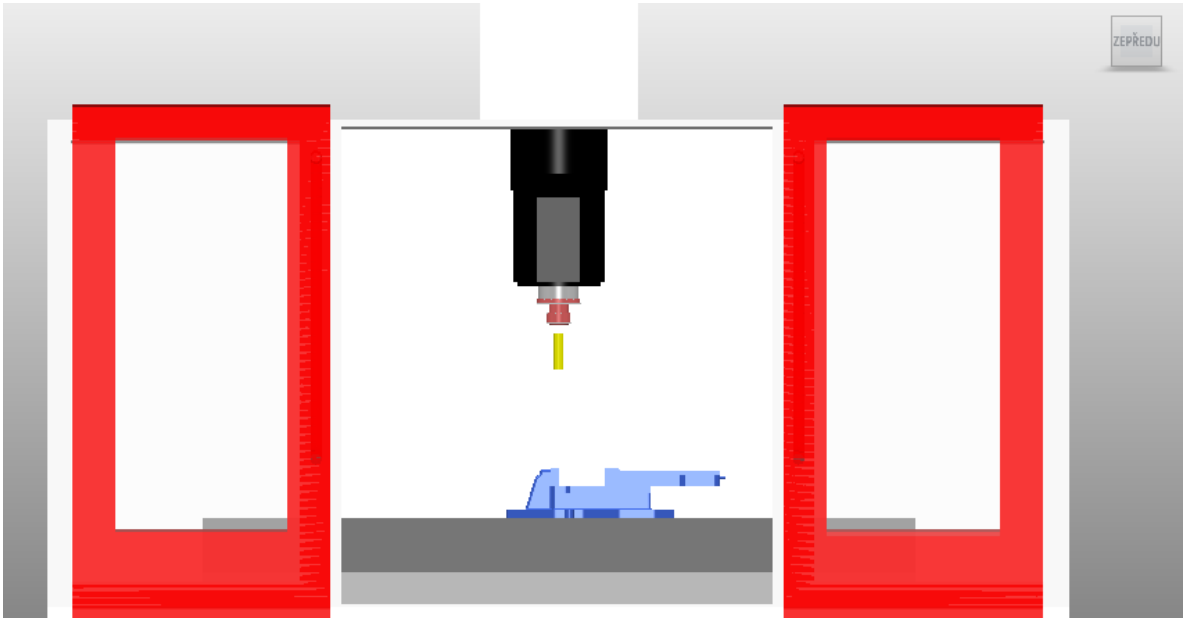
Celý soubor .mtd pro určení kinematiky stroje je uzavřen příkazem *</machine>*

4.5 Testování v prostředí PowerMill

Pro test tříosé varianty v simulaci PowerMill jsem vytvořil novou sestavu a soubor .mtd, který kromě samotného stroje FCM 22 CNC obsahuje i svěrák, který se používá pro upnutí polotovaru na tomto stroji. V simulaci tedy bude nyní možné vidět i případné kolize nástroje s tímto upínacím zařízením.

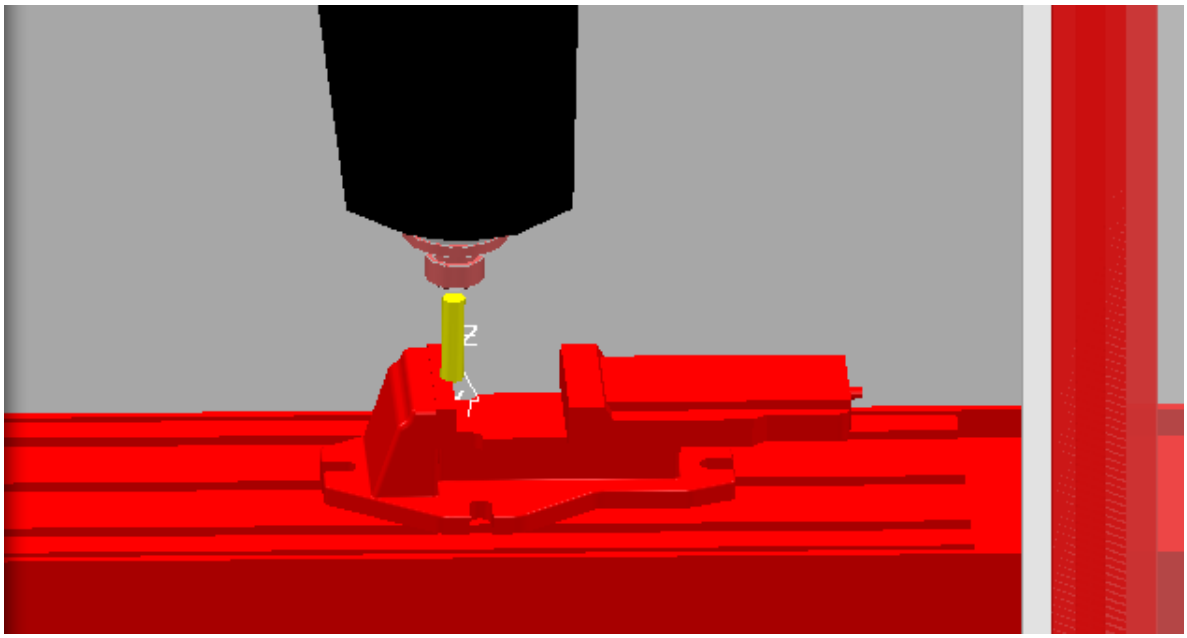
Cílem tohoto testu je ověření správnosti kinematiky stroje a zda jsou v simulaci správně zobrazeny kolize mezi částmi stroje, nástrojem, a upínacím zařízením. Testování simulace obrábění jsem pro tuto tříosou variantu neuváděl, neboť tato varianta slouží jako základ pro vytvoření složitější pětiosé varianty. V tomto případě není pracovní prostor omezen sestavou páté osy.

V prvním případě je na obrázku zobrazena sestava stroje v PowerMillu, kdy se stroj nachází v domovské pozici a je na něm upnuta válcová fréza o průměru 16 mm, jejíž rozměry včetně rozměrů držáku jsou uvedeny v kapitole databáze nástrojů. Dřík nástroje není v simulaci zobrazen z důvodu grafické chyby programu PowerMill.



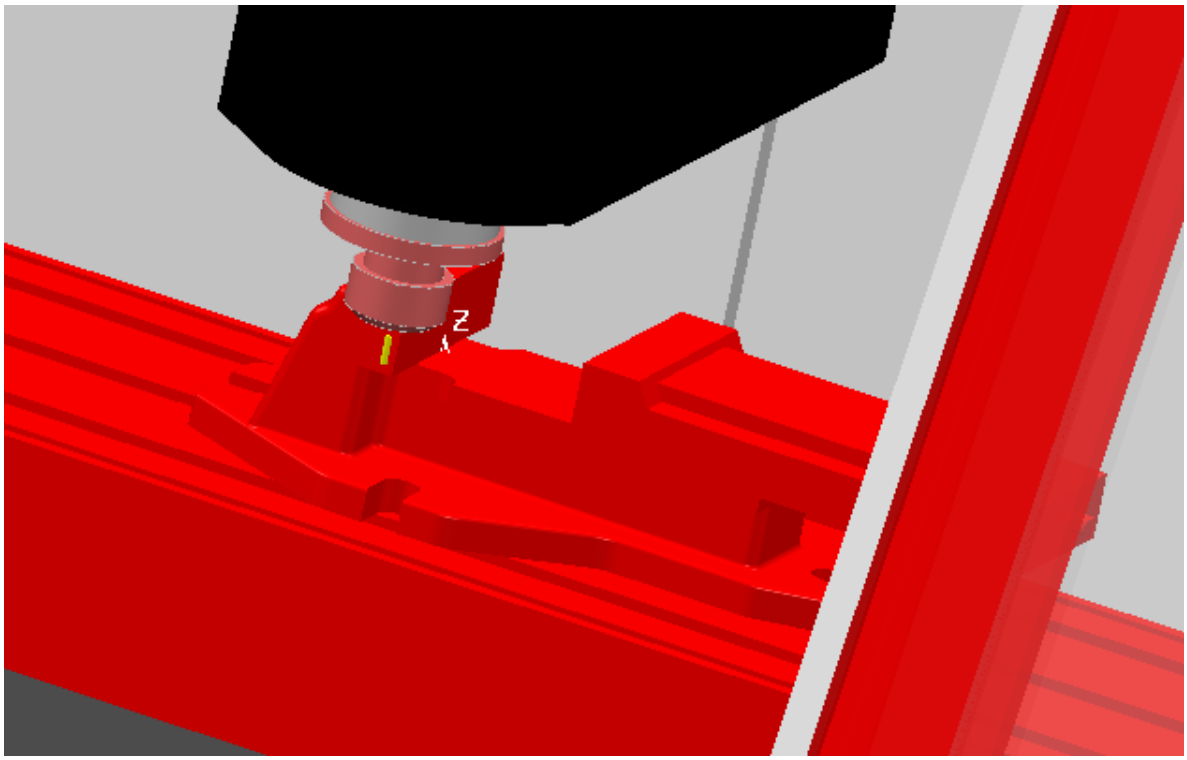
Obrázek 28 - domovská pozice tříosé varianty stroje

Další obrázek znázorňuje kolizní stav řezné části nástroje a typu svěráku, který se běžně na tomto stroji používá.



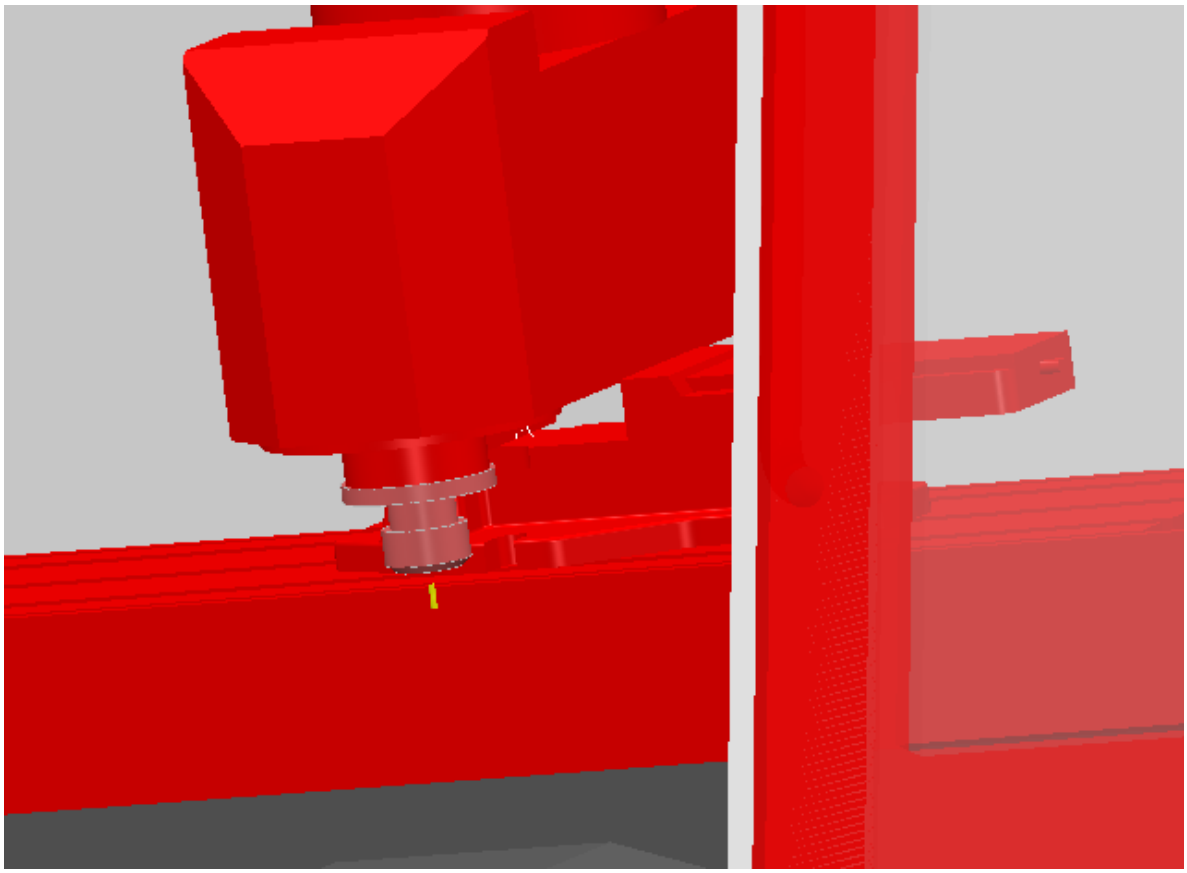
Obrázek 29 - kolize nástroje a svěráku

Mezi další kolizní stav, který by při obrábění mohl nastat, je kolize držáku nástroje a svěráku.



Obrázek 30 - kolize držáku nástroje a svěráku

Pro úplnost ještě uvádím možnost kolize hlavy stroje se svěrákem, ke které ale při běžném obrábění pravděpodobně nedojde. V tomto případě by spíše došlo ke kolizi hlavy stroje s obrobkem.



Obrázek 31 - kolize hlavy stroje a svěráku

Po vyzkoušení různých pozic stroje v simulaci lze prohlásit, že tříosá varianta stroje se pohybuje ve vymezených limitech os, které odpovídají reálnému stroji. Detekce kolizí mezi jednotlivými částmi stroje je taktéž zobrazována správně.

5 Varianta modelu stroje s pěti osami

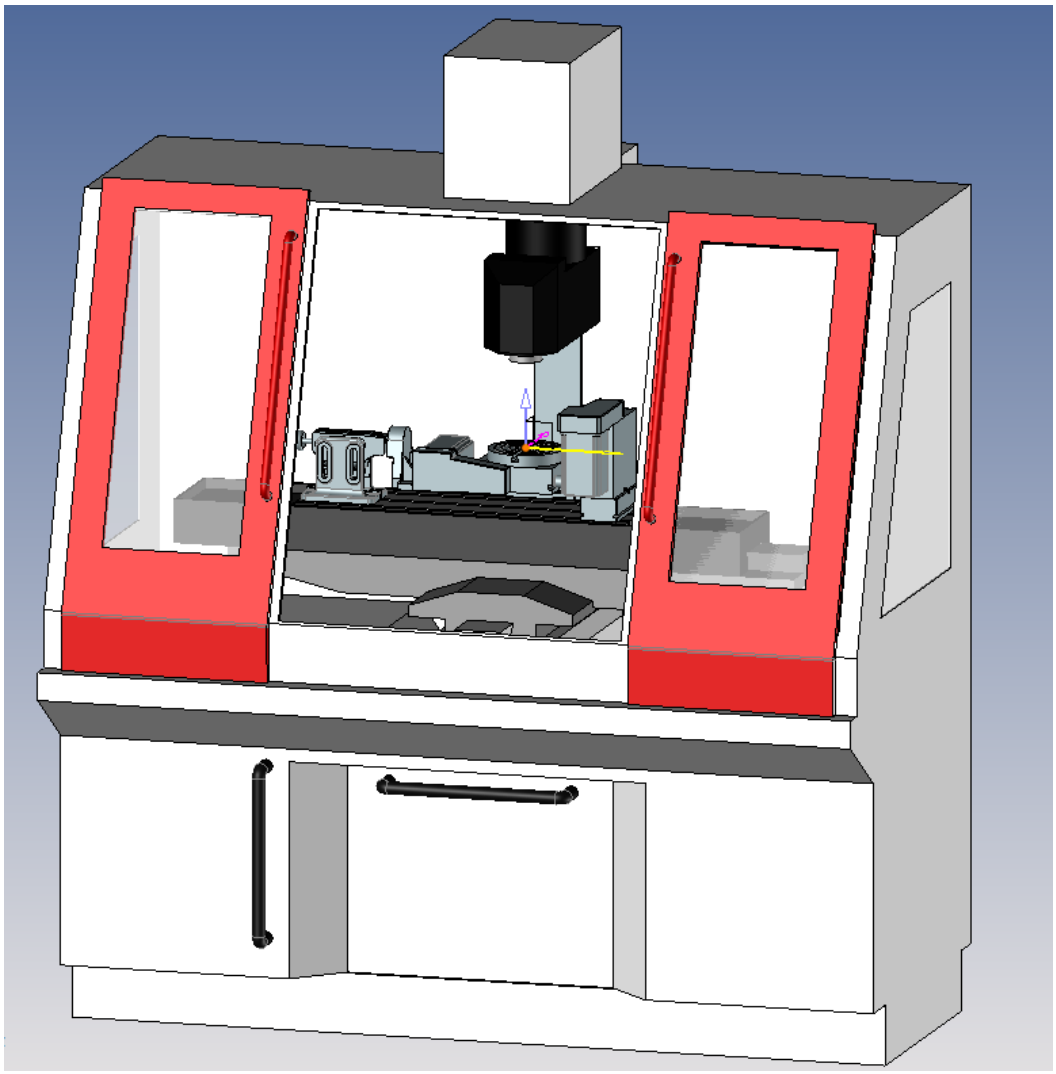
Tato varianta vychází ze stejného základu jako FCM 22 CNC, avšak je doplněná o přídavnou sestavu kolébky a rotačního stolu. Kromě translačních os X, Y a Z přibydou dvě osy rotační. Osa rotace kolébky přidává rotační osu A, neboť kolébka rotuje kolem osy X a rotační stůl rotuje kolem osy Z a přidává tedy rotační osu C. Protože obě přídavné osy jsou umístěny na stole stroje, jedná se o typ pětiosého stroje stůl – stůl.

5.1 Úprava modelu FCM 22 CNC

Při přípravě modelu v pětiosé variantě jsem vycházel ze své základní sestavy stroje FCM 22 CNC ve třech osách a přídavnou sestavu pro frézování v pěti osách jsem převzal ze závěrečné práce bývalého studenta pana Igora Bochkova. Tuto sestavu kolébky jsem přeměřil a pro potřeby simulace zjednodušil, avšak důležité rozměry zůstaly zachovány. Jednotlivé modely komponent sestavy jsem musel znovu poskládat dohromady, protože v halových laboratořích fakulty strojní se oproti závěrečné práci pana Bochkova montuje tato sestava otočená o úhel 180° kolem osy Z stroje.

Dále bylo potřeba přesunout globální souřadnicový systém sestavy z povrchu stolu pro tříosé frézování na střed povrchu rotačního stolu sestavy pro pětiosé frézování.

Kompletní sestavu stroje lze vidět na obrázku na následující stránce.



Obrázek 32 - stroj se sestavou pro obrábění v pěti osách

5.2 Příprava modelu v softwaru PowerShape

Postup pro získání součástí ve formátu .dmt v programu PowerShape je stejný jako při převodu do formátu .dmt u tříosé varianty. Pouze bylo nutné vytvořit soubory .dmt přídavných součástí pro pětiosé frézování. Následně bylo zapotřebí zvětšit tolerance některých komponent pro převod na trojúhelníky, protože při toleranci 0,01 mm součet všech komponent ve formátu .dmt výrazně přesahoval doporučenou velikost 5 Mb.

5.3 Popis přídavné kolébky

Při montáži sestavy pro frézování v pěti osách na stroj FCM 22 CNC je potřeba dávat si pozor na umístění této sestavy vzhledem k okraji stolu pohybujícího se v souřadnicích X a Y. Na stroji totiž často dochází k montáži a demontáži sestavy pro kombinaci frézování ve

třech nebo v pěti osách. Může tedy dojít k nepřesnému umístění sestavy kolébky na stroj. To může mít za následek odchylky mezi simulací a obráběním na reálném stroji.

Dále je potřeba uvažovat, že po montáži sestavy kolébky dojde k výraznému omezení v pracovním prostoru a může snadno dojít ke kolizním stavům mezi nástrojem, sestavou kolébky, hlavou stroje a dalších komponent.

Nejdůležitějšími parametry kromě rozměrů, které jsou definovány virtuálním modelem sestavy je rotační pohyb v osách A a C. Osa C se pohybuje v rozmezí 360° a při její rotaci nedochází k omezení jejího pohybu ostatními částmi stroje. Osa A kolébky má rovněž velmi široký rozsah pohybu, který je však omezený pohonem kolébky. Při montáži kolébky dle přiloženého obrázku modelu je možné natočení kolébky směrem od obsluhy 120° avšak směrem k obsluze pouze 30°. Při větším naklopení již dochází ke kolizi pohonu kolébky se stolem frézky.

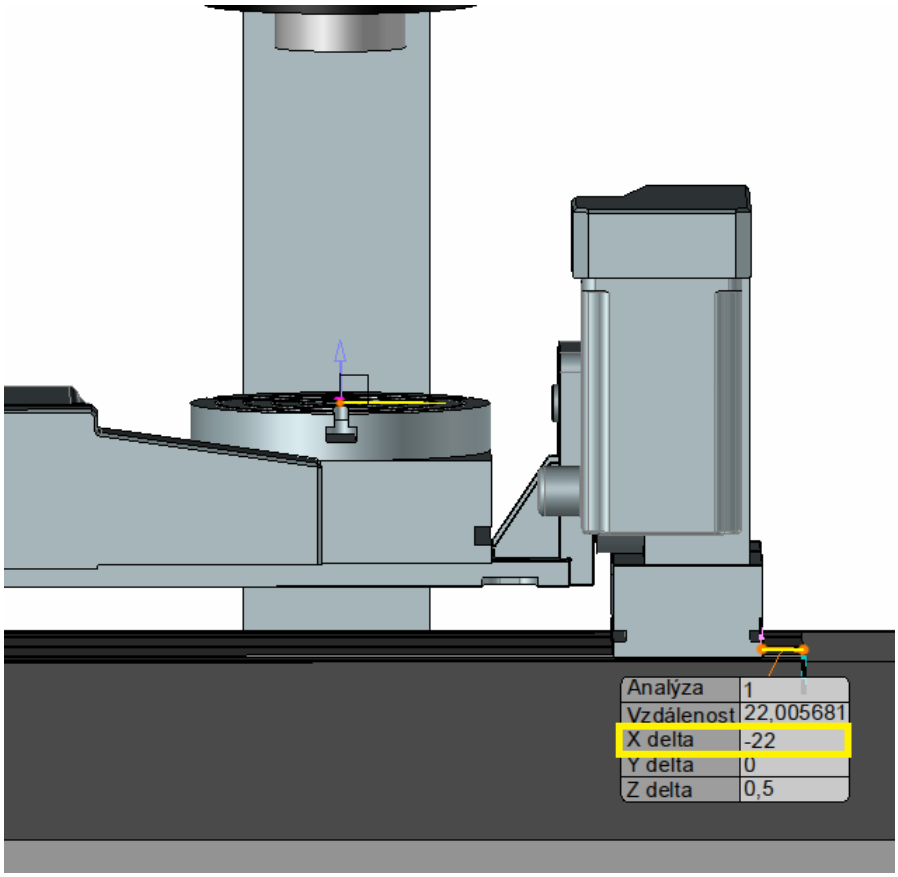
5.4 Úpravy souboru .mtd pro frézování v pěti osách

V této variantě souboru .mtd již nebudu znovu popisovat jednotlivé příkazy, pouze uvedu, jaké změny jsem provedl a z jakého důvodu byly provedeny.

5.4.1 Popis stroje

Již v popisu stroje bylo zapotřebí provést několik změn.

První změnou oproti tříosé variantě stroje FCM 22 CNC je změna hodnot rozsahu jednotlivých os. To z toho důvodu, že globální souřadnicový systém stroje byl přesunut z povrchu středu stolu pohybujícího se v osách X a Y na střed stolu, který má střed rotace v ose C. V simulaci je sestava na stroji umístěna ve vzdálenosti 22 mm od pravého okraje základního upínacího stolu v ose X, na středu stolu tříosé varianty v ose Y a upínací bod nástroje je ve vzdálenosti 250 mm od stolu přídavného zařízení.



Obrázek 33 - umístění přídavné sestavy na stroji

Limity os stroje vzhledem k novému globálnímu souřadnicovému systému jsou následující:

```
<!--*************************************************-->
<!--            Informace o stroji                   -->
<!--*************************************************-->
<!--Výrobce stroje      :Slovtos                      -->
<!--Model stroje        :FCM 22 CNC 5os               -->
<!--Typ stroje          :Vertikální frézka 5os        -->
<!--Limity os           :Xmin -353  Xmax +103         -->
<!--                    :Ymin -123  Ymax +129         -->
<!--                    :Zmin -130  Zmax +250         -->
<!--Tolerance součástí  :0.05                         -->
<!--*****************************************        -->
<!--        Informace of vytvoření a revizi          -->
<!--*****************************************        -->
<!--Vytvořil            :Vít Hájek                    -->
<!--Datum vytvoření     :25.11.2018                   -->
<!--*****************************************        -->
```

Obrázek 34 - limity os pětiosé varianty

Z důvodu plynulosti celé simulace byla zvýšena tolerance součástí z 0,01 mm na 0,05 mm.

5.4.2 Definice připojovacích bodů

V tomto bloku příkazů došlo ke změně Z souřadnice, aby hodnota korespondovala s upravenou vzdáleností vřetene od rotačního stolu přídavné sestavy.

```
<!--*********************************************-->
<!--            Připojovací body                 -->
<table_attach_point PART="table" X="0" Y="0" Z="0" />
<head_attach_point  PART="head" X="0" Y="0" Z="250" I="0" J="0" K="1"/>
```

Obrázek 35 - připojovací body pětiosé varianty

5.4.3 Popis statických součástí stroje

U popisu statických součástí stroje nedošlo oproti předchozí variantě k žádným výrazným změnám. Pouze se změnila velikost tolerance těchto součástí při exportu, ta však nemá zásadní vliv na funkčnost celé simulace.

5.4.4 Popis pohyblivých částí v souboru .mtd

U definice hlavy stroje se změnila vzdálenost rotačního stolu od upínacího bodu nástroje, bylo tedy nutné tuto vzdálenost zapsat i v tomto bloku. Taktéž se změnily i hodnoty u limitu osy Z, protože oproti tříosé variantě došlo k posunutí globálního souřadnicového systému.

```
<!-- Hlava stroje-->
    <machine_part>
        <axis>
            <control_info ADDRESS="Z" VALUE="250" HOME="250" MIN="-90" MAX="250" />
            <simple_linear I="0" J="0" K="1" />
        </axis>
        <model_list>
            <dmt_file>
                <path FILE="FCM22CNC_5os/hlava_z.dmt" />
                <rgb R="0" G="0" B="0"/>
            </dmt_file>
            <dmt_file>
                <path FILE="FCM22CNC_5os/vreteno.dmt" />
                <rgb R="200" G="200" B="200"/>
            </dmt_file>
        </model_list>
        <machine_part NAME="head" />
    </machine_part>
```

Obrázek 36 - popis hlavy stroje pětiosé varianty

K největším změnám došlo při definici pracovního stolu a přídavné páté osy. Jelikož se jedná o typ pětiosého stroje stůl – stůl, bylo potřeba k translačním osám X a Y doplnit dvě rotační osy A a C.

U osy Y jako u jediné nedošlo téměř k žádným změnám kódu, pouze jsem pro lepší přehlednost upravil cestu k souboru .dmt.

Změny osy X se týkají minimálního a maximálního rozsahu této osy z důvodu posunutí globálního souřadnicového systému v jejím záporném směru. Hodnota *VALUE* zůstává 0, protože k celému posunutí došlo již při úpravě modelu a není tedy potřeba posouvat. Dále bylo nutné v této části přidat ty prvky páté osy, které jsou spojené s pohybem osy X, ale samy žádný jiný pohyb nevykonávají. Jedná se o části nastavitelného koníka a vertikální držák s pohonem, který slouží pro rotaci kolébky.

Zápis kódu pro pohyb těchto dvou os lze vyčíst z následujícího obrázku.

```
<!-- Pracovní stůl-->
        <machine_part>
            <axis>
                <control_info ADDRESS="Y" VALUE="0" HOME="0" MIN="-123" MAX="129" />
                <simple_linear I="0" J="-1" K="0" />
            </axis>
            <model_list>
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_5os/pojezd_y.dmt" />
                    <rgb R="100" G="100" B="100"/>
                </dmt_file>
            </model_list>
        <machine_part>
            <axis>
                <control_info ADDRESS="X" VALUE="0" HOME="0" MIN="-353" MAX="103" />
                <simple_linear I="-1" J="0" K="0" />
            </axis>
            <model_list>
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_5os/stul_xy.dmt" />
                    <rgb R="20" G="20" B="20"/>
                </dmt_file>
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_5os/konik_horni_cast.dmt" />
                    <rgb R="150" G="150" B="150"/>
                </dmt_file>
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_5os/konik_spodni_cast.dmt" />
                    <rgb R="150" G="150" B="150"/>
                </dmt_file>
                <dmt_file>
                    <path FILE="FCM22CNC_5os/motor_vertik.dmt" />
                    <rgb R="20" G="20" B="20"/>
                </dmt_file>
            </model_list>
```

Obrázek 37 - popis posuvných os pětiosé varianty

Nyní, po úpravě definic obou posuvných os X a Y, přichází na řadu přidání rotačních os sestavy kolébky. Vzhledem k návaznosti jednotlivých os je vždy nejlepší zachovat posloupnost pohybu od základu stroje. Tedy jako první jsem definoval osu Y, poté osu X a

pro zachování posloupnosti je potřeba pokračovat rotační osou A, tedy rotací samotné kolébky.

Kolébka osy A se nachází v modelu v základní poloze, není tedy opět potřeba měnit hodnotu *VALUE*. Kolébka při takové montáži, jaká je zobrazena na obrázku sestavy, má rozsah pohybu -30° směrem k obsluze a +120° směrem od obsluhy stroje. Příkaz *<simple rotary X="0" Y="0" Z="0"* udává, že se jedná o rotační osu s nulovou vzdáleností od globálního souřadnicového systému. Dále zde opět definujeme veškeré součásti, u kterých chceme zajistit pohyb v ose A. V tomto případě se jedná o kolébku, držák s motorem pro rotaci osy C a vertikální desku, která zajišťuje uložení kolébky z pravé strany.

```
172     <machine_part>
173         <axis>
174             <control_info ADDRESS="A" VALUE="0" HOME="0" MIN="-30" MAX="120" />
175             <simple_rotary X="0" Y="0" Z="0" I="-1" J="0" K="0" />
176         </axis>
177         <model_list>
178             <dmt_file>
179                 <path FILE="FCM22CNC_5os/kolebka.dmt" />
180                 <rgb R="150" G="150" B="150"/>
181             </dmt_file>
182             <dmt_file>
183                 <path FILE="FCM22CNC_5os/motor_horiz_bez_stolu.dmt" />
184                 <rgb R="150" G="150" B="150"/>
185             </dmt_file>
186             <dmt_file>
187                 <path FILE="FCM22CNC_5os/vertik_rot_deska.dmt" />
188                 <rgb R="150" G="150" B="150"/>
189             </dmt_file>
190         </model_list>
```

Obrázek 38 - popis osy A pětiosé varianty

Jako poslední definuji osu C. Její rozsah pohybu je 360°. Jedinou součástí rotace této osy je stůl páté osy. V případě, že bychom v simulaci chtěli použít specifické upínací zařízení pro upnutí obrobku, tak by toto zařízení bylo zapsáno v tomto bloku programu.

Nakonec ještě přiřadím celému bloku, který se týká definice pracovního stolu, příkaz *NAME*, aby byly veškeré komponenty tohoto bloku brány v úvahu při kolizích. Poté ukončím otevření všech součástí pomocí několika příkazů *</machine_part>* a celý program příkazem *</machine>*.

```
191         <machine_part>
192             <axis>
193                 <control_info ADDRESS="C" VALUE="0" HOME="0" MIN="0" MAX="360" />
194                 <simple_rotary X="0" Y="0" Z="0" I="0" J="0" K="-1" />
195             </axis>
196             <model_list>
197                 <dmt_file>
198                     <path FILE="FCM22CNC_5os/stul_pata_osa.dmt" />
199                     <rgb R="150" G="150" B="150"/>
200                 </dmt_file>
201             </model_list>
202             <machine_part NAME="stul_pata_osa" />
203             </machine_part>
204             </machine_part>
205         </machine_part>
206     </machine_part>
207 </machine>
208
```

Obrázek 39 - popis osy C pětiosé varianty

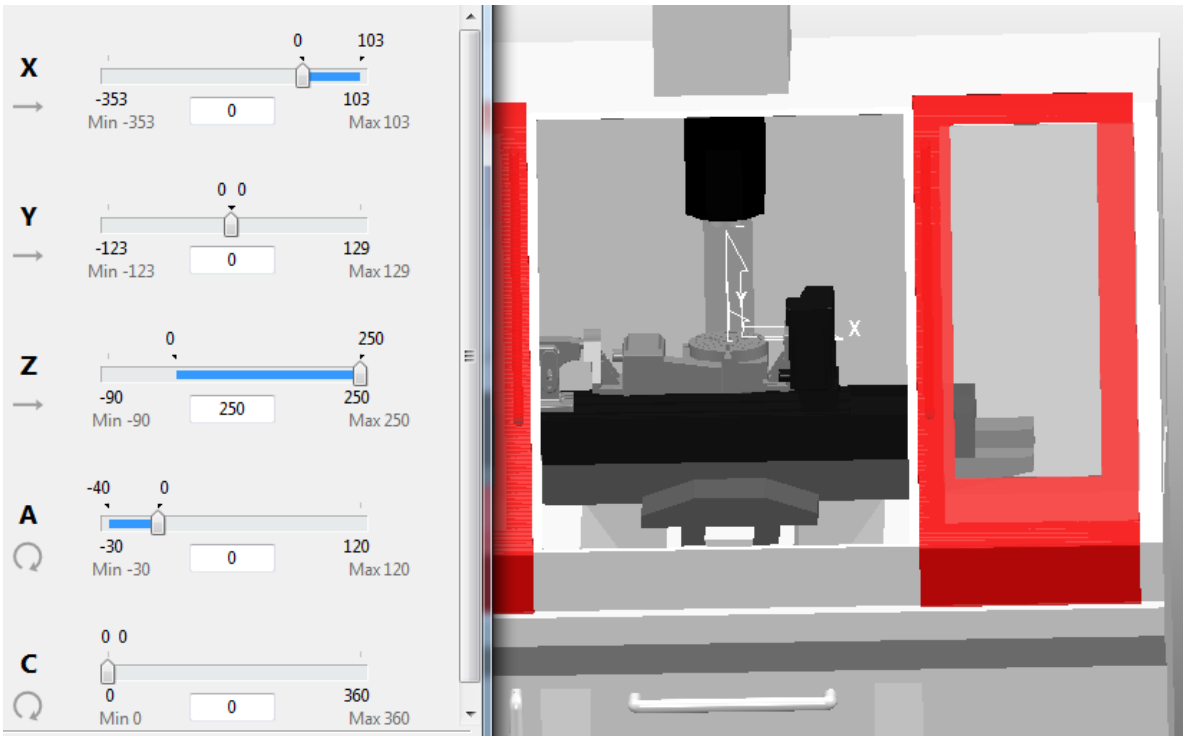
5.5 Testování v prostředí PowerMill

Po dopsání programu je nejdříve potřeba ověřit, zda všechny parametry a definice součástí odpovídají a zda soubor .mtd neobsahuje žádné chyby.

Pokud nějaký problém při samotném importu souboru .mtd nastane, PowerMill ihned zobrazí chybovou hlášku, která na daný problém upozorní. Výhodou tedy je jednoduchá a rychlá identifikace problému, která často odkazuje přímo na konkrétní řádek v programu .mtd.

Po korekci jednotlivých chyb a následném importu modelu stroje lze přejít k samotnému testování kinematiky, zatím však bez obráběného dílu.

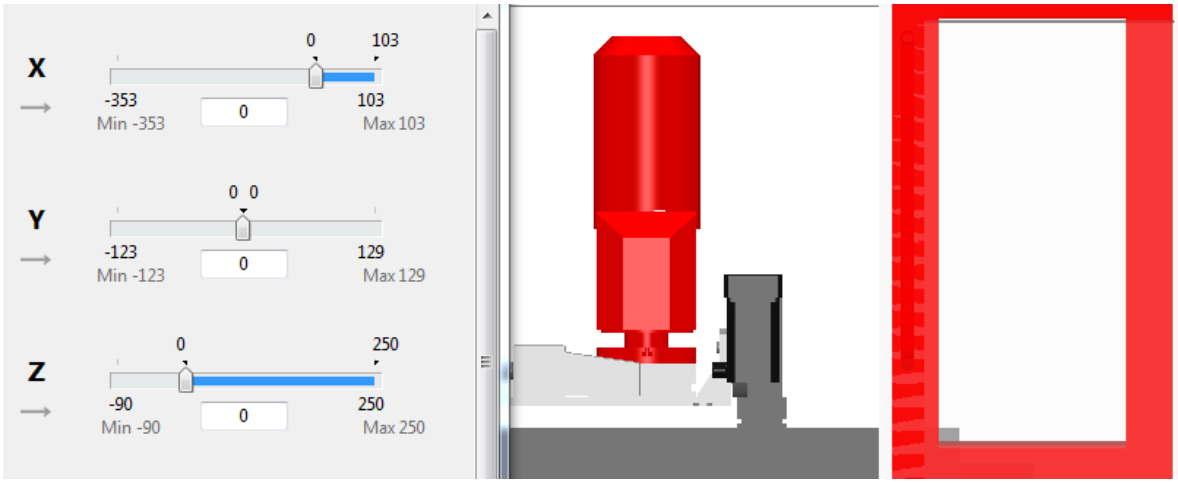
Po stisknutí pravého tlačítka na model stroje vyberu možnost pozice a zobrazí se následující tabulka, kde lze vizuálně otestovat jednotlivé osy.



Obrázek 40 - testování jednotlivých os

Všechny osy se po stisknutí tlačítka *domovská pozice* nachází ve své domovské pozici tak, jak je definováno v souboru kinematiky.

Pohybem lišt jednotlivých os je taktéž potřeba vyzkoušet, zda PowerMill správně odhalí případné kolize součástí stroje. Po otestování kolizí jednotlivých pohyblivých částí stroje jsem zjistil, že PowerMill registruje kolize správě. Jako příklad uvádím kolizi vřetena s rotačním stolem, kdy je vřeteno v poloze Z=0 mm vzhledem k rovině rotačního stolu. Kolidující části stroje jsou vyobrazeny červenou barvou.



Obrázek 41 - test kolize

5.6 Vytvoření databáze nástrojů

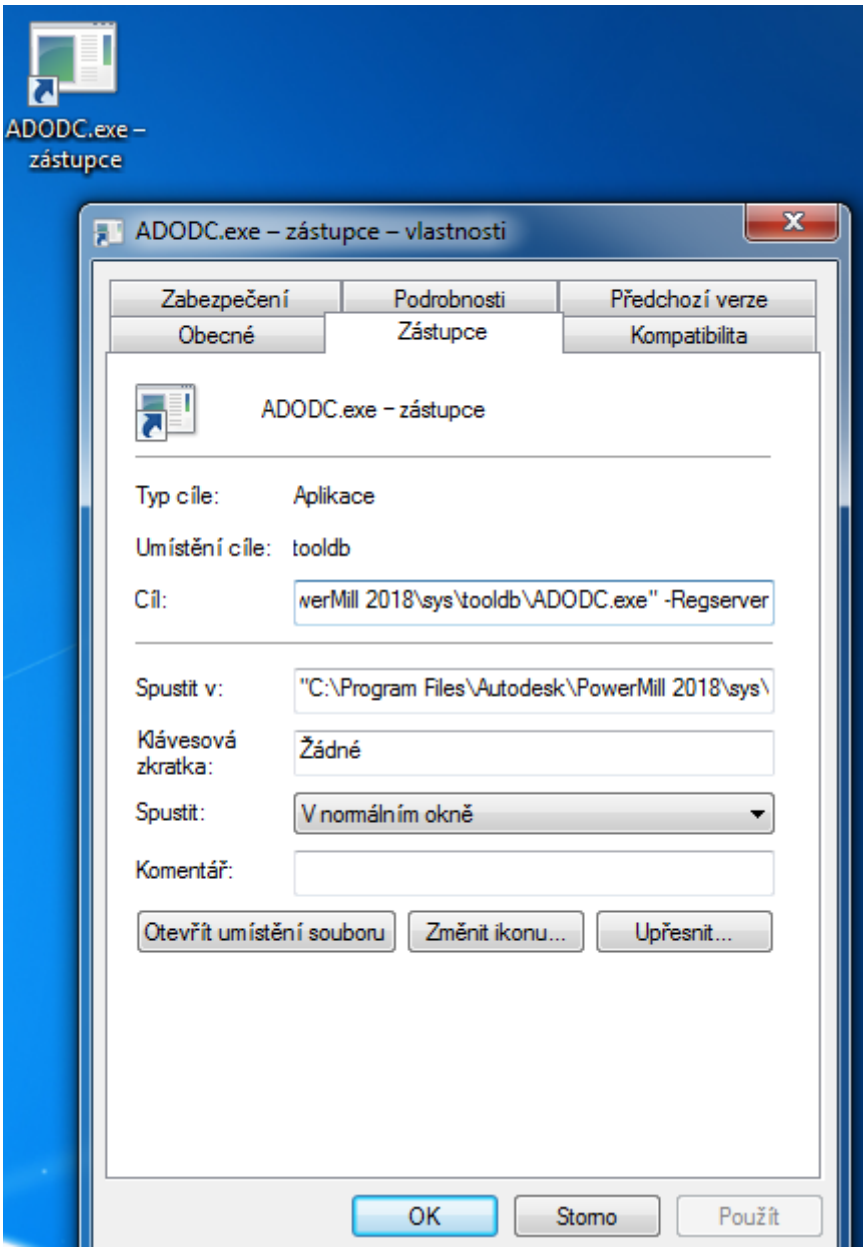
Pro výuku obrábění na Fakultě strojní ČVUT v Praze se na stroji FCM 22 CNC využívá 8 nástrojů pro frézování, které jsou upnuty do stejného typu držáku. Jedná se o 4 frézy válcové a 4 kulové. Protože každý student a vyučující si pro jakýkoli nový projekt obrábění musí znovu definovat nástroje a držák, je vhodné využít databázi nástrojů, kterou PowerMill nabízí.

Vytvořil jsem tedy databázi těchto nástrojů dle rozměrů, které jsou uvedeny v katalogu nástrojů pro stroj FCM 22 CNC.

Po instalaci PowerMillu se může stát, že při spuštění databáze nástrojů zobrazí PowerMill chybovou hlášku, že PowerMill nemůže navázat spojení s databází nástrojů.

Je tedy potřeba učinit následující kroky:

1. Ukončit program PowerMill
2. Stáhnout a nainstalovat Microsoft Visual C++ 2005
3. Provést restart počítače
4. Vytvořit zástupce souboru ADODC.exe na ploše. Cesta k souboru je *"C:\Program Files\Autodesk\PowerMill 2018\sys\tooldb"*
5. Kliknout na tohoto zástupce pravým tlačítkem, vybrat vlastnosti a v kolonce zástupce, kde je uveden cíl *"C:\Program Files\Autodesk\PowerMill 2018\sys\tooldb\ADODC.exe" doplnit na konec příkaz -Regserver*

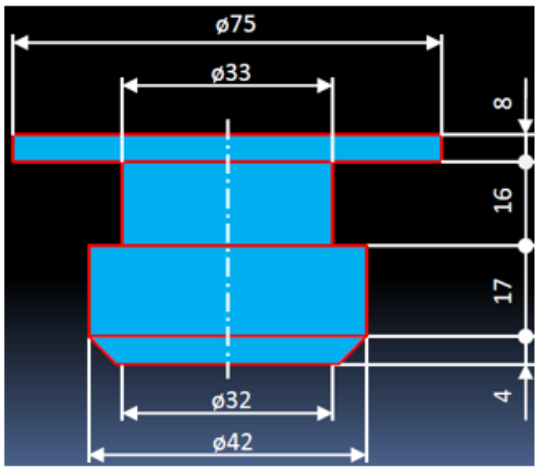


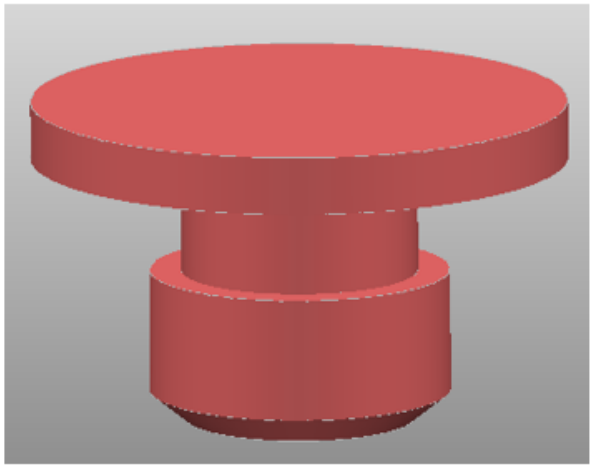
Obrázek 42 - oprava chyby databáze nástrojů

6. Po potvrzení kliknutím na tlačítko OK již bude databáze nástrojů po spuštění PowerMillu dostupná.

5.6.1 Držák nástrojů

Rozměry držáku nástroje používaného při obrábění na fakultním stroji FCM 22 CNC jsou uvedeny na následujícím obrázku. Pro všech 8 nástrojů je použit stejný typ držáku, což usnadňuje modelování sestavy držáku a nástrojů.





Obrázek 43 - držák nástroje [15]

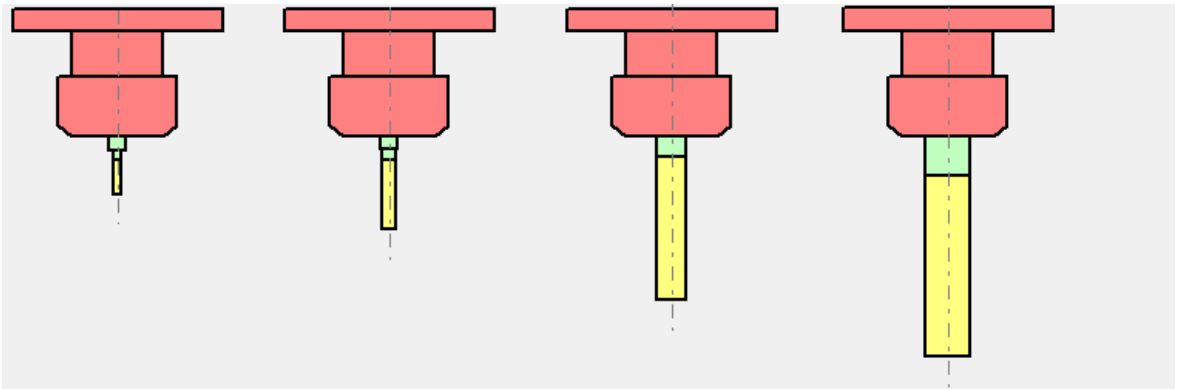
5.6.2 Válcové frézy

Tabulka rozměrů s označením čísla nástroje jednotlivých válcových fréz je zobrazena na obrázku.

Číslo nástroje T	Průměr D [mm]	Délka ostří l [mm]	Vyložení L [mm]	Průměr upnutí d [mm]	Délka l_2 [mm]	Počet břitů z [-]
43	3	12	20	6	15	4
45	5	24	32	6	28	4
50	10	50	57	10		4
66	16	63	77	16		4

Obrázek 44 - parametry válcových fréz [15]

Modely jednotlivých sestav nástrojů, které jsou seřazeny podle velikosti od nejmenšího po největší. Červenou barvou je znázorněn držák nástroje, zelenou pak dřík a žlutá část zobrazuje velikost řezné části nástroje.



Obrázek 45 - sestavy válcových fréz

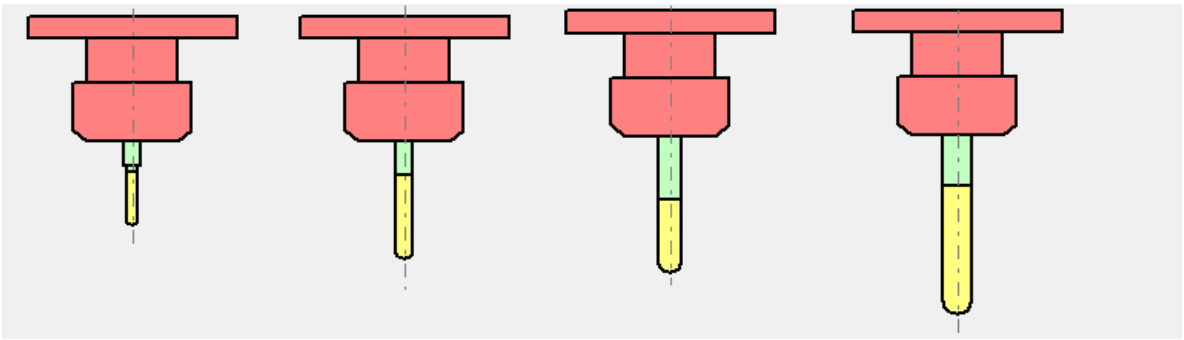
5.6.3 Kulové frézy

Tabulka rozměrů s označením čísla nástroje jednotlivých válcových fréz je zobrazena na obrázku.

Číslo nástroje T	Průměr D [mm]	Délka ostří l [mm]	Vyložení L [mm]	Průměr upnutí d [mm]	Délka l_2 [mm]	Počet břitů z [-]
54	4	19	30	6	21	4
56	6	30	42	6		4
58	8	26	49	8		4
60	10	46	64	10		4

Obrázek 46 - parametry kulových fréz [15]

Pro názornost přikládám porovnání velikosti sestav držáku nástroje s jednotlivými kulovými frézami.



Obrázek 47 - sestavy kulových fréz

U pětiosé varianty stroje FCM 22 CNC je důležité vzít v úvahu velikost nástroje z toho důvodu, že délka nástroje výrazně ovlivňuje velikost pracovního prostoru.

5.7 Simulace obrábění

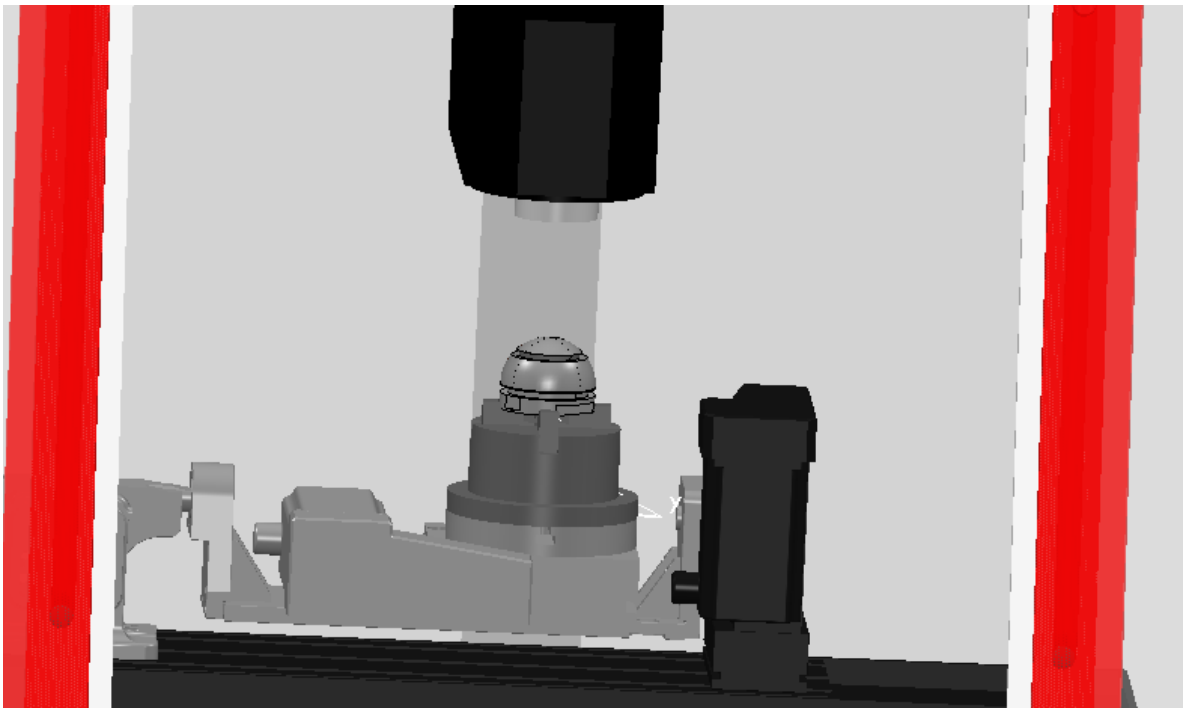
Kromě samostatného testování jednotlivých os je také potřeba vyzkoušet, zda dochází ke správnému pohybu nástroje a stroje při operacích obráběného dílce a jsou-li pohyby stroje mezi jednotlivými operacemi vhodně propojeny a nedochází-li ke kolizím. Tyto kolize propojovacích pohybů bychom totiž při testování jednotlivých os bez upnutého dílce nejspíše nezjistili.

K tomuto účelu jsem tedy vytvořil jednoduchý model obrobku, na kterém otestuji správnost pohybu nástroje vzhledem ke stroji. Dále zda je stroj schopen simulovat obrábění ve více osách a jestli dochází k detekci kolizí mezi nástrojem, držákem nástroje, držákem obrobku a modelem obrobku. Model jsem napozicoval tak, aby jedna drážka, ta větší, byla zčásti zakryta čelistí sklíčidla, abych ověřil kolize nástroje s upínačem

Taktéž bylo nutné upravit pětiosou variantu stroje, ke které jsem vymodeloval a připojil držák obrobku. Jedná se o model čtyřčelisťového sklíčidla, které je k dispozici v halových laboratořích Fakulty strojní ČVUT. Vzdálenost čelistí jsem v modelu nastavil na průměr polotovaru 80 mm. Vzdálenost těchto čelistí nelze v programu PowerMill jednoduše měnit, pouze při použití externích makro souborů.

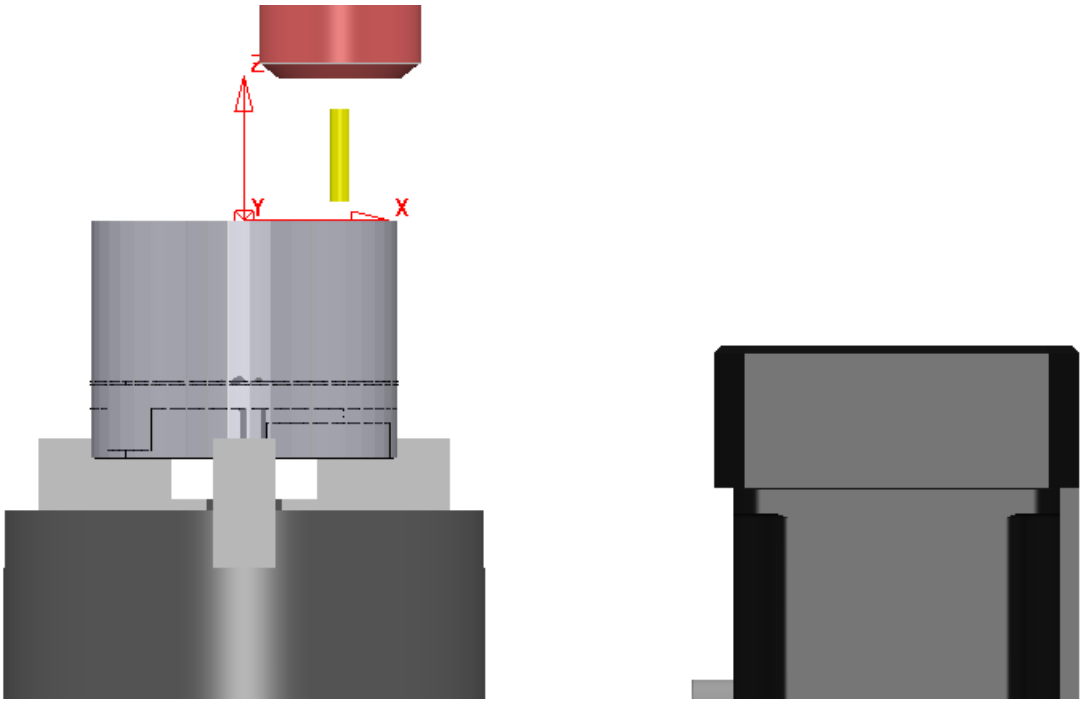
Jako polotovar jsem zvolil kruhovou tyč o průměru 80 mm s délkou 62 mm. Tento polotovar jsem volil s ohledem na malý pracovní prostor, který vzniká po nainstalování přídavné páté osy, s ohledem na délku nástroje a držáku po upnutí do vřetena, a také upínače obrobku.

Celá sestava stroje včetně přídavné páté osy, upínače obrobku a modelu obrobku je vyobrazena na následujícím obrázku.



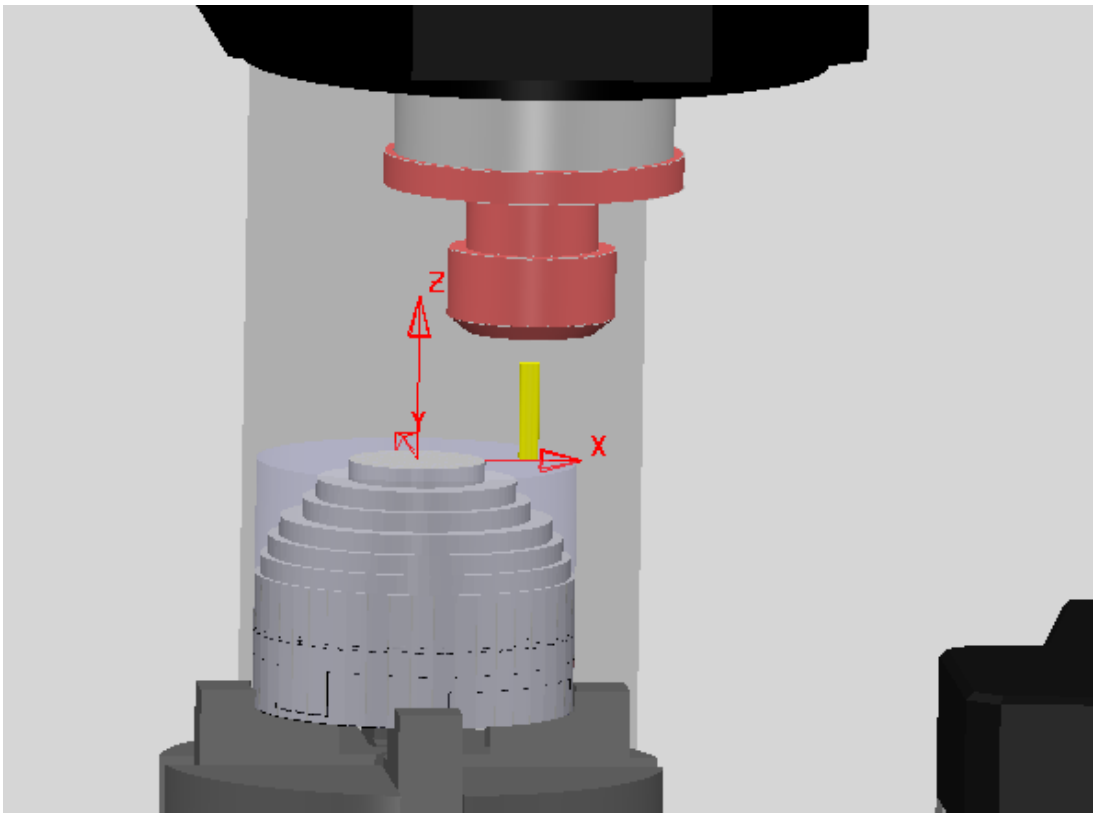
Obrázek 48 - sestava stroje před simulací obrábění

Pro první hrubovací operaci jsem zvolil válcovou frézu o průměru 5 mm, jejíž rozměry jsou uvedeny v tabulce nástrojů. Je viditelná pouze řezná část nástroje a držák nástroje. Dřík nástroje v simulaci není zobrazen, což je pravděpodobně způsobeno grafickou chybou v PowerMillu. Avšak poloha řezné části je stejná jako s dříkem.



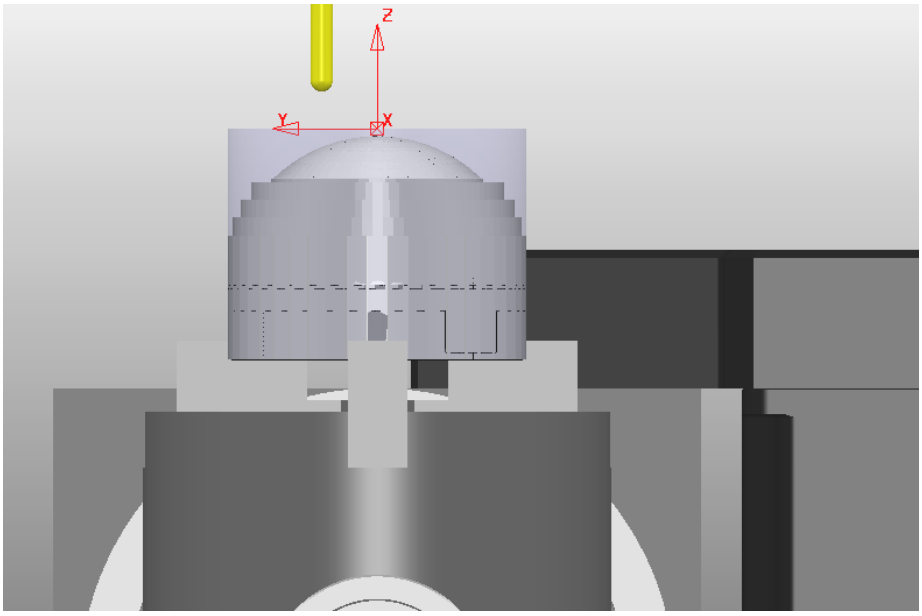
Obrázek 49 - upnutí polotovaru

Hrubovací operace proběhla v pořádku a nepřinesla žádné problémy. Tento pohyb otestoval obrábění v osách X, Y, Z v základní pozici stroje bez natočení os rotačních.

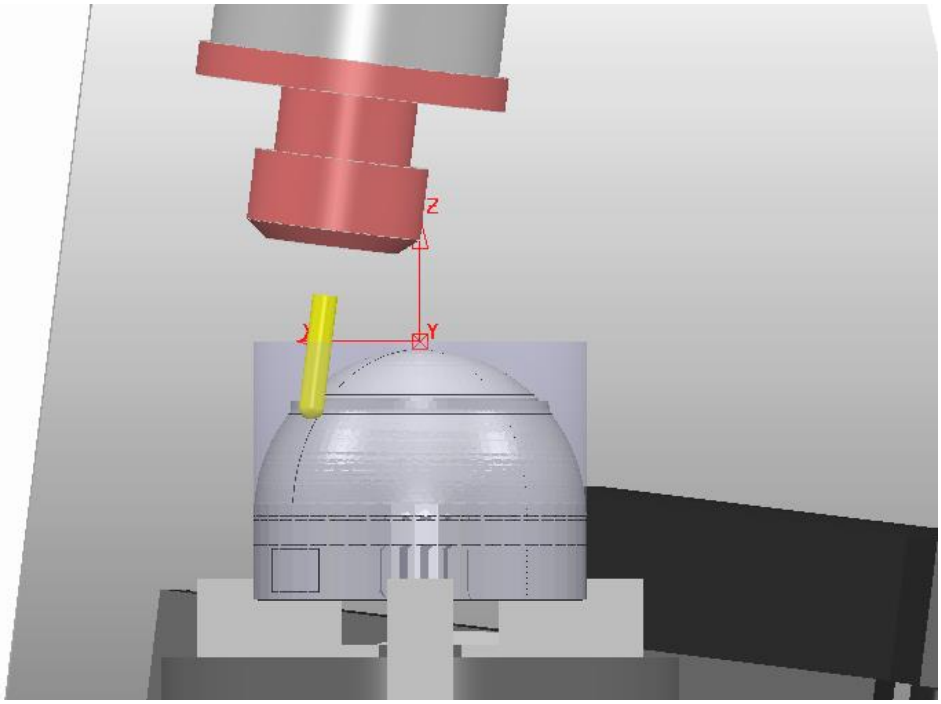


Obrázek 50 - hrubovací operace

Obrábění kulové plochy jsem rozdělil na dvě části. V první části jsem obrobil její horní část až ke drážce. Nástroj je stále kolmý k rovině XY. V druhé části je již osa nástroje vykloněna o úhel 5° dle obrázku. Toto natočení je realizováno pomocí kolébky, tedy osy A. Byla použita kulová fréza o průměru 6 mm. Tato operace taktéž proběhla bez problémů.



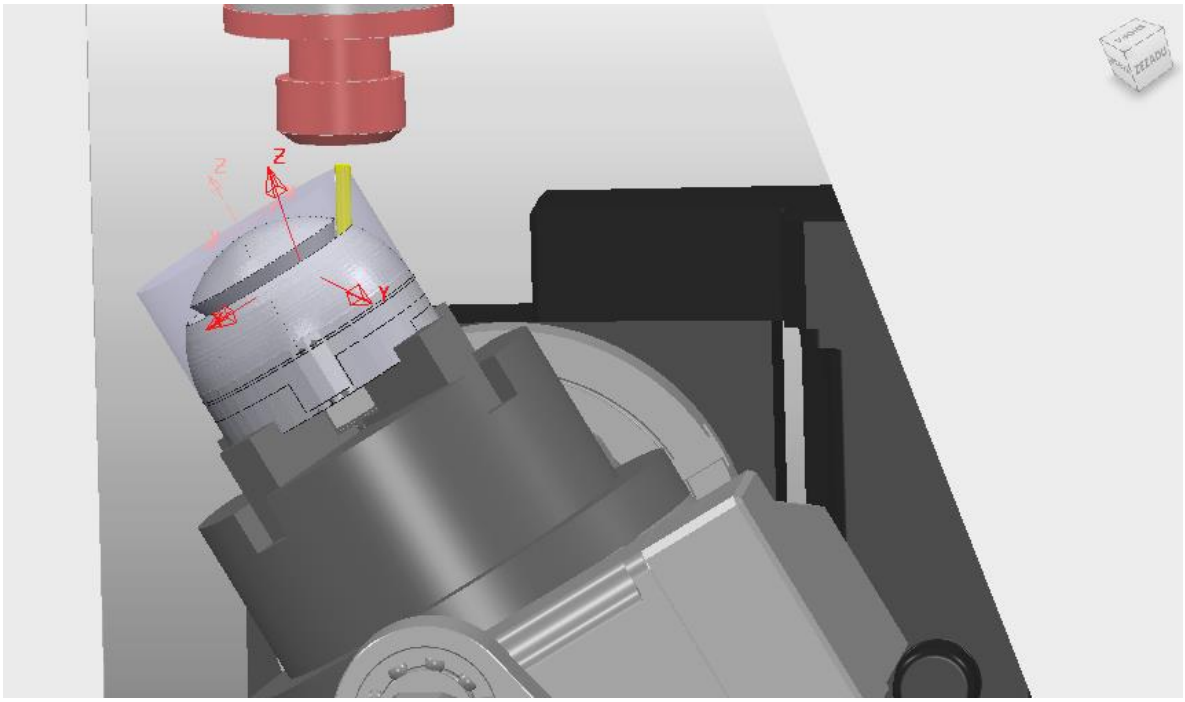
Obrázek 51 - dokončení vrchní části kulové plochy



Obrázek 52 - dokončení spodní části kulové plochy

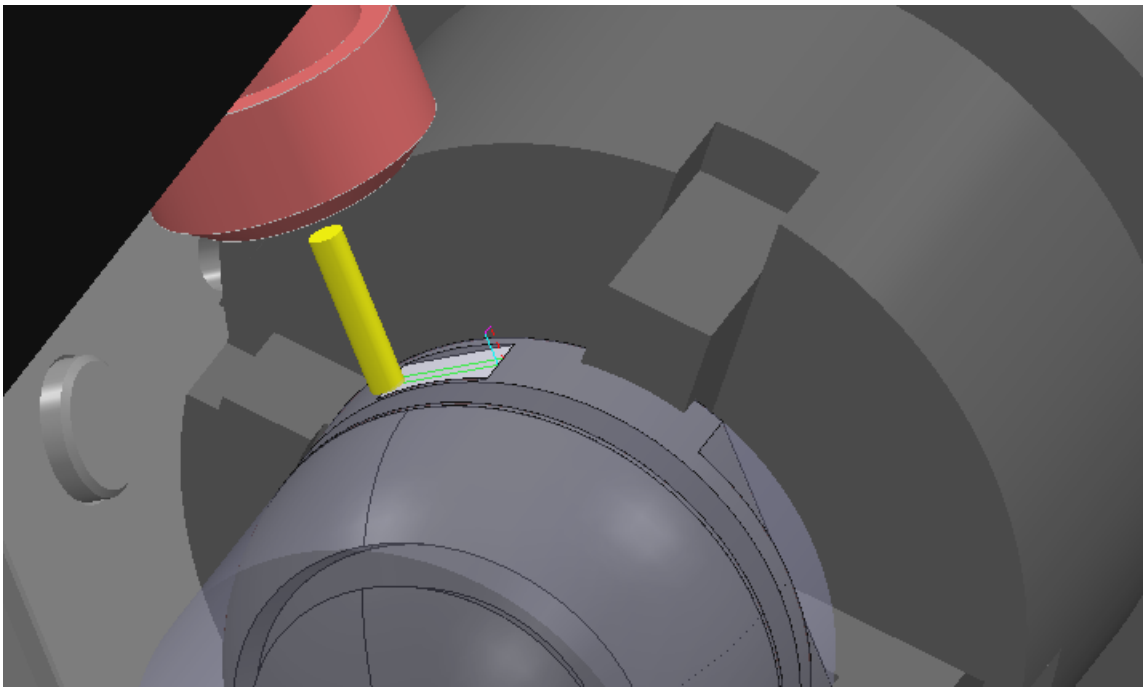
Úkolem třetí operace bylo testování obrábění drážky pod úhlem 30°. V této operaci je tedy kolébka nakloněna v úhlu 30° směrem do prostoru stroje a osa C vykonává rotační pohyb.

V průběhu obrábění taktéž nedošlo ke kolizím.



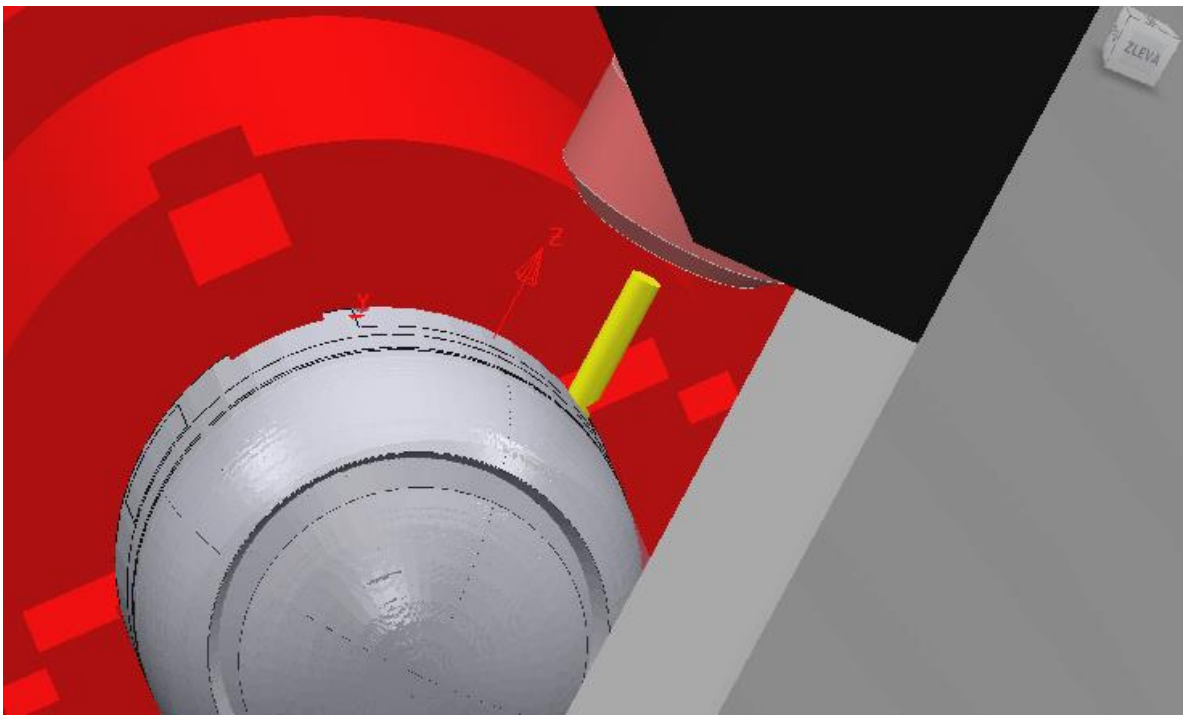
Obrázek 53 - frézování drážky

Ve čtvrté operaci jsem zjišťoval, zda nedochází ke kolizi při frézování drážky mezi dvěma čelistmi sklíčidla při naklopení kolébky o úhel 90° směrem do prostoru stroje. K žádné kolizi nedošlo a simulace proběhla bezproblémově.



Obrázek 54 - frézování rovinné plochy mezi čelistmi

Poslední operace byla navržena tak, aby došlo ke kolizi nástroje a čelisti sklíčidla. Protože v předchozích operacích ke kolizi nedošlo, bylo potřeba zjistit, zda je správně detekována kolize nástroje a některé části stroje.

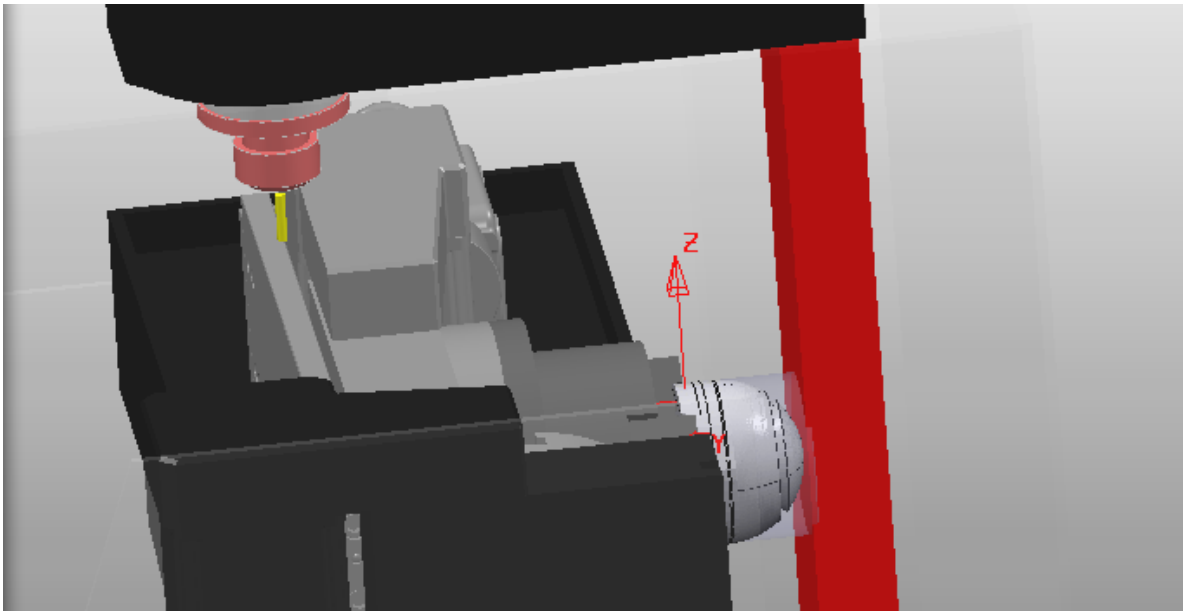


Obrázek 55 - kolize nástroje a čelisti sklíčidla

Ke kolizi a zastavení simulace došlo již při nájezdu nástroje k ploše drážky.

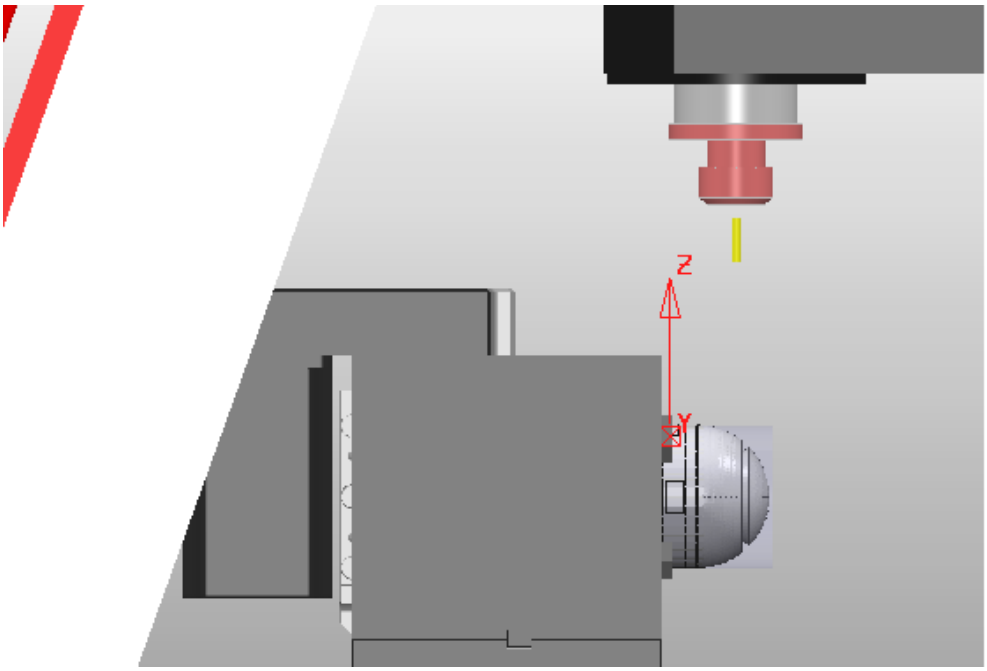
Dále jsem zde zahrnul i další případy kolizí a problémů, které sice při tomto obrábění nenastaly, ale i tak by k nim mohlo v jiném případě docházet.

První problém, který by mohl nastat, je kolize obrobku s částí sloupu, po které se pohybuje hlava stroje. K tomuto stavu může docházet při natočení kolébky směrem k obsluze a následnému překlopení do polohy osy A= 90° směrem do pracovního prostoru stroje. Je to způsobeno tím, že v tomto úhlu obrobek přesahuje pracovní stůl stroje Tato kolize může snadněji nastat s rostoucí výškou obrobku.



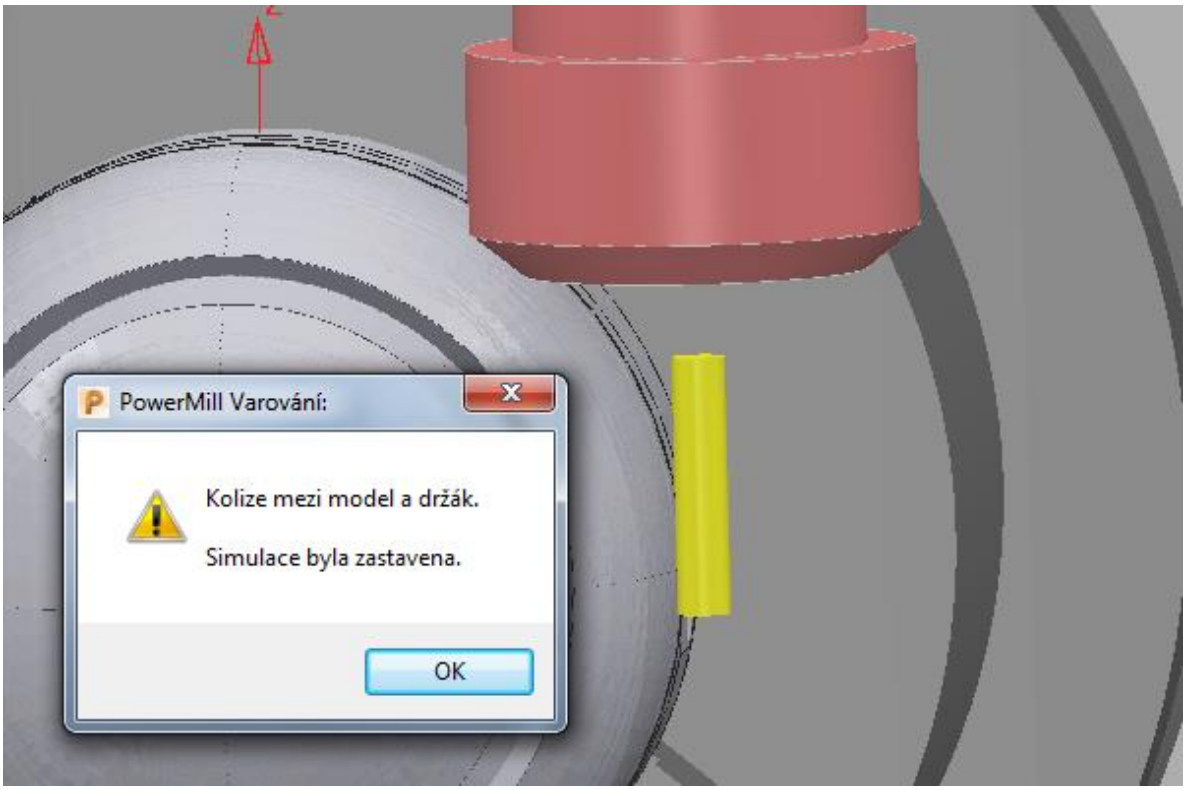
Obrázek 56 - kolize obrobku a stroje

Dále by se mohlo stát, že při obrábění nástroj nedosáhne po celé délce obrobku, jak je vyobrazeno na dalším obrázku. Osa Y je v kladné limitní poloze a nástroj by nebyl schopen frézovat tuto drážku.



Obrázek 57 - nástroj není schopen obrábět po celé délce obrobku

Ke zjištění kolize mezi držákem nástroje a modelem jsem využil pozice, kdy se nástroj vyhne modelu obrobku, avšak dochází k dotyku modelu a držáku. Simulace je přerušena a je nutno tuto kolizi odstranit.



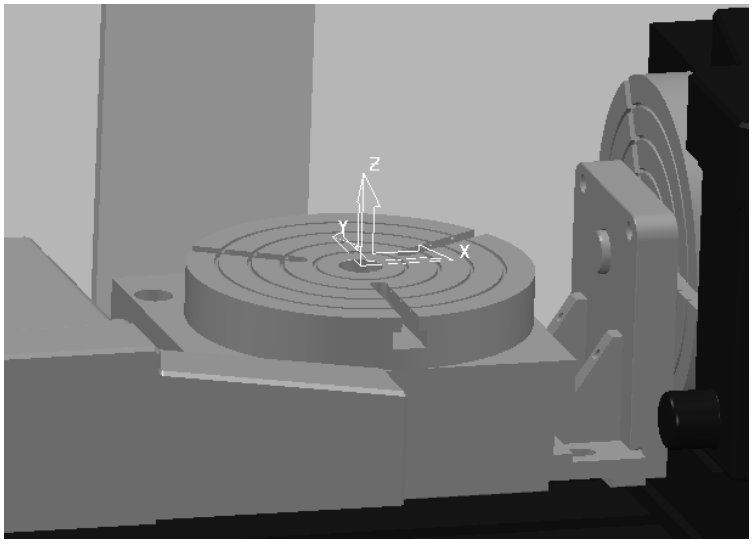
Obrázek 58 - kolize držáku nástroje a obrobku

6 Porovnání pozic reálného stroje a kinematického modelu

Pro porovnání virtuálního modelu a skutečné sestavy stroje jsem zvolil několik pozic, abych zjistil, jak se od sebe model a stroj liší.

Nejprve jsem na stroji pomocí sondy nastavil počátek globálního souřadnicového systému tak, jak je definován v simulaci, tedy na střed rotačního stolu páté osy a jeho povrch.

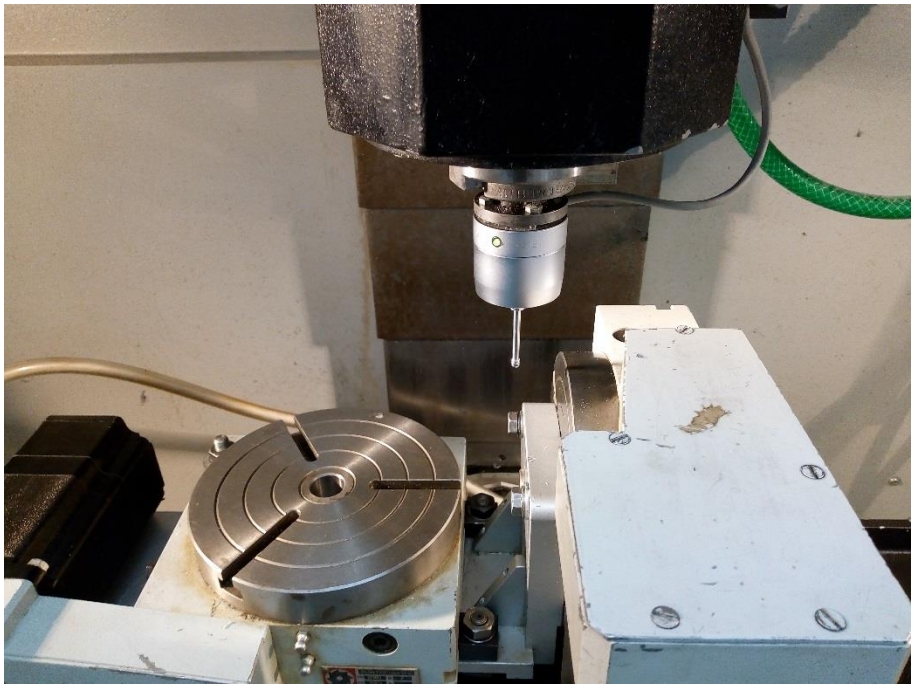
Obrázek 59 - pozice globálního souřadnicového systému na stroji



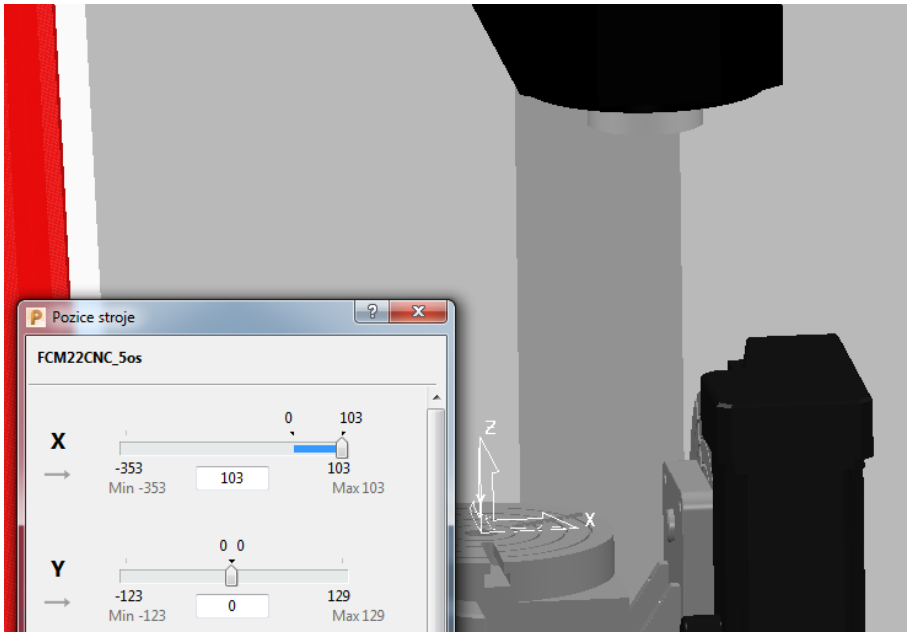
Obrázek 60 - pozice globálního souřadnicového systému v simulaci

Jako první měřenou polohu jsem zvolil maximální hodnotu v kladném směru osy X. Na stroji jsem při dosažení koncového spínače naměřil hodnotu 111 mm. V simulaci je maximální hodnota v kladném směru osy X 103 mm. Tento velký rozdíl byl způsoben tím,

že celá sestava na skutečném stroji byla namontována s posunutím 6 mm v ose X oproti modelu pro simulaci. Odchylka 2 mm je pravděpodobně způsobena nepřesností měření v kombinaci s nepřesností montáže této sestavy a sestavením jednotlivých komponent v modelu.

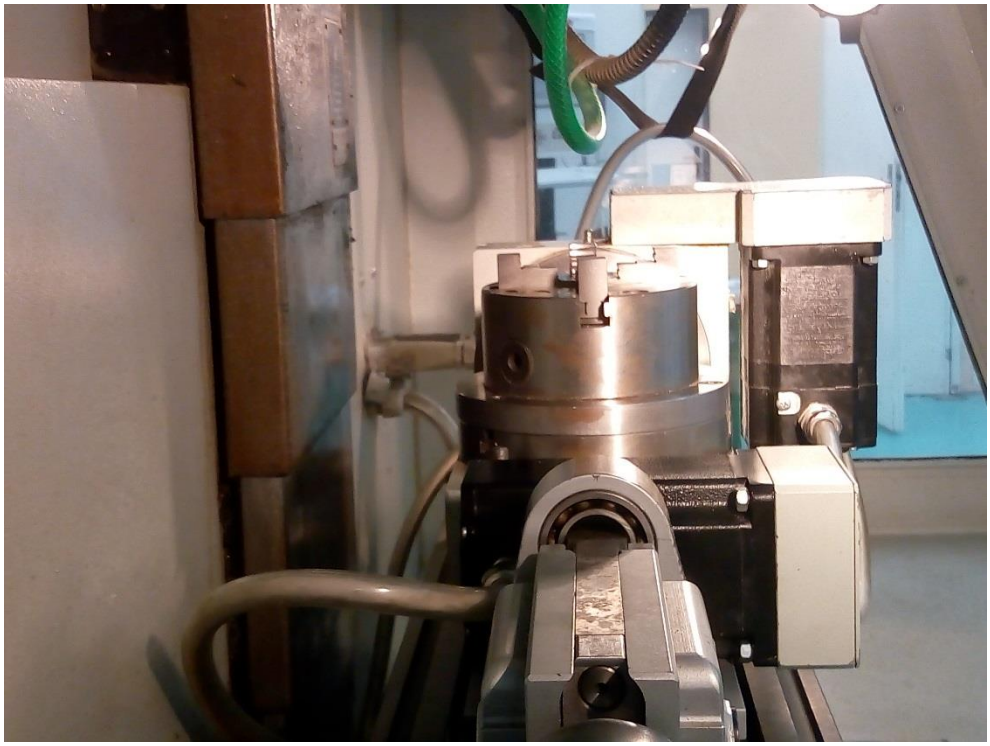


Obrázek 61 - strojní limit osy X v kladném směru

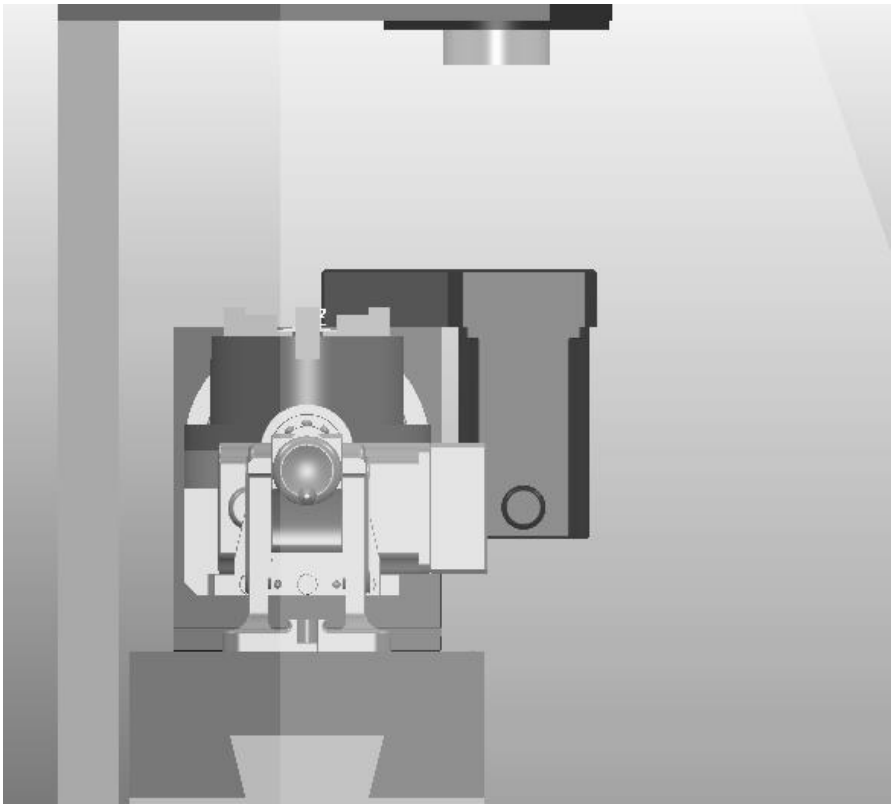


Obrázek 62 - limit osy X v kladném směru v simulaci

Jako další polohu jsem zvolil limitní vzdálenost v záporném směru osy Y. Poloha v ose Y je oproti ose X přesnější, protože sestava přídavné osy je vždy umisťována na střed základního pracovního stolu, a navíc bylo možné tento limit změřit pomocí řídícího systému stroje. V modelu je limitní vzdálenost -123 mm a na reálném stroji při dosažení koncového spínače -122,9 mm.

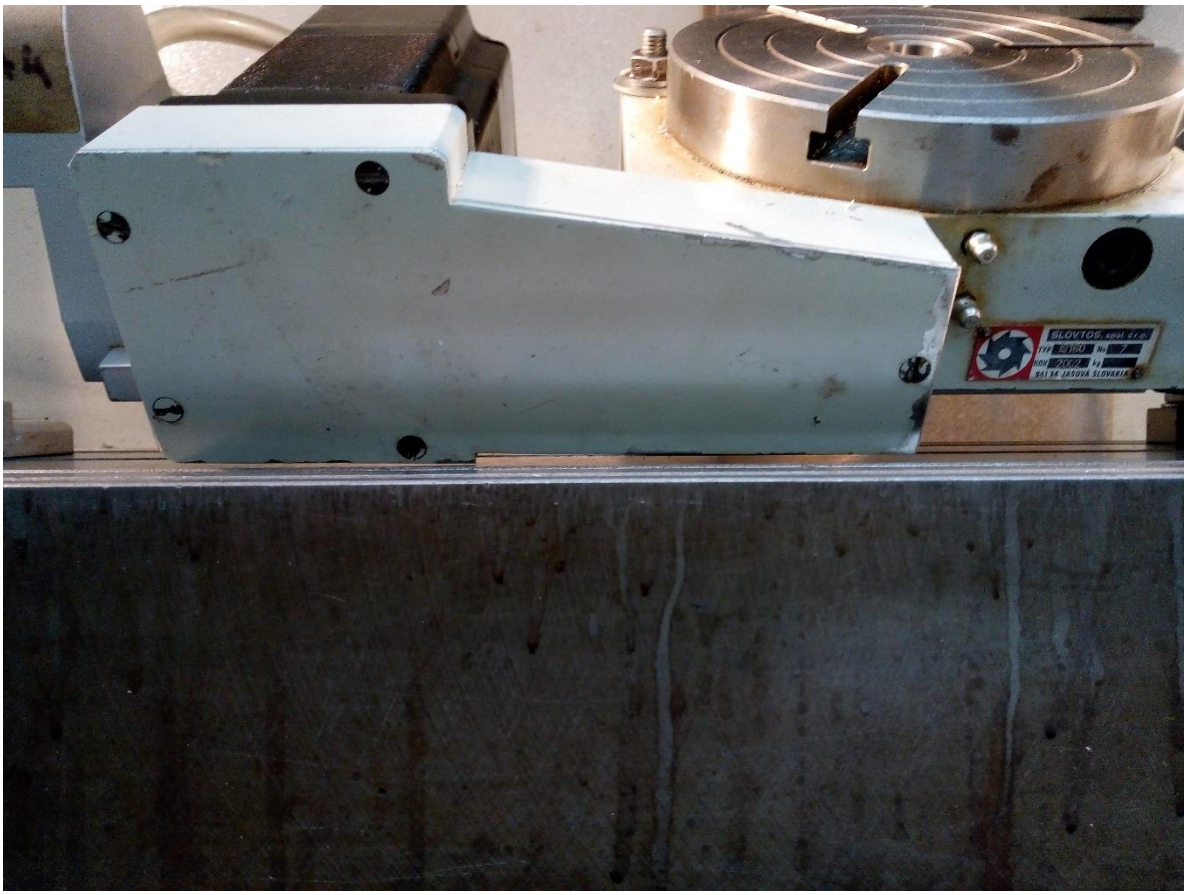


Obrázek 63 - strojní limit osy Y v záporném směru

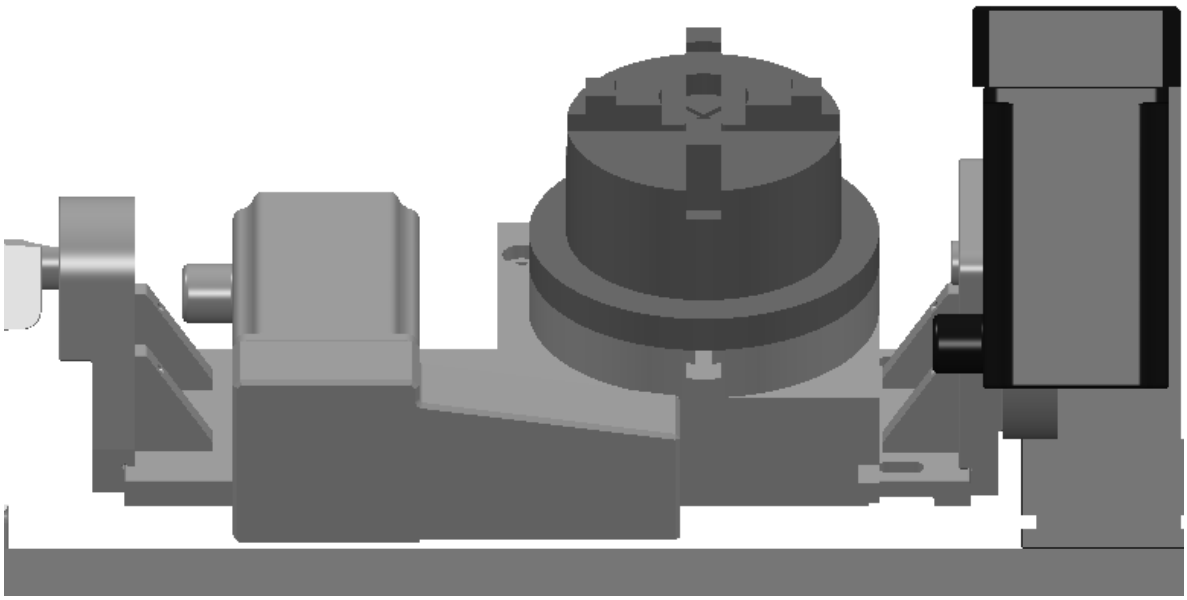


Obrázek 64 - limit osy Y v modelu

Další významnou polohou je natočení kolébky směrem k obsluze, kdy by mohlo dojít ke kolizi kolébky a základního stolu stroje. Natočení kolébky není omezeno koncovým spínačem, proto je při jejím natočení potřeba dbát zvýšené opatrnosti. Při první montáži sestavy jsem strojně naměřil bezpečný rozsah 31° a při druhé montáži 30,5°. V simulaci jsem limit natočení nastavil na 30° z důvodu ochrany před kolizí, kdyby došlo k nepřesné montáži této sestavy.



Obrázek 65 - strojní limit natočení kolébky



Obrázek 66 - limit kolébky v simulaci

7 Machine DNA

Machine DNA je přídavný plugin, který lze využít ve verzi PowerMill Ultimate. Tento plugin slouží k optimalizaci simulace drah v PowerMillu.

K vytvoření dat Machine DNA je potřeba provést výkonnostní test na vybraném stroji. Cílem tohoto testu je vytvoření co nejefektivnější velikosti cyklických křivek a optimálního rozložení bodů. Test na skutečném stroji probíhá bez odebírání materiálu. Při různých pohybech stroje se zjišťují maximální hodnoty posuvů, kterých je stroj schopen dosáhnout.

Pro stroj FCM 22 CNC bohužel není tento test dostupný, protože stroj využívá řídícího systému Mikronex, pro který není tento test vytvořen. K výběru je zde pouze několik celosvětově největších výrobců řídících systémů.

Uvedu zde tedy alespoň stručný postup pro vytvoření Machine DNA.

V prvním kroku vyberu mnou vytvořený model stroje, jeho řídicí systém, zadám hodnotu maximálního posuvu a soubor uložím.

Poté spustím výkonnostní test na skutečném stroji a po dokončení testu zkopíruji výsledky testu na PC, kde provedu následnou analýzu.

Nakonec uložím upravený soubor .mtd a po importu do PowerMillu již mohu optimalizovat dráhy stroje.

8 Závěr

V první části diplomové práce jsem zpracoval rešerši na téma simulací v jednotlivých CAM a CAD/CAM softwarech.

Na rešerši jsem navázal dalším teoretickým tématem, jehož úkolem bylo zjistit, co vše je potřeba udělat pro to, abych mohl vytvořit kinematický model pro simulaci stroje v softwaru Autodesk PowerMill.

Prvním úkolem praktické části bylo vytvoření odpovídajícího modelu stroje FCM 22 CNC. Tento model jsem vytvořil v základní tříosé a pětiosé variantě. Pro lepší práci s těmito modely jsem ještě tyto dvě varianty rozdělil na modely bez upínacího zařízení a s upínacím zařízením obrobků. Tento krok jsem učinil z toho důvodu, že v současné době se u tříosé varianty používá k upnutí konkrétní svěrák a u pětiosé varianty sklíčidlo. Čisté modely bez upínačů obrobků slouží k případnému rozšíření o další upínací prvky těchto variant. Kromě samotných modelů stroje jsem ještě vytvořil databázi nástrojů, které jsou k dispozici ve fakultní laboratoři.

Po vytvoření těchto modelů jsem definoval jejich kinematiku v programu Notepad++. V průběhu testování kinematiky stroje FCM 22 CNC jsem zjistil, že limitní hodnoty jednotlivých os stroje jsou vyšší, než které uvádí výrobce. Tuto skutečnost jsem taktéž zahrnul do své práce.

V další části jsem ověřoval funkčnost samotné simulace. Nejprve pouze pohyby jednotlivých os, poté funkčnost při simulaci obrábění součásti, a nakonec i porovnání limitních poloh v simulaci a na stroji. Též jsem kontroloval, zda jsou správně detekovány veškeré kolize jednotlivých součástí stroje, upínacího zařízení, držáku nástroje, řezné části nástroje a obrobku. Došel jsem tedy k závěru, že samotná simulace probíhá v pořádku a kolize jsou detekovány správně. Je však potřeba si dávat pozor, aby sestava páté osy vždy byla přesně sestavena a namontována, aby mezi simulací obrábění a obráběním na skutečném stroji byly odchylky minimální. Další problém, který by mohl nastat, je poškození kabelů pro pohon osy A a C, které vedou skrz pracovní prostor stroje. Ten by ale pravděpodobně nastal pouze v případě montáže sestavy kolébky při jejím přetočení o 180° kolem osy Z. Při montáži sestavy tak jak je zobrazena v mé práci jsem se s tímto problémem nesetkal.

Posledním bodem diplomové práce je diskuze o možnosti rozšíření simulace o Machine DNA. Využití tohoto pluginu pro stroj FCM 22 CNC není možné, protože Machine DNA není podporován řídicím systémem Mikronex. V tomto případě jsem alespoň naznačil postup tvorby Machine DNA.

Hlavním přínosem celé práce tedy je vytvoření funkčního kinematického modelu stroje FCM 22 CNC pro simulaci v softwaru PowerMill. Tento model odpovídá rozměrům a parametrům skutečného stroje. Navíc může sloužit jako podklad pro vysvětlení problematiky víceosého obrábění studentům fakulty strojní. Dále ho lze z hlediska simulace využít pro kontrolu pohybů stroje před samotným obráběním v laboratořích. Tím, že se kolize zobrazí již v simulaci, lze předejít poškození stroje při obrábění. Definici kinematiky stroje FCM 22 CNC jsem v programu Notepad++ podrobně rozepsal i s přiloženými obrázky, aby bylo možné tento postup případně analogicky aplikovat pro definici dalších strojů v softwaru PowerMill.

9 Seznam použitých zdrojů

[1] *PowerMill: Toolpath animation* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-11-4]. Dostupné z: https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/PWRM-ReferenceHelp/files/GUID-51F5E8D4-A32B-4091-BC56-DC46D0164BBF-htm.html

[2] *PowerMill: ViewMill* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-11-4]. Dostupné z: https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/PWRM-ReferenceHelp/files/GUID-2EE04BA1-5CBF-4E4F-9248-7A511AAA09FD-htm.html

[3] *PowerMill: Machine tool simulation* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-11-4]. Dostupné z: https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/PWRM-ReferenceHelp/files/GUID-7E9FF3A6-B6ED-4493-8C7D-9C7A1D2659A0-htm.html

[4] *FeatureCAM: Tool colors* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-11-5]. Dostupné z: https://knowledge.autodesk.com/support/featurecam/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/FCAM/files/GUID-F38C8923-0861-4FB2-8474-D97C5FF8635A-htm.html

[5] *FeatureCAM: Simulation* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-11-5]. Dostupné z: https://knowledge.autodesk.com/support/featurecam/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/PMAKER-ReferenceHelp/files/GUID-F1205B55-CC88-4321-AC61-AFE2478E4219-htm.html

[6] *FeatureCAM: Machine tool simulation* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-11-5]. Dostupné z: https://knowledge.autodesk.com/support/featurecam/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/FCAM/files/GUID-52B6C7DE-5A7F-421E-8FEF-11D813A6908A-htm.html

[7] *Fusion 360°: Toolpath simulation* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-11-5]. Dostupné z: https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID76F8D8EF-2725-4203-944B-B9345936DDDB

[8] Kunzo, Adam Ing. *Videokonzultace 2018*

[9] Siemens NX: Contour profile tolerance. In: *Siemens* [online]. 2017 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Discussion-Forum-NX-Manufacturing/Contour-Profile-Tolerance/td-p/434105

[10] *Siemens NX: Postprocessing and Machining Simulation* [online]. 2018 [cit. 2018-11-8]. Dostupné z: https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/manufacturing-planning/postprocessing-machining-simulation.html

[11] LOUCKÝ, Milan. Konstrukter.cz: Pokročilé simulace obrábění v prostředí NX CAM. *Konstrukter.cz* [online]. 2015, 23.2.2015, **2015**(2) [cit. 2018-11-9]. Dostupné z: https://www.konstrukter.cz/pokrocile-simulace-obrabeni-v-prostredi-nx-cam/

[12] TopSolid CAM: Toolpath. In: *CADCAMtechnologyleaders* [online]. 2012, 2012 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: http://cadcamtechnologyleaders.blogspot.com/p/topsolid-cadcam.html

[13] TopSolid´Cam: Machine tool simulation. In: *TopSolid* [online]. 2016, 2016 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: https://www.topsolid.com/products/topsolidcam.htm

[14] *Autodesk PowerMill: Mtd user guide* [pdf přístupné ze softwaru PowerMill]. 2014, 2014 [cit. 2018-11-20].

[15] *Katalog nástrojů U12134* [fakultní server]. In: Ústav obrábění, projektování, metrologie Fakulty strojní ČVUT v Praze, 2017, 29.10.2017 [cit. 2018-12-4].

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 - rozlišení drah v PowerMillu [1] 11
Obrázek 2 - barevné rozlišení obrobených ploch dle nástroje [2] 11
Obrázek 3 - simulace včetně modelu stroje v PowerMillu [3] 12
Obrázek 4 - barevné rozdělení ploch dle nástroje [4] 13
Obrázek 5 - strojní simulace ve FeatureCAMu [6] 14
Obrázek 6 - strojní simulace s výměnou nástrojů [6] 14
Obrázek 7 – simulace drah nástroje v programu Fusion 360° [7] 15
Obrázek 8 - verifikace drah nástroje v programu HSM [8] 16
Obrázek 9 - strojní simulace v HSM [8] 16
Obrázek 10 - odchylka teoreticky obrobené plochy a modelu [9] 17
Obrázek 11 - strojní simulace softwaru NX [10] 17
Obrázek 12 - verifikace dílce strojní simulace v NX [10] 18
Obrázek 13 - simulace drah nástroje v programu TopSolid´CAM [12] 19
Obrázek 14 - strojní simulace v TopSolid´CAM [13] 20
Obrázek 15 - příklad správného umístění globálního souřadnicového systému [14] 23
Obrázek 16 - model FCM 22 CNC před úpravou 28
Obrázek 17 - model FCM 22 CNC po úpravě 28
Obrázek 18 - stroj FCM 22 CNC 29
Obrázek 19 - zjednodušený příklad souboru .mtd [14] 32
Obrázek 20 - popis stroje FCM 22 CNC 33
Obrázek 21 - popis postprocesoru 34
Obrázek 22 - připojovací bod stolu 34
Obrázek 23 - připojovací bod hlavy stroje 34
Obrázek 24 - popis statických částí stroje 35
Obrázek 25 - vyjmutí skupin prvků z detekce kolizí 36
Obrázek 26 - definice hlavy stroje 37
Obrázek 27 - definice pracovního stolu 39
Obrázek 28 - domovská pozice tříosé varianty stroje 40
Obrázek 29 - kolize nástroje a svěráku 40
Obrázek 30 - kolize držáku nástroje a svěráku 41
Obrázek 31 - kolize hlavy stroje a svěráku 42
Obrázek 32 - stroj se sestavou pro obrábění v pěti osách 44
Obrázek 33 - umístění přídavné sestavy na stroji 46
Obrázek 34 - limity os pětiosé varianty 46
Obrázek 35 - připojovací body pětiosé varianty 47
Obrázek 36 - popis hlavy stroje pětiosé varianty 47
Obrázek 37 - popis posuvných os pětiosé varianty 48

Obrázek 38 - popis osy A pětiosé varianty 49
Obrázek 39 - popis osy C pětiosé varianty 50
Obrázek 40 - testování jednotlivých os 51
Obrázek 41 - test kolize 51
Obrázek 42 - oprava chyby databáze nástrojů 53
Obrázek 43 - držák nástroje [15] 54
Obrázek 44 - parametry válcových fréz [15] 54
Obrázek 45 - sestavy válcových fréz 55
Obrázek 46 - parametry kulových fréz [15] 55
Obrázek 47 - sestavy kulových fréz 55
Obrázek 48 - sestava stroje před simulací obrábění 57
Obrázek 49 - upnutí polotovaru 58
Obrázek 50 - hrubovací operace 58
Obrázek 51 - dokončení vrchní části kulové plochy 59
Obrázek 52 - dokončení spodní části kulové plochy 59
Obrázek 53 - frézování drážky 60
Obrázek 54 - frézování rovinné plochy mezi čelistmi 61
Obrázek 55 - kolize nástroje a čelisti sklíčidla 61
Obrázek 56 - kolize obrobku a stroje 62
Obrázek 57 - nástroj není schopen obrábět po celé délce obrobku 63
Obrázek 58 - kolize držáku nástroje a obrobku 63
Obrázek 59 - pozice globálního souřadnicového systému na stroji 64
Obrázek 60 - pozice globálního souřadnicového systému v simulaci 64
Obrázek 61 - strojní limit osy X v kladném směru 65
Obrázek 62 - limit osy X v kladném směru v simulaci 65
Obrázek 63 - strojní limit osy Y v záporném směru 66
Obrázek 64 - limit osy Y v modelu 67
Obrázek 65 - strojní limit natočení kolébky 68
Obrázek 66 - limit kolébky v simulaci 68

11 Seznam elektronických příloh

1. Soubory databáze nástrojů pro použití v softwaru PowerMill.
2. Modely jednotlivých variant stroje FCM 22 CNC ve formátu .TopPkg a v přenosovém formátu .stp.
3. Soubory komponent stroje ve formátu .dmt společně se soubory definujícími kinematiku jednotlivých variant .mtd.
4. Model testovacího obrobku ve formátu .stp a projekt obrábění tohoto modelu pro použití v PowerMillu.