



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND  
ROBOTICS

# OBRÁBĚNÍ PROSTOROVÝCH OBJEKTŮ POMOCÍ PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU

ROBOT MACHINING OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. BRONISLAV KOLÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ KUBELA

BRNO 2013



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2012/13

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Bronislav Kolář

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Obrábění prostorových objektů pomocí průmyslového robotu**

v anglickém jazyce:

#### **Robot machining of three-dimensional objects**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je navrhnout pracoviště, které bude schopné pomocí průmyslového robotu KUKA a stacionárně umístěné frézky obrobít libovolný prostorový objekt. Objekt bude zhotoven z lehkého materiálu (např. umělé dřevo, polystyren). Pro účely programování robotu bude využíván program RobotMaster.

Cíle diplomové práce:

1. Navrhnout pracoviště pro obrábění zvolených prostorových tvarů.
2. Návrh nezbytných konstrukčních prvků.
3. Navrhnout řízení celého pracoviště.
4. Navrhnout algoritmus obrábění s využitím programu RobotMaster.
5. Ověřit funkci navrženého pracoviště na demonstrační aplikaci.

Seznam odborné literatury:


1. SICILIANO, B. KHATIB, O. Springer Handbook of Robotics. Springer-Verlag New York, Inc., 2008. 1611 s. ISBN 978-3-540-23957-4
2. PIRES, J. N. Industrial Robots Programming: Building Applications for the Factories of the Future. Springer, 2008. 282 s. ISBN 978-0-387-23325-3
3. NOF, S. Y. Springer Handbook of Automation. Springer, 2009. 1812 s. ISBN 978-3-540-78830-0
4. MONKMAN, G. J., HESSE, S., STEINMANN, R. SCHUNK, H. Robot Grippers. Wiley-VCH Verlag, 2007. 463 s. ISBN 978-3527406197

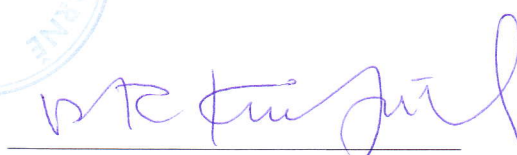
Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Kubela


Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 19.12.2012



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. i
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem obrábění prostorových objektů pomocí průmyslového robotu. Jedná se o metodu, kdy robot v koncovém efektoru drží obráběnou součást, a pomocí stacionárně upnuté frézky obrábí daný dílec. Jsou zde navrženy celkem tři dílce, kde každý z nich demonstruje odlišný styl obrábění. Obráběcí operace jsou zde detailně popsány. K jejich vytvoření byl použit program Mastercam. Dále je popsán převod těchto dat pro průmyslový robot pomocí programu Robotmaster a doporučený algoritmus vytváření obdobných úloh. Je zde také řešen návrh zjednodušeného pracoviště pro demonstrační ukázkou obrobění všech navržených dílců.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

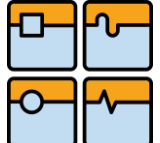
Obrábění pomocí robotů, dílec k nástroji, koncový efektor, Robotmaster, Mastercam, průmyslový robot.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the design of robot machining of three-dimensional objects. Used method is Part to tool, in which robot holds the part in its gripper and with stationary clamped mill, machines the part. Overallly three parts for machining are designed, everyone of them shows the different style of machining. Every machining operations are described in details. For their creation was used program Mastercam. Furthermore is described transfer of the data for industrial robot using program Robotmaster and recomanded algorithm for creation of similar tasks. The design of simplified workplace for demonstrative show of the milling of all the parts is also solved.

## **KEY WORDS**

Robot machining, part to tool, gripper, Robotmaster, Mastercam, industrial robot.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. ii
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

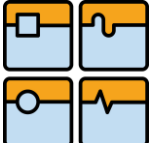
KOLÁŘ, B. Obrábění prostorových objektů pomocí průmyslového robotu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 110 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Kubela.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Obrábění prostorových objektů pomocí průmyslového robotu, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Tomáše Kubely, za použití odborné literatury a jiných informačních zdrojů uvedených v závěru této práce.

V Brně, dne 24. 5. 2013

.....  
Bc. Bronislav Kolář


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. iii
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval mému vedoucímu práce panu Ing. Tomáši Kubelovy, za věnovaný čas a cenné rady při vypracování této diplomové práce. Dále děkuji panu Ing. Aleši Pochylému, za poskytnutí důležitých informací ohledně vytváření virtuálního pracoviště. Děkuji také panu Jiřímu Netopilovi z firmy Sonetech, za poskytnutí doplňujících informací v problematice programování průmyslových robotů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě podporovala po celou dobu studia a také mojí přítelkyni Bc. Ivaně Konečné za poskytnutou morální podporu.


## OBSAH

Abstrakt.....	i
Klíčová slova .....	i
Abstract.....	i
Key words .....	i
Bibliografická citace.....	ii
Prohlášení .....	ii
Poděkování .....	iii
Úvod.....	1
1. Možnost nasazení PRaM v oblasti obrábění .....	2
2. Programování robotů.....	3
2.1 On-line programování .....	3
2.1.1 Teach-in .....	3
2.1.2 Play-back.....	4
2.2 Off-line programování .....	4
2.3 Hybridní programování.....	6
3. Software pro programování robotů .....	6
3.1 CAD/ CAM.....	6
3.2 Mastercam.....	7
3.3 Robotmaster .....	8
3.4 Řetězec 3D dat .....	11
4. Návrh pracoviště .....	12
4.1 Návrh procesu zhotovení dílce.....	12
4.2 Návrh rozložení pracoviště .....	13
4.3 Návrh řízení pracoviště .....	14
4.4 Volba robotu .....	14
4.5 Volba frézky.....	16
4.6 Volba materiálu obrobku .....	17
4.7 Vytvoření demonstračních dílců .....	18
4.7.1 Součást pro 2,5 D obrábění .....	18

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. v
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

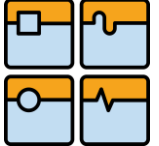
4.7.2	Šachovnicová figurka - věž.....	19
4.7.3	Obecná plocha s textem .....	20
4.8	Volba koncového efektoru .....	21
4.8.1	Upínací modul.....	23
4.8.1.1	Výpočet upínacího tlaku .....	24
4.9	Volba pracovního stolu .....	25
4.10	Návrh upnutí ruční frézky .....	25
4.11	Nakládací a odkládací pozice.....	26
4.12	Vytvoření pracoviště .....	28
5.	Model koncového efektoru a dílce - CAD .....	29
5.1	Úprava souřadných systémů 3D dat.....	29
6.	Model koncového efektoru a dílce - CAM .....	31
6.1	Spojení efektoru a dílce v prostředí Mastercam.....	31
7.	Volba nástrojů a příslušenství - CAM.....	34
7.1	Volba frézy.....	34
7.2	Vytvoření fréz v programu Mastercam .....	35
7.3	Vytvoření nástrojového upínače .....	40
8.	Obráběcí strategie - cam.....	41
8.1	Kontrolní součást pro 2,5 D obrábění – obráběcí strategie.....	41
8.1.1	Nastavení polotovaru .....	41
8.1.2	Vytvoření kontur dílce .....	41
8.1.3	Zarovnání čela.....	42
8.1.4	Frézování válcové části .....	45
8.1.5	Frézování kvádrové části.....	47
8.1.6	Frézování válců .....	48
8.1.7	Frézování drážky .....	50
8.1.8	Shrnutí 2,5D obrábění .....	51
8.2	Šachovnicová figurka – obráběcí strategie .....	52
8.2.1	Nastavení polotovaru .....	52
8.2.2	Zarovnání čela.....	53
8.2.3	Hrubovací procedura 1,2,3 .....	56
8.2.4	Obrábění bokem frézy.....	60
8.2.5	Dokončení rádiusového přechodu.....	61

8.2.6	Obrábění kulové části.....	63
8.2.7	Obrábění kuželové části .....	65
8.2.8	Obrábění horních drážek .....	65
8.2.9	Obrábění vnitřní kulové plochy .....	66
8.3	Součást s obecnou plochou a textem – obráběcí strategie .....	68
8.3.1	Hrubování obecné plochy .....	68
8.3.2	Dokončení obecné plochy .....	69
8.3.3	Vytvoření projekce textu na součást .....	70
8.3.4	Obrobení textu na obecnou plochu .....	71
9.	Robotmaster - Implementace průmyslového robotu.....	72
9.1	Globální nastavení robotu .....	72
9.1.1	Vytvoření virtuálního robotu .....	72
9.1.1.1	Zdroje pro vytvoření virtuálního robot .....	72
9.1.1.2	Proces vytváření řídicího kódu .....	73
9.1.1.3	Řídicí soubor ROBX.....	74
9.1.1.4	Řídicí soubor XML .....	74
9.1.1.5	Využití 3D dat robotu .....	74
9.1.2	Vytvoření virtuálního efektoru.....	75
9.2	Globální nastavení pozice nástroje .....	76
9.3	Lokální nastavení .....	76
9.4	Spuštění simulace.....	78
9.5	Změna pohybů robotu .....	80
9.6	Generování kódu .....	81
10.	Doporučení při práci s Mastercam, Robotmaster.....	81
11.	Sestavení pracoviště .....	83
11.1	Základová deska robotu .....	83
11.2	Průmyslový robot.....	84
11.3	Kalibrace nulových poloh os.....	84
11.4	Upevnění měřicího hrotu .....	85
11.5	Naměření pracoviště .....	86
11.6	Koncový efektor.....	87
11.7	Ovládání koncového efektoru .....	87
12.	Výrobní cyklus.....	87

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. vii
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

12.1	On-line programování robotu – uchopení, odložení dílce .....	87
12.2	Spojení všech částí programu.....	88
12.3	Vzhled obroběných dílců .....	89
12.3.1	Součást pro 2,5D obrábění .....	89
12.3.2	Součást šachovnicová figurka - věž .....	90
12.3.3	Součást obecná plocha s textem.....	91
13.	Zhodnocení práce s programy Mastercam a Robotmaster .....	92
	Závěr.....	93
	Slovník.....	95
	Seznam zdrojů.....	97
	Seznam použitých zkratek .....	101
	Přílohy.....	102



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 1
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ÚVOD

Zákazník se vždy kromě kvality, dostupnosti a značky zajímá především o cenu. Všechny další aspekty jsou, ať už více či méně, odsunuty do pozadí. Výrobce má v zásadě pouze omezené možnosti, jak dosáhnout snížení ceny výrobku. Má na výběr ze dvou hlavních směrů: cesta úspor a cesta investic. V momentě, kdy bude chtít výrobce co nejvíce zefektivnit výrobu a začne snižovat náklady, může vylepšit např. svůj management zásob, hledat levnější dodavatele, nebo snižovat výrobní prostoje. Ať už je výrobce ve svém počínání jakkoli úspěšný, vždy narazí na maximální úroveň, za kterou už nejde touto cestou jít. Velikost této úrovně souvisí s velikostí strojního zázemí, kvalitou obsluhy, skladovacími kapacitami, možnostmi výroby (know-how). Po dosažení této hranice již není, co zlepšovat.

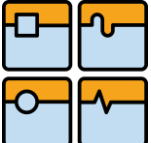
Dalším přístupem je cesta investic, kdy podnik investuje nejen do strojního parku, ale také např. do školení obsluhy apod. Cesta investic má stejně jako cesta úspor také svůj maximální limit. Tento limit je dán zejména možnostmi podniku vůbec nějaké investice provádět. Pro úspěšně kladený odpor proti konkurenci je samozřejmě nutné vydat se oběma směry. Úroveň, na kterou se podnik posune v případě zvětšování svých výrobních zdrojů a tím kapacit, je vždy větší, než se snažit za každou cenu srazit výrobní časy apod. Tato změna je sice drazí vykoupena a projeví se až za určitý čas, ale má mnohem trvalejší charakter.

Nelze říci, který směr je lepší. V této dynamické době musí výrobce i zákazník pružně reagovat na stav trhu. V době krize se jeví jako vhodnější varianta úspor, zatímco v době prosperity zase varianta investic. To co ovšem spojuje oba směry, je investice do automatizace. Zkracují se tím průběžné časy a zároveň se zvětšují výrobní kapacity. Žádný větší výrobní provoz se bez značné dávky automatizace nemůže obejít. Při zvětšení kapacity a zkrácení výrobních časů dochází ke snížení výrobních nákladů vlivem tzv. úspor z rozsahu. Výrobce si tedy může dovolit oproti své konkurenci cenu produktu snížit (při zachování kvality) a celý kruh se opět s cenou uzavírá.

Z důvodu zvětšující se poptávky po efektivitě a flexibilitě ve výrobních průmyslových provozech v posledních deseti letech, se zvýšila potřeba automatizovaných a přesných výrobních zařízení. Obzvláště v obráběcích procesech tvoří CNC obráběcí stroje neotřesitelnou skupinu, které splňují naplno většinu těchto požadavků.

Před pár lety se začala objevovat další možnost, která může být v několika ohledech pro některé aplikace výhodnější, než klasické řešení pomocí CNC obráběcích strojů. Tímto řešením je použití průmyslových robotů jako strojní zařízení k obrábění.

Průmyslové roboty vynikají více možnostmi nasazení, všestranností a relativně nízkými náklady na pořízení. V současné době se dá použití průmyslových robotů rozdělit do tří velkých skupin: manipulace s materiálem, procesní využití (svařování, lakování) a montáž.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 2
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Obecně řečeno, průmyslové roboty jsou využity ke zmenšení nákladů na výrobu, zvětšení produktivity, zvětšení kvality produktu, zvýšení flexibility a odstranění člověka nebezpečných úkolů. Tyto vlastnosti mají za následek rozšíření robotických aplikací po celém světě. Kvůli limitované přesnosti a nízké tuhosti se ovšem na první pohled vůbec nehodí pro procesy obrábění.

## 1. MOŽNOST NASAZENÍ PRaM V OBLASTI OBRÁBĚNÍ

S dalším rozvojem technologií se začínají objevovat aplikace robotů, ve kterých už roboty nevykonávají pouze funkci strojního zařízení určeného k přemístění obrobku nebo jako svařovací jednotka, ale také jako samotný prostředek k obrábění. Roboty k tomu vždy neměly předpoklady. Jak ale ukazují některé aplikace, ve kterých hlavní obráběcí roli hraje robot, tyto doby už jsou dávno pryč.

Roboty mají oproti strojům, které se běžně využívají pro obrábění zásadní nevýhody [10]:

- Limitovaná přesnost a opakovatelnost
- Menší tuhost
- Nižší přirozená frekvence – náchylnost ke kmitání

Mohou ovšem překonat používané stroje v těchto ohledech [10]:

- Integrují v sobě možnosti 4 a 5 osy u obráběcích center, která není vždy u OC přítomna
- Volnost pohybu – umožňuje obrábění rozměrných součástí na jedno upnutí ze všech stran
- Možnost přemístění robotu – není vázán na konkrétní místo, kde obrábění probíhá
- Možnost nasazení robotu v nepříznivých podmínkách
- Možnost změnit robotu koncový efektor z např. vřetena na úchopový prvek a použít ho jako paletizační zařízení
- Daleko menší zástavbový prostor při stejných dosazích jako CNC obráběcí centrum
- Menší náklady na provoz



## 2. PROGRAMOVÁNÍ ROBOTŮ

Robot své pohyby vykonává podle dopředu zhotoveného programu. Ten se skládá z příkazů, které vedou robot skrz požadované body v prostoru a tím ke splnění úkolu. Dle zhotovení tohoto programu se programování robotů dělí na [2]:

- On-line programování (programování přímo u robotu)
- Off-line programování (programování mimo robot např. na PC)
- Hybridní programování (program zhotoven z části on-line i off-line metodou)

### 2.1 On-line programování

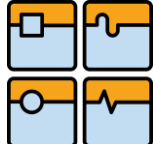
On-line programování, neboli přímé, se provádí přímo u robotického pracoviště za současné přímé a okamžité interakce s robotem. Cílem je zapsání důležitých bodů trajektorie do paměti robotu, který je má poté zopakovat. To může být prováděno dvěma způsoby [2].

#### 2.1.1 Teach-in

Při programování postupným učením je robot naváděn operátorem do požadovaných poloh v prostoru pomocí tlačítek na přenosném programovacím panelu (Teach pendant). Na něm je možno ovládat jednotlivé osy robotu a tím ho navést až do požadovaného bodu (Obr. 2.1). Po njetí do požadovaného bodu, se na Teach pendantu zvolí volba „zapamatuj si tuto pozici“ a tento bod se uloží do paměti. Před spuštěním sekvence těchto bodů je jim nutno přiřadit způsob, jakým budou projížďeny. Při automatické činnosti jsou tyto data robotem využívána k provedení zamýšleného úkolu [2].



Obr. 2.1 Teach pendant Comau [21]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 4
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Výhodou je, že údaje o jednotlivých pozicích mohou být zadávány velmi přesně a jak je dlouho třeba. Nevýhodou je, že pohyb mezi těmito pozicemi, nemusí být obsluze dostatečně dobře znám [2].

### 2.1.2 Play-back

Další možností On-line programování robotů je metoda Play-back. U tohoto způsobu obsluha vede rameno a zápěstí robotu po požadované dráze určitou rychlostí. Jednotlivé pohyby jsou průběžně (po 20ms) ukládány do paměti. Tímto způsobem jsou programovány roboty určené např. pro stříkání barvy. Nevýhodou je zaznamenání také případných chybných pohybů obsluhy, přítomnost obsluhy v malých prostorech je také problematická. Výhodou je rychlé vytvoření programu [2].



Obr. 2.2 Play-back metoda programování robotů [22]

Nevýhodou obou způsobů je poměrně dlouhá doba programování pro větší projekty, fyzická náročnost na programátora při dlouhých a složitých manipulačních cyklech. Další nevýhodou je ztráta výdělečnosti dané robotické buňky, protože ta v době programování nevykonává žádné výrobní nebo jiné činnosti [2].

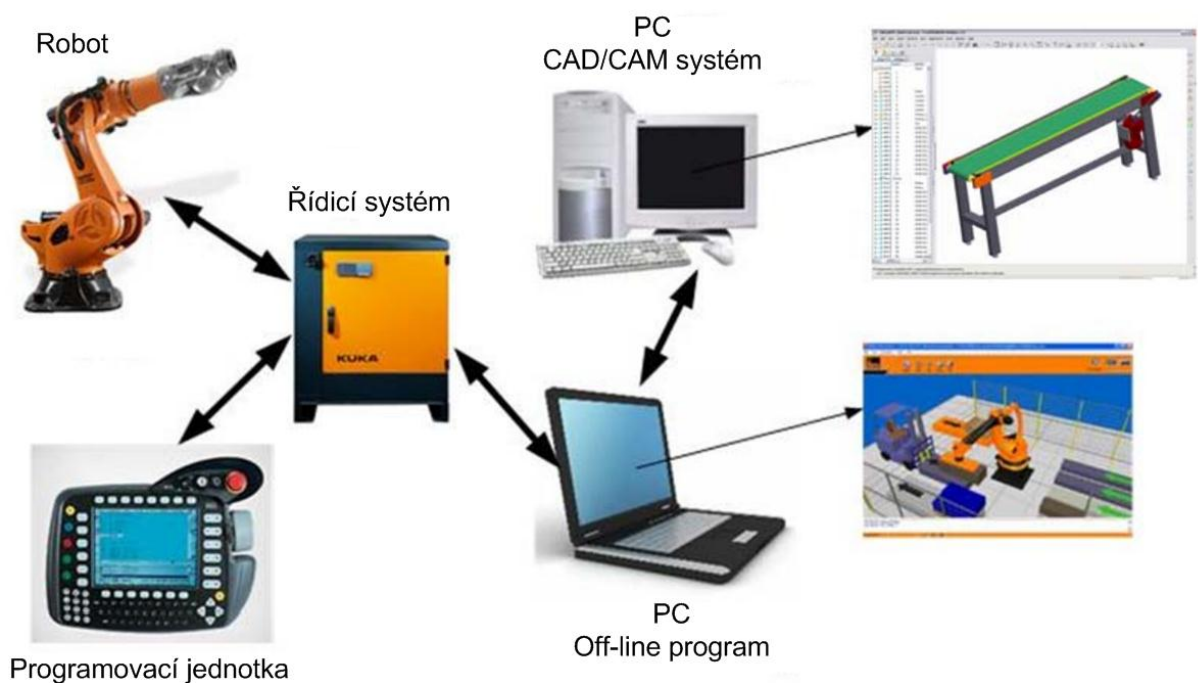
## 2.2 Off-line programování

Off-line programování, neboli nepřímé, je prováděno v počítačovém modelu skutečného robotického pracoviště. Programování probíhá v předstihu, je zde možnost zkoumání různých sestavení buňky a simulování různých pohybů robotu. Tím může být dosažena nejlepší konfigurace z hlediska ekonomických, výkonnostních i produktivních [2].

Off-line programování umožňuje detailní 3D simulaci, pomocí které lze s předstihem vidět případné kolize. Lze také provádět změny na pracovišti a zkoumat jejich vlastnosti bez zásahu

do pracující buňky. Mnoho off-line programovacích systémů sleduje i časový průběh činnosti robotu, podporuje výběr vhodných nástrojů stejně jako vhodné technologické parametry [2].

Velkou výhodou je možnost nahrání 3D dat z CAD systému, a to nejen samotného dílce, ale také celého příslušenství buňky. Vytvoření pracovní dráhy robotu spočívá v navedení funkčních modelů do požadovaných poloh. Koloběh vytvoření Off-line prostředí buňky a propojení s CAD systémem je patrné z Obr. 2.3 [2].



Obr. 2.3 Propojení CAD systému s robotem při off-line programování [2]

Jednou z největších nevýhod off-line programování je citlivost na reálná data. Jestliže je prováděna simulace skutečného pracoviště, data používaná ve virtuálním prostředí musejí být velice přesná. Jinak bude celý výsledek (program) nepřesný a nemusí být ani z funkčního hlediska správný. Off-line metoda není závislá na fyzické přítomnosti reálného pracoviště. Může proto být prováděno expertní firmou, a na reálném pracovišti pouze odladěna. Dalšími nejmenovanými výhodami jsou především [2]:

- Zjednodušení a zefektivnění programování
- Možnost kompletní simulace procesu v počítači
- Automatické vyhledávání trajektorií s vyhýbáním se překážkám
- Otestování dosažitelnosti jednotlivých bodů
- Eliminace tvorby chyb v programu

Každá z metod programování má svoje výhody i nevýhody. Využitím výhod obou přístupů můžeme dosáhnout optimálního řešení.

## 2.3 Hybridní programování

Program se v tomto případě skládá ze dvou hlavních částí: lokalizace polohy a programová logika. Pohybové příkazy k lokalizaci místa obrobku jsou prováděny on-line přímo na pracovišti (např. najetí pro obrobek a jeho uchycení), zatímco vlastní výkonnostní část (např. obrábění) je prováděna off-line metodou [2].

Při použití průmyslových robotů pro obrábění je nutné do programového zázemí zařadit mimo CAD i některý z CAM systémů. Ve výsledku se pak virtuální prostředí vytváří pomocí CAD softwaru, jednotlivé dráhy nástroje pomocí CAM softwaru. Ideální potom je situace, kdy je pro off-line programování k dispozici software obsahující obě tyto varianty (CAD/CAM).

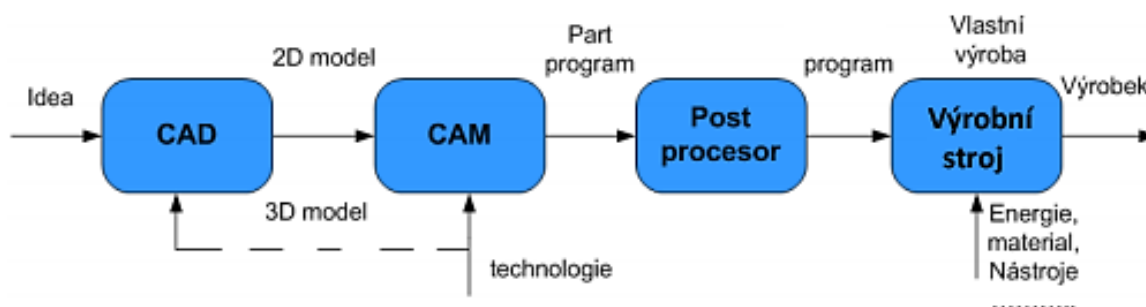
## 3. SOFTWARE PRO PROGRAMOVÁNÍ ROBOTŮ

### 3.1 CAD/ CAM

V současné době se již výhradně pro konstrukci jakéhokoli strojního zařízení využívá některého z CAD softwarů (CAD – Computer Aided Design = počítačem podporovaný návrh). Dřívější konstruktérské návrhy přenášené na papír, se již po mnoho let ztvárňují (modelují) v počítačovém prostředí. Jednotlivé programy jsou si velice podobné a práce s nimi je na stejné bázi. Je v nich možno vytvářet jednotlivé dílce, ty skládat do sestav pomocí vazeb, opatřovat je spojovacím materiálem a vytvářet z nich výkresy [3].

Dalším moderním nástrojem pro výrobu součástí jsou CAM softwary (CAM – Computer Aided Manufacturing = počítačem podporovaná výroba). Tyto programy připravují data pro řízení výrobních strojů na základě součástí z CAD softwarů (pracují s geometrickými útvary dílce). Tyto programy umožňují simulovat proces obrábění na virtuálním dílci a tím optimalizovat výrobní náklady. Po prověření a odladění bezpečného chodu výroby, je tímto programem vygenerován kód pro řízení pohybů výrobního stroje [3].

Propojení těchto programů ve výrobním procesu je patrné z Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Hierarchie výroby součásti pomocí CAD/CAM systémů [3]

Každý výstup z daného programu CAD/CAM má ovšem jiný formát dat. Prakticky se dá říct, že co firma, to několik datových formátů. U spousty z nich je možno součást z jednoho CAD/CAM programu otevřít v programu jiném apod. Vždy ale tuto možnost uživatel nemá.

V průběhu let bylo pro vyřešení migrace 3D dat mezi jednotlivými softwary navrženo několik řešení. Jedním z prvních byly národní standarty zaměřené na výměnu grafických dat. Jednalo se o formáty SET (Francie), VDAFS (Německo) a IGES (USA). V pozdější době došlo k jejich sjednocení pod Mezinárodní standardizační organizace (ISO), jejímž výsledkem bylo prosazení mezinárodního standardu STEP, někdy nazývaného jako „výměnný“ [4].

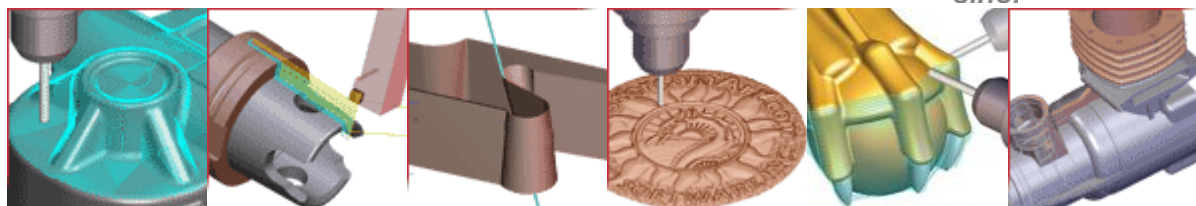
### 3.2 Mastercam

Jedním z univerzálním CAD/CAM softwarů je také Mastercam od firmy CNC software, Inc. Pro Českou a Slovenskou republiku je distributorem firma Sonetech sídlící ve Zlíně.

Program je rozdělen na několik úrovní, které si může zákazník dle potřeby pořizovat. Integruje v sobě také nejrůznější množství pořiditelných modulů [23][7]:

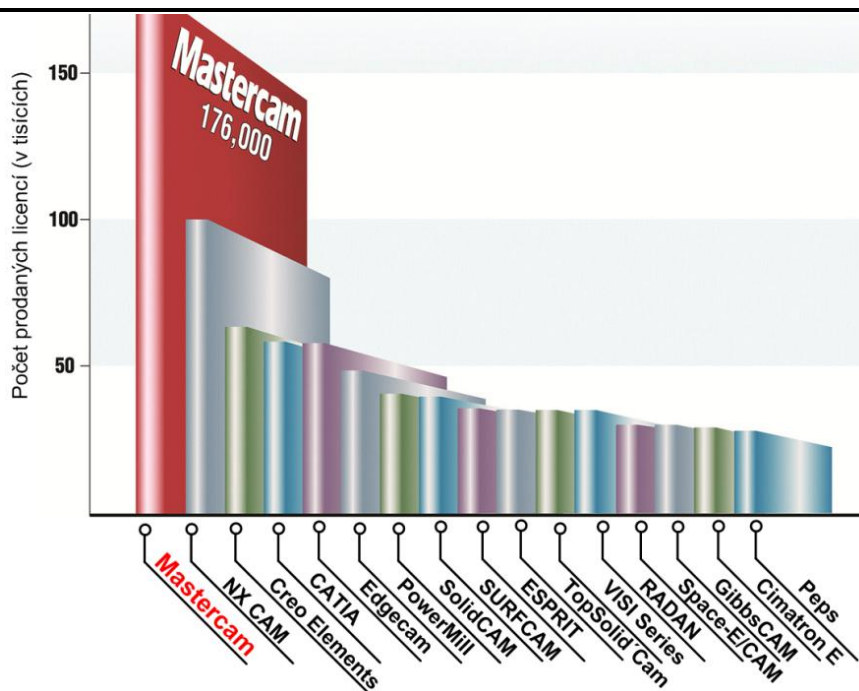
- **Mill:** Modul umožňující 2,5D, 3D hrubovací i dokončovací frézování
- **Lathe:** Modul pro definování dráhy nástroje pro všechny soustružnické operace
- **Wire:** Umožňuje generování drah nástroje pro dvouosé i čtyřosé drátové EDM stroje
- **Art:** Modul pro obrábění uměleckých předmětů a reliéfů
- **Multiaxis:** Modul pro programování drah nástrojů pro víceosé obráběcí stroje
- **Design Tools:** CAD modul umožňující tvoření prostorových objektů i ploch

**Mastercam** *SoneTECH*  
s.r.o.



Obr. 3.2 Mastercam a jeho nástavbové moduly [23][25]

Jedním z důvodů, proč se zabývat právě Mastercamem, je jeho celosvětová prodejní úspěšnost. Jak udává statistika firmy CIMdata, prodaných licencí má Mastercam již přes 176000 [24]. Srovnání v prodejnosti s dalšími zmíněnými CAM softwary je uvedeno na Obr. 3.3.

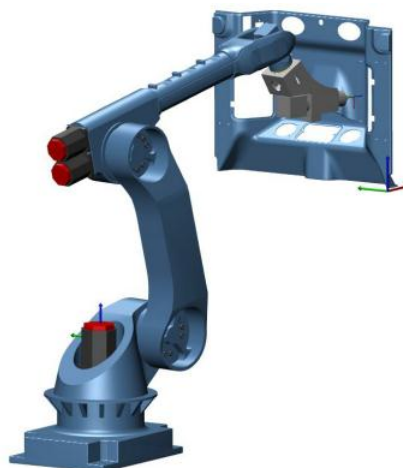


Obr. 3.3 Srovnání celosvětové prodejnosti CAM softwarů [24]

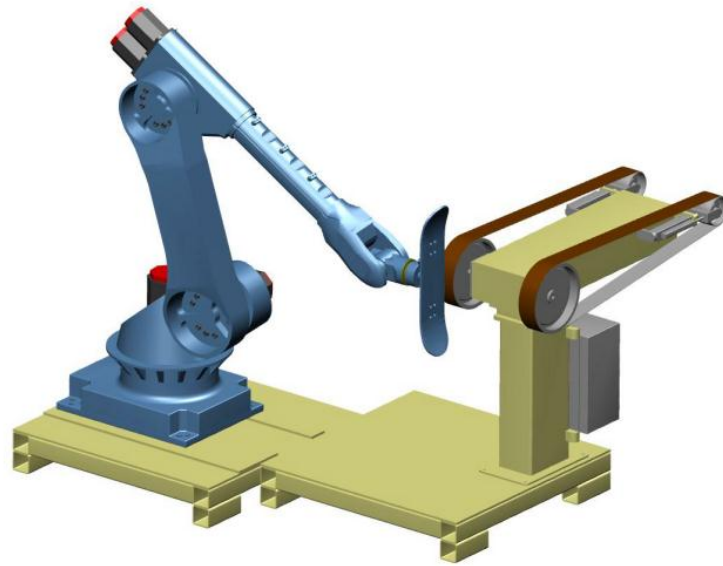
### 3.3 Robotmaster

Jedním z nástrojů programu Mastercam je jeho nastavba Robotmaster. Jedná se o software pro off-line programování průmyslových robotů na bázi CAD/CAM. Pomocí Robotmasteru se dají mimo jiné programovat složité trajektorie robotů, optimalizovat jejich pohyb a také určit neoptimálnější umístění součásti v pracovním prostoru robotu [8].

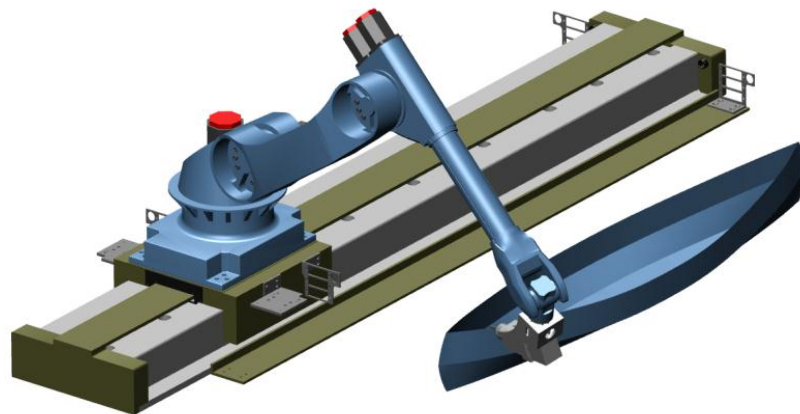
Robotmaster je využíván k programování robotů pro svařování, řezání laserem i vodním paprskem, broušení, lakování a v neposlední řadě také pro programování obráběcích robotů. Spolu s robotem je možno do virtuálního pracoviště v prostředí Robotmaster umístit např. otočný stůl, nebo celý robot umístit na pojezd po kolejnicích (pro obrábění dlouhých dílců) a programovat celé pracoviště. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny některé z možných využití programu Robotmaster [8].



Obr. 3.4 Frézování obráběcím robotem [6]



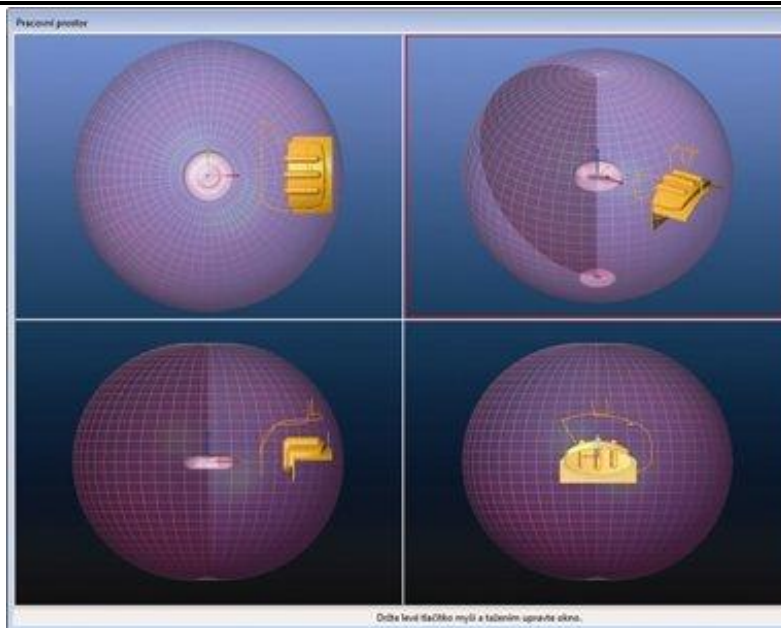
Obr. 3.5 Broušení hran součástí [6]



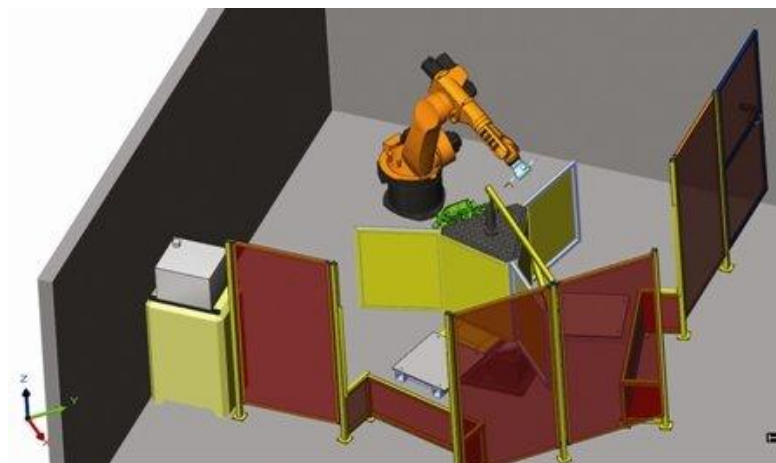
Obr. 3.6 Obrábění dlouhých součástí s robotem na pojezdu [6]

K jednotlivým volbám Robotmasteru (nastavení robotu, efektoru, umístění nástroje apod.) se přechází přímo v okně programu Mastercam. Nemusí se zvlášť zapínat další program, vše je účelně umístěno na jedné obrazovce.

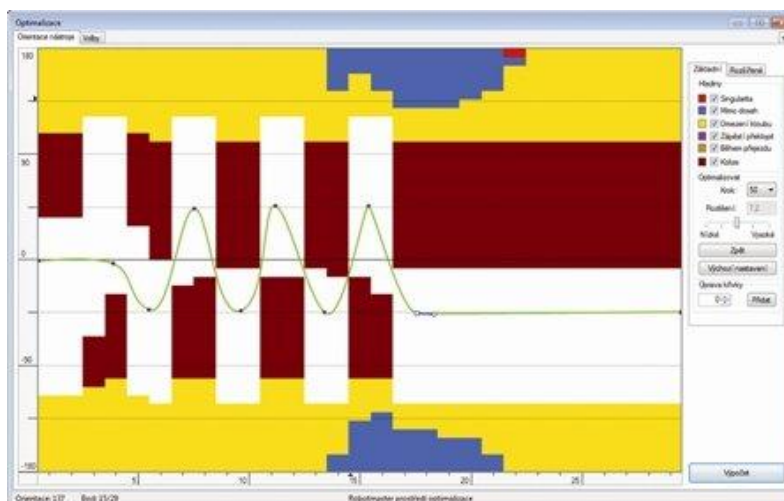
Ve své databázi obsahuje Robotmaster konfigurace robotů všech světových výrobců (Stäubli, Fanuc, ABB, Motoman, KUKA a další). Dále jsou k dispozici k těmto robotům také koncové efektoru nejrůznějších druhů. Lze zde nastavovat žádanou polohu obrobku v pracovním prostoru robotu (Obr. 3.7), vložit ochranný kryt pracoviště nebo další příslušenství (Obr. 3.8), konfigurovat parametry pohybu robotu. Je zde možnost automatického nastavení vhodných pohybů robotu pro danou operaci. Tím odpadá potřeba řešit problémy, jako jsou singularity, limity pohybu jednotlivých kloubů robotu, maximální dosah, rychlosti natočení apod. Jestliže už si Robotmaster sám neporadí s vytvořením dráhy robotu a narazí na problém s dosažením maximálních limitů os, singularit apod., je zde účinný nástroj pro vyřešení těchto problémů (Obr. 3.9) [8].



Obr. 3.7 Optimalizace umístění obrobku v pracovním prostoru robotu [9]



Obr. 3.8 Frézovací pracoviště v programu Robotmaster [9]



Obr. 3.9 Prostředí optimalizace Robotmaster [9]

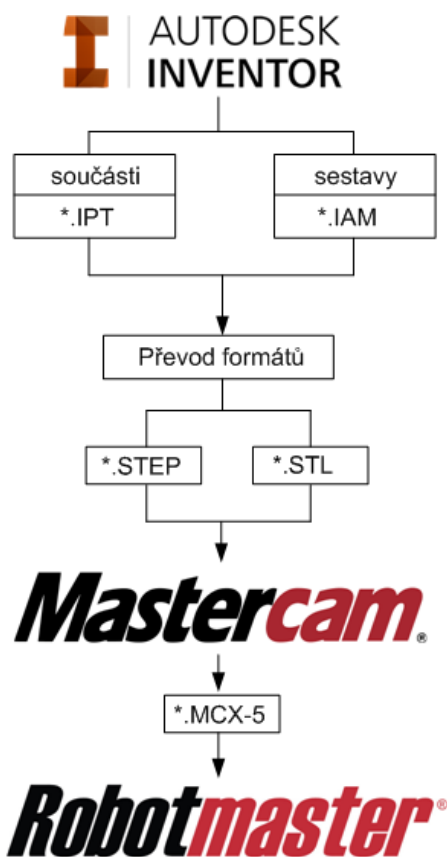
Uživatel má k dispozici také možnost 3D simulace pohybu robotu, a to buď samotného, nebo v prostředí buňky. Robotmaster je také schopen upozornit na případné kolizní stavy robotu s pracovištěm. Tato simulace může být zkoumána po jednotlivých výrobních úsecích, nebo celá najednou [8].

Neodmyslitelnou součástí takového programu je samozřejmě generování programu pro řízení robotu (u CNC se jedná o tzv. „G-kód“). Ten je vygenerován v nativním jazyce pro zvoleného výrobce robotu a je ho možno posléze uživatelsky upravit [8].

### 3.4 Řetězec 3D dat

V této práci je jako CAD software použit Autodesk Inventor 2012. Bude využit pro tvorbu a editaci zkušebních dílců, vytvoření koncového efektoru robotu a také pro prvotní návrh pracoviště. Dále zde bude využíván CAM software Mastercam, který bude sloužit k navrhování obráběcích drah na dílci.

Mastercam umožňuje otevírat soubory Autodesk Inventor, ovšem pouze za podmínky, že je na stejném počítači také nainstalován. To se může zdát jako velká nevýhoda. Autodesk Inventor ovšem umožňuje také uložení součástí i sestav do jiných formátů než do svých klasických (\*.ipt součást, \*.iam sestava), a to do formátů výměnných (viz. kapitola 3.1) \*.step apod. Tyto formáty jsou kompatibilní s Mastercam vždy, a tím je zajištěno potřebné spojení 3D dat a CAM softwaru. Vzhled datového řetězce této práce je znázorněn na Obr. 3.10.



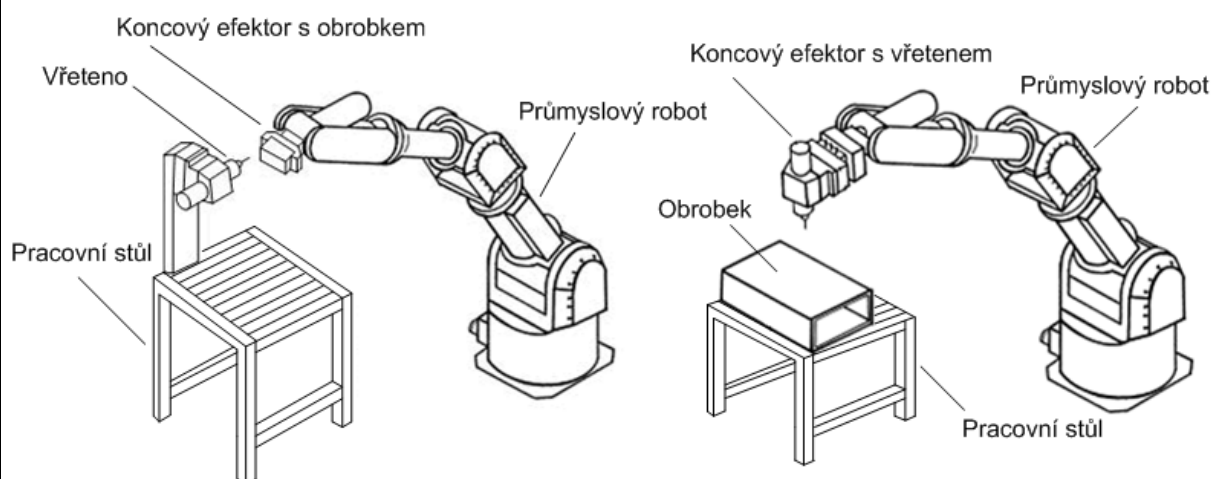
Obr. 3.10 Datový řetěz 3D formátů [25][26]

#### 4. NÁVRH PRACOVIŠTĚ

Použití robotů jako přímý prostředek k obrábění, je relativně nové. Přesto největší výrobci průmyslových robotů již mají vyvinuto odvětví zabývající se právě tímto segmentem.

V oblasti použití průmyslových robotů pro frézování jsou dvě možnosti jak zhotovit obrobek. Prvním případem je umístění vřetena s nástrojem jako koncový efektor robotu, a obrobek je pevně upnut na stole (Obr. 4.1). Někdy se tato metoda nazývá „Spindle“.

Druhým případem je situace, kdy v koncovém efektoru robotu je upnut obrobek a robot s ním manipuluje v prostoru kolem rotujícího nástroje, který ovšem v průběhu obrábění nemění svou polohu. Tato metoda se někdy označuje „Part to tool“.

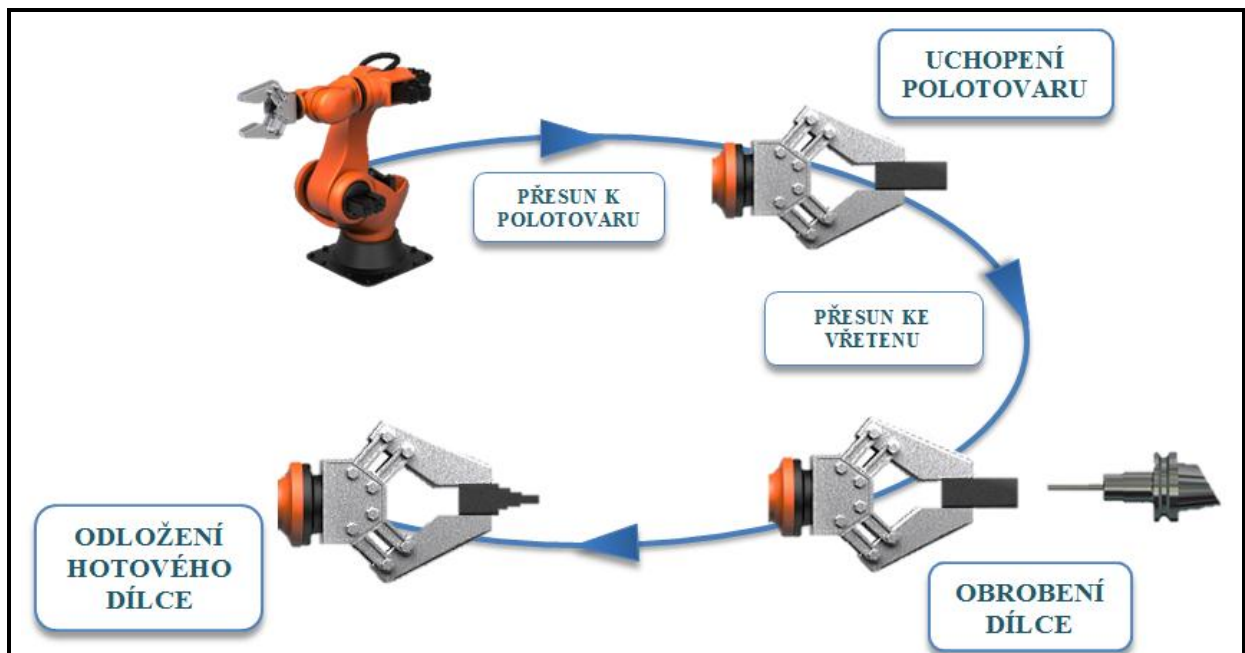


Obr. 4.1 Robot s obrobkem v koncovém efektoru, robot s vřetenem jako koncový efektor [1]

##### 4.1 Návrh procesu zhotovení dílce

Jak vyplývá ze zadání této práce, v tomto případě se bude jednat o druhý způsob. Průmyslový robot bude držet ve svém efektoru obrobek, a pomocí stacionárně umístěné frézky a pohybů jednotlivých os bude vytvářet výsledný tvar součásti.

Pro celkovou kompaktnost pracoviště musí být obrobek také upínán robotem. Proces zhotovení dílce bude tedy začínat upnutím polotovaru do koncového efektoru ve vstupní pozici. Efektor se s upnutým dílcem přesune do výchozího bodu pro obráběcí proceduru, a začne obrábět. Po obrobení robot založí dílec do výstupní pozice. Tento proces je zobrazen na Obr. 4.2.

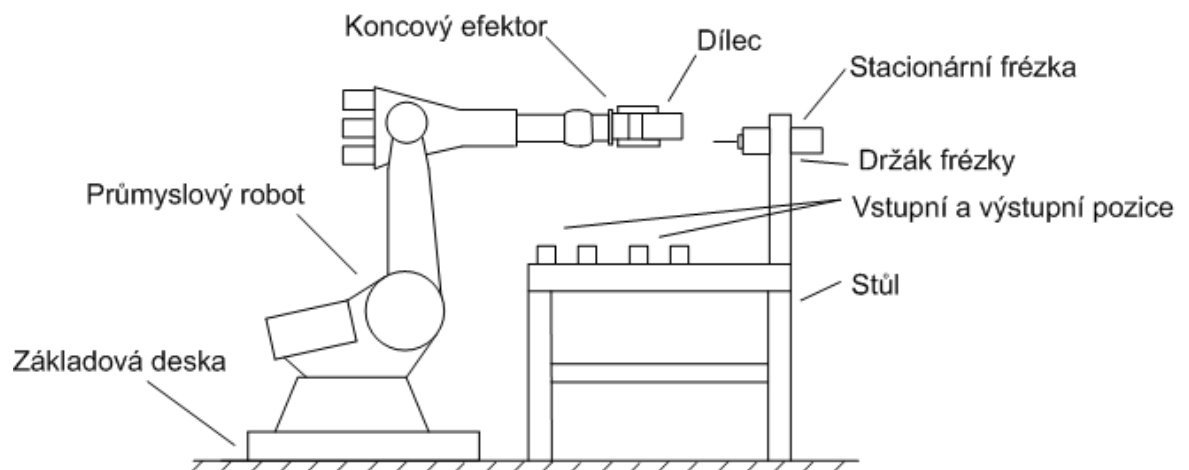


Obr. 4.2 Proces zhotovení dílce [27]

Z předchozího procesu a z uvedené teorie je zřejmé, že celkový program pro robot se bude skládat celkově ze tří částí. Uchopení a odložení dílce se bude provádět metodou On-line, kdy pomocí Teach pendantu musí operátor napolohovat koncový efektor do žádaných pozic a tyto pozice ukládat. Procedura obrobění dílce bude zhotovena metodou Off-line. V této části bude pomocí programů Mastercam a Robotmaster vytvořen program pro obrobění určitých dílců.

## 4.2 Návrh rozložení pracoviště

Na Obr. 4.3 je uveden zjednodušený náčrtek návrhu pracoviště. Průmyslový robot je upevněn na základové desce. Ta je k zemi přišroubována a tvoří základ pracoviště. Stůl musí být v takové pozici a mít takové rozměry, aby na všechna potřebná místa mohl robot dosáhnout. Stůl je připevněn k podlaze.

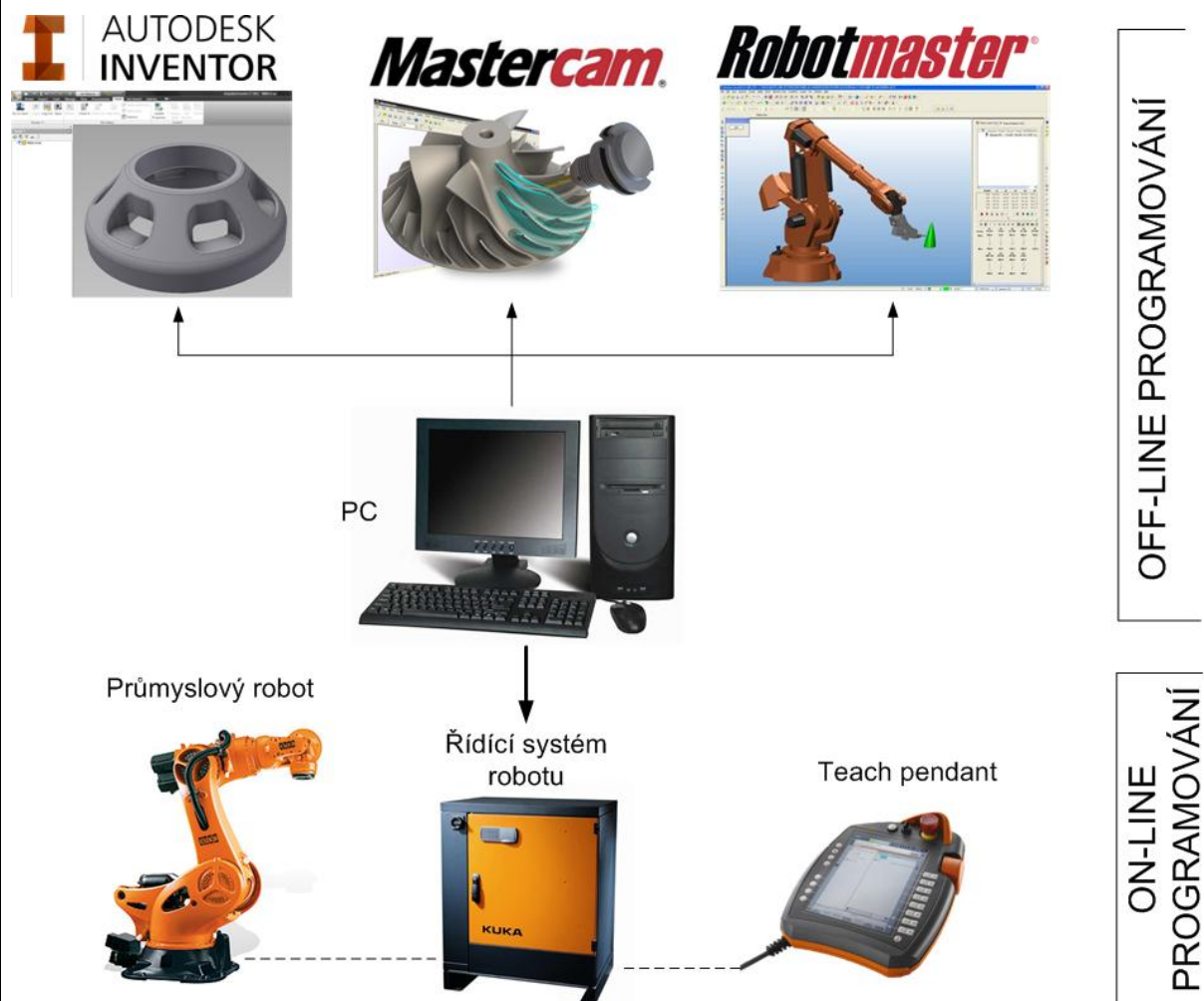


Obr. 4.3 Návrh rozložení pracoviště

### 4.3 Návrh řízení pracoviště

Řízení celého pracoviště je ve své podstatě velice jednoduché. Dalo by se rozdělit na dvě hlavní části pro off-line a on-line programování. Hlavní součástí off-line části řízení pracoviště je osobní počítač s nainstalovanými programy pro programování robotů (Mastercam, Robotmaster) a některý z CAD softwarů (v tomto případě Autodesk Inventor). Na tomto PC bude probíhat vytváření dílců, jejich obráběcích drah, a také vytvoření řídicího kódu pro průmyslový robot.

V on-line části řízení je hlavním prvkem řídicí systém robotu, který je propojen se samotným robotem a také s teach pendantem.



Obr. 4.4 Návrh řízení pracoviště [25][26][28][29][30][31][32][33]

### 4.4 Volba robotu

Jako průmyslový robot byl použit robot KUKA KR 210-2 K (Obr. 4.5). Jedná se o klasický antropomorfní robot se šesti říditelnými osami. Vyniká zvětšenou opakovatelnou přesností polohování (Viz Tab. 4.1), což má za následek lepší výrobní přesnost. Konceptně je



určen především pro aplikace s větší zátěží (paletizace s hmotností okolo 200kg), bodové svařování, montážní úkoly. Jedná se o provedení, které je určeno pro montáž na konzoly, a robot poté zasahuje do prostoru pod sebou. [13].



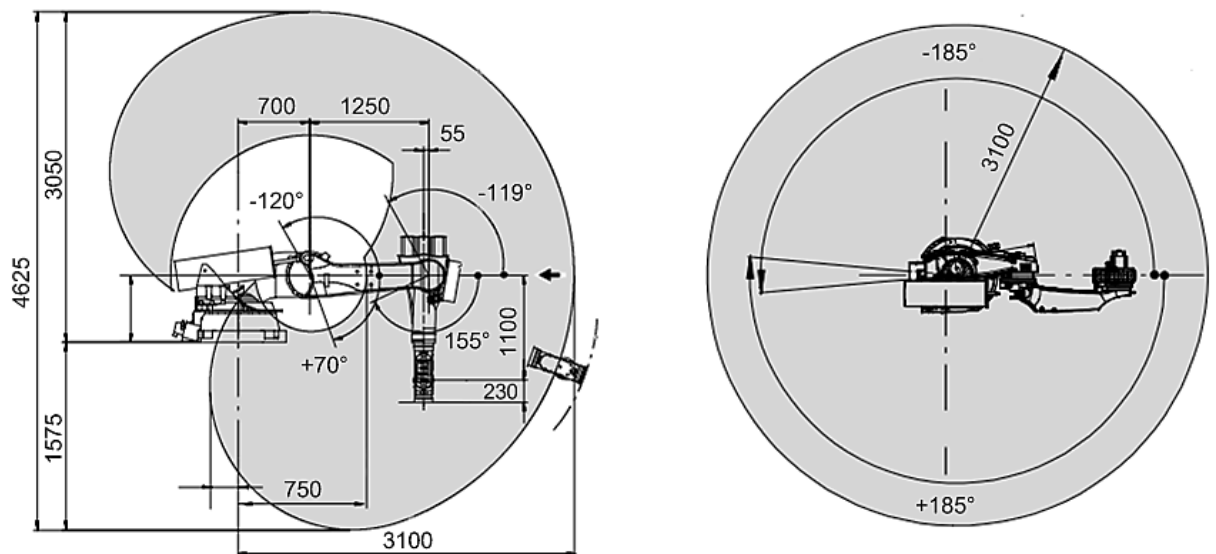
Obr. 4.5 KUKA KR 210-2 K [13]

Model	KUKA KR 210-2 K
Počet os	6
Mezní zátěž	210 kg
Přídavná zátěž	50 kg
Hmotnost robotu	1445 kg
Přesnost opakování	$\pm 0,06$ mm
Maximální dosah	3100 mm
Délka ramena	1100 [mm]
Řídicí systém	KR C2 Edition 2005
Možnosti ukotvení	Podlaha, konzola
Stupeň ochrany	IP 65

Tab. 4.1 KUKA KR-210-2 K specifikace [12]

Dosah efektoru je až 3100 mm, což je hodnota pro zamýšlený úkol zbytečně velká. Tento robot je ovšem do budoucna zamýšlen jako hlavní součást výzkumu v oblasti obrábění pomocí průmyslových robotů na našem ústavu. Proto je vhodné ho začlenit již do tohoto prvního projektu.

Z celé řady robotů KR-210 K, má tento model nejmenší objem pracovního prostoru (Tab. 4.2). Pro zamýšlený účel použití, je ale tato hodnota více než dostačující. Možné hodnoty natočení jednotlivých os, a rozměry pracovního prostoru jsou patrné z Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Tvar a rozměry pracovního prostoru, rozsahy jednotlivých os KR-210-2 K [12]

Model	Objem pracovního prostoru
KR 210-2 K	97 m <sup>3</sup>
KR 210 L180-2 K	120 m <sup>3</sup>
KR 210 L150-2 K	145 m <sup>3</sup>

Tab. 4.2 KUKA KR-210-2 K objem pracovního prostoru [12]

#### 4.5 Volba frézky

Jako obráběcí prvek, byla zvolena frézka SGP 30-8 od firmy PROTOOL (Obr. 4.7). Jedná se o elektrickou ruční frézku s klidným během a malými vibracemi díky spojení mezi hřídelem motoru a hnacím vřetenem. Vřeteno je uloženo ve skříni z hliníkové slitiny. Primárně je určena pro ruční odjehlování hran, zabrušování dílců apod. Může být použita také stacionárně, díky upínacímu krku. Má možnost upnutí širokého spektra nástrojů se stopkami o průměru 3 až 8 mm. Další specifikace jsou patrné z Tab. 4.3 [5].



Obr. 4.7 Ruční frézka SGP 30-8 PROTOOL [14]

Frézy jsou upínány ručně pomocí kleštin před započtením obrábění. Ruční je také spouštění otáček frézy, stejně tak i nastavení hodnoty otáček (pomocí kolečka elektronické regulace otáček).

Tato frézka je tzv. „bezpečným strojem“. Po odpojení elektrického proudu, při zapnutém vřetenu, a po jeho znovu zapnutí, se frézka znovu nerozběhne. Proto je zde vyloučeno, že by ovládání spouštění frézky bylo provedeno pomocí instrukce z programu.

Model	SGP 30-8 PROTOOL
Jmenovitý příkon	740 W
Napájecí napětí	230 V
Otáčky naprázdno	13000– 31000 min <sup>-1</sup>
Průměr kleštiny	3 – 8 mm
Hmotnost	1,9 kg
Upínací krk	43 mm

Tab. 4.3 Ruční frézka SGP 30-8 PROTOOL – specifikace [5]



#### 4.6 Volba materiálu obrobku

Jako materiál obrobků byl zvolen extrudovaný polystyren (XPS – extruded polystyrene). Přestože je extrudovaný polystyren vyráběn ze stejného materiálu jako pěnový, díky rozdílnému procesu výroby jsou odlišné i jeho vlastnosti. Je vyráběn z roztavených polystyrenových granulí, které jsou napěňovány  $\text{CO}_2$ , hmota je dále vytlačována zařízením (extrudérem) na pás, kde se tloušťkově formuje. Po vychladnutí a ztvrdnutí jsou upravovány rozměry. Tímto procesem je extrudovaný polystyren oproti klasickému pevnější, ovšem za cenu vyšší ceny. Pevnost v tlaku extrudovaného polystyrenu dosahuje až 500kPa, zatímco pevnost klasického pěnového činí pouze 100-200 kPa (oba při 10% stlačení) [18][19].



Obr. 4.8 XPS – extrudovaný polystyren, klasický pěnový polystyren [34]

Jak je patrné ze struktury materiálu, při obrábění pěnového polystyrenu, by se jednotlivá zrníčka mohla vylamovat. Tím by byl výsledný povrch značně znehodnocen. Při řezném procesu na materiál působí síla, kterou se materiál deformuje a tím dochází ke zhoršení výsledné přesnosti. Extrudovaný polystyren tomuto zatížení odolá lépe než klasický [18][19].

Konkrétní charakteristiky použitého materiálu jsou uvedeny v Tab. 4.4.

Charakteristika	Hodnota
Hustota	$33 \pm 3 \text{ kg/m}^3$
Koef. tep. Roztažnosti	0,07 mm/m
Provedení	Rovná hrana, mřížkovaný povrch
Prodáváný rozměr desky	1250x600x50 [mm]
Únosnost v tlaku	300 [kPa] při 10% stlačení

Tab. 4.4 Hodnoty použitého materiálu [15]

## 4.7 Vytvoření demonstračních dílců

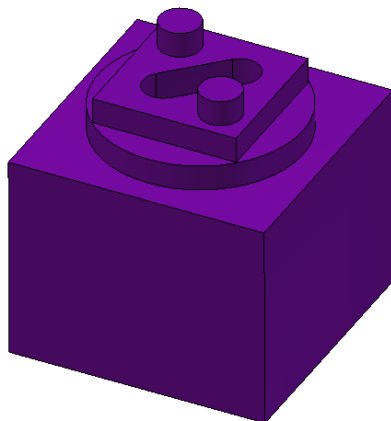
Při vytváření demonstračních dílců, byl kladen důraz na to, aby se po obrobení těchto dílců v co největší míře projeví nedostatky metody „Part to tool“. Mělo se tedy jednat o dílce, které obsahují sférické plochy stejně jako kolmé drážky a vyfrézovaný text na některé z ploch. Dílce by neměly být moc velké, aby výrobní čas stejně jako spotřeba materiálu nebyli příliš vysoké. Měly by mít možnost využití jednak hrubovacích, ale také dokončovacích operací. Dále by z důvodu menších nároků na výrobu měly být obrobitelné na maximálně dva nástroje.

Byly navrženy tři dílce, které jsou popsány níže. Přesto, že Mastercam má možnost vytvářet 3D dílce, byly některé z těchto součástí vytvořeny v CAD softwaru. Důvodem byla skutečnost, že většina strojírenských podniků stejně používá pro konstrukci dílců strojního zařízení speciální CAD software (Pro/E, Catia, Inventor). Dílce tohoto zařízení jsou pak importovány do některého z CAM softwarů a vytváří se pro ně obráběcí dráhy. Rozhodně ale tyto dílce nejsou kompletně vytvářeny v některém z CAM softwarů. Samozřejmě jsou i situace, kdy je i tato možnost výhodná. Především se jedná o jednoduché dílce pro tzv. 2,5 D obrábění.

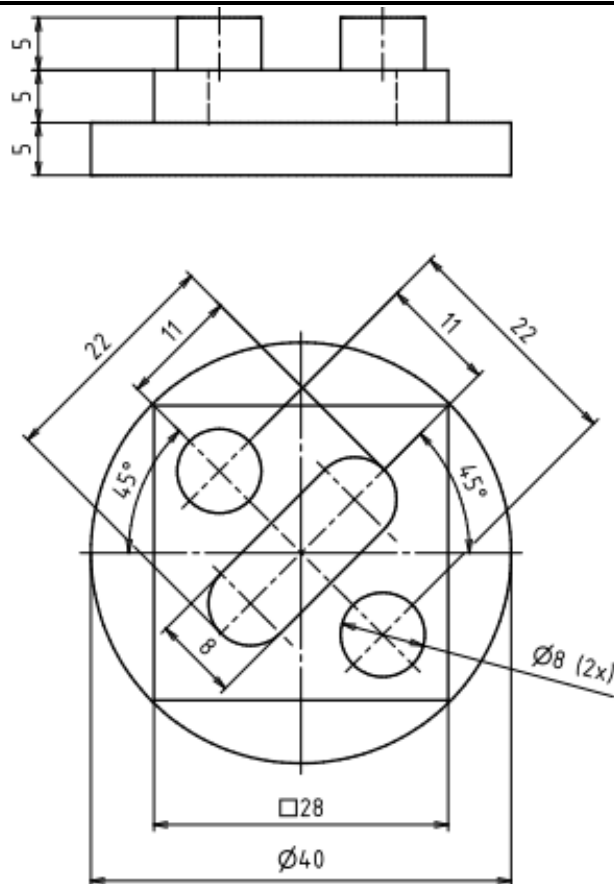
### 4.7.1 Součást pro 2,5 D obrábění

První součást byla navržena tak, aby se každý její rozměr mohl jednoduše změřit, a tím posoudit přesnost celé metody. Jedná se o součást pro tzv. 2,5 D obrábění. Jde v podstatě o obrábění pomocí křivek dílce (2D) a nástroji je pak zadána hodnota absolutního nebo relativního posunutí vůči základní rovině, ve které má obrábět (0,5 D) [35].

Vzhled a rozměry jsou patrné z Obr. 4.9 a Obr. 4.10. Tato součást byla zvolena z toho důvodu, že mnoho současných aplikací obrábění pomocí robotů je právě křivkového charakteru (odjehlení hran převodové skříně apod.). Dále má tato součást demonstrovat náhradu 3-osého frézovacího CNC stroje. Pro posouzení přesnosti této metody bez zanesení dalších vnějších vlivů, bude tato součást obrobena pouze jedním nástrojem. Polotovar pro tento dílec má rozměry 50x50x60 mm.



Obr. 4.9 Vzhled součásti pro 2,5D obrábění

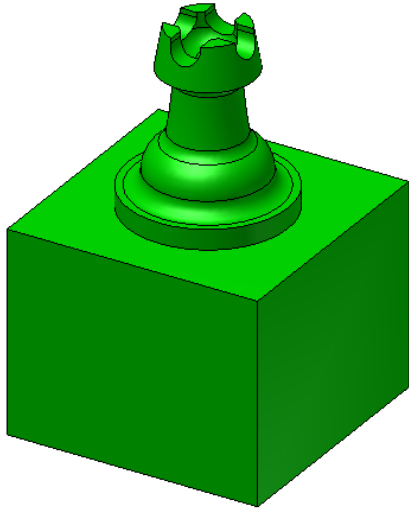


Obr. 4.10 Rozměry součásti pro 2,5 D obrábění

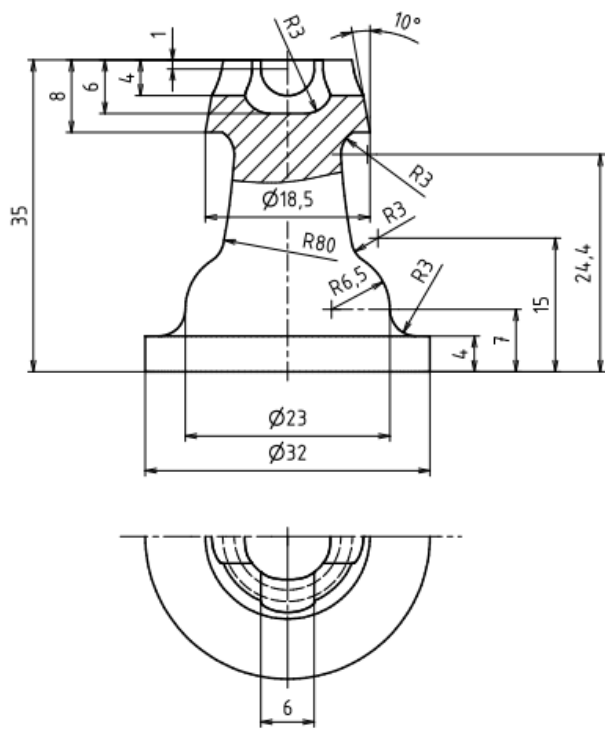
#### 4.7.2 Šachovnicová figurka - věž

Dalším dílcem je jedna z šachovnicových figurek a to věž. Byla vybrána z toho důvodu, že obsahuje sférické plochy a také drážky v horní části. Její tvar a rozměry jsou patrné z Obr. 4.11 a Obr. 4.12. Tato součást má především demonstrovat možnost obrábění ploch v 360° a dále vytvoření kolmých drážek. Což se dá považovat jako náhrada multifunkčního soustružnického centra.

Všechny plochy na sebe navazují rádiusy R3, protože takovou kulovou frézou ( $\varnothing 6$ ) budou tvarové plochy obrobena. Dále byla zohledněna celková výška figurky z důvodu menších hrubovacích procedur, s čímž souvisí také kratší výrobní čas. Zamýšleno je také vyrobení pouze na dva nástroje. Polotovár pro tento dílec má rozměry 50x50x80 mm.



Obr. 4.11 Vzhled šachové figurky

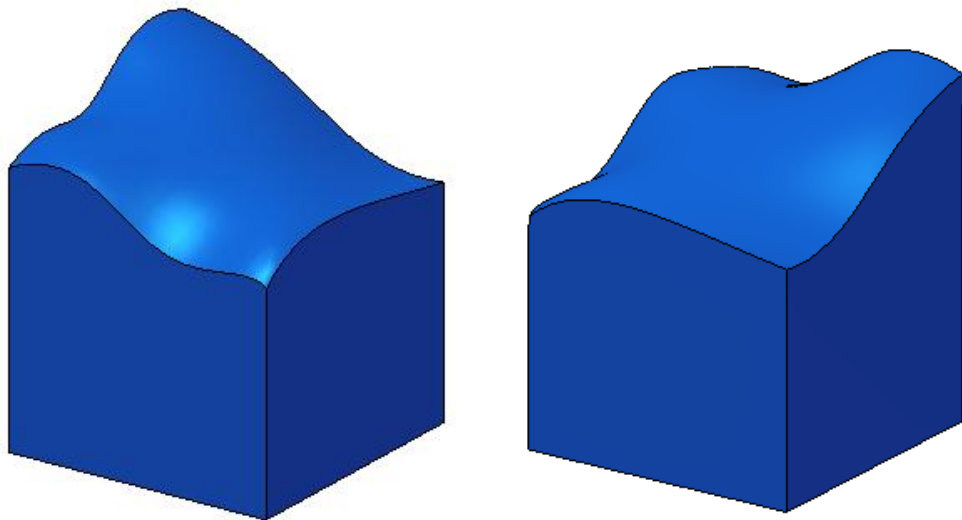


Obr. 4.12 Rozměry šachové figurky

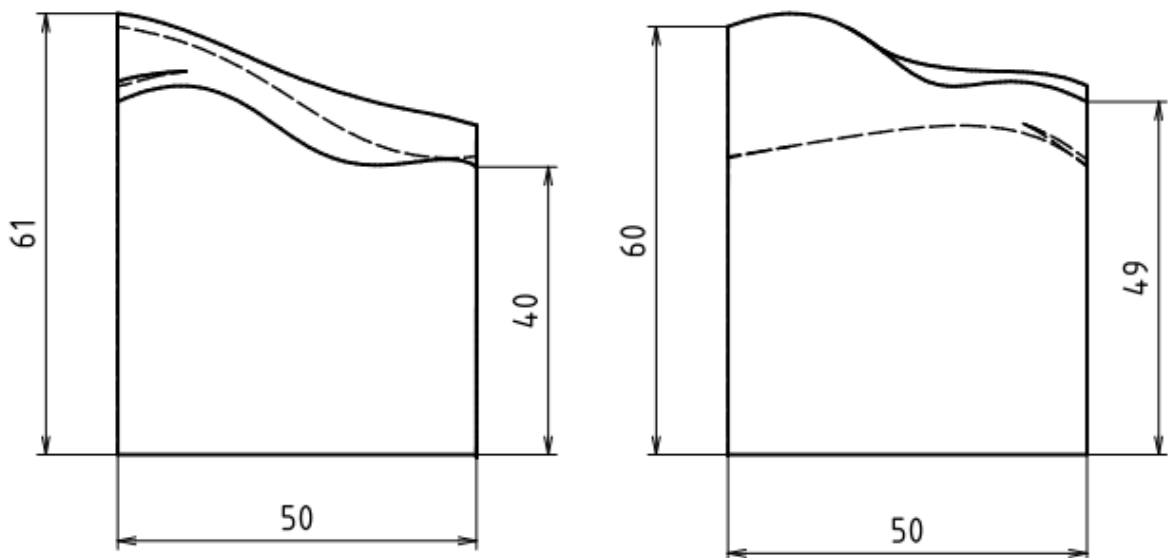
### 4.7.3 Obecná plocha s textem

Poslední součást je znázorněna na Obr. 4.13. Jedná se o obecnou plochu, na jejímž povrchu je vyfrézovaný nápis „VUT FSI“. Tento text nemá proměnnou hloubku. V každém místě má text vůči povrchu stejnou hodnotu hloubky. Rozměry tohoto dílce jsou patrné z Obr. 4.14. Tato součást bude vyrobena celkem dvěma nástroji. Jeden bude určen pro hrubování a dokončení tvaru, a druhý pro samotné vyfrézování textu. Samotný text bude přidán až v programu Mastercam.

Součást má demonstrovat možnost nahrazení víceosého obráběcího stroje robotem. Polotovar pro tento dílec má rozměry 50x50x65 mm.



Obr. 4.13 Vzhled součásti s obecnou plochou a textem

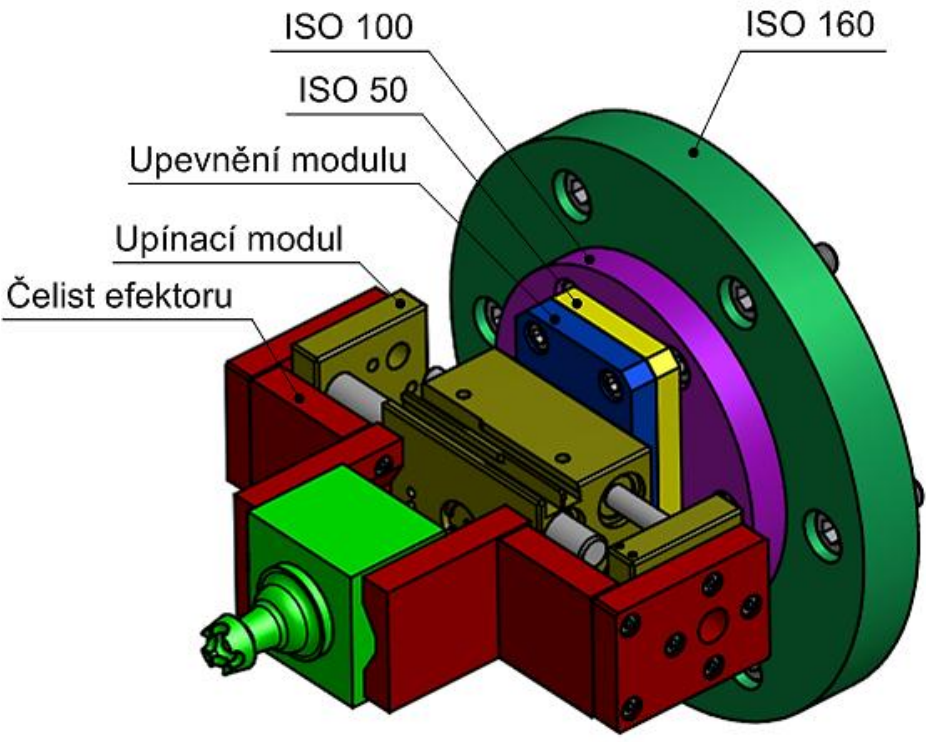


Obr. 4.14 Rozměry součásti s obecnou plochou a textem

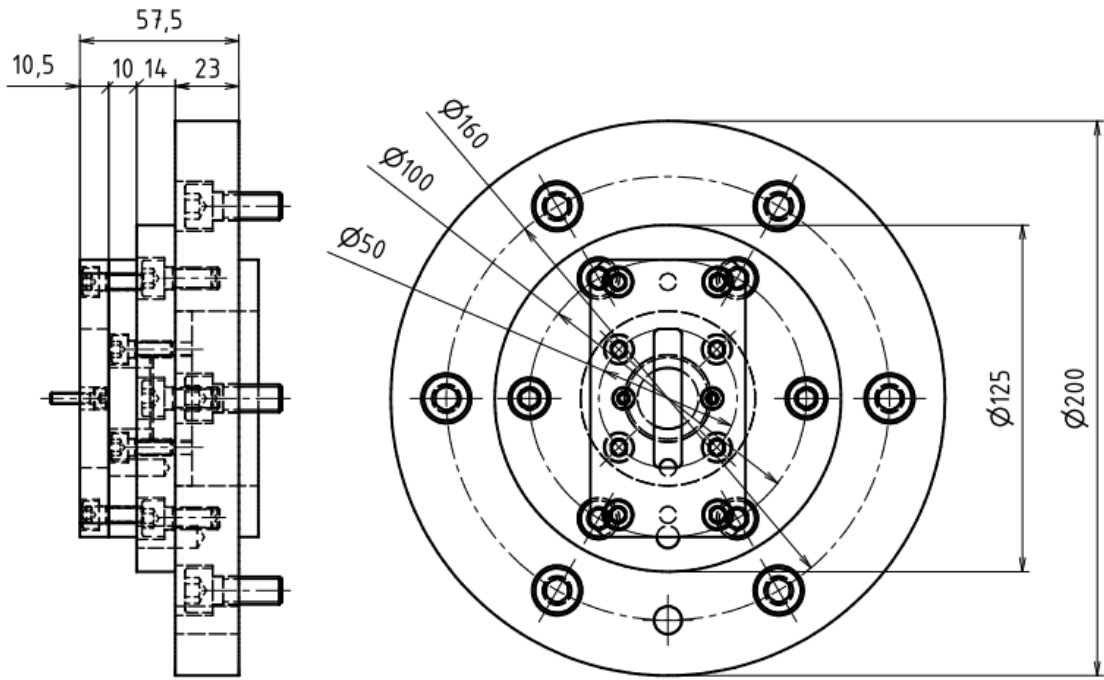
#### 4.8 Volba koncového efektoru

Koncový efektor pro účely této práce je svou konstrukcí velice jednoduchý. Znázorněn je na Obr. 4.15 a Obr. 4.16. Skládá se ze tří přírub, upínacího modulu, upevnění modulu a dvou čelistí. Vnější příruba (ISO 160) je přišroubována na přírubu robotu. Vnitřní příruba (ISO 100) je s ní spojena. Vnitřní příruba (ISO 50) je spojena s vnější (ISO 100) a zároveň s přírubou upevnění modulu. Příruba upevnění modulu je připevněna k upínacímu modulu. Na něm jsou připevněny čelisti efektoru. Všechna spojení jsou provedena šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem.

Každý průmyslový robot má v dané kategorii určitý průměr roztečné kružnice připojovacích šroubů na své přírubě. Pro KUKA KR 210-2 K je to  $\text{Ø}160$  mm. Při použití tohoto efektoru pro jiný robot, např. s roztečnou kružnicí připojovacích šroubů  $\text{Ø}100$  mm, se příruba ISO 160 oddělá. Stejně tak by se postupovalo v případě menších robotů s roztečnou kružnicí  $\text{Ø}50$  mm. Výkres celého efektoru je součástí příloh.



Obr. 4.15 Konstrukce koncového efektoru

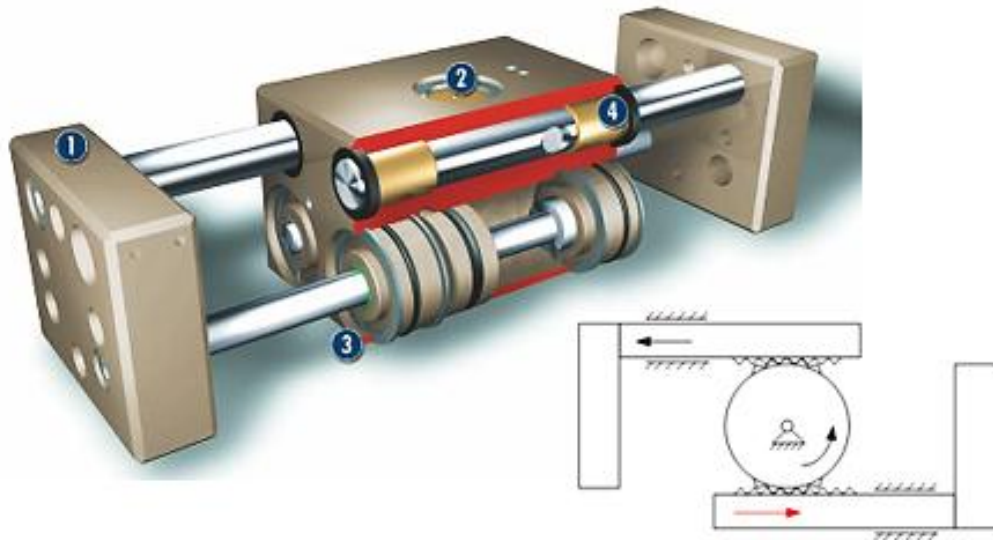


Obr. 4.16 Rozměry přírub koncového efektoru



### 4.8.1 Upínací modul

Princip a konstrukce upínacího modulu je znázorněna na Obr. 4.17. Jedná se o pneumatický modul firmy SHUNK s označením PSH 22-1. Po přísunu tlakového vzduchu do komory pístu, se čelist začne vysouvat. Pístnice je ozubená a zabírá do pastorku umístěného v ose modulu. Ten je v záběru s další ozubenou pístnicí druhé čelisti. Tím je pohyb obou čelistí synchronizován.



Obr. 4.17 Princip a konstrukce upínacího modulu [16]

Konstrukce upínacího modulu: 1 – čelist modulu  
2 – kinematická část mechanismu  
3 – skříň modulu  
4 – vedení

Model	PSH 22-1
Zdvih pro jednu čelist	28 [mm]
Uzavírací síla	320 [N]
Hmotnost	0.95 [kg]
Doporučená hmotnost zátěže	1.6 [kg]
Nominální tlak	6 [bar]
Čas uzavření	0.1 [s]
Maximální hmotnost čelisti	0.8 [kg]
Maximální délka čelisti	140 [mm]

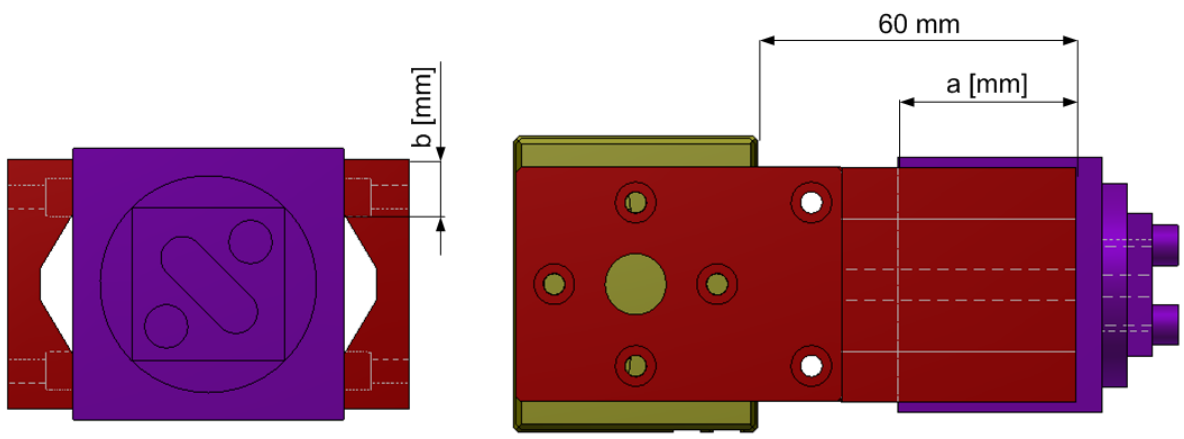
Tab. 4.5 Charakteristika upínacího modulu [16]

Poslední částí koncového efektoru jsou čelisti. Ty jsou vyrobeny ze segmentů, které jsou vzájemně přišroubovány. Tyto segmenty jsou opět spojeny s čelistmi modulu pomocí šroubů. Obě přírubby a všechny segmenty jsou vyrobeny z duralu.

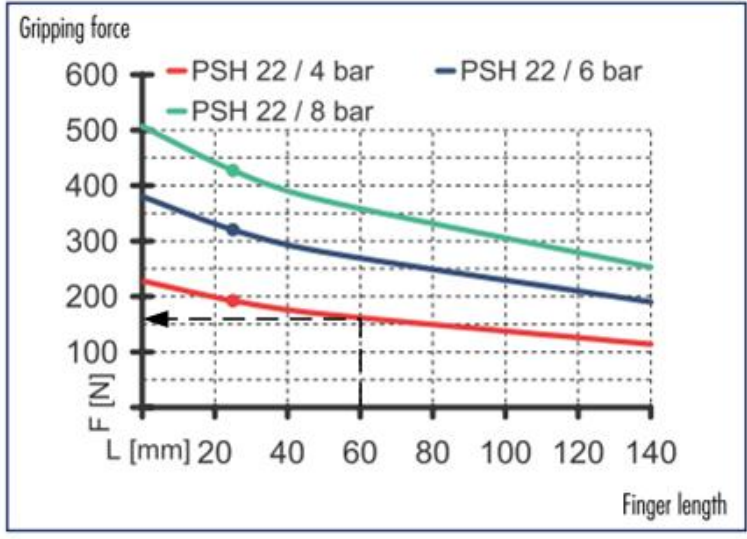
#### 4.8.1.1 Výpočet upínacího tlaku

Z charakteristik pro upínací modul (Tab. 4.5) byly pro návrh efektoru důležité zejména hodnoty doporučené hmotnosti zátěže, uzavírací síla, maximální hmotnost a délka čelistí. Při velké uzavírací síle efektoru, by se mohl obrobek zdeformovat nebo v nejhorším případě poškodit. Pro výpočet maximální možné uzavírací síly jsou použity materiálové hodnoty extrudovaného polystyrenu uvedené v kapitole 4.6.

Hodnoty uzavírací síly pro každou z čelistí v závislosti na pracovním tlaku a výšce čelistí jsou uvedeny na Obr. 4.19. Z diagramu pro přepočet uzavírací síly v závislosti na výšce čelistí (jenž je 60 mm) byla pro tento tlak odečtena hodnota uzavírací síly 155 N. Ta je použita pro výpočet tlaku vyvozené upínacím modulem na jednu stěnu dílce. Jednotlivé rozměry pro výpočet jsou znázorněny na Obr. 4.18.



Obr. 4.18 Rozměrové hodnoty pro výpočet zatížení stěny dílce



Obr. 4.19 Diagram uzavírací síly pro výšku čelistí [16]



$$F := 155\text{N}$$

uzavírací síla při 4 bar a 60mm vysokých čelistí

$$a := 35\text{mm}$$

rozměr sevření

$$b := 10\text{mm}$$

rozměr sevření

$$S_1 := a \cdot b \cdot 2$$

plocha sevření dílce jednou čelistí

$$P := \frac{F}{S_1} = 221.429\text{kPa}$$

tlak na stěnu dílce

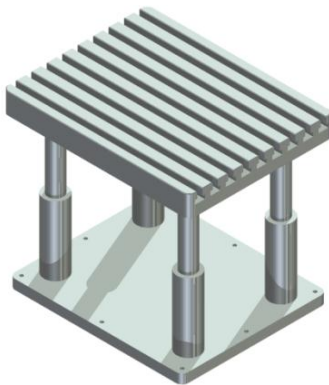
$$P_{\text{dov}} := 300\text{kPa}$$

únosnost v tlaku materiálu viz Tab. 4.4

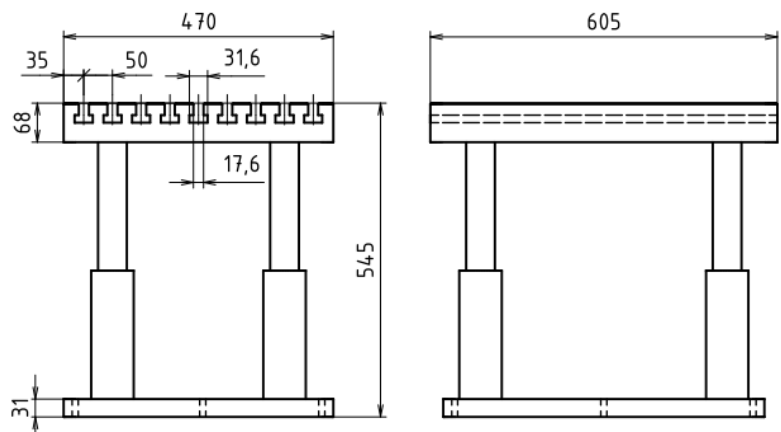
Jak vyplývá z výpočtu, hodnota únosnosti v tlaku použitého materiálu nebude při použití 4 bar jako upínací tlak upnutím překročena.

#### 4.9 Volba pracovního stolu

Zvolený pracovní stůl je uveden na Obr. 4.20. Jedná se o výškově stavitelný stůl s T-drážkami. Do nich je upnut stojan upnutí frézky, a na jeho povrchu jsou vytvořeny vstupní a výstupní pozice pro obrobek. Jeho rozměry jsou patrné z Obr. 4.21. Pracovní stůl jako celek je přišroubován k zemi, aby se stůl nemohl posouvat, a tím znehodnocovat kvalitu a přesnost obrábění.



Obr. 4.20 Pracovní stůl

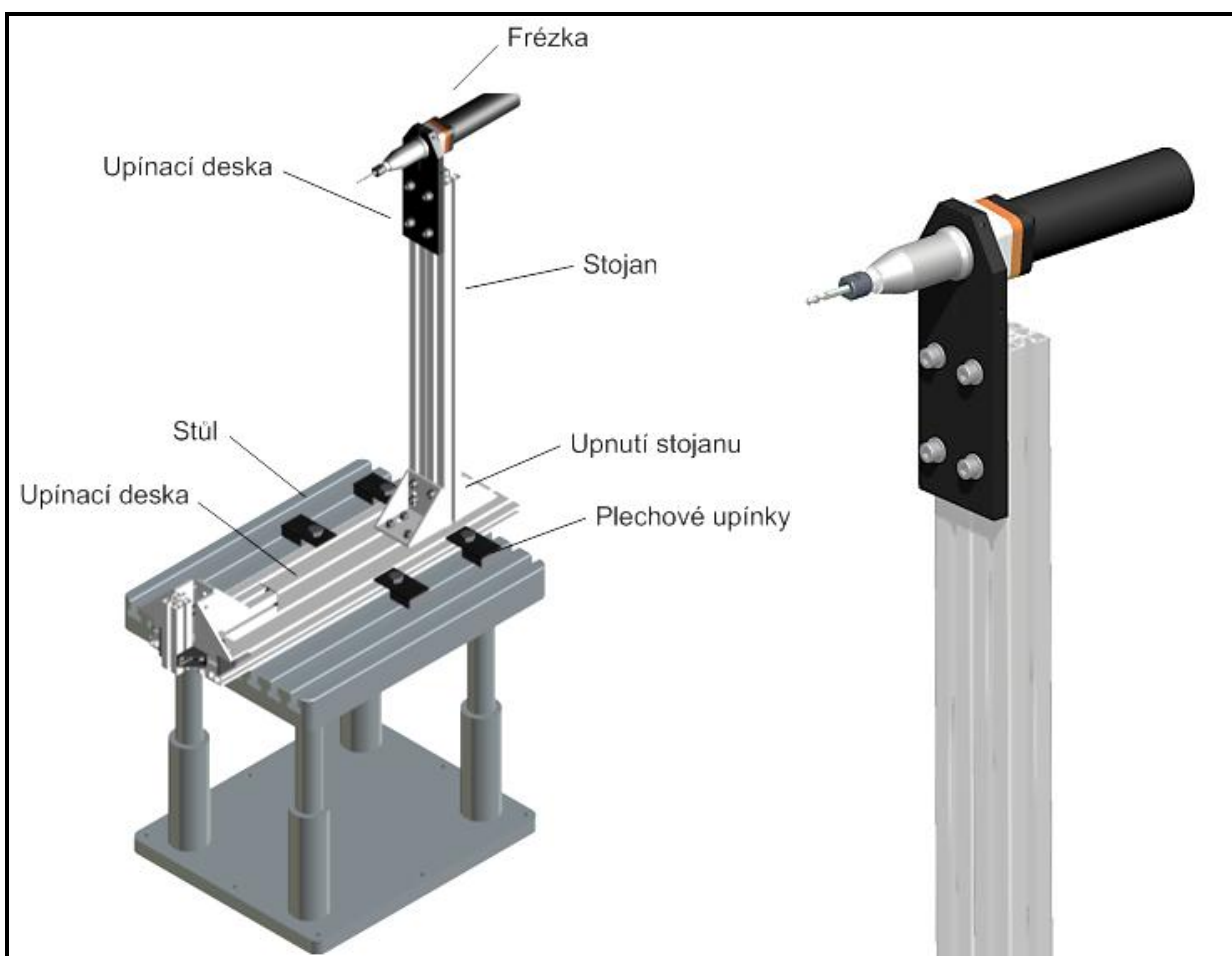


Obr. 4.21 Rozměry pracovního stolu

Na tomto stole je stacionárně upnuta ruční frézka.

#### 4.10 Návrh upnutí ruční frézky

Frézka má možnost stacionárního upnutí pomocí upínacího krku. Proto byla pro účel upnutí zvolena upínací deska, která upíná frézku a je přišroubována ke stojanu frézky. Ten je umístěn a přišroubován na stůl, a skládá se ze dvou hliníkových profilů 45x45 mm o délce 740 mm. Rozměry a vzhled celé sestavy stolu s upnutím frézky je uveden na Obr. 4.22. Základní rozměry sestavy stolu a upnutí frézky jsou patrné z Přílohy II.

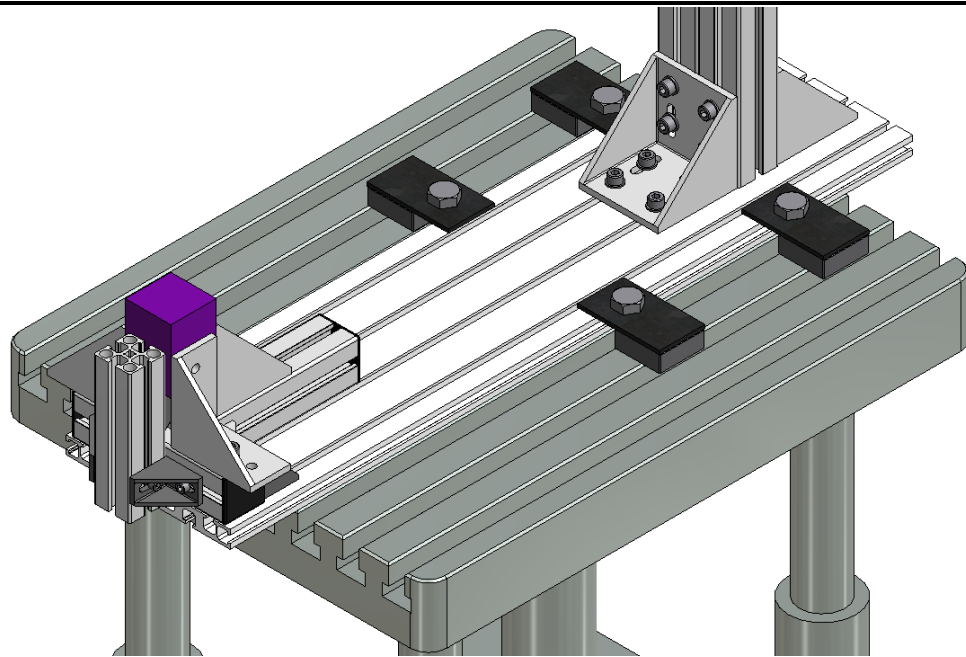


Obr. 4.22 Upnutí ruční frézky

#### 4.11 Nakládací a odkládací pozice

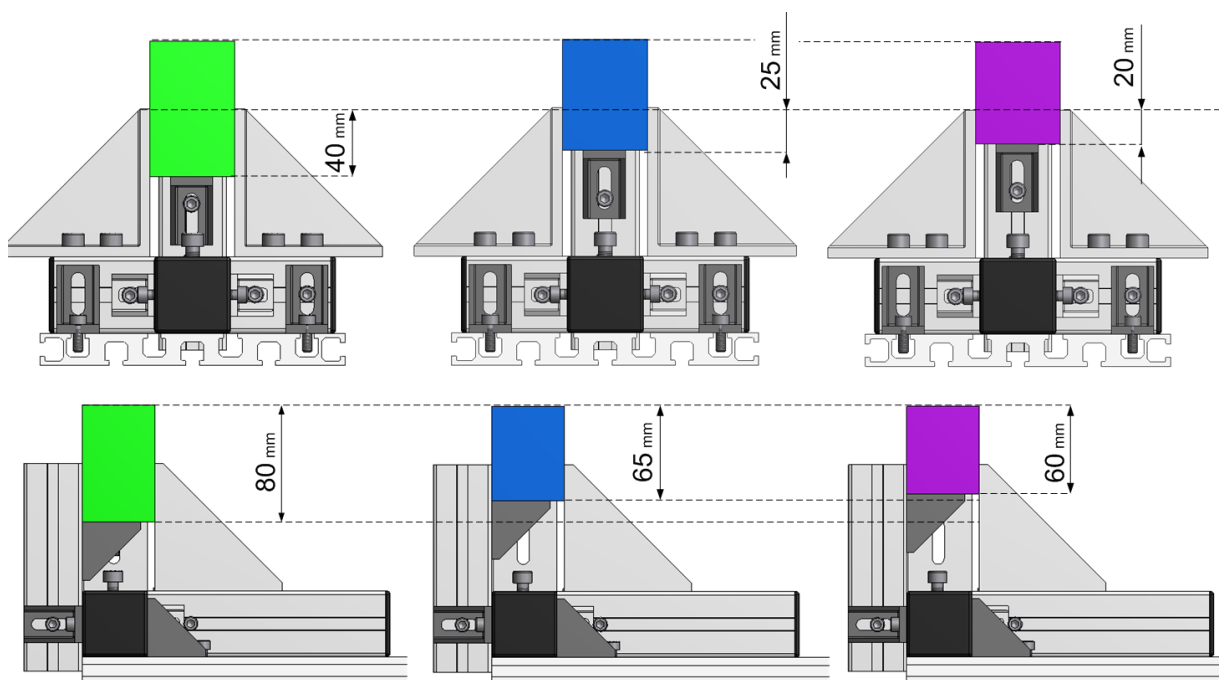
Jak je vidět z předcházejícího obrázku, upínací deska, která je umístěna na stole, je k němu upnuta pomocí jednoduchých plechových upínek. Na upínací desce je vytvořena nakládací a odkládací pozice. Její konstrukce je velice jednoduchá. Je složena z hliníkových profilů a také z příslušenství těchto hliníkových konstrukcí (Obr. 4.23).

Protože každý dílec, má odlišnou výšku polotovaru, bylo nutno vymyslet jednoduchou konstrukci nakládací a odkládací pozice, která by se dala jednoduše upravit pro daný dílec. Požadavkem bylo, aby při On-line programování najetí pro dílec, byl tento program stejný pro všechny součásti.



Obr. 4.23 Nakládací a odkládací pozice

Způsob úpravy nakládací a odkládací pozice pro každý dílec je patrný z Obr. 4.24. Na hliníkovém profilu 40x40 jsou z vnitřní strany vytvořeny rysky. Na ně se potom pro daný dílec nastavuje posuvný úhelník, na jehož volnou plochu se zakládá polotovár. Vnitřní rozměr sevření byl nastaven v tomto případě na hodnotu 50x50 mm. Konstrukce tohoto uzlu by mohla být daleko jednodušší a hlavně více dopracovaná, ale je složena ze zbytků profilů a příslušenství, které byli v dané chvíli dispozici. Upínací rozměry jsou ovšem stavitelné a mohou být nastaveny na jiné rozsahy polotovarů (i obdélníkové).

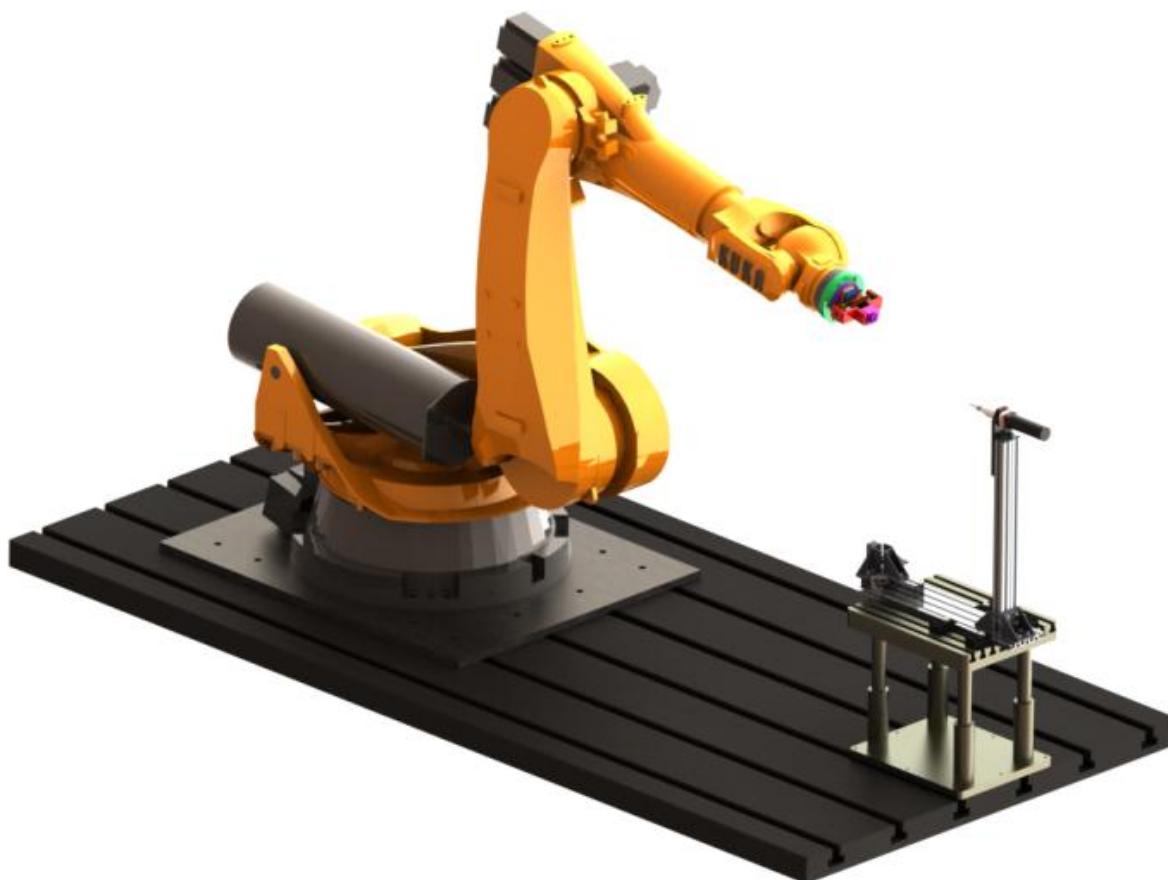


Obr. 4.24 Stavitelná opěra nakládací, vykládací pozice pro všechny dílce

#### 4.12 Vytvoření pracoviště

Po zvolení všech klíčových komponent pracoviště bylo na řadě jejich vytvoření ve virtuálním prostředí. Pro účely Off-line programování je nezbytné mít všechny prvky pracoviště vytvořeny v některém z CAD softwarů.

Všechny relevantní prvky byly pro účely prvotní vizualizace pracoviště vytvořeny v CAD softwaru Autodesk Inventor. Nutno podotknout, že 3D data průmyslového robotu jsou volně ke stažení z archivu stránek výrobce.



Obr. 4.25 Vizualizace pracoviště

Z obrázků je patrné, že zvolený průmyslový robot je vůči pracovnímu stolu ve velkém nepoměru. Důvody pro volbu tohoto robotu byly vysvětleny v minulých kapitolách.



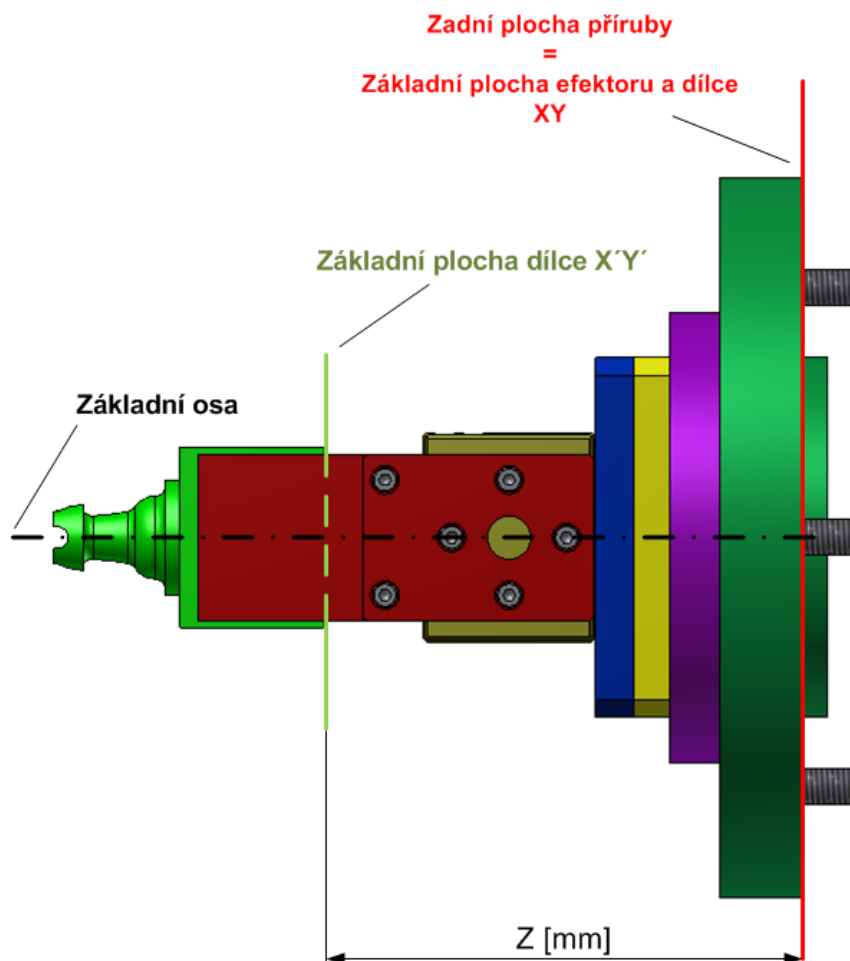
## 5. MODEL KONCOVÉHO EFEKTORU A DÍLCE - CAD

Pro účely správného přenesení dat ze skutečnosti do prostředí CAM je zapotřebí vytvořené 3D data efektoru a dílce mírně upravit. Jedná se pouze o změnu souřadného systému počátku efektoru a dílce. V následující kapitole je vysvětleno proč a jak toho dosáhnout.

### 5.1 Úprava souřadných systémů 3D dat

V prostředí CAD softwaru, je potřeba vytvořit kompletní sestavu koncového efektoru a dílce tak, jak bude v efektoru upnut.

V této sestavě je nejdříve potřeba umístit koncový efektor tak, aby jeho plocha, kterou je přišroubován k přírubě robotu, byla totožná se základní plochou sestavy XY. Dále je pak do této sestavy nahrán dílec tak, jak bude upnut v efektoru. Následuje změření posunutí mezi základní plochou dílce (jeho vlastní základní plocha X'Y') a základní plochou XY sestavy efektoru a dílce – Vzdálenost Z [mm] (Obr. 5.1).

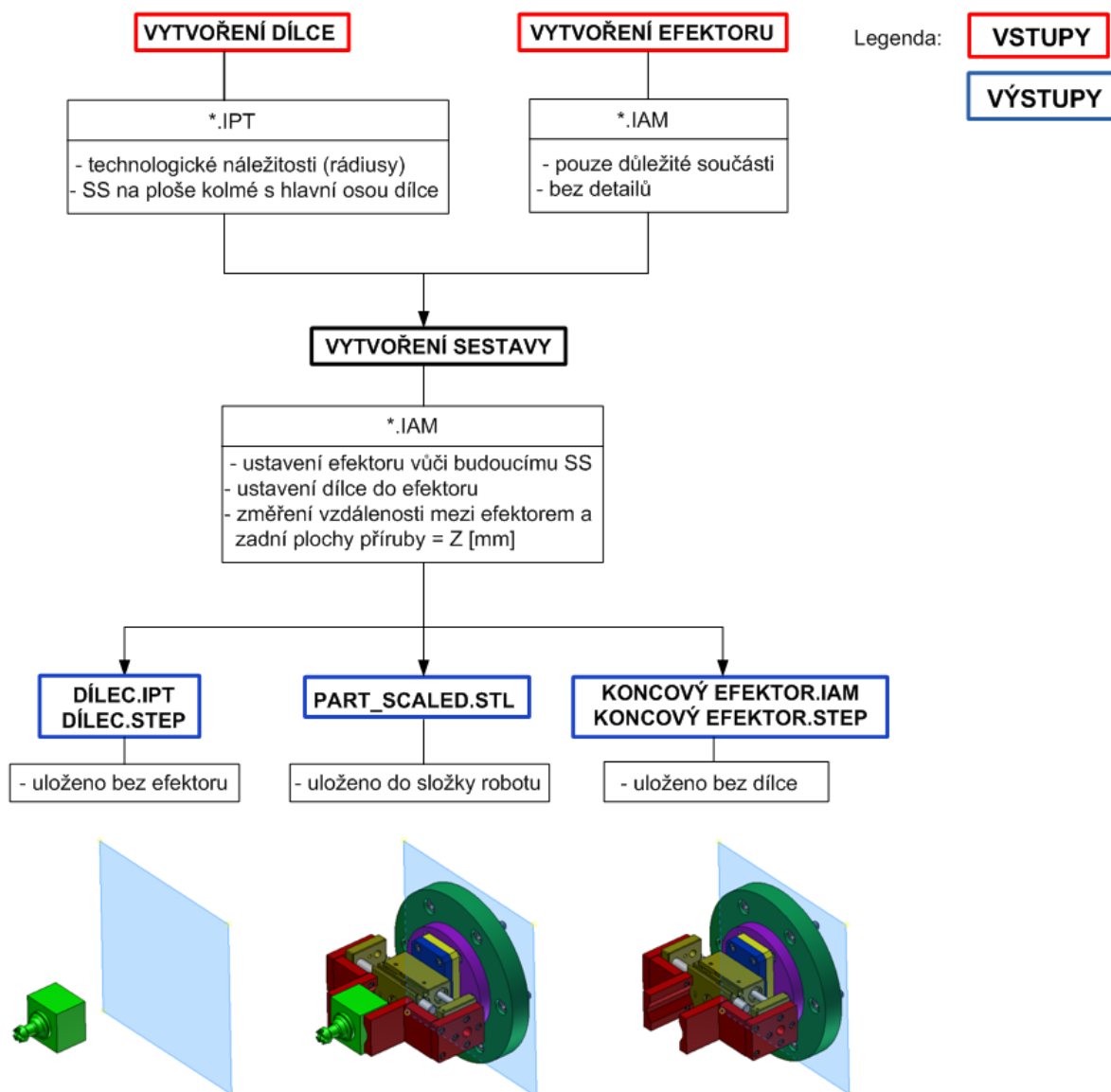


Obr. 5.1 Měření posunutí dílce vůči základní ploše sestavy efektoru a dílce

O tuto vzdálenost (  $Z$  [mm] ) musí být následně v prostředí CAM také posunut dílec vůči souřadnému systému. Volba jestli dílec uložit jako nativní soubor Inventoru \*.ipt, je podmíněno přítomností Inventoru na počítači, kde budeme provádět CAM část. V opačném případě je nutno soubor uložit ve výměnném formátu \*.step.

Je zde také možnost ze sestavy efektoru a dílce vždy vymazat buď dílec nebo efektor, v závislosti na tom, který soubor chceme vytvářet. Jestliže chceme mít dílec posunutý ve správném souřadném systému, stačí v sestavě efektoru a dílce vymazat právě efektor. Tento soubor potom uložit ve formátu \*.step. V prostředí CAM se již pak tento dílec po nahrání objeví v posunutém (správném) souřadném systému.

Dalším krokem je uložení sestavy efektoru a dílce jako souboru „part\_scaled.stl“. Tento soubor využívá Robotmaster do prostředí simulace a také jako zdroj 3D dat pro analýzu případných kolizí. Tento soubor je nutno uložit do adresáře s robotem.



Obr. 5.2 Vývojový diagram tvorby koncového efektoru – CAD část

V posledním kroku této části je potřeba vymazat ze sestavy dílce a efektoru právě pouze dílec, a tento soubor uložit. Ten bude sloužit jako 3D data efektoru pro CAM část. Podobně jako dílec je možno samotný efektor uložit v nativním formátu sestav inventoru (\*.iam), ale pouze za předpokladu, že bude na počítači s Mastercam nainstalovaný také Inventor. Tento relativně složitý postup je znázorněn na Obr. 5.2.

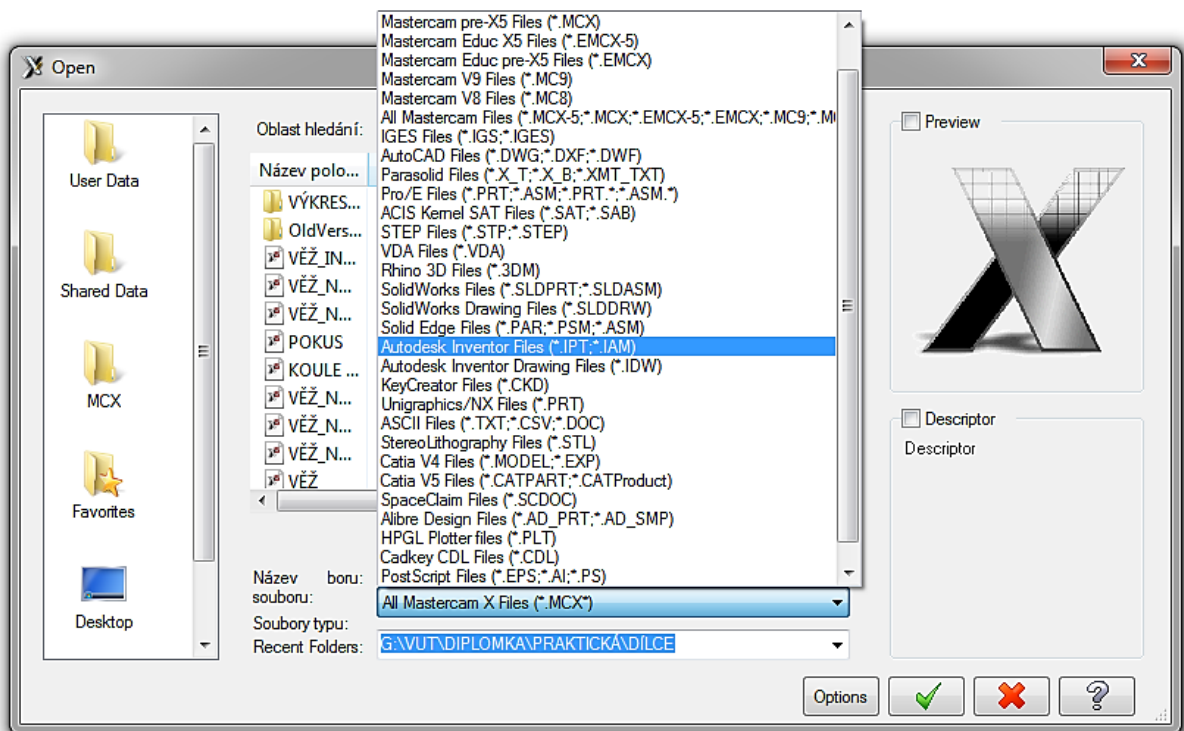
Důvodem pro provedení této procedury je záruka, že všechny tři soubory (dílec, efektor, dílec a efektor) mají stejný souřadný systém, který je také stejný se souřadným systémem příruby robotu.

## 6. MODEL KONCOVÉHO EFEKTORU A DÍLCE - CAM

Po úpravě souřadných systémů dílce a efektoru se v této fázi přistupuje k nahrání těchto součástí do programu Mastercam. Opět zde bude nutno spojit dva soubory (efektor a dílec).

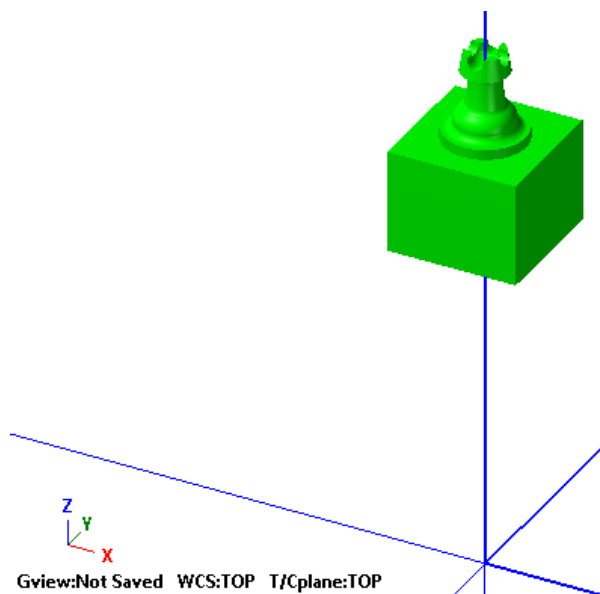
### 6.1 Spojení efektoru a dílce v prostředí Mastercam

Jak již bylo uvedeno, Mastercam umožňuje práci s mnoha datovými formáty dílců (Obr. 6.1). Mastercam také umožňuje rozdělení jednotlivých grafických struktur, do jednotlivých úrovní („levelů“). Ty jdou jednotlivě skrývat a tím uživateli zpřehledňovat práci v okně programu.



Obr. 6.1 Podporované grafické formáty Mastercamu

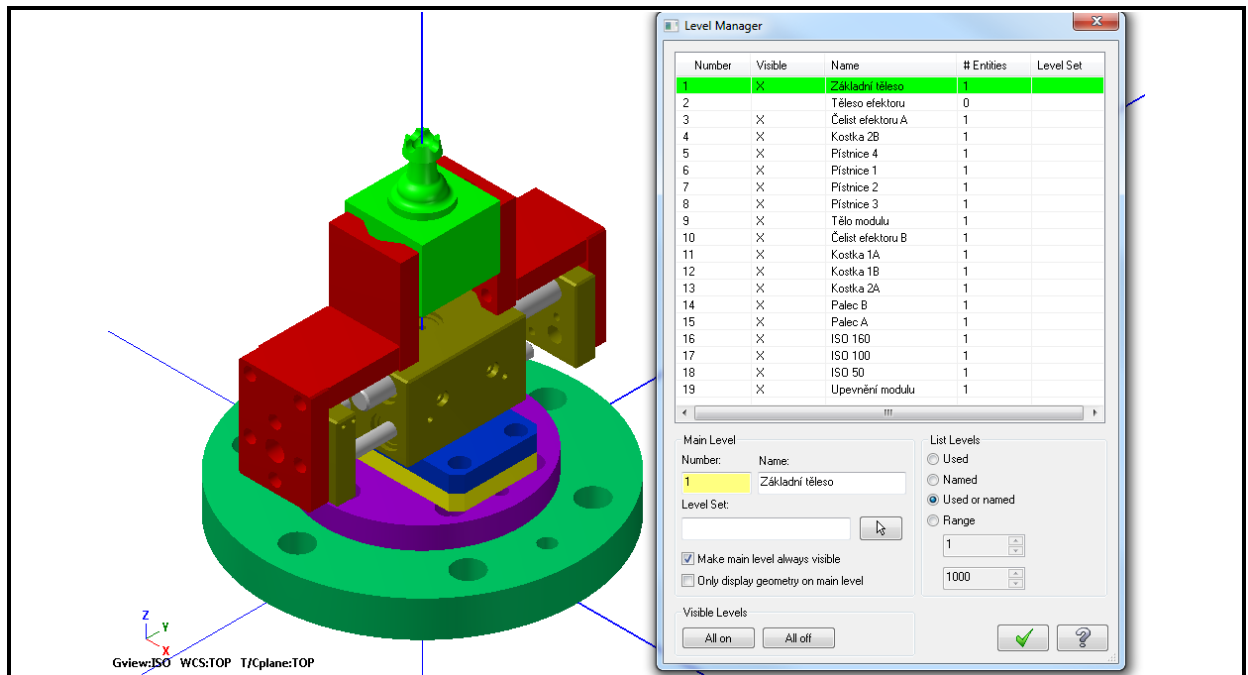
Prvním krokem je nahrání souboru např. dílce, který je vůči své základní rovině posunut o určitou vzdálenost „Z“ (viz. Obr. 6.1). Jestliže v minulém kroku uživatel správně uložil posunutý dílec, bude tento zobrazen podobně jako na Obr. 6.2. Dílec nebo jakákoli součást, se dá do programu nahrát pomocí volby *File- File Merge/Pattern*. Po této volbě je zde možnost dílec přepolohovat (natočit kolem určité osy) vůči souřadnému systému, nebo změnit jeho měřítko.



Obr. 6.2 Nahrání dílce do prostředí Mastercamu

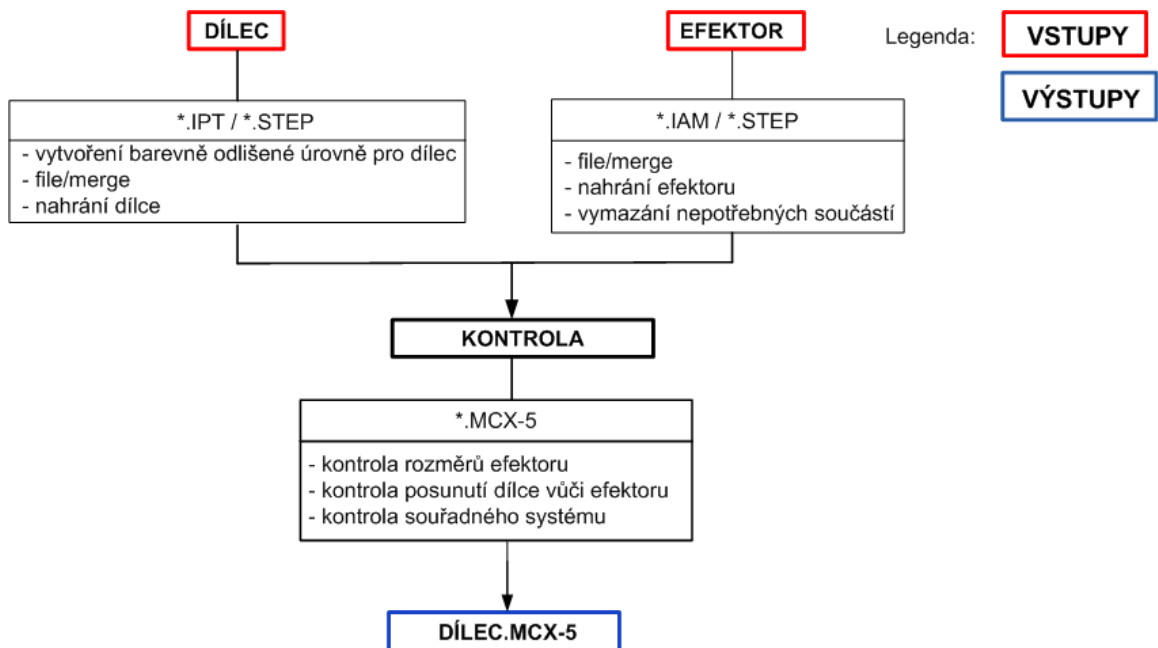
Jak bylo uvedeno, pro dílec je vhodné vytvořit samostatnou úroveň, kterou lze libovolně zobrazovat a skrývat.

Dalším krokem je nahrání souboru koncového efektoru (bez dílce). Do programu je nahráván stejným způsobem jako dílec. Po nahrání se každá jeho součást uloží do samostatné úrovně („levelu“). To je výhodné hlavně z toho důvodu, že lze tyto součásti (šrouby, kolíky apod.) ještě v této chvíli vymazat, nebo pouze skrýt a využívat je v pozdějších fázích (kontrola kolizí). Jednotlivé úrovně lze také přejmenovat, filtrovat a tím uživateli zlehčovat práci a orientaci s grafikou efektoru (Obr. 6.3).



Obr. 6.3 Nahrání efektoru, jednotlivé součásti (úrovně) efektoru

Po této fázi je doporučeno změřit posunutí dílce vůči počátku (vzdálenost Z [mm]), a také umístění zadní plochy vnější přírby efektoru vůči celkovému počátku. Dále zkontrolovat známé rozměry efektoru, jestli nedošlo ke změně měřítka. Celkový proces v této fázi tvorby je zobrazen na Obr. 6.4.



Obr. 6.4 Proces spojení efektoru a dílce v prostředí Mastercam

Nyní je nahrání celého efektoru s dílcem hotovo, a lze přistoupit k samotnému vytváření obráběcích drah. Je také výhodné v této fázi zneviditelnit všechny součásti kromě dílce. Výstupem z této fáze je uložený soubor \*.mcx-5 (koncovka Mastercamu ve verzi X5).

## 7. VOLBA NÁSTROJŮ A PŘÍSLUŠENSTVÍ - CAM

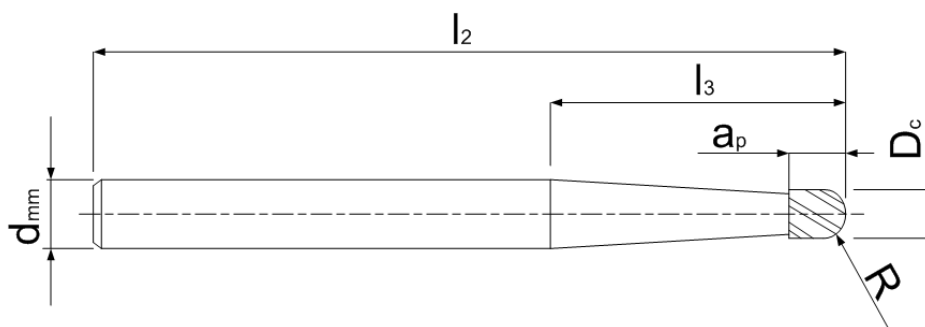
Po nahrání efektoru a dílce se v dalším kroku přistupuje k vytvoření obráběcích drah nástroje. Předtím je ale nutné zvolit případně vytvořit v programu nástroje k tomu vhodné.

### 7.1 Volba frézy

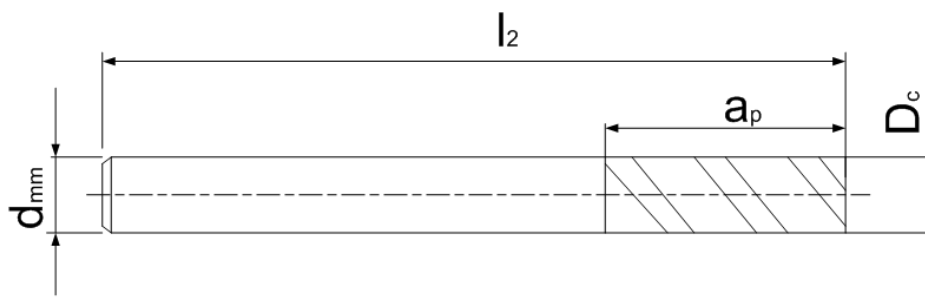
Toto pracoviště nemá v současné konfiguraci možnost automatické výměny nástrojů. Při požadavku výměny nástroje, by se musel celý proces zastavit, ručně odšroubovat sklíčidlo, vyměnit případně kleštinu, upnout nový nástroj, a ručně nastavit vzdálenost vysunutí. To by ovšem zanášelo do procesu další nepřesnosti vlivem odlišného nastavení vysunutí prvního a druhého nástroje. Na druhou stranu, při použití více nástrojů pro jeden obrobek, by mohlo být prozkoumáno chování více typů nástrojů při procesu „Part to tool“. Pro eliminaci nepřesností nastavení vysunutí mezi prvním (hrubovacím) a druhým (dokončovacím) nástrojem jsou plochy opatřeny potřebným přídatkem.

K obrábění obecných ploch, či jiných prostorových objektů, se ve velké míře používají různé typy stopkových fréz. Pro případ této práce byly zvoleny tři stopkové frézy. Hrubovací operace se provádí klasickou stopkovou válcovou frézou. Dokončovací operace se pak provádí stopkovou frézou s kulovou hlavou. Od průměru dokončovací frézy se odvíjí další náležitosti. Především se jedná o rádius mezi navazujícími plochami. Jeho hodnota nesmí být menší, než je poloměr sféry frézy. V opačném případě by došlo k nedořezání profilu dílce.

Rozměry a tvar jednotlivých fréz jsou patrné z Obr. 7.1, Obr. 7.2 a Tab. 7.1. Jejich výrobcem je firma SECO. Frézy jsou ručně upnuty ve frézce pomocí kleštiny a její vysunutí z čela frézky je ručně nastaveno na určitou hodnotu (pomocí posuvného měřidla).



Obr. 7.1 Výkres kulové dokončovací frézy [17]



Obr. 7.2 Výkres válcové hrubovací frézy [17]

Typ frézy	Označení frézy	Rozměry v [mm]						$Z_n$ [-]
		$D_c$	$d_{mm}$	$l_2$	$l_3$	$a_p$	R	
Kulová	TDM - MEGA 065064	6	8	65	25	6	3	4
Válcová	HSC - 00025533	6	6	65	-	20	-	2

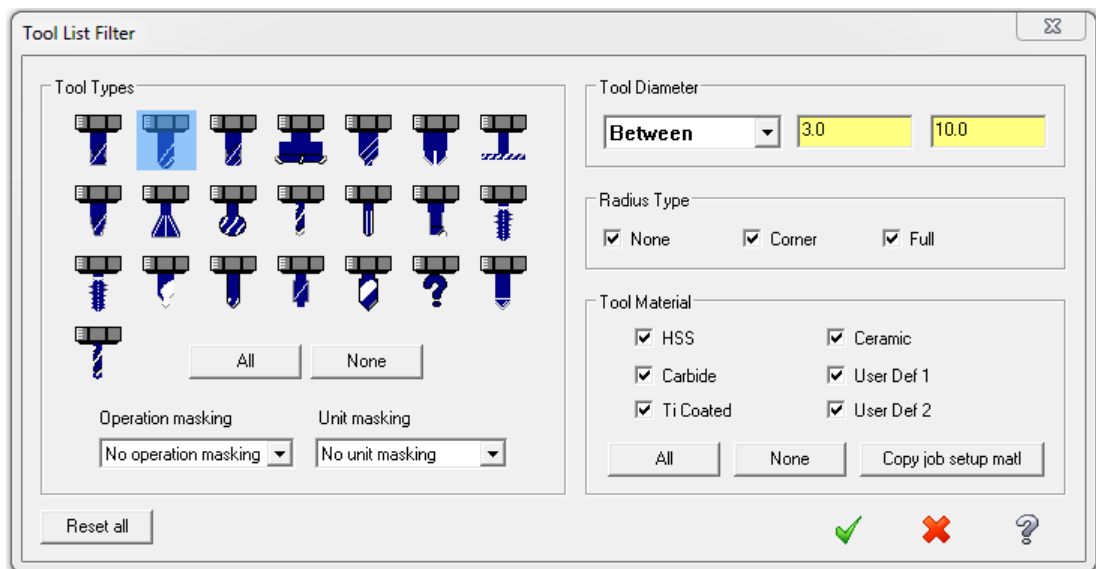
Tab. 7.1 Používané typy fréz

Význam symbolů:

- $D_c$  – průměr řezné části [mm]
- $d_{mm}$  – průměr stopky [mm]
- $l_2$  – celková délka nástroje [mm]
- $l_3$  – délka kuželové části nástroje [mm]
- $a_p$  – šířka záběru ostří
- $Z_n$  – počet zubů frézy

## 7.2 Vytvoření fréz v programu Mastercam

Mastercam nabízí ve své knihovně nejrůznější množství fréz. K výběru potřebné frézy slouží filter (Obr. 7.3), který po zadání požadovaného intervalu rozměrů, tvaru a doplňujících údajů zobrazí vyhovující frézy v knihovně.

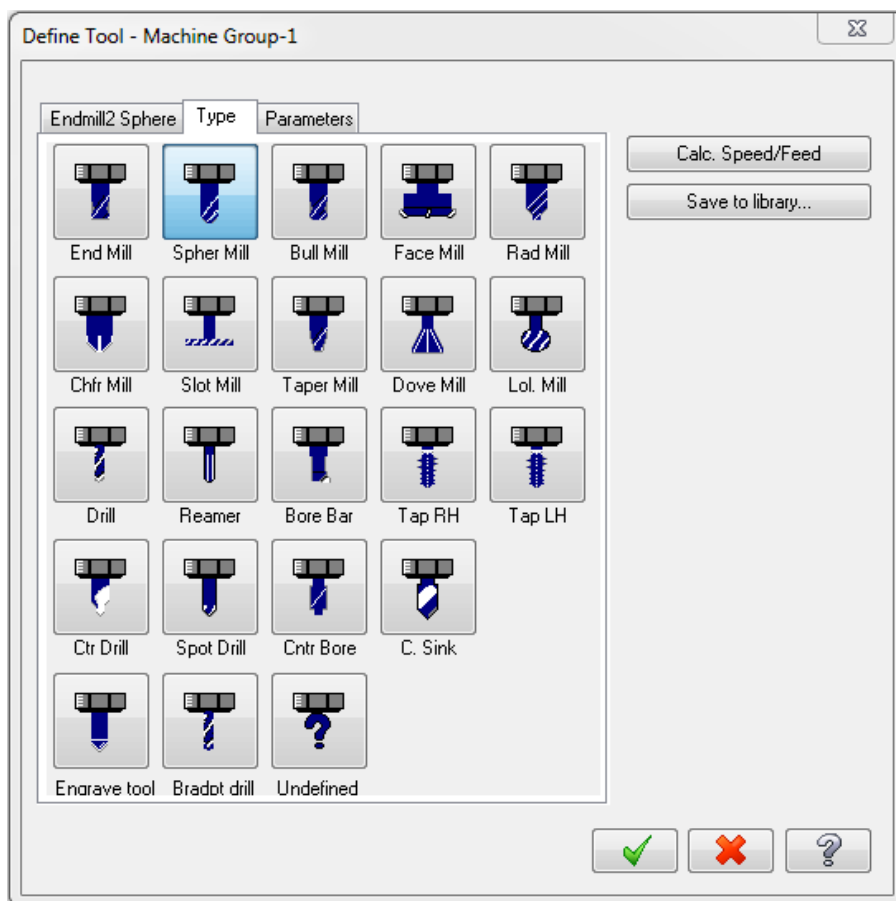


Obr. 7.3 Nástrojový filter Mastercam

Po zadání požadovaných rozměrů sice program našel ve své databázi kulové frézy o průměru 6 i 4 mm a válcové frézy o průměru 6 mm, ale jejich ostatní rozměry se liší od těch, které mají použité frézy. Proto byla potřeba tyto nástroje vytvořit.

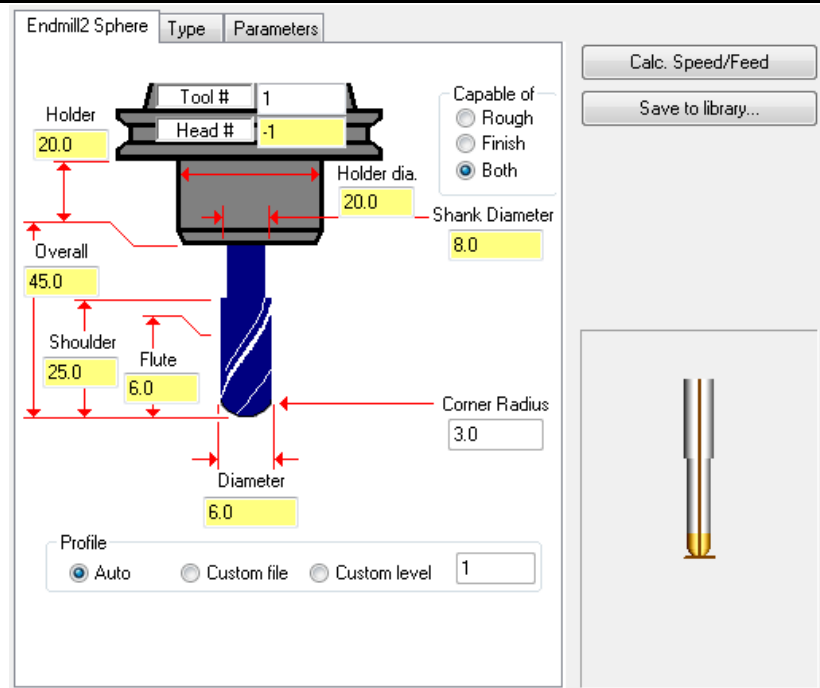
Mastercam umožňuje vytvořit také samostatnou uživatelskou knihovnu nástrojů, do které lze nástroje nejen importovat, ale především vytvářet úplně nové nástroje. Po založení nové

uživatelské knihovny lze vytvářet nové nástroje pomocí předvolby „Create new tool“. První z volby parametrů je typ uživatelského nástroje. Na výběr je množství tvarů nástrojů (Obr. 7.4). Kromě toho je zde i možnost importovat vlastní tvar nástroje, který musí být předem uložen v úložišti nástrojů (volba „Undefined“). Nástroj je zde uložen jako osově souměrný obrazec poloviny nástroje.

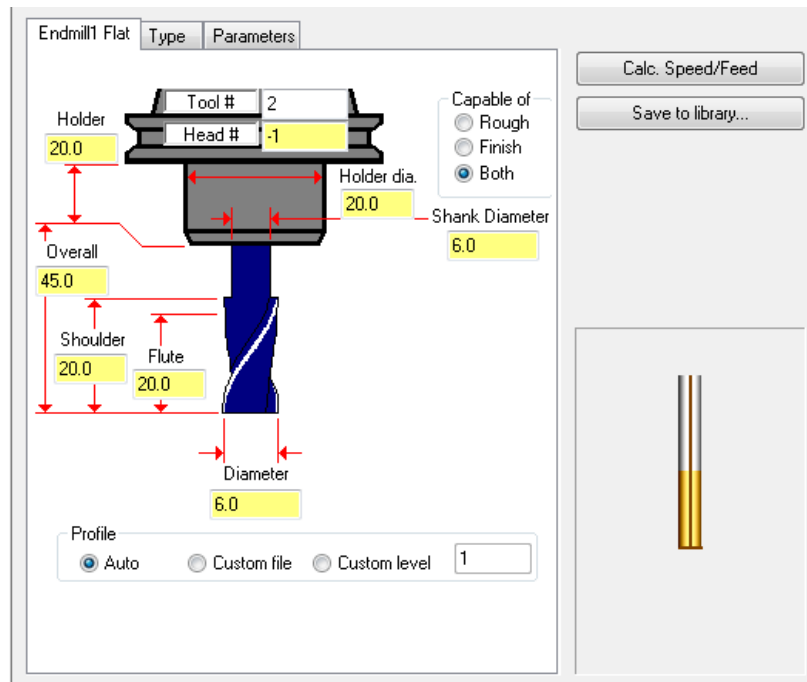


Obr. 7.4 Volba typu nástroje

Následuje volba jednotlivých rozměrů frézy, vysunutí nástroje z držáku, informace jestli je fréza schopna pouze dokončovat nebo také hrubovat. V pravém dolním rohu se zobrazuje skutečný profil nástroje (Obr. 7.5, Obr. 7.6).



Obr. 7.5 Volba rozměrů definovaného nástroje – dokončovací fréza



Obr. 7.6 Volba rozměrů definovaného nástroje – hrubovací fréza

Posledním krokem je volba řezných parametrů nástroje (hodnota posuvu, otáčky nástroje, posuv na zub) a doplňkových parametrů (směr otáček nástroje, materiál nástroje, počet zubů). Řezné parametry mohou být spočítány přímo Mastercamem (dle parametrů obráběcího stroje), nebo doplněny dle doporučení (volba „Calculate Speed/Feed“ Obr. 7.7, Obr. 7.8).

Výrobce nástroje (firma SECO), má doporučené řezné podmínky pro různé skupiny obráběných materiálů (ocel, ocelolitina, nerezové oceli, litina, žáruvzdorné slitiny, kalené materiály, hliník a neželezné materiály). Bohužel mezi nimi nejsou řezné podmínky pro polystyren ani pro dřevo. Následuje proto výpočet pro určení vhodných řezných podmínek dle literatury [20]. Vřeteno (ruční frézka) má pouze omezený rozsah otáček (13000-31000 min<sup>-1</sup>). Proto byla zvolena hodnota dokončovacích otáček jako tato maximální hodnota, a hodnota hrubovacích otáček jako tato minimální hodnota.

### Hrubování: Válcová fréza Ø6

$D := 0.006\text{m}$	průměr nástroje
$n_{\text{hrub}} := 13000 \cdot \frac{1}{\text{min}}$	nejnižší otáčky vřetena
$v_{\text{c\_hrub}} := D \cdot n_{\text{hrub}} \cdot \pi = 245.044 \cdot \frac{\text{m}}{\text{min}}$	řezná rychlost hrubovací
$Z_{\text{eff\_hrub}} := 2$	počet efektivních břitů na hrubovacím nástroji
$f_z := 0.013 \cdot D = 0.078 \cdot \text{mm}$	posuv na zub
$v_{\text{f\_hrub}} := f_z \cdot n_{\text{hrub}} \cdot Z_{\text{eff\_hrub}} = 2.028 \times 10^3 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	velikost posuvu hrubování
$f_{\text{n\_hrub}} := \frac{v_{\text{f\_hrub}}}{n_{\text{hrub}}} = 0.156 \cdot \text{mm}$	posuv na otáčku hrubování

### Dokončování: Fréza s kulovou hlavou Ø6

$n_{\text{dok}} := 31000 \cdot \frac{1}{\text{min}}$	nejvyšší otáčky vřetena
$v_{\text{c\_dok}} := D \cdot n_{\text{dok}} \cdot \pi = 584.336 \cdot \frac{\text{m}}{\text{min}}$	řezná rychlost dokončovací
$Z_{\text{eff\_dok}} := 4$	počet efektivních břitů na hrubovacím nástroji
$f_z := 0.013 \cdot D = 0.078 \cdot \text{mm}$	posuv na zub
$v_{\text{f\_dok}} := f_z \cdot n_{\text{dok}} \cdot Z_{\text{eff\_dok}} = 9.672 \times 10^3 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	velikost posuvu dokončování
$f_{\text{n}} := \frac{v_{\text{f\_dok}}}{n_{\text{dok}}} = 0.312 \cdot \text{mm}$	posuv na otáčku dokončování



Tyto hodnoty byly zadány do parametrů pro daný používaný nástroj (Obr. 7.7, Obr. 7.8).

Parameter	Value
Rough XY step (%)	45.0
Rough Z step	4.0
Finish XY step	1.0
Finish Z step	1.0
Required pilot dia.	0.0
Dia. offset number	1
Length offset number	1
Feed rate	584.0
Plunge rate	292.0
Retract rate	292.0
Spindle speed	31000
Number of flutes	4
% of matl. cutting speed	25.0
% of matl. feed per tooth	25.0
Tool file name	C:\USERS\PUBLIC\DOCUME
Tool name	Kulová fréza fi6
Manufacturer's tool code	
Chuck	

Obr. 7.7 Nastavení řezných podmínek nástroje – dokončování

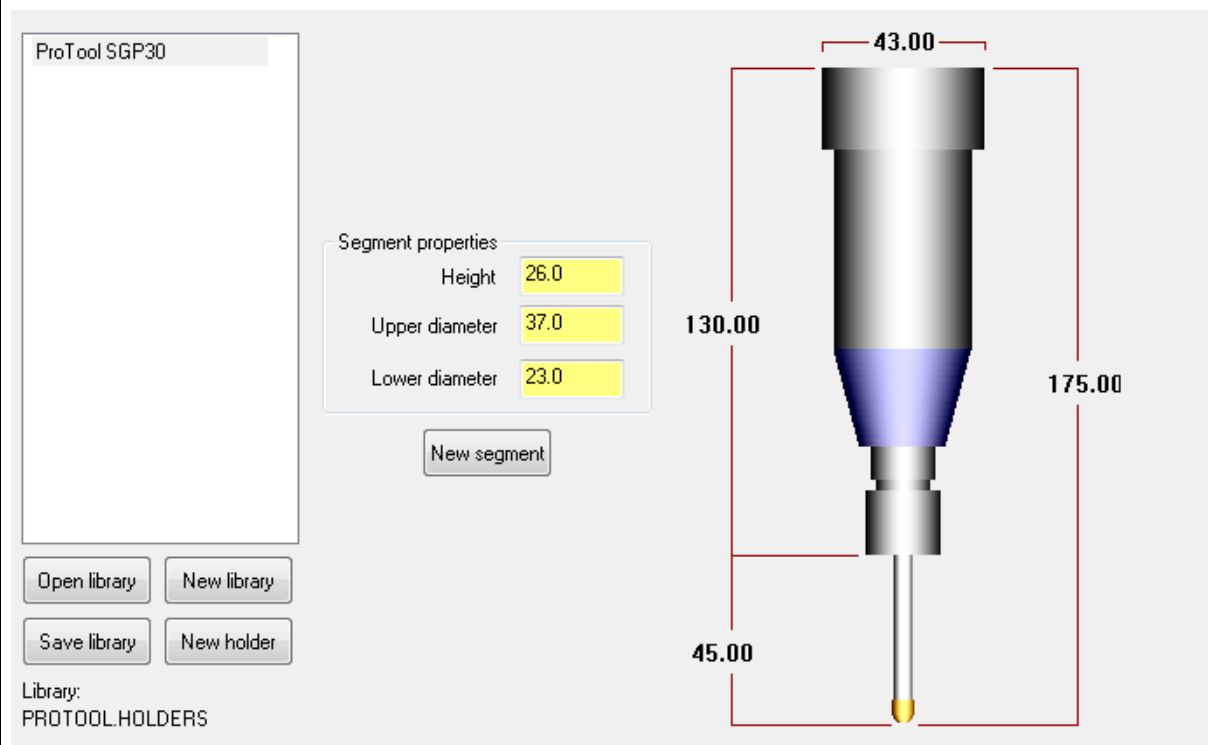
Parameter	Value
Rough XY step (%)	45.0
Rough Z step	10.0
Finish XY step	3.0
Finish Z step	3.0
Required pilot dia.	0.0
Dia. offset number	2
Length offset number	2
Feed rate	245.0
Plunge rate	122.5
Retract rate	122.5
Spindle speed	13000
Number of flutes	4
% of matl. cutting speed	25.0
% of matl. feed per tooth	25.0
Tool file name	
Tool name	valcova freza fi6
Manufacturer's tool code	
Chuck	

Obr. 7.8 Nastavení řezných podmínek nástroje – hrubování

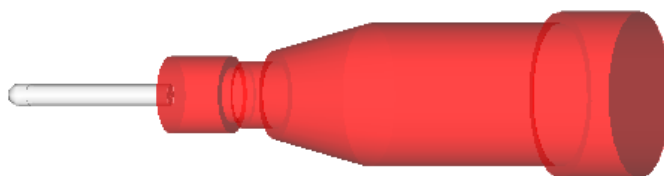
### 7.3 Vytvoření nástrojového upínače

Dalším krokem je vytvoření nástrojového upínače. V běžné situaci, simulaci obrábění na CNC stroji, jsou k dispozici knihovny několika typů kompletních nástrojových upínačů. Jsou zde k výběru modely např. MAS-BT, CT, HSK. Mastercam ovšem umožňuje vytvoření požadovaného typu upínače. Jak lze vidět na Obr. 7.9, tvorba probíhá editací rozměrů jednotlivých segmentů upínače. Segmenty lze libovolně přidávat a editovat a lze jich na jednom upínači vytvořit až 20. Lze zadat délku, počáteční a koncový průměr segmentu. Tím lze vytvořit také kuželovité části upínače (zadáním rozdílné hodnoty počátečního a koncového průměru segmentu).

Pro potřeby této práce byl vytvořen nástrojový upínač v podobě části ruční frézky, která bude v pracovišti zasahovat do pracovního prostoru (Obr. 4.22). Výhodou tohoto řešení je možnost simulace obrábění s použitím reálných dat a tím přiblížení skutečnosti. Případné kolize budou také zapříčiněny skutečným tvarem upínače. Při použití např. upínače HSK, by k některým kolizím také vůbec nemuselo dojít.



Obr. 7.9 Vytvoření nástrojového upínače



Obr. 7.10 Vzhled nástrojového upínače v prostředí simulace Mastercamu

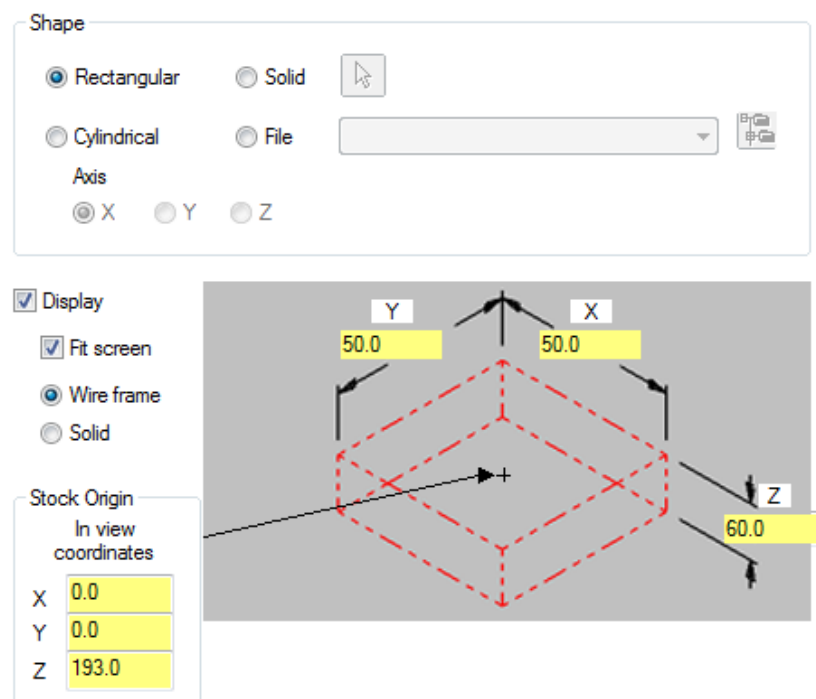
## 8. OBRÁBĚCÍ STRATEGIE - CAM

### 8.1 Kontrolní součást pro 2,5 D obrábění – obráběcí strategie

V následujících kapitolách budou několikrát zmíněny anglické názvy jednotlivých obráběcích operací a jejich nastavení. Pro lepší přehlednost budou uvedeny kurzívou. A i když je jejich překlad a vysvětlení k čemu slouží vždy uvedeno, je pro lepší přehlednost uveden na konci této práce slovník obsahující všechny tyto výrazy.

#### 8.1.1 Nastavení polotovaru

Prvním krokem při vytváření obráběcích drah, je vždy vytvoření polotovaru. Hodnoty nastavení polotovaru jsou ukázány na Obr. 8.1. Je zde přídavek na obrábění ve směru osy Z v hodnotě 5 mm. Horní část polotovaru je posunuta celkově o hodnotu 193 mm, což je hodnota součtu výšky dílce (55 mm), přídavku na obrábění v ose Z (5 mm) a posunutí dílce vůči počátku v ose Z (133 mm).



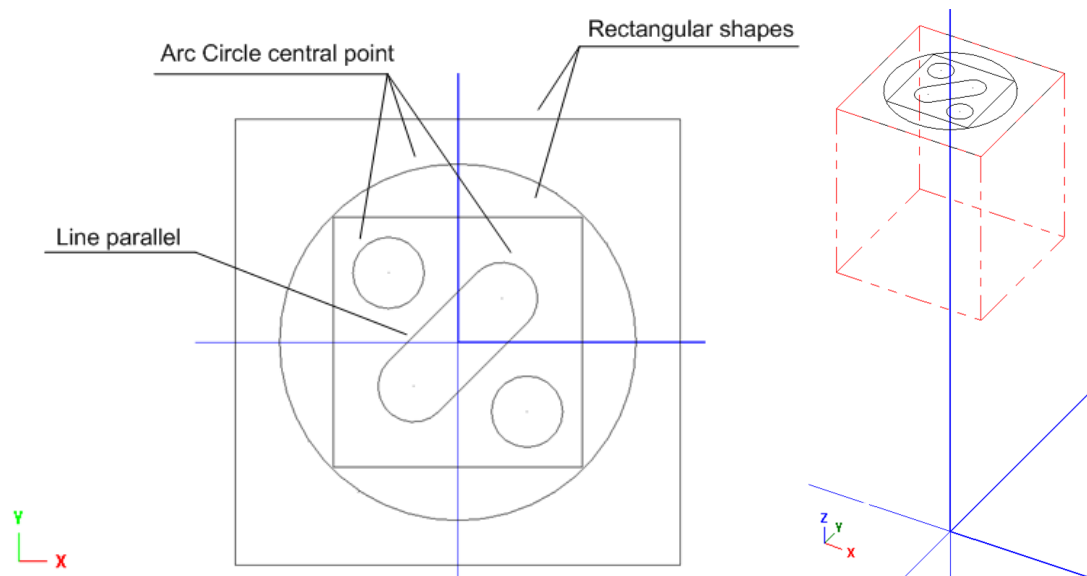
Obr. 8.1 Nastavení polotovaru

#### 8.1.2 Vytvoření kontur dílce

Jako ukázka využitelnosti Mastercamu jako skicáře, je zde provedeno vytvoření kontur dílce dle jeho výkresu. Tyto kontury potom slouží jako vodící prvky pro nástroj. Dají se jimi definovat jednotlivé oblasti, drážky nebo ostrůvky na dílci. Ačkoli jsou tyto kontury na skutečném dílci v prostoru, v případě 2,5 D obrábění se všechny nakreslí do jedné roviny. Jednotlivým úběřům se pak pouze nastavuje typ obrábění a především hloubka, ve které má být úběř proveden.

Mastercam nabízí jednoduché rozhraní pro vytvoření 2D skic. Důležité je ovšem kreslení těchto skic ve správné výšce Z nad rovinou XY. Tato hodnota by měla reprezentovat horní plochu polotovaru se všemi přídávky a také hodnotu usazení obrobku v efektoru (viz výše). V tomto případě tedy ve výšce  $Z = 193$  mm nad rovinou XY.

Následující obrázek ukazuje jednotlivé kontury a nástroje využitě pro jejich vytvoření (Obr. 8.2 vlevo). Je nutné vytvořit také vnější konturu polotovaru. Spolu s polotovarem vypadají kontury dle Obr. 8.2 vpravo. Je zde vidět, že kontury dílce jsou správně vytvořeny na horní ploše polotovaru.

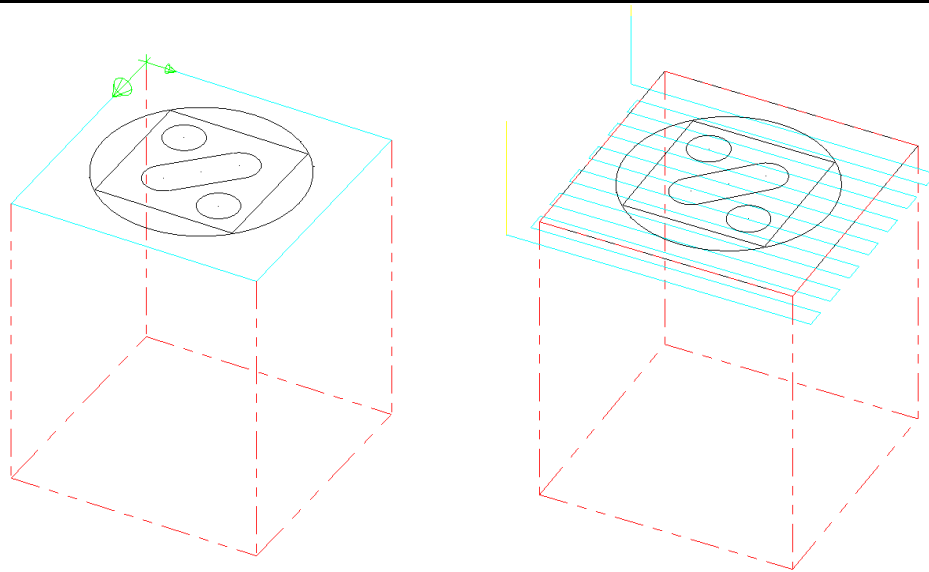


Obr. 8.2 Vytvořené kontury dílce, umístění kontur na polotovaru

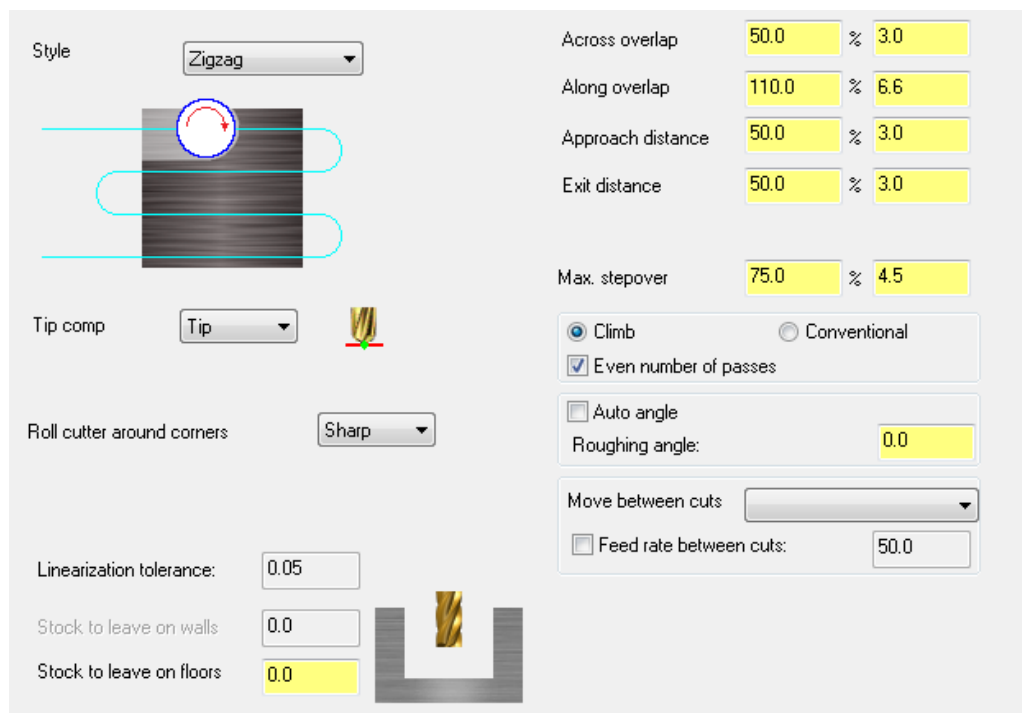
Jak již bylo uvedeno, celý dílec bude vyroben jedním nástrojem a to válcovou frézou  $\varnothing 6$  s délkou řezné části 20 mm. Všechny využitě příkazy pro definování typu obrábění pro tento dílec budou klasického typu (2D).

### 8.1.3 Zarovnání čela

První obráběcí strategií pro tento dílec je zarovnání čela. Pro tu se využije příkaz čelního frézování (*Facing*). Protože je zde přídavek na obrábění pouze 5 mm, lze toto zarovnání provést na jeden úběr. Na následujících obrázcích lze vidět výběr kontury, vytvořenou dráhu a nastavení pro tuto proceduru.



Obr. 8.3 Výběr kontury pro zarovnání čela, dráhy nástroje

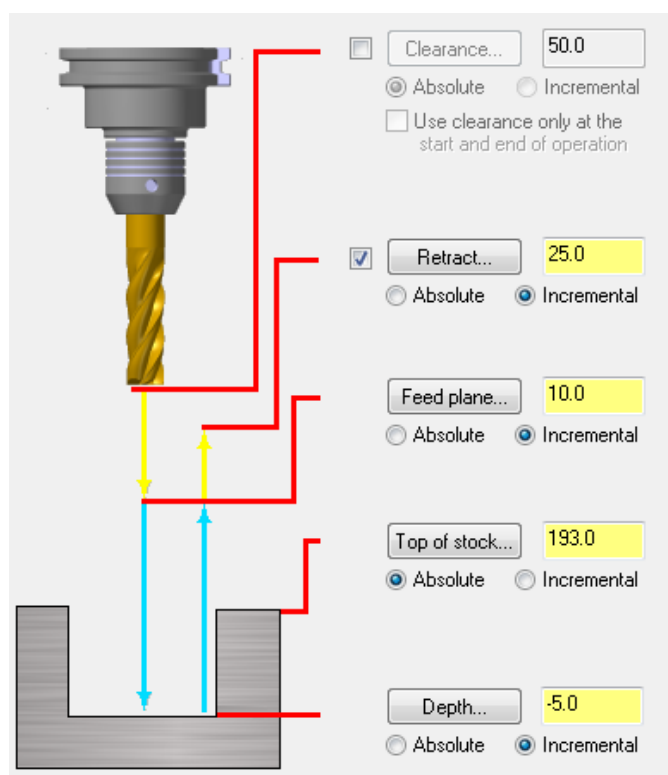
Obr. 8.4 Nastavení parametrů řezu (*Cut pattern*)

Pro 2D obrábění obecně, má uživatel na výběr z velkého množství možností. Všechny mají ovšem některé prvky stejné. Jedná se především o:

- Parametry řezu (*Cut pattern*):**
- Nastavení typu obrábění (ve spirále, jeden směr apod.)
  - Nastavení přídávku pro stěny a spodní plochy
  - Překrytí jednotlivých stop nástroje
  - Množství a hloubky úběrů

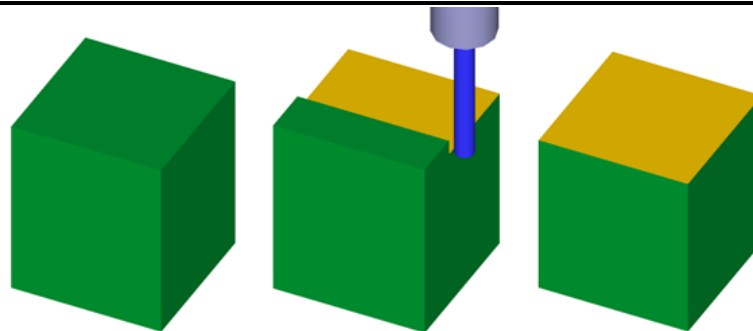
- Parametry přejezdů (Linking parameters):**
- Souřadnice pohybu nad polotovarem
  - Nastavení odjezdů ze záběru
  - Nastavení výšky horní plochy polotovaru
  - Hloubka celkového úběru

Pro 2,5 D obrábění je charakteristické to, že jednotlivým konturám, které jsou v jedné výšce, se přiřazují jiné hloubky záběru (inkrementálně). Pro první úběr je tedy hodnota úběru (*Depth*) -5 mm, protože je zde přídavek na obrábění 5 mm do materiálu. Důležitá je zde také správná hodnota umístění horní plochy polotovaru (*Top of stock*).



Obr. 8.5 Nastavení odjezdů nástroje, výšky polotovaru a celkového úběru

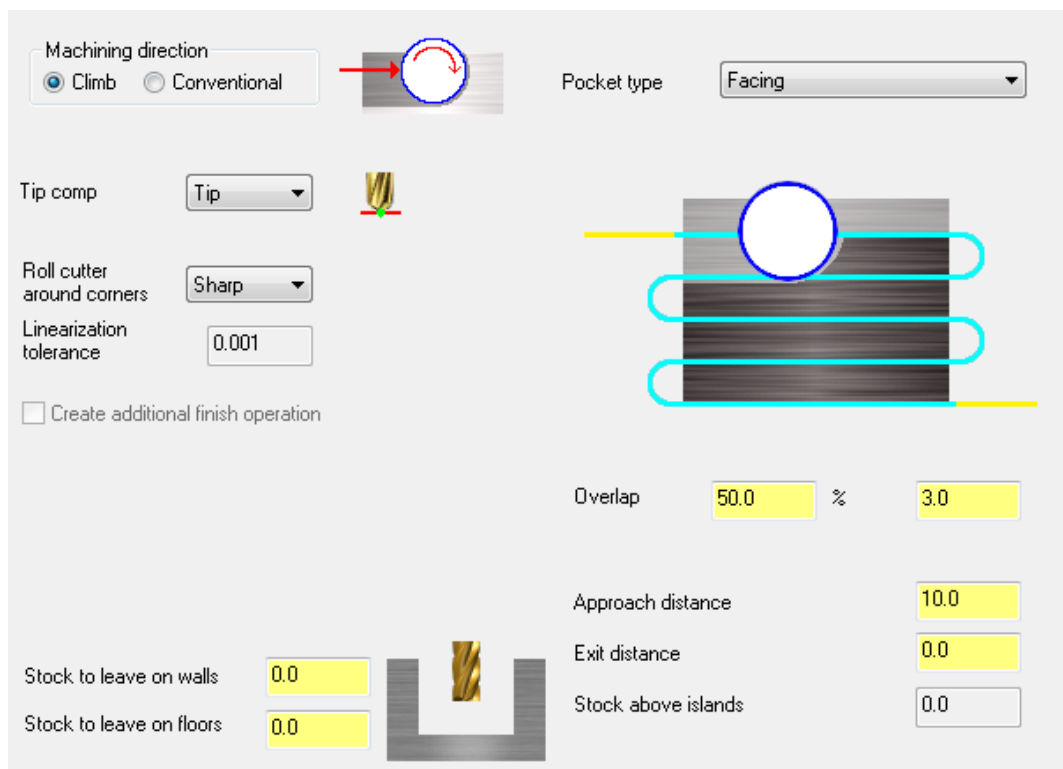
Uživatel má v programu Mastercam k dispozici několik možností jak ověřit správnou dráhu nástroje. Jednou z nich je funkce Ověř (*Verify*). Lze zde vidět jednotlivé úběry nástroje, ale hlavně je zde také zobrazeno, jak nástroj průběžně odebírá materiál. Jsou zde také patrné případné kolize, které materiál s nástrojem nebo s jeho upínačem při simulaci měl. Výsledný tvar lze přeměřit funkcí Měřit (*Measure*). Počáteční, průběžný a výsledný vzhled dílce v této proceduře je patrný z Obr. 8.6.



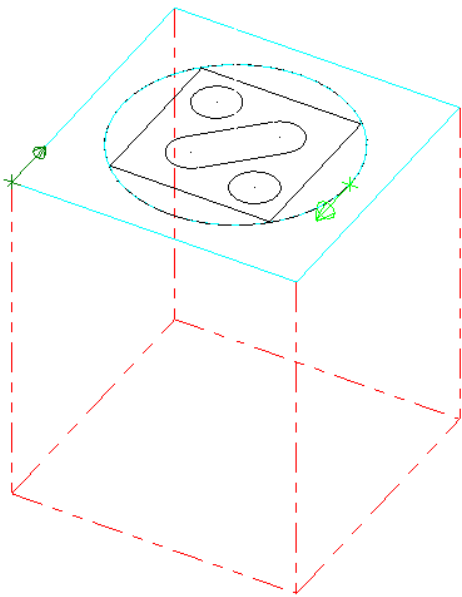
Obr. 8.6 Vzhled obrobku ve funkci Ověř (*Verify*) pro zarovnání čela

### 8.1.4 Frézování válcové části

Pro frézování válcové části byla zvolena procedura čelního frézování kapes (*Pocket Facing*) Obr. 8.7. Byly vybrány dva řetězce křivek, které definují oblast obrábění (Obr. 8.8). Zvolením této metody a výběrem obou řetězců křivek, se dosáhne úspory obráběcího času, protože nástroj skutečně obrábí pouze materiál a nevyjíždí mimo obrobek.

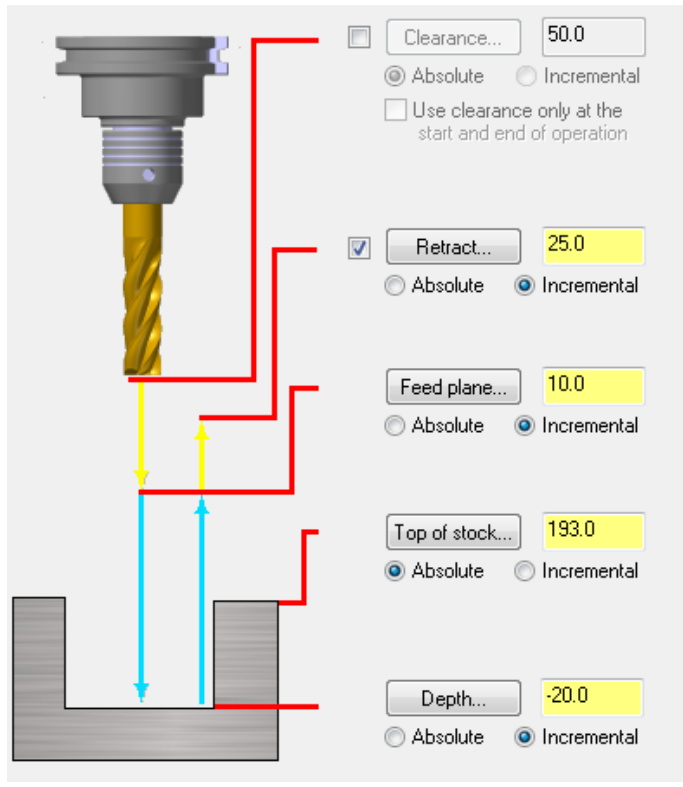


Obr. 8.7 Parametry řezu pro čelní frézování kapes (*Pocket Facing*)

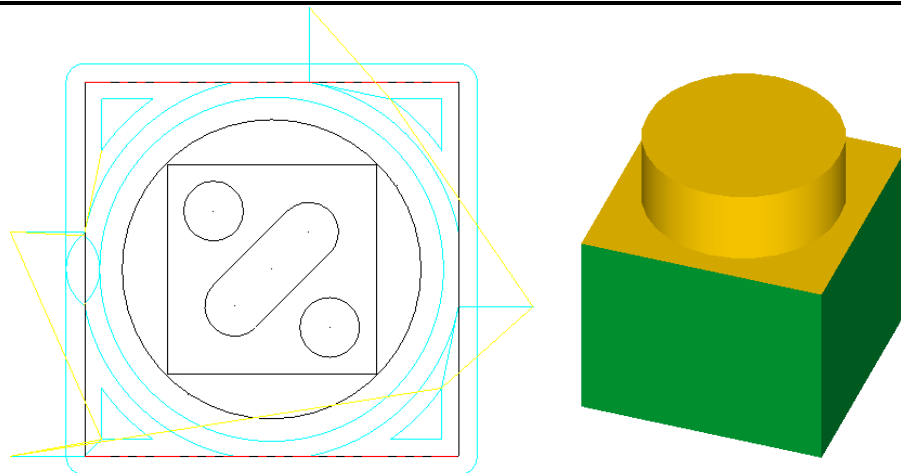


Obr. 8.8 Volba řetězců křivek definující oblast obrábění

Pro maximální úběr byla zvolena hodnota 10 mm. Nejdůležitějším parametrem je opět hodnota celkového úběru (*Depth*), která je zvolena inkrementálně (Obr. 8.9). Tato hodnota je brána od horní plochy polotovaru. Protože je hodnota úběru první plochy 5 mm, a tento rozměr má na dílci, bráno od horní plochy dílce, 15 mm, je hodnota úběru pro tuto operaci 20 mm (inkrementálně). Výsledný vzhled dílce po této operaci spolu s nástrojovými drahami je na Obr. 8.10.



Obr. 8.9 Nastavení odjezdů nástroje, výšky polotovaru a celkového úběru

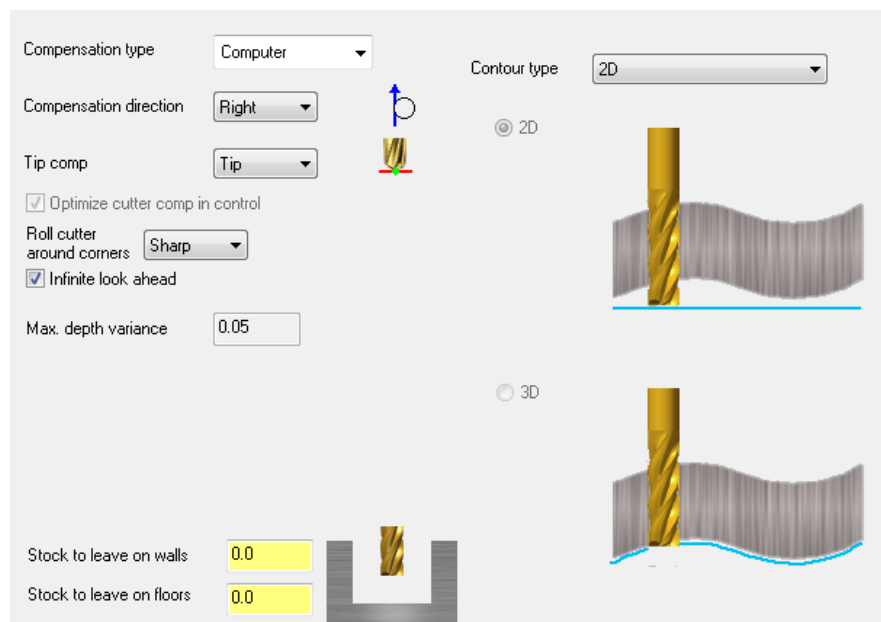


Obr. 8.10 Nástrojové dráhy, Vzhled dílce po proceduře

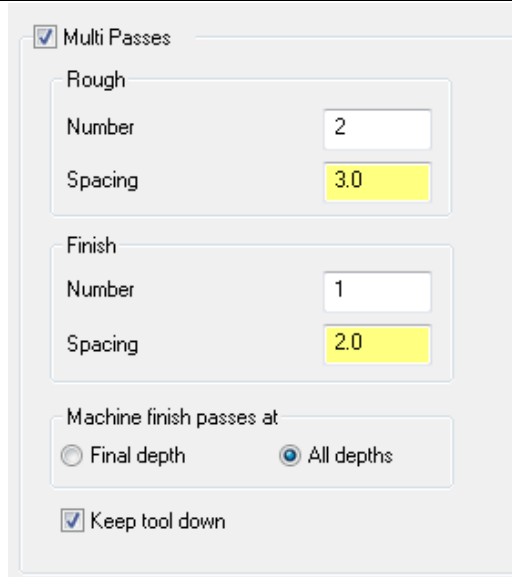
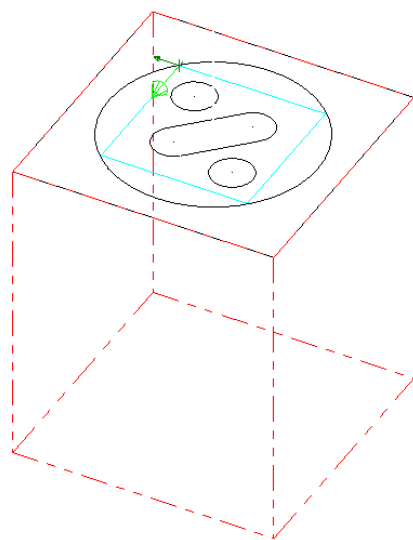
### 8.1.5 Frézování kvádřové části

Další procedurou je vytvoření kvádřové části, odfrézováním části válce. Jako typ obráběcí strategie bylo zvoleno plošné frézování kontur (*Contour 2D*). Nastavení parametrů řezu je uvedeno na Obr. 8.11. Vodícím prvkem pro nástroj v této operaci je pouze čtverec (Obr. 8.12), proto je nutné nastavit v záložce přejezdů (*Multi Passes*) více přejezdů této kontury (Obr. 8.12). Potom bude dosaženo obrobení celé plochy.

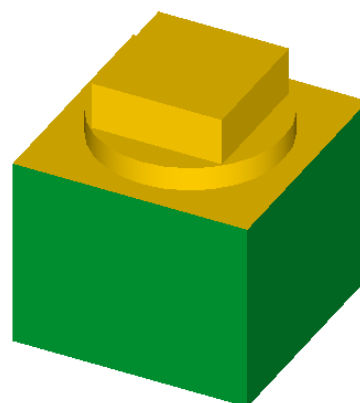
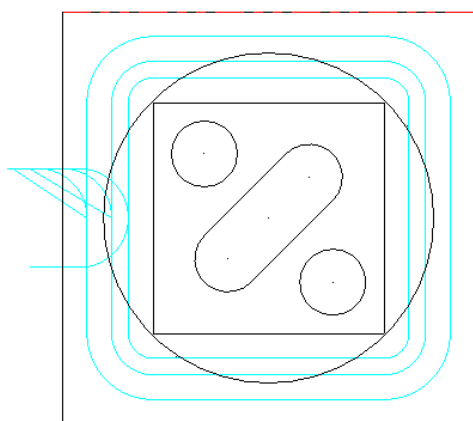
Protože má tato procedura celkový úběr 10 mm, je provedena na jeden úběr. S tím souvisí také nastavení celkového úběru, který je opět zadán relativně vzhledem k horní ploše polotovaru, stejně jako v předchozích operacích. Výsledný vzhled a vygenerované obráběcí dráhy jsou uvedeny na Obr. 8.13. Je vidět, že nástroj skutečně objíždí plochu dvakrát při úběru 3 mm a jednou dokončuje plochu při úběru 2 mm. Tyto parametry jsou znázorněny na Obr. 8.12.



Obr. 8.11 Nastavení parametrů řezu



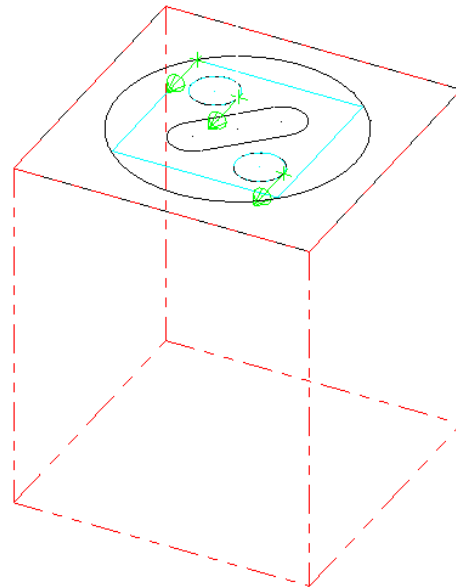
Obr. 8.12 Výběr kontury, Nastavení více přejezdů



Obr. 8.13 Obráběcí dráhy, Vzhled dílce po proceduře

### 8.1.6 Frézování válců

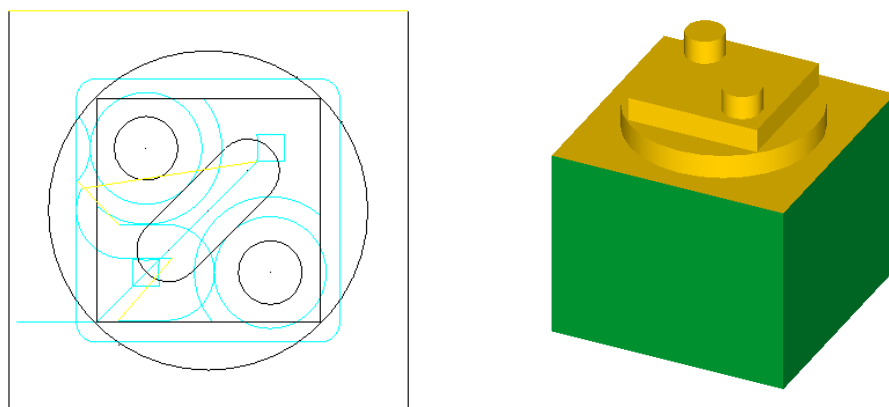
Tato procedura je podobná s frézováním první válcové části. Opět je zde využito čelní frézování kapes (*Pocket Facing*). Proto zde nebude uváděno celé nastavení, ale pouze její odlišnosti. Tou první je výběr řetězců křivek (Obr. 8.14). Je zde vidět, že jsou vybrány vnitřní kontury, které má nástroj objíždět, a také krajní kontura, ohraničující celou oblast. Prostřední kontura tvaru drážky pro pero není vybrána, protože se nejedná o výstupek z této plochy, ale o drážku frézovanou do této plochy (bude provedena v další operaci).



Obr. 8.14 Výběr kontur

Hodnota úběru je opět 5 mm. Proto je tato operace provedena na jeden úběr. Důležité je znovu nastavit správnou hodnotu úběru v závislosti od horní plochy polotovaru. V tomto případě činí hodnota -10 mm inkrementálně (*Depth*).

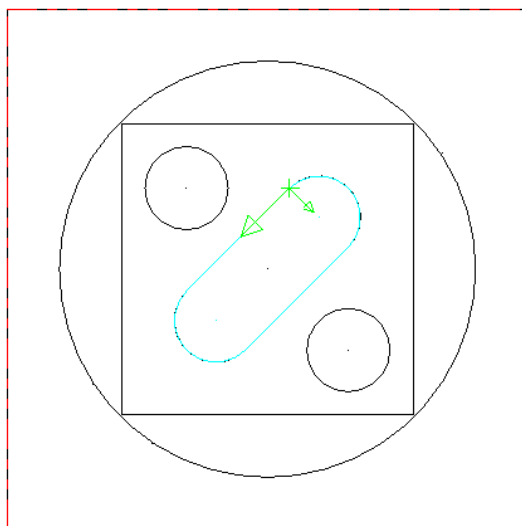
Výsledné vygenerované dráhy a vzhled dílce po proceduře je patrný z Obr. 8.15. Je zde vidět, že nástroj skutečně objíždí válce z vnější strany, a že také přejíždí nad konturou vnitřní drážky.



Obr. 8.25 Obráběcí dráhy, Vzhled dílce po proceduře

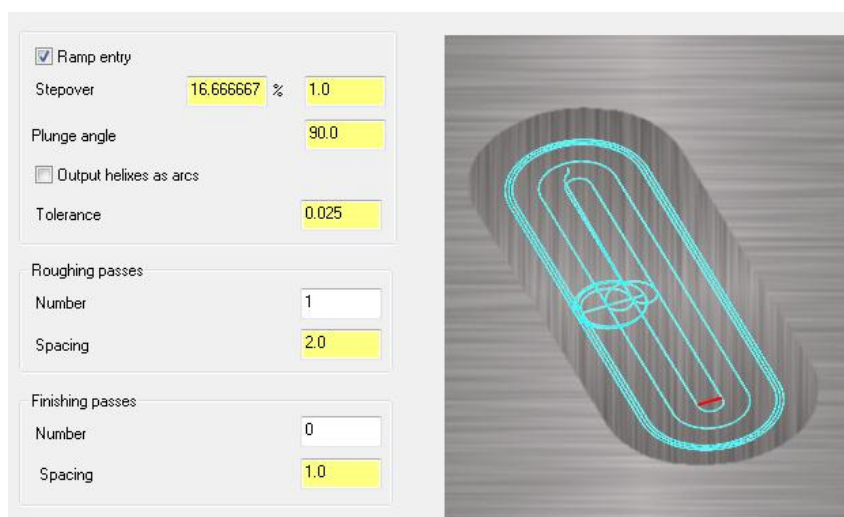
### 8.1.7 Frézování drážky

Poslední částí pro tento dílec je vyfrézování drážky. Pro tuto a podobné situace je určena obráběcí strategie frézování drážek (*Slot milling*). Opět je zde volba vodící křivky jako v předcházejících operacích (Obr. 8.16).



Obr. 8.16 Volba vodící křivky

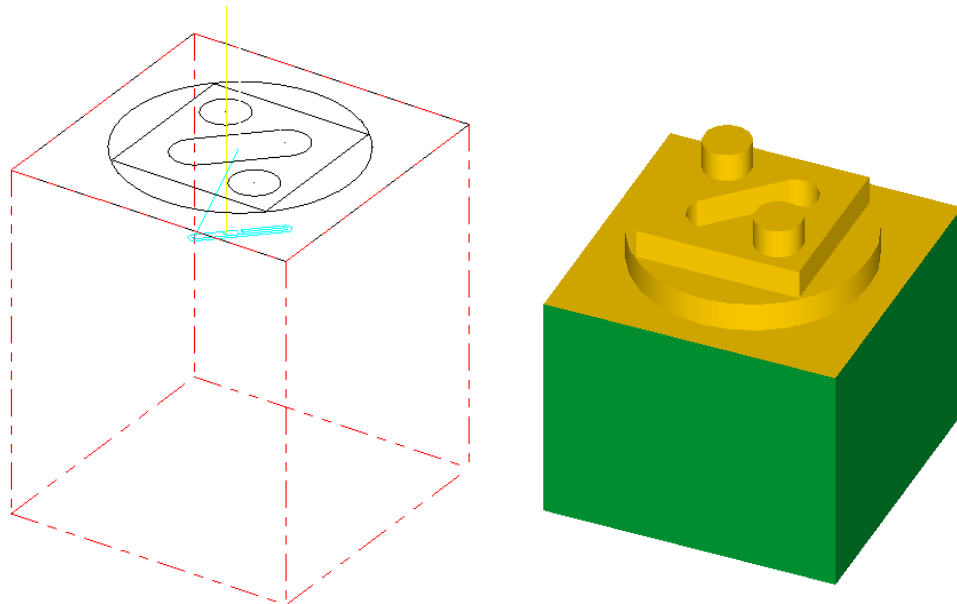
Protože je zde úběr 5 mm, bude tato operace provedena na jeden úběr. Nástroj zde ovšem najíždí do plného materiálu, a proto byla nastavena nájezdová rampa (Obr. 8.17).



Obr. 8.17 Nastavení nájezdové rampy

Důležitou hodnotou této procedury je opět hodnota úběru (*Depth*). Ten je znovu zadán relativně vůči horní ploše polotovaru. V následující kapitole bude shrnuto nastavení všech úběrů pro všechny operace tohoto dílce.

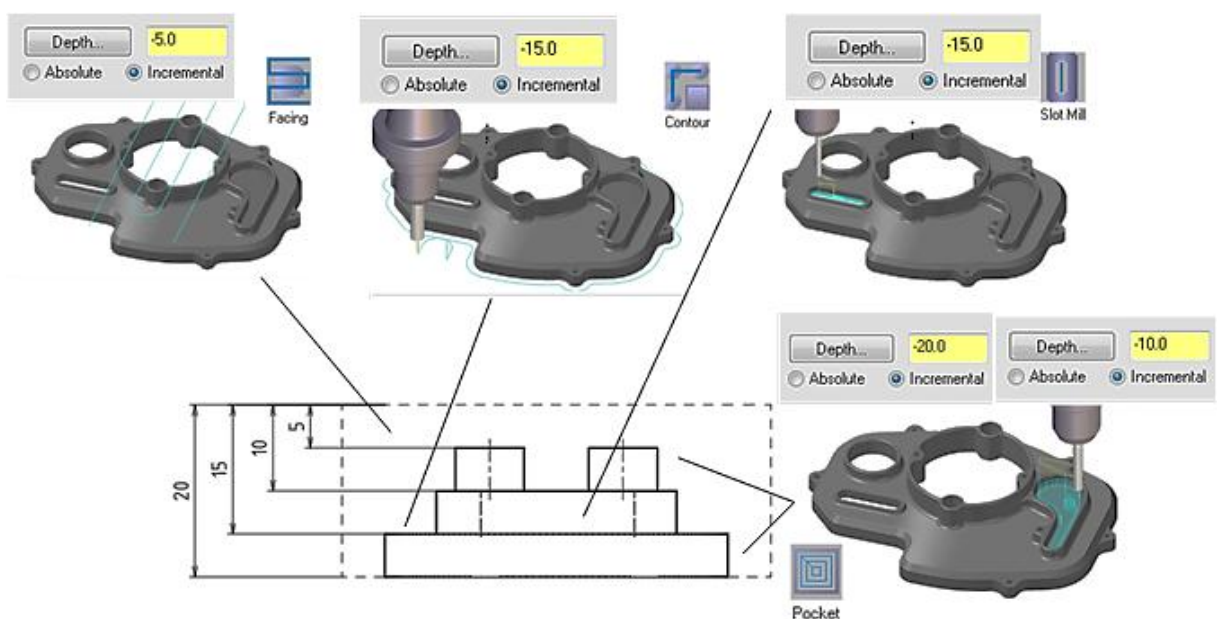
Vygenerované obráběcí dráhy a hotový vzhled dílce je patrný z Obr. 8.18. Je zde vidět, že nájezd do záběru je skutečně skloněn.



Obr. 8.18 Obráběcí dráhy, hotový vzhled dílce

### 8.1.8 Shrnutí 2,5D obrábění

Jak jde vidět z předešlé kapitoly, 2,5D obrábění je velice účinnou metodou zhotovení jednoduchých tvarů. Silnou stránkou je rychlost vytvoření kontur. Ke každé kontuře se jednoduše přiřadí hloubka. Sumarizace těchto hloubek a jednotlivých použitých typů 2,5 D obrábění je uvedena na Obr. 8.19.

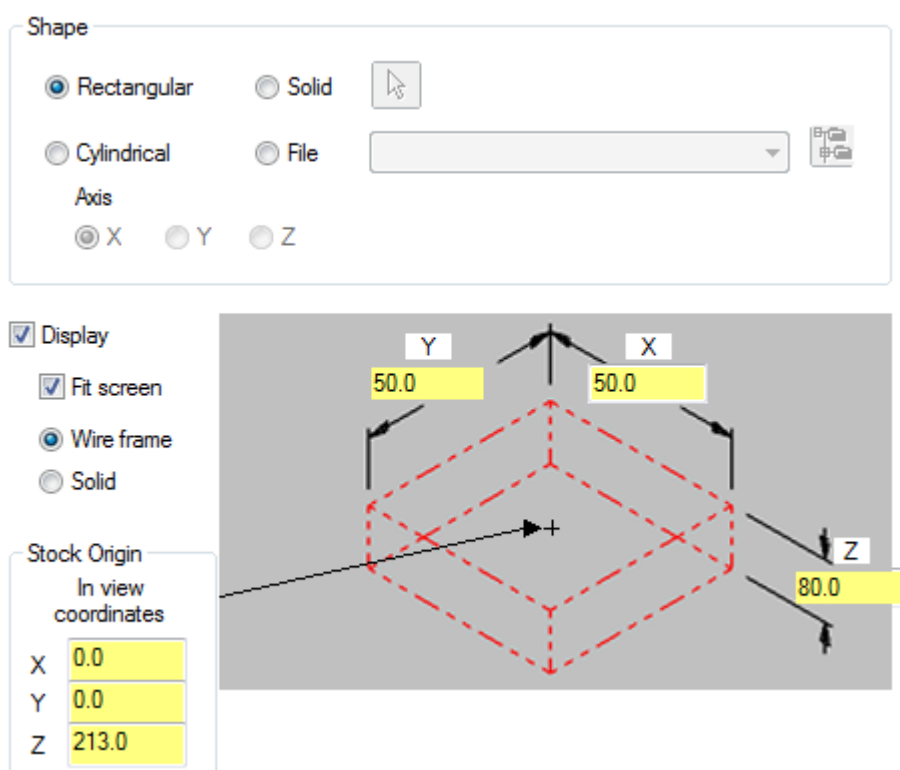


Obr. 8.19 Sumarizace hodnot úběru a typu 2,5 D obrábění

## 8.2 Šachovnicová figurka – obráběcí strategie

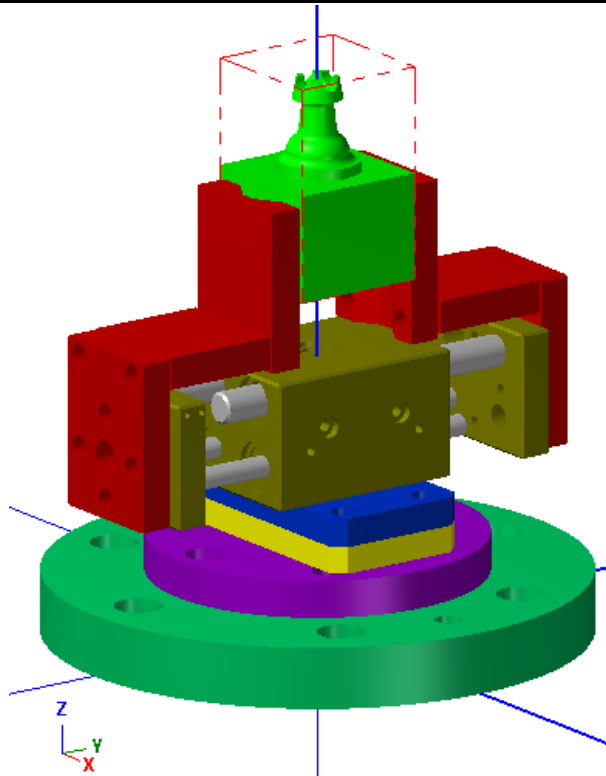
### 8.2.1 Nastavení polotovaru

Stejně jako u předchozího dílce je prvním krokem nastavení polotovaru. Nastavení polotovaru bylo provedeno dle Obr. 8.20. Je zvolen obdélníkový polotovar, rozměry polotovaru jsou zvětšeny pouze ve směru osy Z o 5 mm. Je to z důvodu eliminování nepřesností uchopení obrobku a jeho nepřesném uřezání. Horní část polotovaru je posunuta celkově o hodnotu 213 mm, což je hodnota součtu výšky dílce (75 mm), přídavku na obrábění v ose Z (5 mm) a posunutí dílce vůči počátku v ose Z (133 mm). Ve spojení s dílcem a efektořem pak celá situace vypadá jako na Obr. 8.21.



Obr. 8.20 Nastavení polotovaru

Polotovar na Obr. 8.21 je znázorněn červenou čárkovanou čarou. Je také vidět, že skutečně končí na spodní straně dílce, a že nepokračuje až do základní roviny sestavy.



Obr. 8.21 Ustavení polotovaru dílce

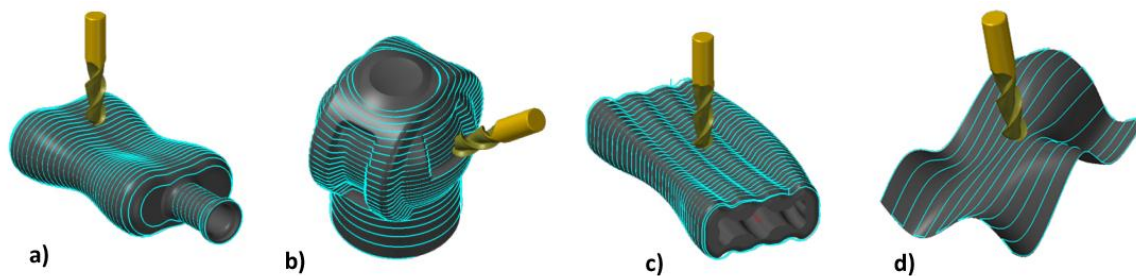
Po zneviditelnění všech součástí efektoru, je dalším postupem vytvořením hrubovacích procedur.

### 8.2.2 Zarovnání čela

Požadavkem hrubování je vždy co největší úběr materiálu za co nejkratší čas. Proto pro první operace obrábění bude zvolena válcová fréza  $\varnothing 6$  s řeznou částí dlouhou 20 mm (viz kap. 7.1 Volba frézy).

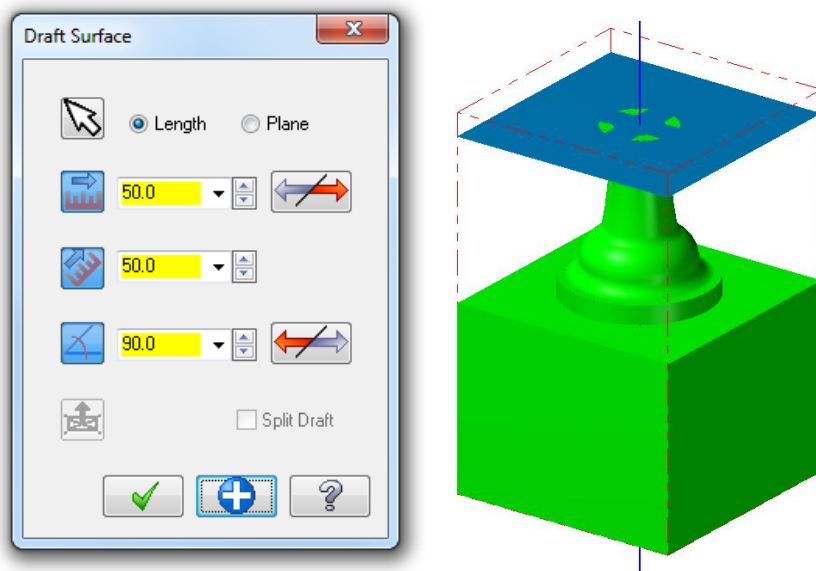
Mastercam nabízí velké množství obráběcích operací. Je zde také celé řada strategií pro víceosé obrábění (*Multiaxis*). Prvním typem, který je využit, je obrábění více povrchů (*MultiSurface*) viz Obr. 8.22. Slouží pro obrábění jednoho nebo více povrchů součásti najednou. Nejdůležitější definiční prvek pro tuto operaci je samotná plocha, která se má obrobit.

První hrubovací operace je zarovnání čela figurky, neboli horní plochy dílce (je zde přídavek na obrábění 5 mm). Protože horní plocha figurky je pouze malá část, bylo nutno tuto plochu vytvořit (pomocí funkce *Draft Surface*) Obr. 8.23. Všechny pomocné geometrické prvky (křivky, plochy apod.) je výhodné ukládat do samostatných úrovní a každé přiřadit jinou barvu.



Obr. 8.22 Jednotlivé možnosti Vícesosého obrábění (*MSurf*)

- a) Válec (*Cylinder*)
- b) Koule (*Sphere*)
- c) Kvádr (*Box*)
- d) Obecný povrch (*Surface*)



Obr. 8.23 Vytvoření horní plochy pomocí *Draft Surface*

Nejdůležitější parametry každého vícesosého obrábění v Mastercam jsou:

- Cut pattern:** (Obráběcí vzor) - Zvolení plochy, která se bude obrábět (*Patern options*)
- Způsob obrábění (jednosměrně, „Cik-Cak“, ve spirále)
  - Typ kompenzace
  - Další charakteristiky obrábění
  - Začátek, směr a typ obrábění (*Flow parameters*)

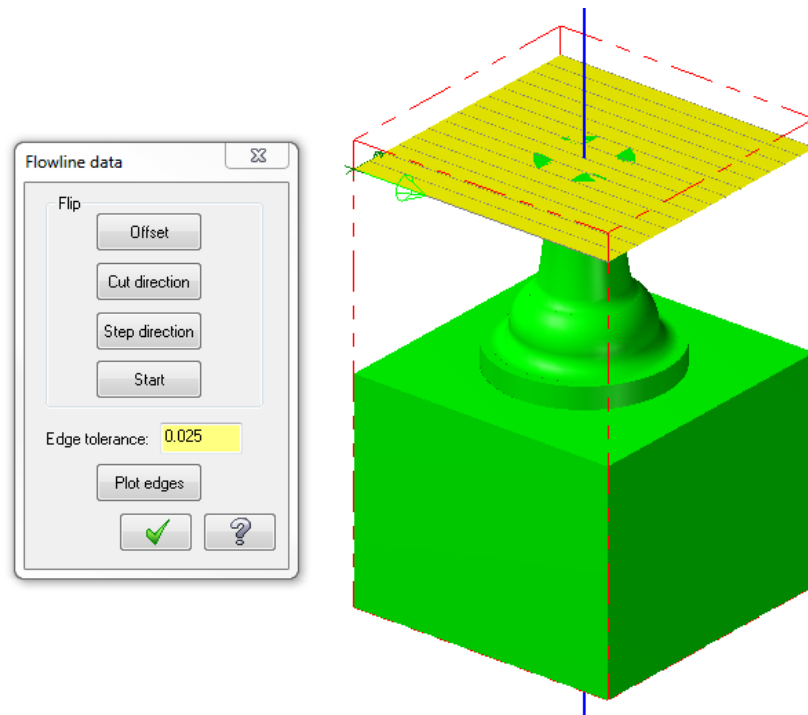
**Tool axis control:** (Řízení osy nástroje)

- Nastavení, ke kterému bodu, křivce ploše apod. bude směřovat osa nástroje
- Boční úklon nástroje vůči ploše
- Přední předklon nebo zadní záklon nástroje vůči ploše

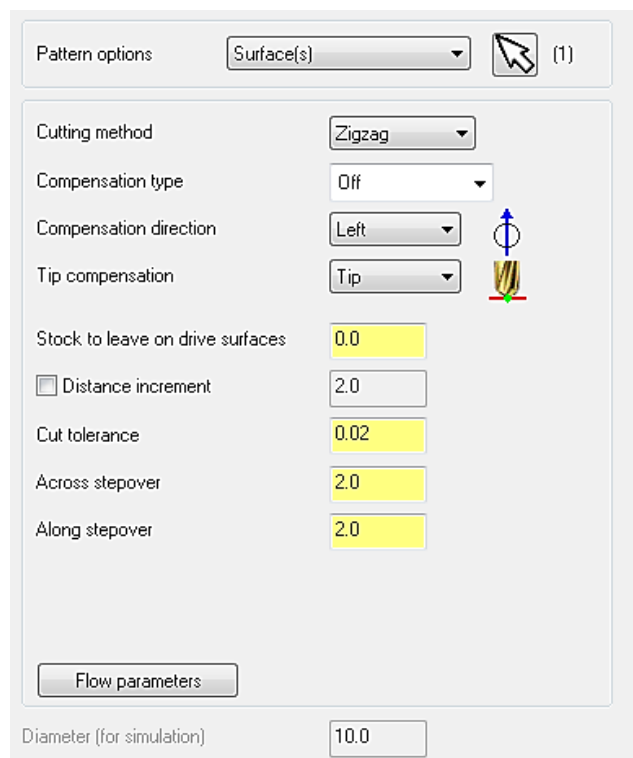


Významy zbývajících parametrů, byly již popsány v minulých kapitolách.

Jako plocha, která je určena k obrábění pro tuto část, byla zvolena vytvořená horní plocha. Parametry výběru, zvolený směr obrábění a další nastavení jsou patrné z následujících obrázků.

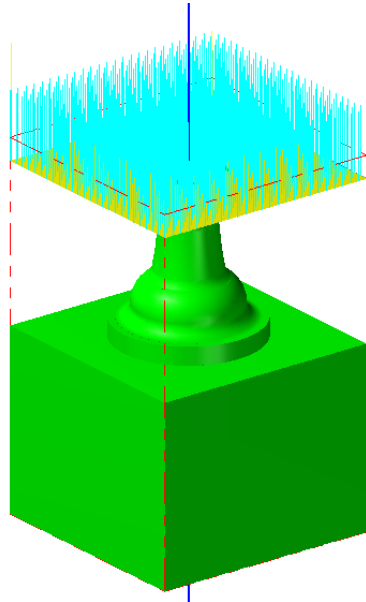


Obr. 8.24 Volba začátku a směru obrábění (*Flow parameters*)



Obr. 8.25 Volba obráběcího vzoru (*Cut pattern*)

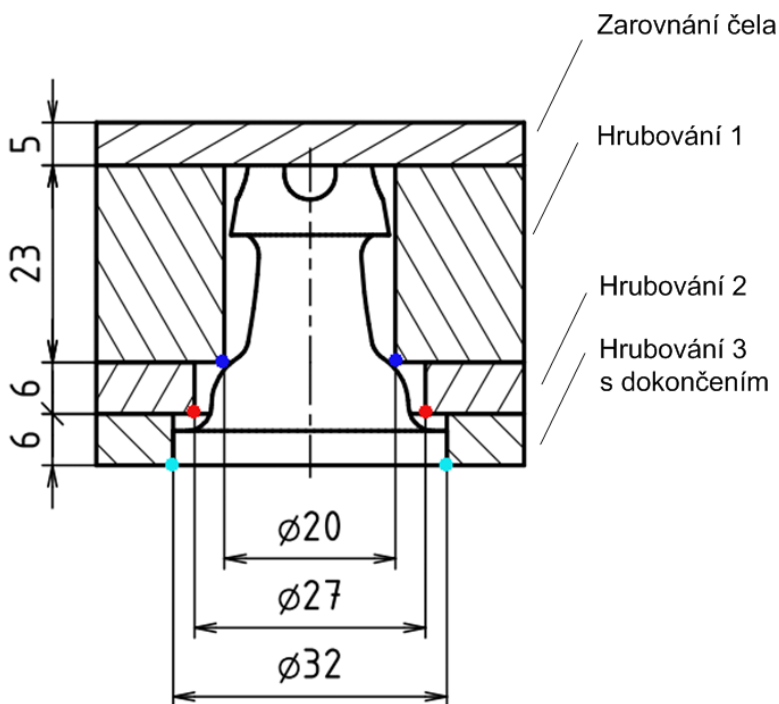
Tříska by měla mít okolo 5 mm v závislosti na přesnosti uchopení a nastavení vysunutí nástroje. Proto je možné tento povrch obrobit na jeden záběr (délka ostří frézy je 20 mm). Další parametry jsou ponechány jako výchozí (*Default*). Vygenerované obráběcí dráhy jsou znázorněny na Obr. 8.26.



Obr. 8.26 Obráběcí dráhy pro zarovnání čela

### 8.2.3 Hrubovací procedura 1,2,3

Po zarovnání čela je dalším postupem co nejvíce vyhrubovat zbylý materiál. Jednotlivé hrubovací úběry jsou znázorněny na Obr. 8.27. Tyto operace budou opět prováděny válcovou frézou  $\varnothing 6$  mm s délkou ostří 20 mm.



Obr. 8.27 Jednotlivé úběry při zarovnání čela a hrubování

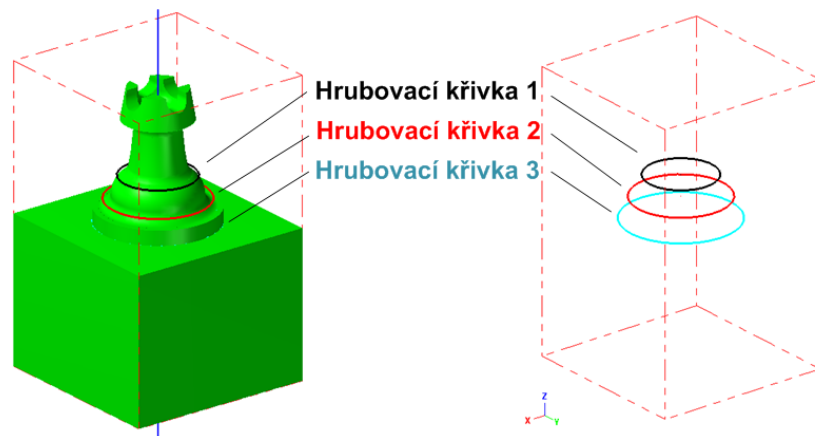


Mastercam kromě procedur víceosého obrábění nabízí také možnost obrábění pomocí prostorových křivek (*Curve*) Obr. 8.28. Ty si buď uživatel vytvoří sám, nebo využívá křivek na dílci. Způsob jak nástroj sleduje křivku, definuje uživatel v nastavení procedury.



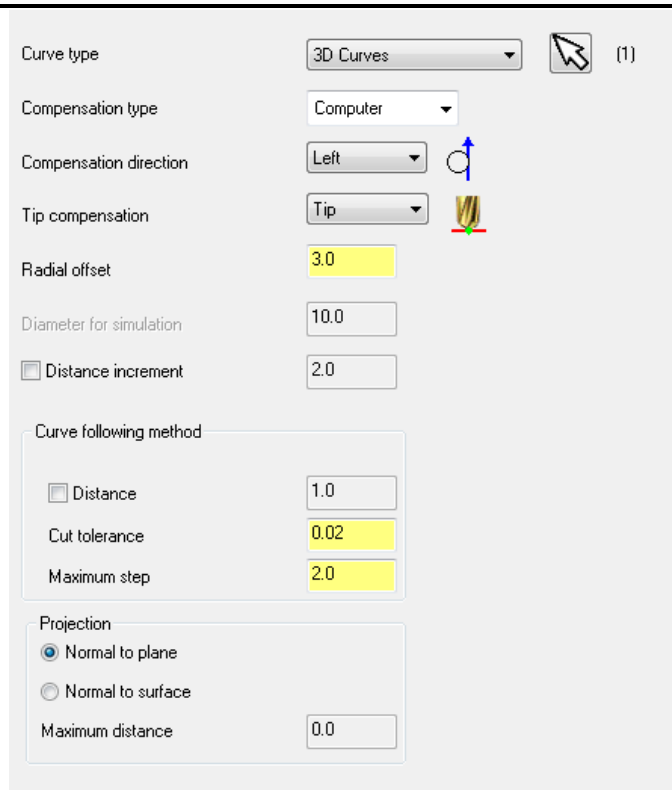
Obr. 8.28 Princip metody víceosého křivkového obrábění (*Multiaxis Curve*)

Pro vytvoření křivek lze využít mnoho voleb Mastercamu. Pro hrubování dílce „Věž“ byly vytvořeny v určitých vzdálenostech kružnice, které byly využity jako vodící křivky nástroje (Obr. 8.29). Jejich vzdálenosti a průměry odpovídají naznačeným kružnicím z Obr. 8.27.

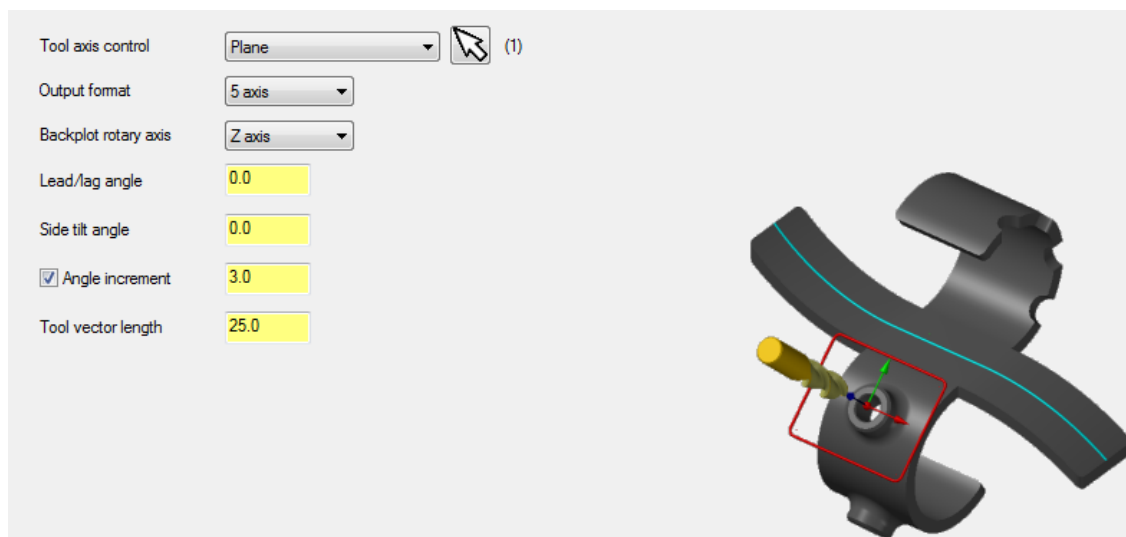


Obr. 8.29 Vodící křivky hrubování dílce

Pro každou tuto kružnici existuje jedna hrubovací operace. Nastavení hrubovacího vzoru (*Cut Pattern*) bylo provedeno dle Obr. 8.30. Pro řízení osy nástroje (*Tool axis control*) byla zvolena řídicí plocha XY. K této ploše směřuje osa nástroje v každém okamžiku obrábění. Nastavení řízení osy nástroje spolu s principem řízení osy nástroje vůči ploše je uvedeno na Obr. 8.31.

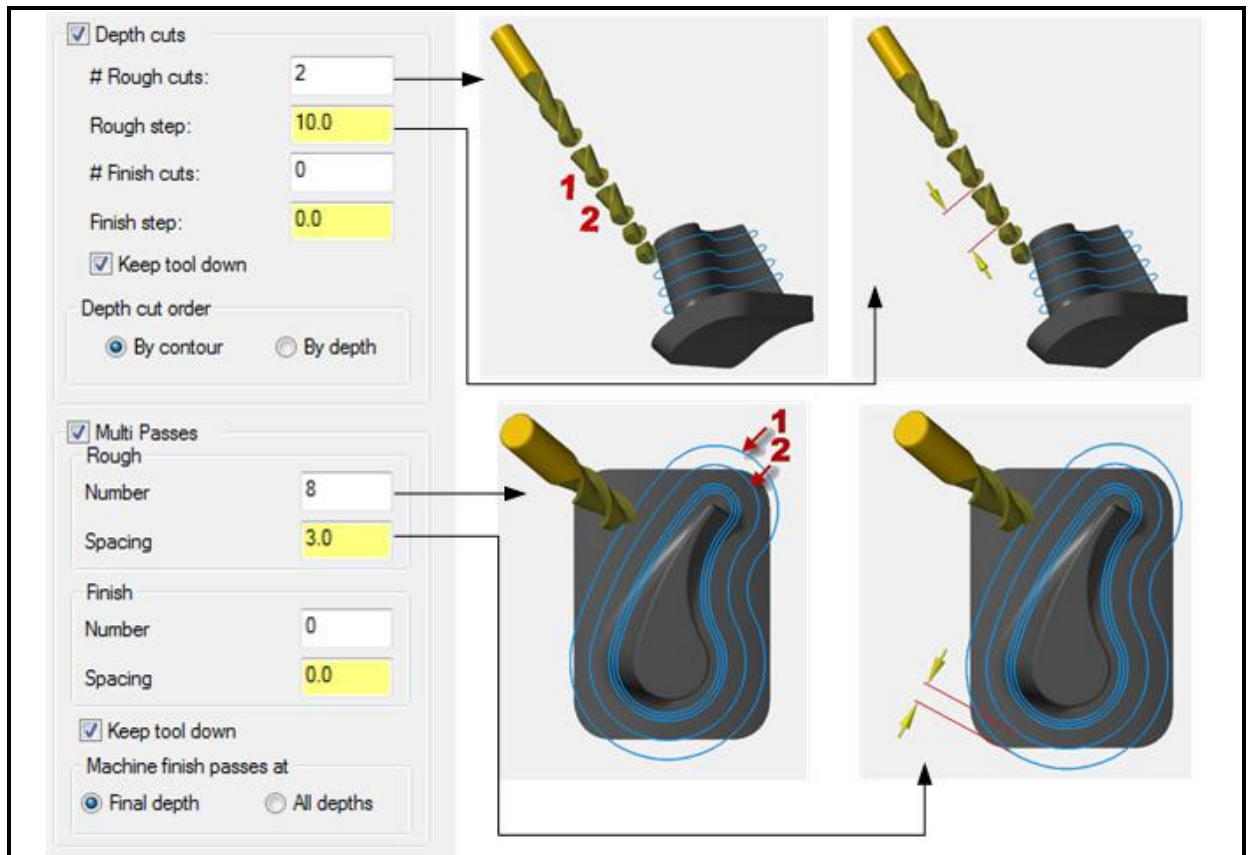


Obr. 8.30 Volba obráběcího vzoru (*Cut pattern*) pro hrubovací operace

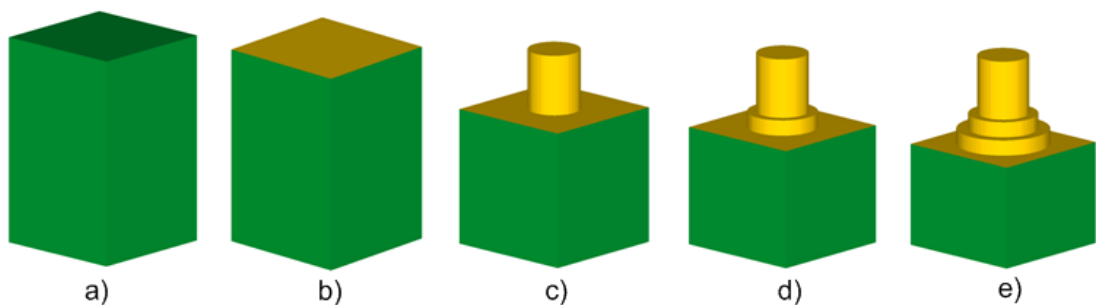


Obr. 8.31 Volba řízení osy nástroje (*Tool axis control*) pro hrubovací operace

Dalším důležitým parametrem pro tyto hrubovací operace je nastavení kolikrát a v jakých roztečích, bude nástroj vodící křivky projíždět. Jestliže je úběr materiálu větší než délka řezné části nástroje, je navíc nutné rozdělit úběr materiálu na více záběrů. Pro první hrubovací operaci byly zvoleny parametry dle Obr. 8.32. Počet záběrů (*# Rough cuts*) jsou 2, protože délka ostří nástroje je pouze 20 mm, zatímco délka celkového úběru pro tuto operaci je 23 mm. Významy jednotlivých voleb v této proceduře zobrazen na Obr. 8.32.

Obr. 8.32 Nastavení hodnot hrubování (*Roughing*)

Výsledné vzhledy po obrábění prvních hrubovacích operací (zarovnání horní plochy, hrubovací operace 1,2,3) jsou uvedeny na Obr. 8.33. Pomocí nástroje měření (*Measure*) lze zkontrolovat správnost požadovaných rozměrů.



Obr. 8.33 Vzhledy obrobku po jednotlivých hrubovacích operacích

- a) Polotovár
- b) Zarovnání čela
- c) První hrubování
- d) Druhé hrubování
- e) Třetí hrubování

Jak je vidět z Obr. 8.27, pouze Hrubovací procedura 1 musela být provedena na dva úběry. Ostatní úběry jsou do 20 mm tloušťky. Všechny uvedené hrubovací operace jsou si v nastavení velice podobné. Proto zde dále nejsou uvedeny jejich nastavení.

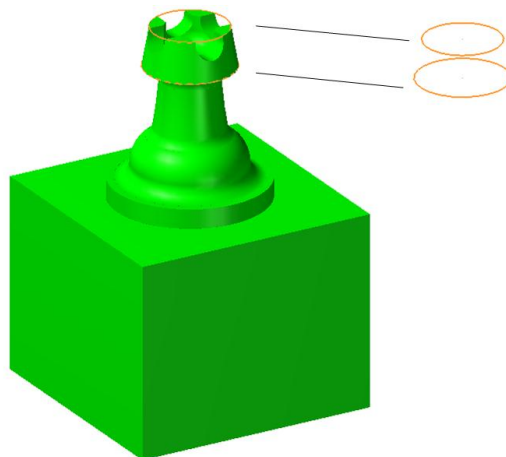
### 8.2.4 Obrábění bokem frézy

Po hrubování přichází na řadu dokončovací operace jednotlivých tvarů dílce. Prvním z nich je dokončení šikmé stěny horní části věže. Pro tu se s výhodou využije typ obrábění Bokem frézy („Swarf“). Princip tohoto typu je naznačen na Obr. 8.34.



Obr. 8.34 Princip obrábění bokem frézy

Vodícími prvky pro tuto operaci jsou horní a spodní křivka, nebo je vybrána celá plocha. Vodící křivky mohou být vybrány přímo na dílci nebo mohou být zvoleny křivky vytvořené uživatelem. Lineární spojnice těchto křivek definuje oblast boku frézy (Obr. 8.34). Protože konkrétně na tomto dílci je horní vodící křivka přerušena drážkami, bylo nutno ji dokreslit. (Obr. 8.35).

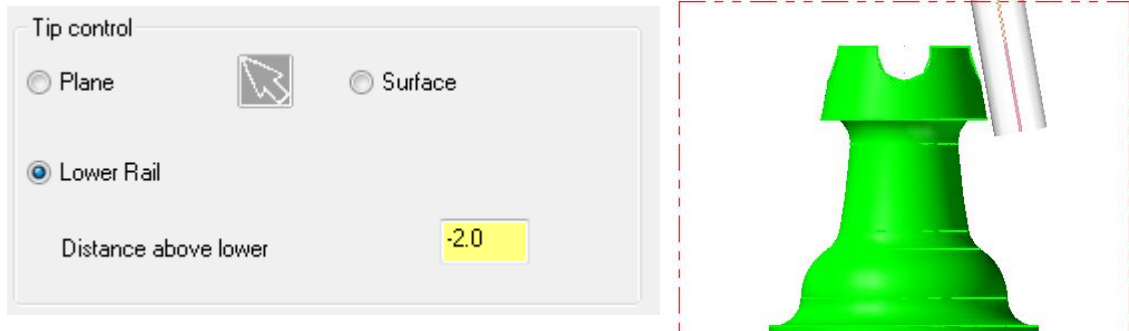


Obr. 8.35 Výběr vodících křivek na dílci pro obrábění Bokem frézy („Swarf“)

Důležitým parametrem nastaveným v tomto případě bylo řízení špičky nástroje („Tip Control“). V něm byla nastavena hodnota pohybu nástroje nad spodní vodící křivkou -2 mm.

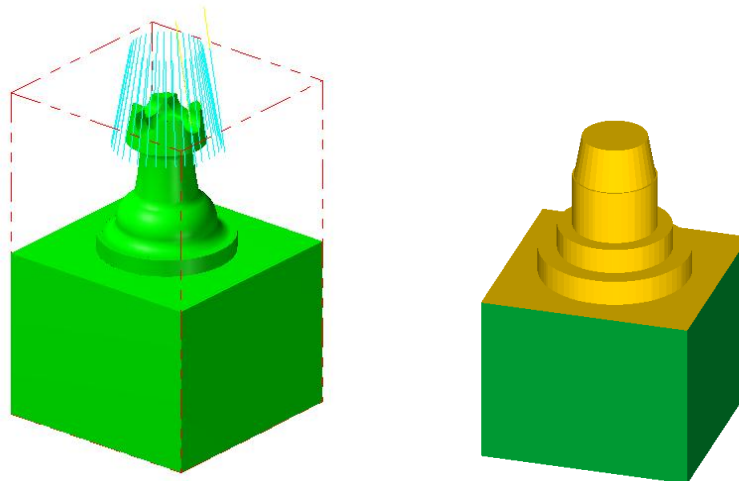


To má za následek, že dojde k přesazení špičky nástroje vůči spodní vodící křivce o tuto hodnotu ve směru řezání bokem frézy (Obr. 8.36).



Obr. 8.36 Nastavení řízení špičky nástroje („Tip Control“)

Výsledné vodící dráhy nástroje pro tuto operaci a výsledný vzhled je patrný z Obr. 8.37.



Obr. 8.37 Vodící dráhy nástroje, vzhled součásti po obrábění bokem frézy

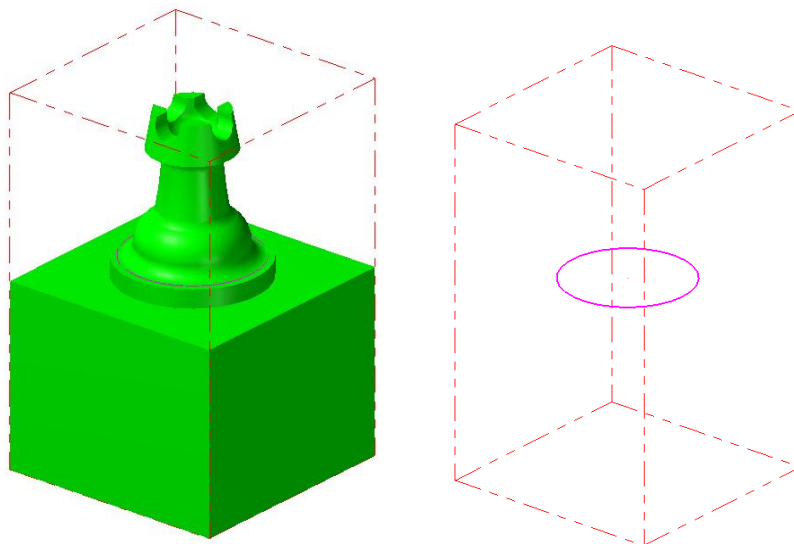
### 8.2.5 Dokončení rádiusového přechodu

Před touto operací je nutno vyměnit nástroj. Jak již bylo uvedeno, toto pracoviště nemá možnost automatické výměny nástroje. Je nutno celý proces zastavit, ručně vyměnit nástroj, nastavit ručně vysunutí nástroje a znovu spustit celý proces. Z tohoto důvodu je generovaný kód do robotu rozdělen na dvě části, jehož první operace v druhé části programu je dokončení rádiusového přechodu.

Pro všechny následující obráběcí operace je zvolena kulová stopková fréza  $\varnothing 6$  (viz. Kap. 7.1 Volba frézy). Podobně jako u hrubovacích operací je i zde využito křivkového obrábění („Multiaxis Curve“). Zvolená vodící křivka je patrna z Obr. 8.38. Jedná se o křivku, kterou

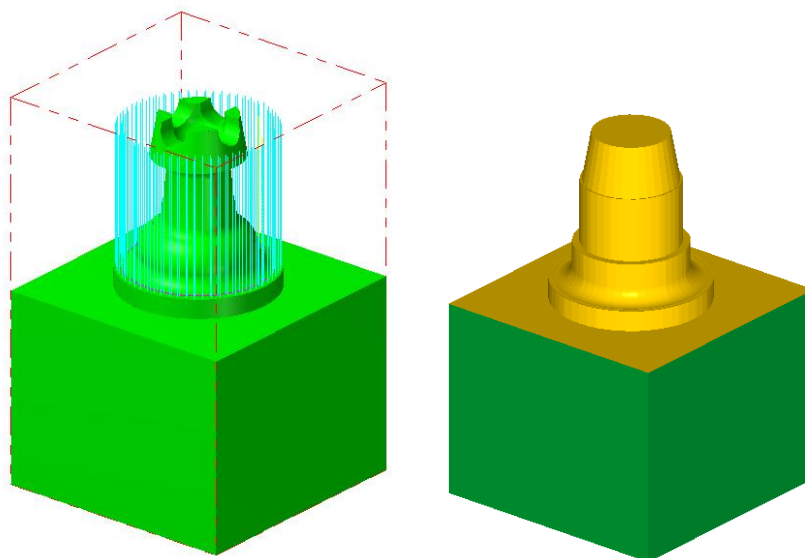
kopíruje „špička“ nástroje. Předpokladem je, že fréza má odpovídající rádius vůči profilu dílce.

Množství a velikost úběrů pro tuto operaci byly zvoleny tři po 2 mm úběru do hloubky. Vzhledem k dokončovací povaze této procedury je zvoleno více menších úběrů a více přejezdů.



Obr. 8.38 Zvolená vodící křivka

Výsledné vodící dráhy nástroje jsou patrné z Obr. 8.39, kde je také vidět vzhled dílce po této operaci.



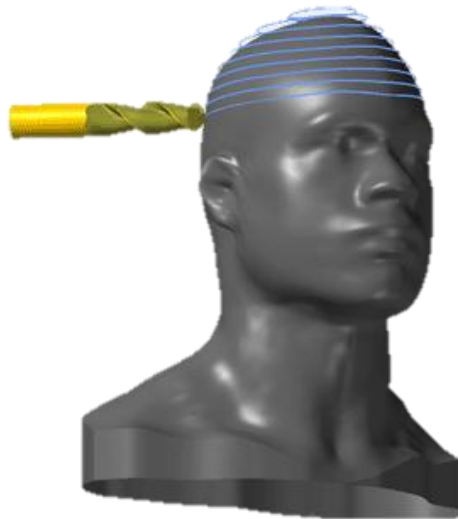
8.39 Vodící dráhy nástroje, vzhled dílce po dokončovacím obrábění rádiusu plochy

Je potřeba poznamenat, že začátek všech křivkových obrábění byl nastaven do kladné části osy Y ( $X=0$  Z dle dané křivky). Toto nastavení bylo změněno zpětně, protože při různých počátcích obrábění se ve velké míře projevila absolutní nepřesnost robotu.



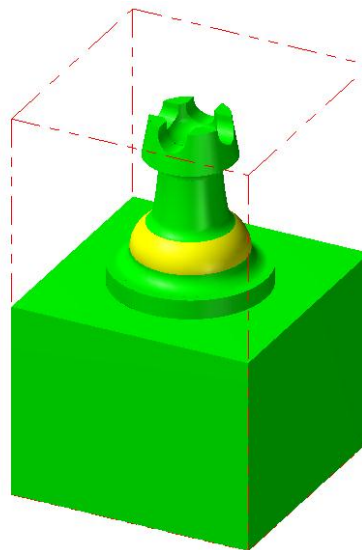
### 8.2.6 Obrábění kulové části

Mastercam kromě klasických metod víceosých obrábění *Curve*, *Swarf*, *MSurf* apod., které již byly uvedeny, nabízí také pokročilé metody. Jednou z nich je také metoda paralelních řezů („*Parallel Cuts*“). Princip metody je znázorněn na Obr. 8.40. Pro uživatele je velice výhodná, protože pro jednoduché operace je zde minimum nastavovaných parametrů. Je zde ovšem skryto mnoho dalších nastavení v případě, že je požadavek na detailnější nastavení obráběcí operace.



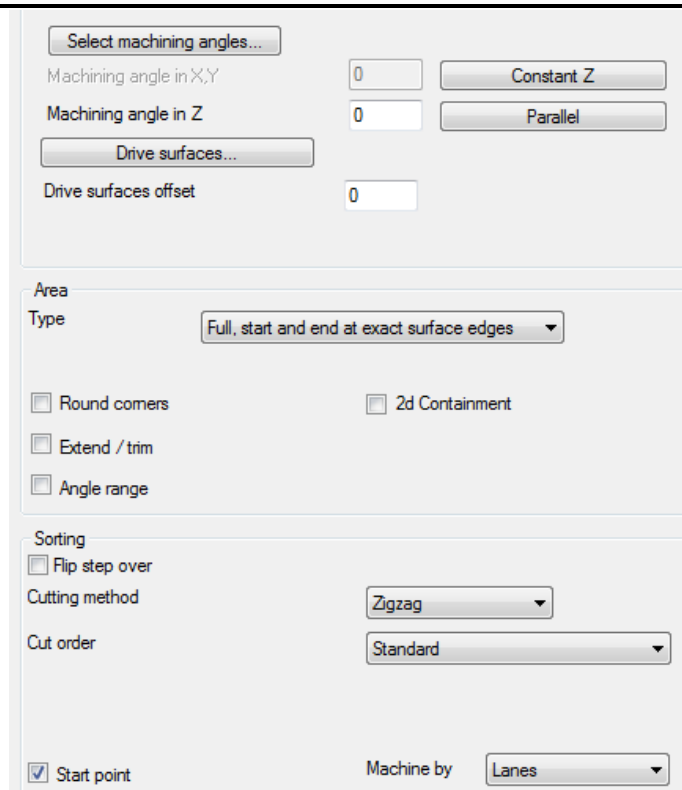
Obr. 8.40 Princip metody obrábění paralelních řezů („*Parallel Cuts*“)

Vodícím prvkem je pouze obráběná kulová plocha (Obr. 8.41).



Obr. 8.41 Obrábění kulové plochy

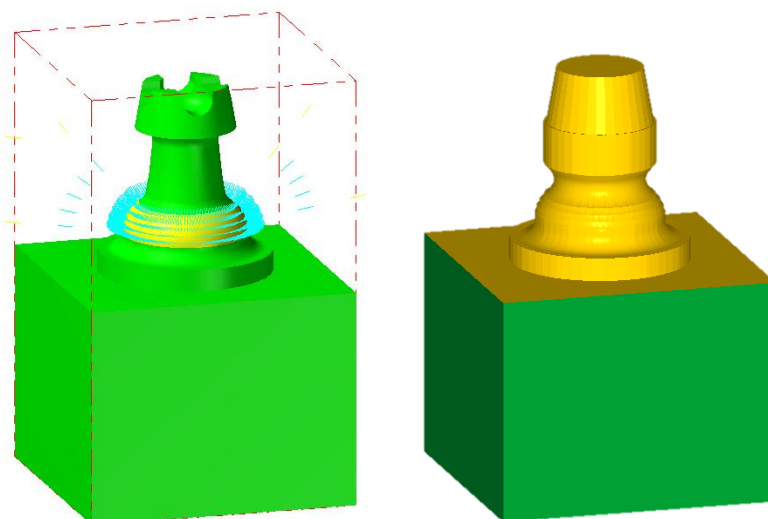
Jako konkrétní metoda obrábění byla zvolena metoda „Cik-cak“ („*Zig-zag*“), kdy nástroj obrábí zvolený povrch sousledně i nesousledně (první tříska +360°, druhá tříska -360°). Další nastavení jsou patrná z Obr. 8.42.



Obr. 8.42 Nastavení parametrů řezu („Cut Pattern“)

Byl zde nastaven počáteční bod, ze kterého tato obráběcí operace začíná. Jeho hodnota byla nastavena na  $X=0$   $Y=25$   $Z=202$ . Tato hodnota byla zvolena proto, aby nástroj najížděl ze stejné pozice, jako najížděl při hrubovacích operacích. Tím je dosaženo částečného eliminování absolutní přesnosti robotu.

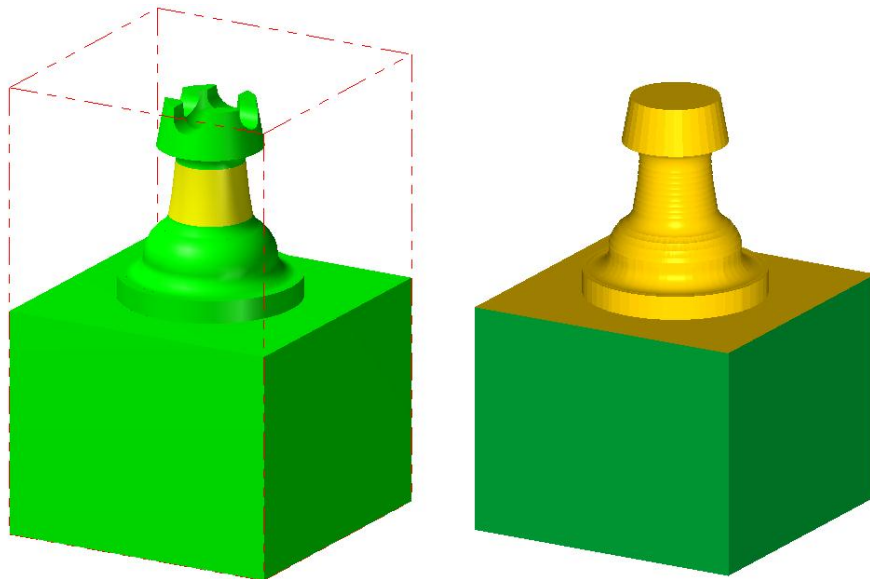
Dále bylo nastaveno, aby obrábění začínalo v horní části obrobku a pokračovalo směrem dolů s krokem 2 mm. Výsledné dráhy nástroje a výsledný vzhled dílce jsou patrné z Obr. 8.43.



Obr. 8.43 Dráhy nástroje, vzhled dílce po obrobení kulové plochy

### 8.2.7 Obrábění kuželové části

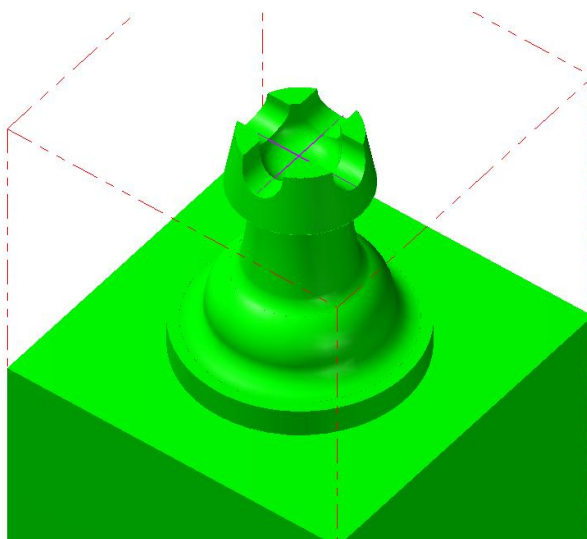
Pro další operaci bylo využito stejného typu obrábění i stejného principu jako v předešlé operaci, proto zde nebudou uvedeny dílčí nastavení ale pouze odlišnosti. Jedinou volbou, v čem se tato procedura liší od předcházející, je volba plochy. Ta je zvolena dle Obr. 8.44. Tato operace začíná stejně jako předchozí z výchozího bodu  $X=0$   $Y=25$   $Z=202$ .



Obr. 8.44 Volba obráběné plochy, vzhled dílce po obrobení kuželové části

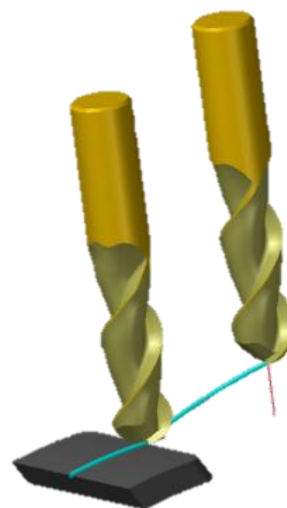
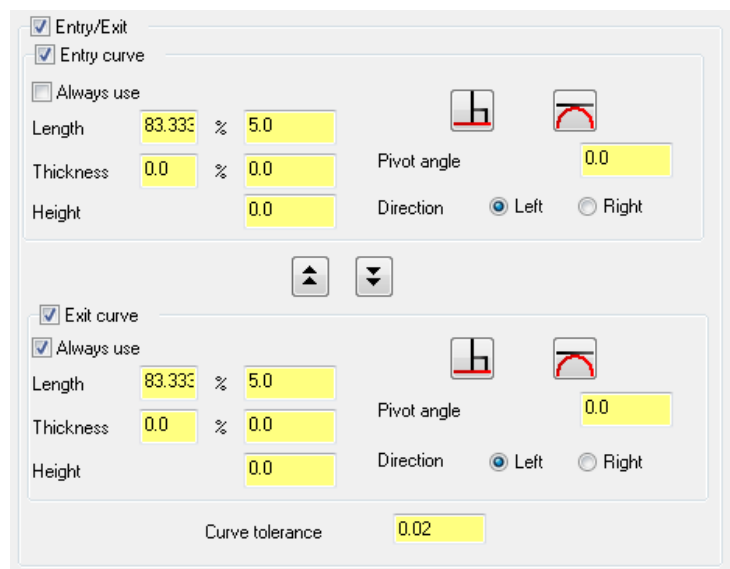
### 8.2.8 Obrábění horních drážek

Jednou z posledních operací na tomto dílci je obrobení horních drážek. Ty jsou opět obrobeny pomocí metody křivkového obrábění („*Curve Multiaxis*“). Vodicí křivky pro tuto operaci ovšem musely být na tento dílec dokresleny (Obr. 8.45)



Obr. 8.45 Zvolené vodicí křivky pro obrábění horních drážek

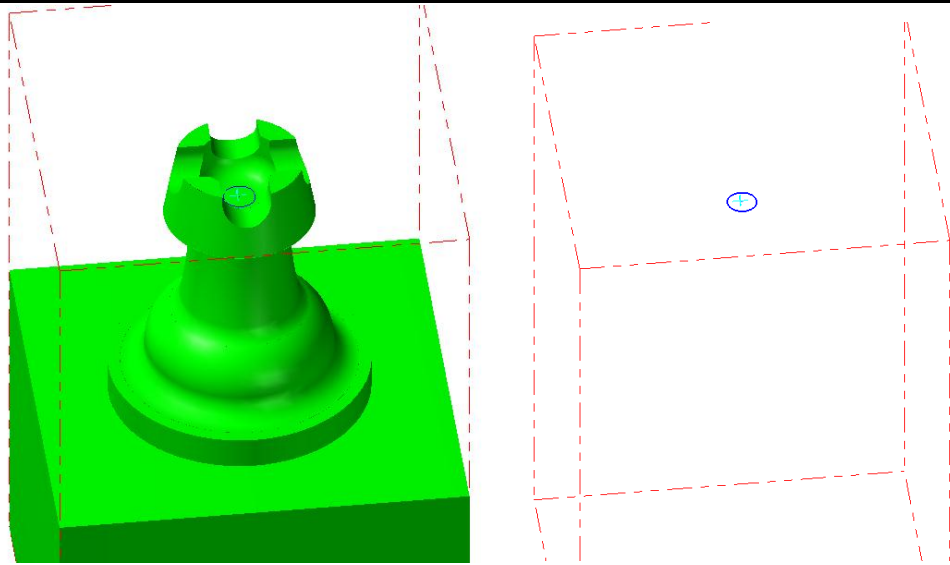
Dalším důležitým nastavením je hodnota výjezdů z těchto křivek. Ta byla zadána v nastavení najetí a vyjetí nástroje („*Linking – Entry/exit*“). Typ vyjetí a najetí nástroje po křivce do materiálu byl zvolen jako lineární s hodnotou 5 mm (Obr. 8.46).



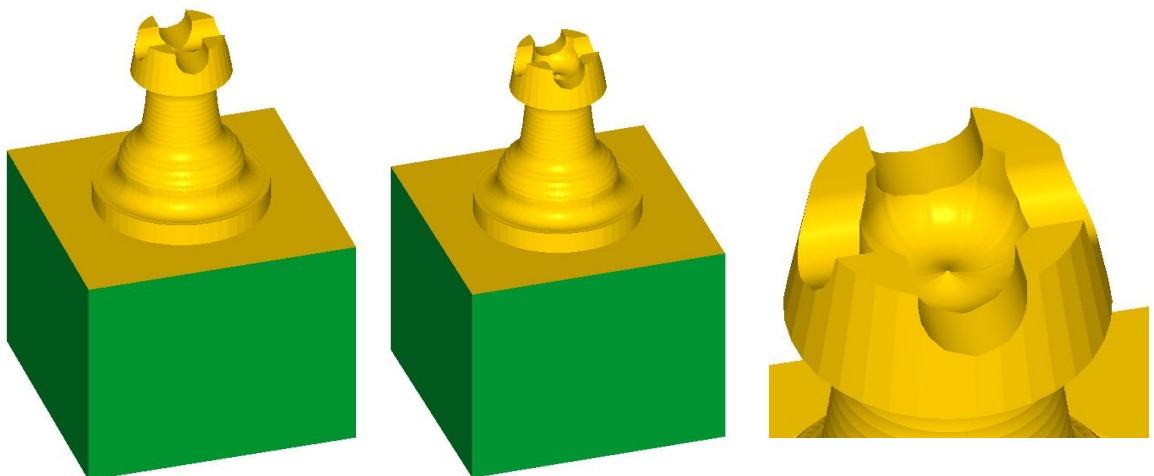
Obr. 8.46 Nastavení najetí a vyjetí nástroje z materiálu

### 8.2.9 Obrábění vnitřní kulové plochy

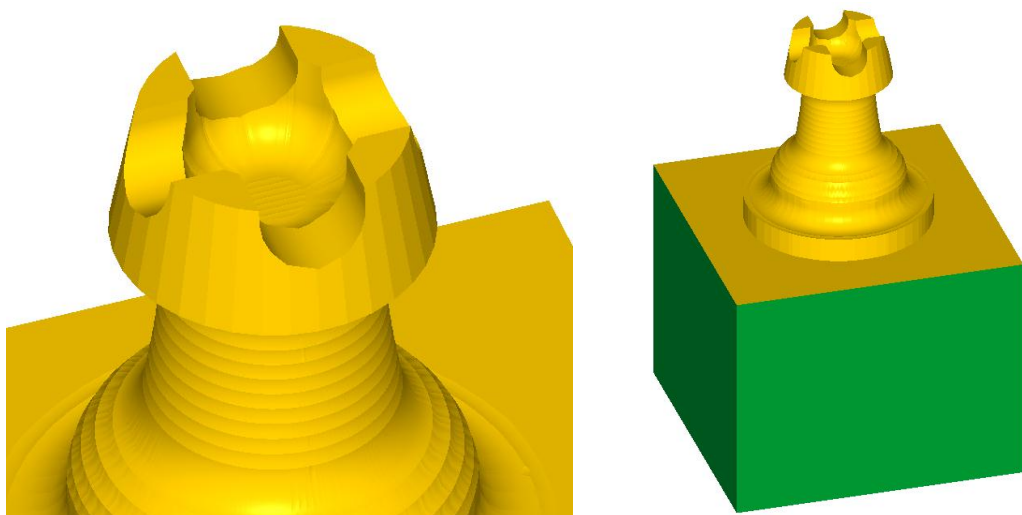
Poslední operací na tomto dílci je zhotovení vnitřní kulové plochy. Ta bude zhotovena celkově na dvě podoperace. Opět je zde využito křivkové obrábění. Výběr řídicí křivky - kružnice je patrný z Obr. 8.47. Z důvodu dokončovací povahy této procedury a vzhledem k použitému nástroji byly zvoleny celkově dva úběry. Jak je patrné z Obr. 8.48, přesně v ose dílce na spodní ploše kulové plochy je neobrobená ploška, která musela být další operací doobrobena. Pro tu byla zvolena procedura paralelního dokončování povrchů ve třech osách („*Surface finish – Parallel*“). Výsledný pohled obrobené součásti věže je uveden na Obr. 8.49.



Obr. 8.47 Výběr vodící křivky



Obr. 8.48 Výsledný vzhled dílce po obrobení drážek, po obrobení vnitřní kulové plochy



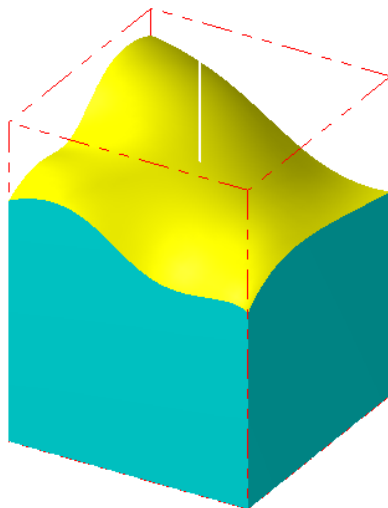
Obr. 8.49 Detail dokončení vnitřní kulové plochy, výsledný vzhled dílce

### 8.3 Součást s obecnou plochou a textem – obráběcí strategie

Stejně jako u předchozích dílců je i zde po nahrání efektoru a samotného modelu součásti (kap. 6.1), nutno vytvořit polotovár. Z důvodu stejného postupu jako u předchozí součásti zde již nejsou uvedeny ilustrace k tomuto úkolu. Posunutí spodní plochy polotovaru je od základní roviny 133 mm. Velikost polotovaru je 65 mm, kde přídavek tvoří opět 5 mm. Posunutí horního okraje polotovaru je tudíž 198 mm.

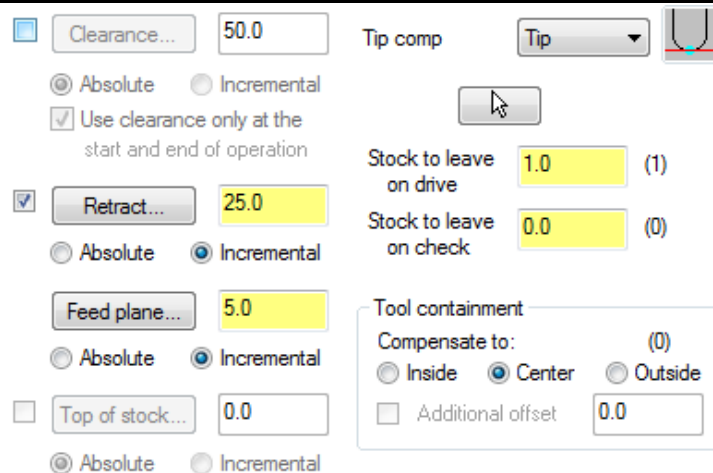
#### 8.3.1 Hrubování obecné plochy

První operací je hrubování, které probíhá pouze ve třech osách. Pro tuto operaci je využita procedura paralelního hrubování povrchu (Surface Rough Parallel). Volby, které uživatel v této proceduře využívá, jsou pouze volba nástroje, nastavení přejezdů nad povrchem a nastavení samotného úběru. Vodicím prvkem v tomto případě je samotná obráběná plocha (Obr. 8.50).

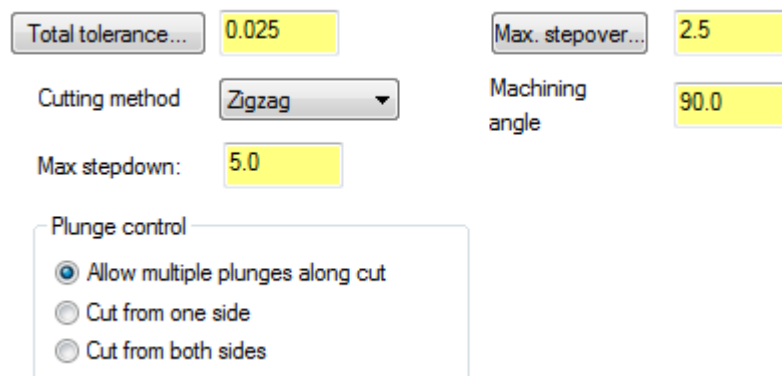


Obr. 8.50 Volba řídicí plochy, umístění plochy vůči polotovaru

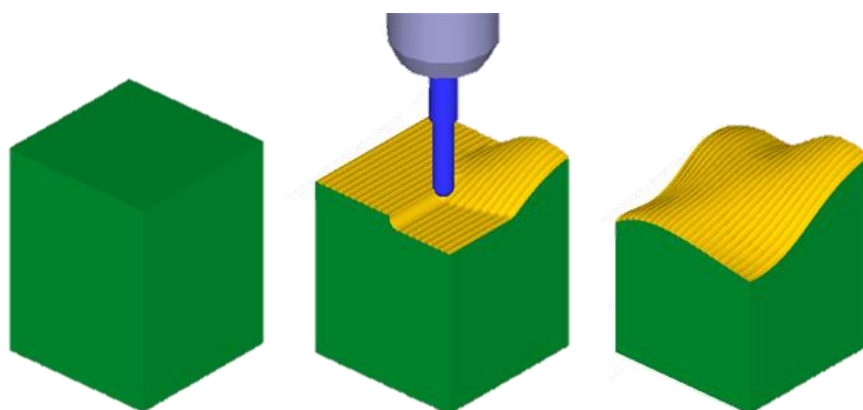
Použitým nástrojem je stopková fréza s kulovou hlavou  $\varnothing 6$  s délkou řezné části 6 mm, která již byla použita u předchozího dílce. Jak je vidět z Obr. 8.51, pro tuto operaci bylo nastaveno ponechání 1 mm na cílové ploše. Tento přídavek bude v další operaci obroben v pěti osách. Následně byly nastaveny hodnoty úběru dle Obr. 8.53.



Obr. 8.51 Nastavení přejezdů, nastavení přídávku pro následující operaci



Obr. 8.52 Nastavení hodnot úběrů

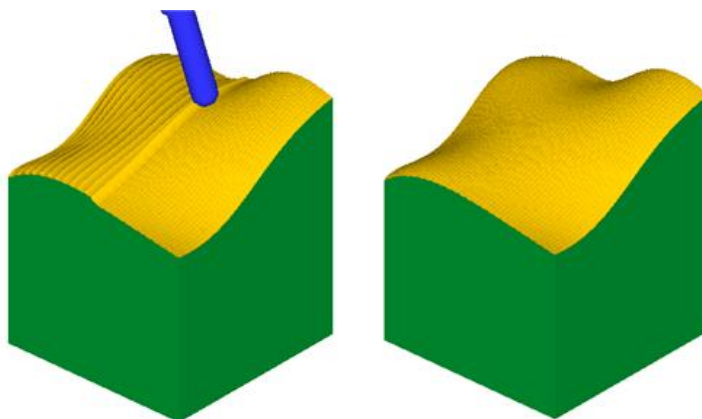


Obr. 8.53 Vzhled obrobku při operaci hrubování obecné plochy

### 8.3.2 Dokončení obecné plochy

Přídavek na povrchu plochy z minulé operace je v této obroben ve všech osách. Pro tuto operaci bude využita již dříve použitá metoda paralelních řezů („Parallel cuts“). Proto zde nebudou uváděna všechna její nastavení.

Protože se jedná pouze o dokončovací proceduru, není zde potřeba nastavovat hodnoty úběrů. Je zde nastavena pouze metoda obrábění, která byla nastavena jako metoda obrábění „cik-cak“. Jak je vidět z Obr. 8.54, obrábění skutečně probíhá v pěti osách. Hodnota bočního kroku při dokončování byla nastavena na 2 mm.



Obr. 8.54 Vzhled obrobku při operaci dokončení obecné plochy

### 8.3.3 Vytvoření projekce textu na součást

Text, který je zamýšlený pro vyfrézování do povrchu plochy, byl vytvořen přímo v programu Mastercam. Existuje pro tyto situace jednoduchý nástroj, kdy se text vytvoří v určité výšce, a jeho obrysy poté slouží jako vodící prvky nástroje. V tomto případě je ovšem situace odlišná, protože text je zamýšlen k frézování na obecné ploše. Pro tuto variantu je zde přímo obráběcí procedura frézování projekcí, kdy je nějaká křivka nebo útvar promítnut na zvolenou plochu, a tato projekce teprve slouží jako vodící prvek nástroje.

V tomto případě je potřeba vytvořit zamýšlený text někde nad nebo pod plochou, a ten poté využít k obrábění. Text „VUT FSI“ je vložen pomocí funkce vytvořit text („*Create Letters*“). Samotný text není vytvořen na rovné přímce, ale je umístěn na křivku vytvořenou nad dílcem (Obr. 8.55).

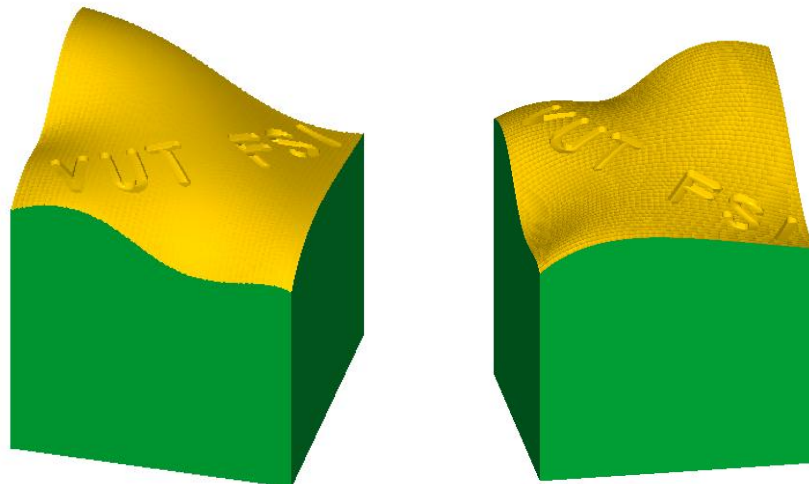


Obr. 8.55 Vzhled vytvořeného textu

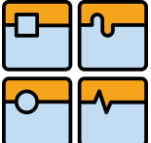
### 8.3.4 Obrobení textu na obecnou plochu

Po vytvoření textu je již vše připraveno pro poslední operaci obrobení textu na obecnou plochu. Pro tu se jak již bylo uvedeno, využije metoda obrábění projekcí. Jako nástroj byla využita do této chvíle nepoužitá fréza  $\varnothing 2$  s délkou řezné části 4 mm. To je hodnota velice malá, ale text je zamýšlen frézovat pouze do hloubky 1 mm. Vytvoření nástroje je stejné jako u předchozích dvou použitých (Kap. 7). Proto zde není tento postup znovu uveden.

Pro tuto operaci je řídicím prvkem plocha, na kterou se křivky textu mají projektovat, a poté také samotné křivky textu. Výsledný vzhled součásti je patrný z Obr. 8.56.



Obr. 8.56 Výsledný vzhled součásti obecná plocha s textem

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 72
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## 9. ROBOTMASTER - IMPLEMENTACE PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU

Po vytvoření obráběcích drah dílců, je na řadě vytvoření off-line části v programu Robotmaster. Do prostředí Robotmaster se přejde přímo z aplikace Mastercam, kde je hotový dílec s obráběcími drahami. První typ nastavení je Globální.

### 9.1 Globální nastavení robotu

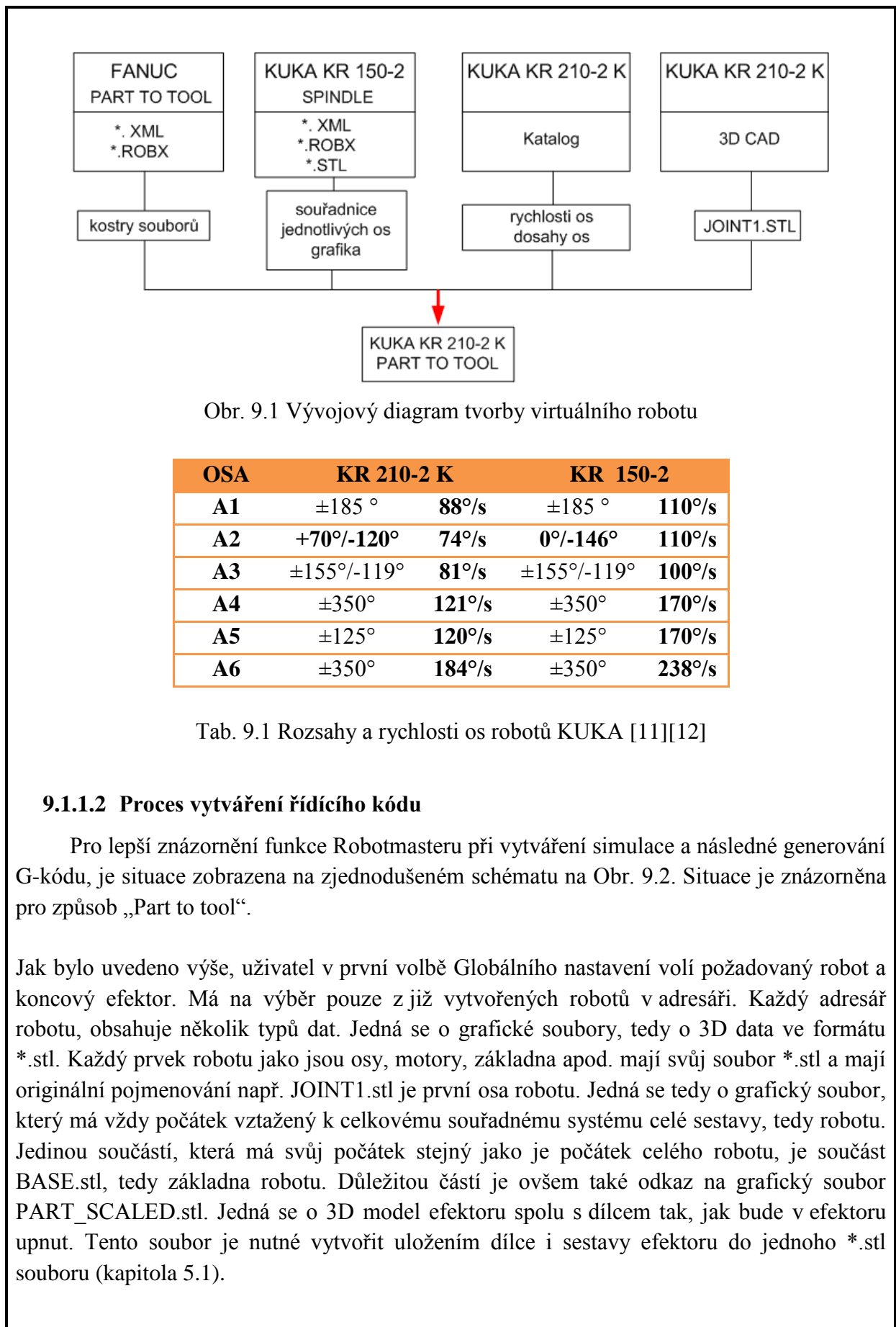
V tomto nastavení se provádí výběr robotu a nástroje, který je k přírubě robotu připojen. Bohužel Robotmaster ve své verzi, neobsahoval ve své databázi robotů robot KUKA KR 210-2 K. V knihovně Robotmasteru je také k dispozici poměrně velké množství robotů, ale pouze jeden z nich je připraven pro aplikaci obrábění typu „Part to tool“. Tento jediný robot je vytvořený pouze pro výukové účely a jedná se o robot firmy Fanuc, neznámého modelu. Z těchto důvodů bylo nutné virtuální robot kompletně vytvořit.

#### 9.1.1 Vytvoření virtuálního robotu

Robot ve virtuálním prostředí Robotmaster je definován několika prvky. Jsou to především soubory přípony \*.xml a \*.robx. Dále jsou to grafické soubory jednotlivých částí robotu ve formátu \*.stl.

##### 9.1.1.1 Zdroje pro vytvoření virtuálního robot

K dispozici pro vytvoření požadovaného virtuálního robotu KUKA KR 210-2 K, byly data robotu KUKA KR 150 a robotu značky Fanuc neznámého modelu, vytvořeného pouze pro účely výuky. Robot KR 150 se fyzicky ve své vnější konstrukci (rozměry, dosahy apod.), výrazně neliší od robotu KR 210-2 K. Liší se od něj výrazně pouze výkonnostními parametry (rychlosti natočení, únosnosti) viz Tab. 9.1, a také jinou konstrukcí první osy. Robot KR 150 je určen pro klasické upevnění na zemi, zatímco KR-210-2K je určen pro montáž na konzoli a má možnost zasahovat do prostoru pod sebou (umístěn na stroji a obsluhuje pracovní prostor pod sebou). Problém byl, že tento robot (KR 150) je vytvořen v Robotmasteru pro klasickou aplikaci obrábění, tedy situaci, kdy robot má jako koncový efektor obráběcí vřeteno („Spindle“). Robot Fanuc připravený v Robotmasteru pro aplikaci part to tool, je zase jiná konstrukce než KUKA KR 210-2 K. Proto byly definiční soubory, \*.xml \*.robx, obou robotů využity k vytvoření nových definičních souborů požadovaného robotu KUKA KR 210-2 K. Dále bylo nutno do těchto souborů implementovat výkonnostní parametry KR210-2 K tak, aby výsledek odpovídal skutečnosti (Obr. 9.1). Posledním krokem bylo nahrazení první osy KR 150 osou KR 210-2K.



Obr. 9.1 Vývojový diagram tvorby virtuálního robotu

OSA	KR 210-2 K		KR 150-2	
A1	±185 °	88°/s	±185 °	110°/s
A2	+70°/-120°	74°/s	0°/-146°	110°/s
A3	±155°/-119°	81°/s	±155°/-119°	100°/s
A4	±350°	121°/s	±350°	170°/s
A5	±125°	120°/s	±125°	170°/s
A6	±350°	184°/s	±350°	238°/s

Tab. 9.1 Rozsahy a rychlosti os robotů KUKA [11][12]

### 9.1.1.2 Proces vytváření řídicího kódu

Pro lepší znázornění funkce Robotmasteru při vytváření simulace a následné generování G-kódu, je situace zobrazena na zjednodušeném schématu na Obr. 9.2. Situace je znázorněna pro způsob „Part to tool“.

Jak bylo uvedeno výše, uživatel v první volbě Globálního nastavení volí požadovaný robot a koncový efektor. Má na výběr pouze z již vytvořených robotů v adresáři. Každý adresář robotu, obsahuje několik typů dat. Jedná se o grafické soubory, tedy o 3D data ve formátu \*.stl. Každý prvek robotu jako jsou osy, motory, základna apod. mají svůj soubor \*.stl a mají originální pojmenování např. JOINT1.stl je první osa robotu. Jedná se tedy o grafický soubor, který má vždy počátek vztažený k celkovému souřadnému systému celé sestavy, tedy robotu. Jedinou součástí, která má svůj počátek stejný jako je počátek celého robotu, je součást BASE.stl, tedy základna robotu. Důležitou částí je ovšem také odkaz na grafický soubor PART\_SCALED.stl. Jedná se o 3D model efektoru spolu s dílcem tak, jak bude v efektoru upnut. Tento soubor je nutné vytvořit uložením dílce i sestavy efektoru do jednoho \*.stl souboru (kapitola 5.1).

### 9.1.1.3 Řídicí soubor ROBX

Dále adresář robotu obsahuje soubor \*.robx. Pomocí tohoto souboru Robotmaster počítá potřebnou dráhu robotu. Jsou v něm obsaženy rychlostní limity a limity natočení os robotu. Nejdůležitější je mít v kódu tohoto souboru zadánu hodnotu `child="part"`, v části kódu definice robotu. Součástí kódu jsou tzv. „DH parametry“. Jsou to vlastně souřadnice posunutí a natočení jednotlivých souřadných systémů od báze až po koncovou osu. Ty byly spočteny dle doporučené literatury [36]. Vytvořený soubor KR210-2.robx je součástí příloh.

### 9.1.1.4 Řídicí soubor XML

Poslední důležitou částí adresáře robotu, je soubor \*.xml. Tento soubor obsahuje odkazy na grafiku jednotlivých os spolu s jejími souřadnicemi (je nutné znát prostorové rozložení os dle katalogu). Dále obsahuje odkazy na grafické soubory celé buňky, jako jsou stoly, držáky apod. Tento soubor slouží Robotmasteru k výpočtu natočení jednotlivých os pro dosažení požadované dráhy. K tomu využívá především limity natočení jednotlivých os, které jsou v kódu programu zaneseny.

Je zde také možnost v kódu měnit barvu jednotlivých komponent díky částem kódu „`clrr`“, „`clrg`“ a „`clrb`“ jehož hodnoty nabývají od 0,0 do 1,0. Jedná vlastně o jiný způsob zapsání RGB kódu, který slouží pro definici barev. V klasickém RGB kódu je rozsah 0-255. Je proto nutné lineárně zamýšlený odstín přepočítat z rozsahu 0-255 do rozsahu 0,0-0,1. Dále je v kódu obsažen pokyn „`transform id = „holder_transform“`“. Ve verzi „`spindle`“ je ve stejném řádku obsažen pokyn „`transform id = „workpiece“`“.

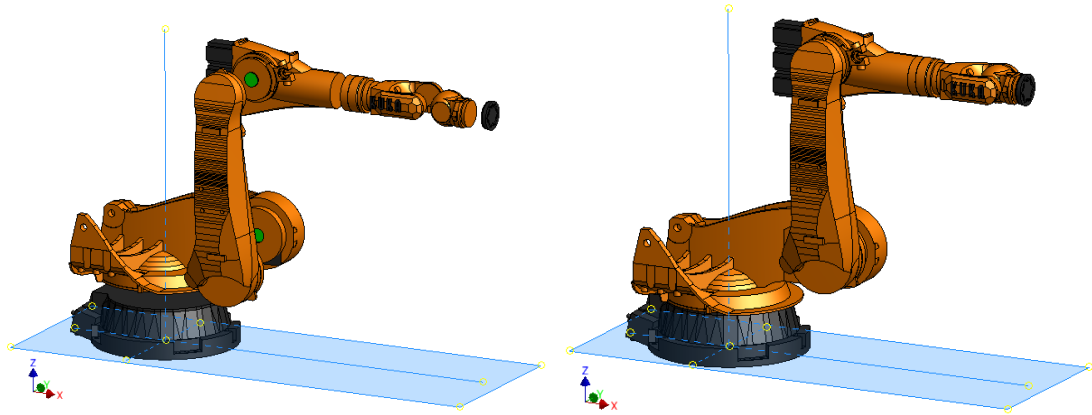
Poslední důležitou součástí je příkaz „`collcheck`“. Do něj se zadávají dvě skupiny grafických dat. V jedné jsou například osy robotu a efektor s dílcem. Ve druhé pak příslušenství buňky (stoly upínače apod.) a hlavně nástroj (tool). Jestliže se tyto dvě skupiny setkají (kolidují) při simulaci, všechny prvky, které přišly do styku zčervenají, a je zaznamenána kolize (Obr. 9.11). Vytvořený soubor KR210-2.xml je součástí příloh.

### 9.1.1.5 Využití 3D dat robotu

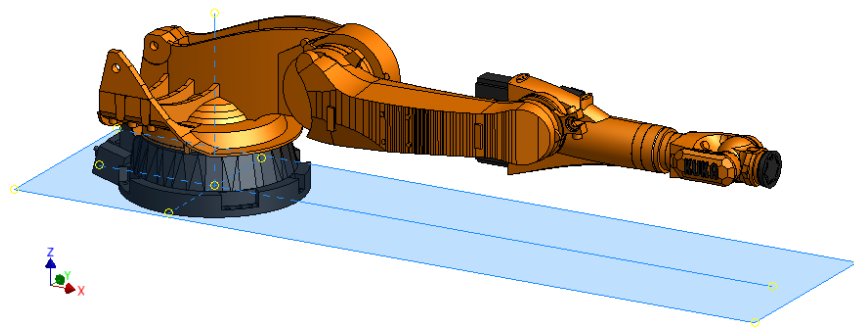
Jakýkoli průmyslový robot obdobné konstrukce jako KR210-2K, lze virtuálně vytvořit poměrně snadno. Je třeba mít k dispozici 3D data robotu. Ty jsou ke stažení ze stránek výrobce. Při zpracování robotu KR210-2K se osvědčilo používat 3D data formátu \*. IGES. Tento soubor lze otevřít také v programu Inventor. Po otevření lze vidět jednotlivé části sestavy robotu. Nejdříve je nutné napevno zavazbit základnu do počátku souřadného systému sestavy (Obr. 9.3). Dále je potřeba jednotlivé osy zavazbit tak, jak jsou ve skutečnosti. Tím se vytvoří reálný model robotu, jehož osami lze pohybovat. V dalším kroku je nutné jednotlivé osy vyrovnat dle rozsahů v manuálu do nulových poloh (Obr. 9.4). Každý díl robotu (osy, motory, nápisy) je třeba postupně uložit do nových souborů formátu \*. STL, a zachovat přitom souřadný systém vytvořené sestavy. Každý soubor je pojmenován jinak, např. první



osa se zpravidla jmenuje LINK1.STL. Je nesmírně důležité, aby tyto soubory byly vytvářeny z pozic, kdy je sestava robotu se svými osami v nulových pozicích vzhledem ke katalogu.



Obr. 9.3 Nahrání a zavazbení sestavy robotu



Obr. 9.4 Vyrovnání os robotu do nulových poloh

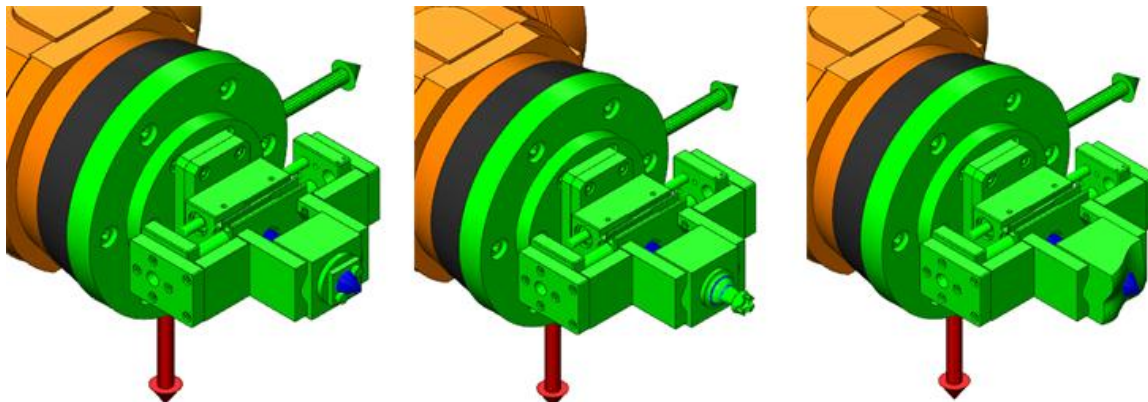
### 9.1.2 Vytvoření virtuálního efektoru

Další volbou v Globálním nastavení robotu je výběr koncového efektoru. V databázi Robotmaster je k dispozici několik vytvořených modelů vřeten, které se upínají na přírubu robotu. Je zde také množství jiných koncových efektorů, např. stříkačí pistole, hlava pro řezání drátem, koncový efektor s brusným plátem, lepicí pistole, hlavice pro řezání vodním paprskem, svařovací pistole apod.

V situaci, kdy je koncovým efektem vřeten („Spindle“), je struktura souborů, které Robotmaster využívá podobná se strukturou definující virtuální robot (viz výše). Je zde opět soubor \*.xml definující prostorové rozložení grafiky, odkazy na tyto soubory a další.

Pro tuto práci je ovšem potřeba mít jako koncový efektor upínač s dílcem. Jedna z možností výběru v Globálním nastavení robotu je i možnost výběru efektoru nazvaného DEFAULT\_PART\_TO\_TOOL. Jedná se prakticky o soubor definující vřeten, ale není v něm obsažen žádný odkaz na grafiku tohoto vřeten. Také v adresáři nástrojů není přítomen žádný soubor DEFAULT\_PART\_TO\_TOOL.stl. Výsledkem je situace, kdy na přírubě robotu není umístěn žádný efektor. Ten je součástí adresáře robotu pojmenovaný „part\_scaled.stl“ (kapitola 5.1).


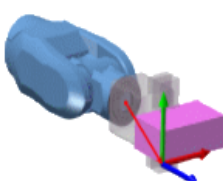
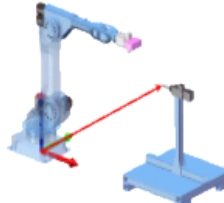
V simulaci to poté vypadá tak jak je znázorněno na Obr. 9.5. Na přírubě robotu je umístěn koncový efektor s dílcem, který odpovídá 3D datům souboru part\_scaled.stl.



Obr. 9.5 Koncový efektor na přírubě robotu v prostředí Robotmaster

## 9.2 Globální nastavení pozice nástroje

Po zvolení souborů definující robot a koncový efektor přichází v globálním nastavení volba pozice nástroje vůči robotu. Zde se zadávají souřadnice X,Y,Z a orientace A,B,C (Obr. 9.6). Vzdálenosti jsou zadávány se zřetelem na dosah koncového efektoru robotu. To jestli robot na nástroj skutečně dosáhne, a bez problému obrobí součást, vyplyne po spuštění simulace. V případě, že robot má nástroj mimo svůj dosah, se po spuštění simulace objeví chybová hláška.

Base Data		Tool Data	
Base Number		Tool Number	
Base: <input type="text" value="User defined"/> <input type="text" value="1"/>		Method: <input type="text" value="Use tool definition"/> 	
X	<input type="text" value="0.000"/>	Tool	<input type="text" value="1"/>
Y	<input type="text" value="0.000"/>	X	<input type="text" value="2485.000"/>
Z	<input type="text" value="0.000"/>	Y	<input type="text" value="5.000"/>
A	<input type="text" value="0.00"/>	Z	<input type="text" value="1360.000"/>
B	<input type="text" value="0.00"/>	A	<input type="text" value="270.00"/>
C	<input type="text" value="0.00"/>	B	<input type="text" value="90.00"/>
		<input type="button" value="Tool list"/> 	

Obr. 9.6 Globální nastavení pozice nástroje vůči robotu

## 9.3 Lokální nastavení

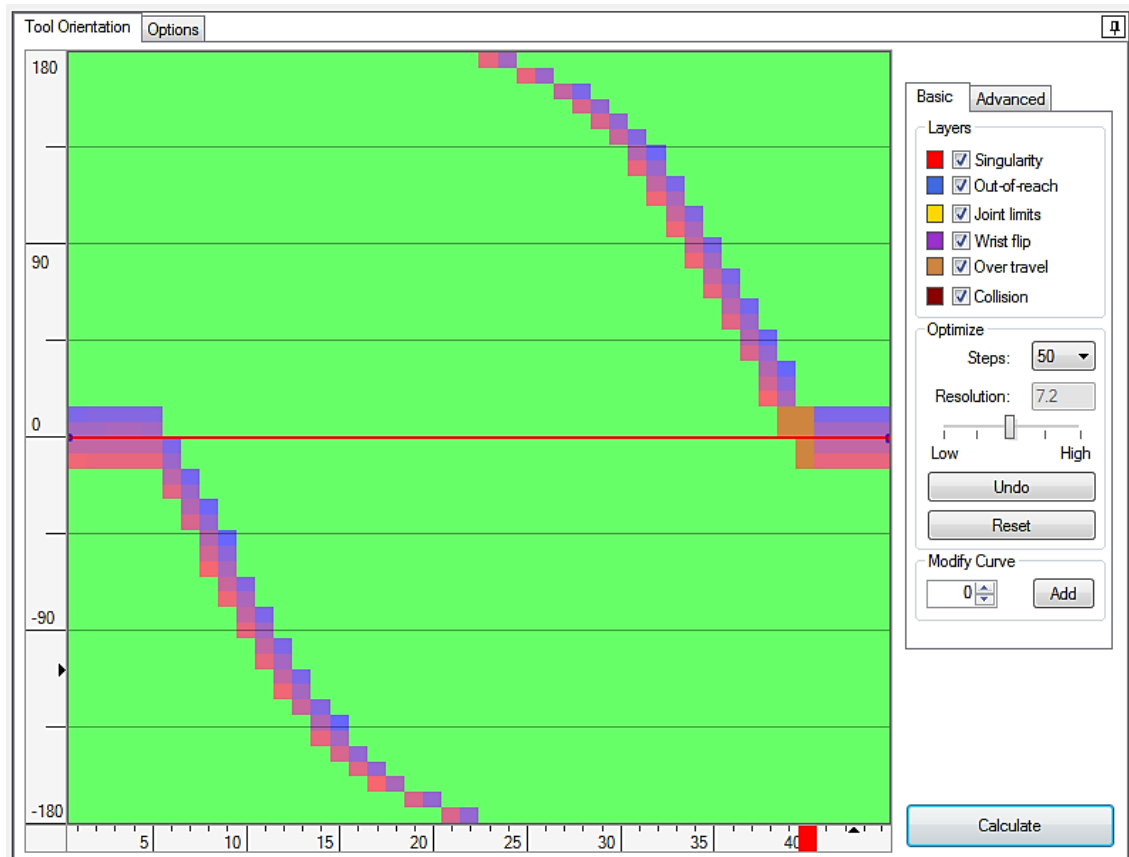
Další volbou v programu Robotmaster je lokální nastavení, které se provádí pro každou obráběcí operaci. Zde uživatel volí především z nastavení Konfigurace osy („Axis configuration“). Má na výběr ze dvou hlavních přístupů týkajících se typu rotačních pohybů robotu. Prvním typem je základní pohyb s rotací kolem osy Z („Default with Z rotation“).



Druhým je základní pohyb bez rotace kolem osy Z („Default with no Z rotation“). Tyto typy se od sebe ve velké míře liší. Zatímco při využití způsobu s rotací kolem osy Z, robot využívá ve velké míře první pohybové osy (bráno od základu), při způsobu bez rotace kolem osy Z, se snaží robot veškerou práci vykonat pouze posledními osami. Nejvíce osou 5 a 6. Pro všechny obráběcí operace byl zvolen typ bez rotace kolem osy Z. Druhá možnost byla využita pouze v případech, kdy robot při simulaci překročil limit natočení některé z os.

Jestli-že tato opatření nevyřešila problémy s limity os nebo se singularitami, byl použit nástroj Robotmasteru, který tyto problémy řeší. Jedná se o modul Optimalizace (*Optimization*) a je součástí lokálního nastavení.

Pouze u jedné operace ze všech dílců bylo potřeba změnit nastavení optimalizace. U této operace totiž Robotmaster zahlásil chybu překročení singularit a limit přetočení zápěstí („*Wrist flip*“). Konkrétně se jednalo o operaci obrábění bokem frézy na dílci šachovnicová figurka – věž (Kap. 8.2.4). Na Obr. 9.7 je patrné jak Robotmaster vykresluje všechny potenciální limity robotu do jednoho obrázku. Uživatel má potom snadnou úlohu, protože pouze modifikuje (přetažením) řídicí přímku natočení (Obr. 9.8) .

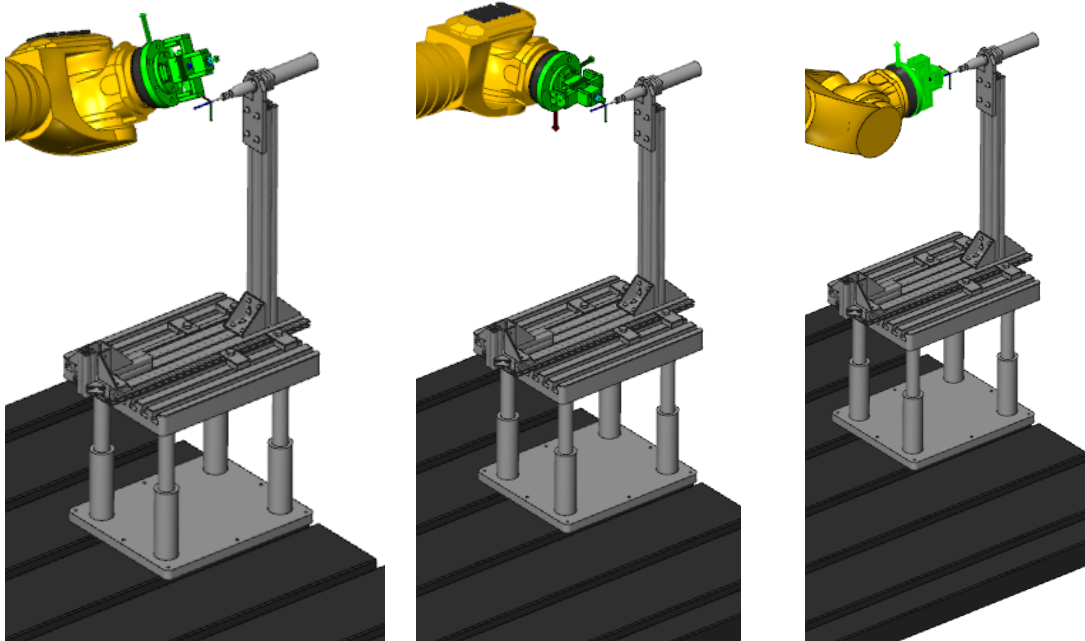


Obr. 9.7 Dosažení singulárních bodů a limitu přetočení zápěstí



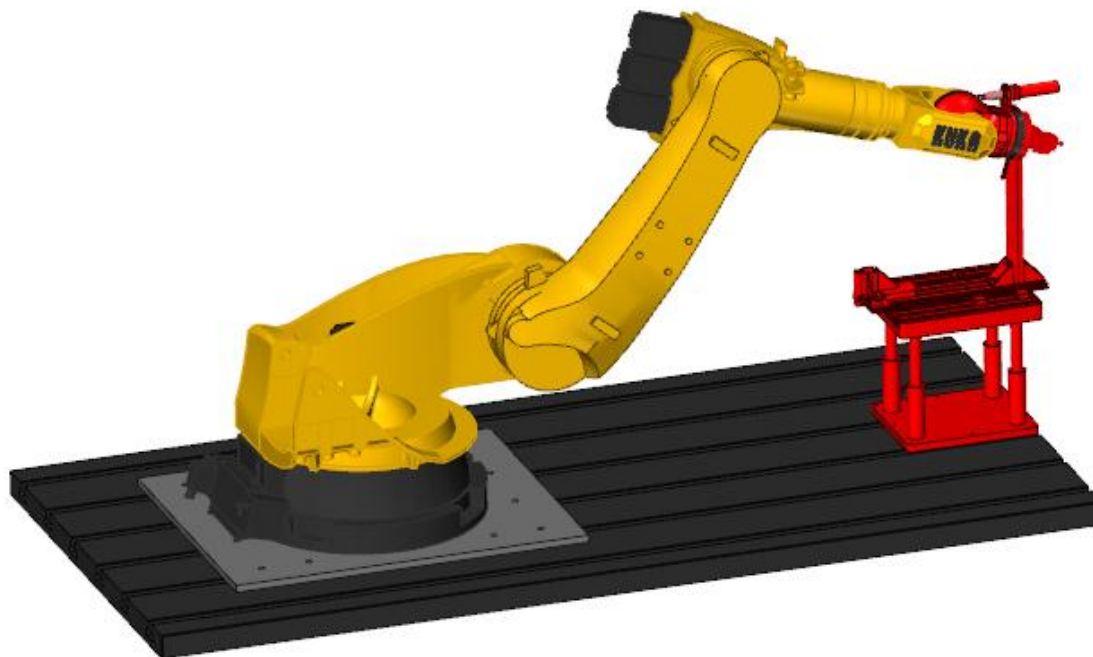


Při některých navržených operacích se koncový efektor robotu pohybuje poměrně blízko konstrukce stolu (Obr. 9.10). Díky hlídání kolizí těchto částí, ale Robotmaster upozorní na případné kolizní stavy.



Obr. 9.10 Příklady pohybů robotu kolem stolu

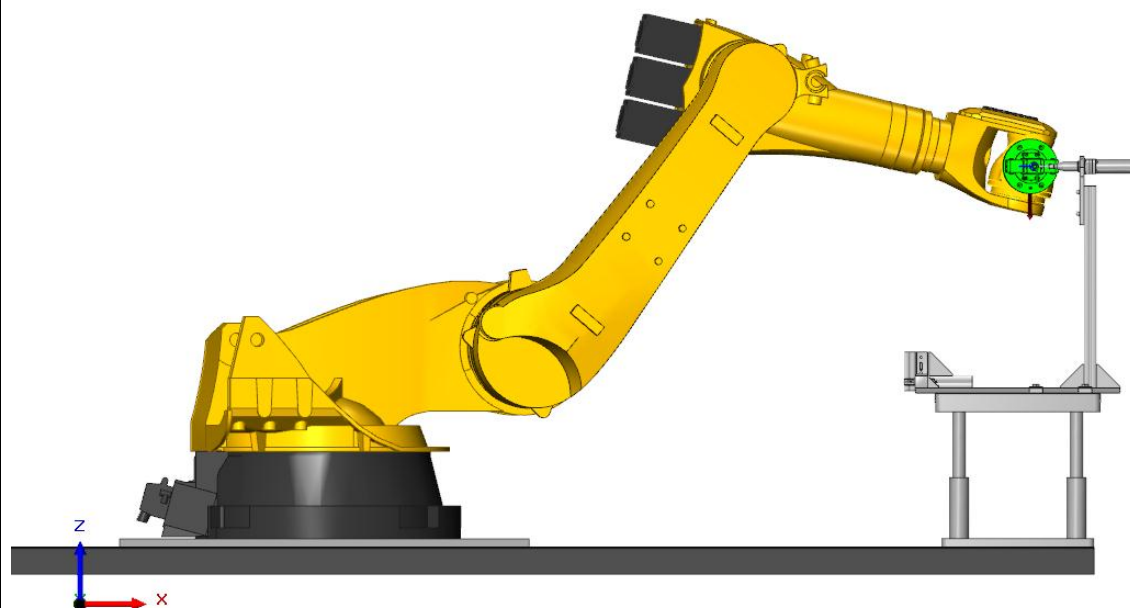
Jestli-že jsou pohyby robotu v rámci CAM části bez kolizí, neznamená to ještě, že celý vygenerovaný program je bezkolizní. Další metodou předcházení kolizí je samotná simulace v prostředí Robotmaster. Jestli-že při ní totiž dojde ke kolizi, např. některé z částí robotu a pracoviště, obě tyto části se zbarví červeně. V žádné simulaci toho nebylo dosaženo, ale pro účely ukázky je uveden jeden uměle vytvořený kolizní stav (Obr. 9.11). V tomto případě se jedná o kolizi koncového efektoru, páté osy a stolu. Jde vidět, že se znázorní pouze ty části, které skutečně kolidují.



Obr. 9.11 Uměle vytvořená kolize koncového efektoru a stolu

## 9.5 Změna pohybů robotu

Změna jednotlivých pohybů robotu byla provedena až na základě experimentu. Veškeré nájezdy a odjezdy ze záběru byly eliminovány na minimum tak, aby byla zaručena funkčnost a navíc se nezanášela další chyba opakovatelné přesnosti robotu. Ukázalo se totiž, že je velice důležité najíždět na součást vždy z jedné strany dílce, a tím eliminovat absolutní nepřesnost polohování robotu. Dále byl kladen důraz na to, aby robot polohoval dílec do výchozí pozice řezu, a řez samotný byl poté vytvořen jediným pohybem (otáčením) pouze poslední osy (Obr. 9.12).



Obr. 9.12 Výhodná poloha robotu – prostředí Robotmaster



Obr. 9.13 Výhodná poloha robotu – skutečnost

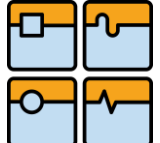
## 9.6 Generování kódu

Po ověření, že je simulace bezkolizní, se dále přistupuje ke generování kódu pro robot. Ten se generuje po návratu z prostředí simulace do prostředí Mastercam. V případě, že byla součást vyrobena na více nástrojů (Věž, Obecná plocha) byl kód rozdělen na více částí. Pro každý nástroj v rámci jedné součásti byl tedy vygenerován jeden řídicí kód. Vygenerované kódy ke všem součástem a nástrojům jsou součástí příloh na přiloženém DVD.

## 10. DOPORUČENÍ PŘI PRÁCI S MASTERCAM, ROBOTMASTER

- Pro účely této práce byl také vytvořen konfigurační soubor, který definuje barevný vzhled aplikace Mastercam a Robotmaster. Je obzvláště užitečný, když je potřeba jednotlivé obrázky z aplikace uvádět v publikacích a mít v nich automaticky bílé pozadí. Volbu tohoto souboru uživatel provede v hlavní nabídce pod záložkou Nastavení - konfigurace („*Settings - configuration*“). Úplně dole v rolovacím okně pak uživatel volí z defaultních nebo uživatelem vytvořených konfiguračních souborů. Ty musejí být nahrány ve složce Dokumenty/my mcamx5/CONFIG.

- Při editacích zdrojových kódů robotu docházelo občas k pádu simulace. Po znovuootevření potom nebyly nikde zobrazeny žádné ovládací panely. V rámci této práce byl proto také vytvořen konfigurační soubor rozložení ovládacích panelů a voleb, který lze zapnout po takovémto pádu simulace. Ovládací panely se tímto rozloží do obvyklé pozice včetně ovládacích panelů Robotmasteru, který se po volbě rozložení panelů „Default“ nezobrazují. Výběr konfiguračního souboru pro ovládací panely provádí uživatel v hlavní

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 82
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

nabídce pod záložkou Nastavení – přizpůsobit („*Settings – customize*“). Konfigurační soubor je uložen ve stejné složce jako předchozí.

- V některých situacích po spuštění simulace Robotmaster zahlásí chybu, že limit druhé osy je překročen („*Joint 2 axis limit reached*“). Tento limit je ovšem dosažen ještě před jakýmkoli pohybem robotu v dané operaci. Jedná se o chybu, která se často stává při editaci souborů robx a xml. Vyřeší ho restart aplikace.

- Za žádných okolností nesmí uživatel pojmenovat obráběcí soubor („*NC file*“) tak, že je v něm obsažena mezera nebo číslo na začátku názvu. V takovém případě se nespustí simulace v Robotmasteru, ani nedojde ke generování řídicího kódu. Když už ho uživatel takto pojmenoval, jediná možnost jak ho přejmenovat, je kliknutím pravým na danou obráběcí operaci pravým a zadat Změnit vybrané operace – změnit jméno obráběcího souboru („*Edit selected operation – Change NC file name*“).



## 11. SESTAVENÍ PRACOVIŠTĚ

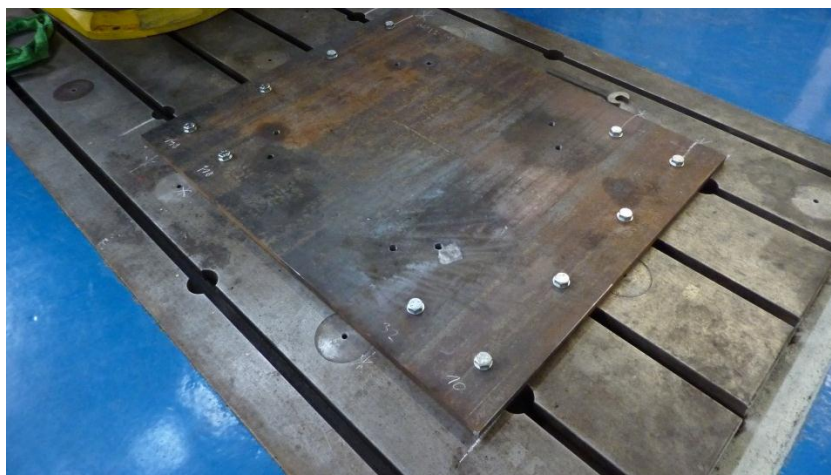
Pracoviště pro demonstrační účely této práce bylo umístěno do laboratoře C1 Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně. Složení je provedeno dle popisu v celém předešlém obsahu práce. Vzhled pracoviště s jednotlivými celky je patrný z Obr. 11.1.



Obr. 11.1 Celkový pohled na pracoviště

### 11.1 Základová deska robotu

Na montážní plotnu se do upínacích t-drážek nejdříve umístily upínací kameny a pomocí nich se upnula základová deska k zemi. Jedná se o ocelovou desku s rozměry 1215x1500x30 mm. V upínacích drážkách v zemi jsou umístěny upínací kameny, pomocí kterých je základová deska upevněna celkem na 11 místech pomocí šroubů M24.



Obr. 11.2 Základová deska robotu

## 11.2 Průmyslový robot

Průmyslový robot KUKA KR-210-2 K je upevněn na základové desce pomocí osmi šroubů M24. Jeho řídicí systém KRC-2 Edition 2005 je umístěn v bezpečné vzdálenosti. Napájení průmyslového robotu je pomocí 3-fázového proudu 400V. Robot je s řídicím systémem propojen jedním datovým a jedním silovým kabelem.

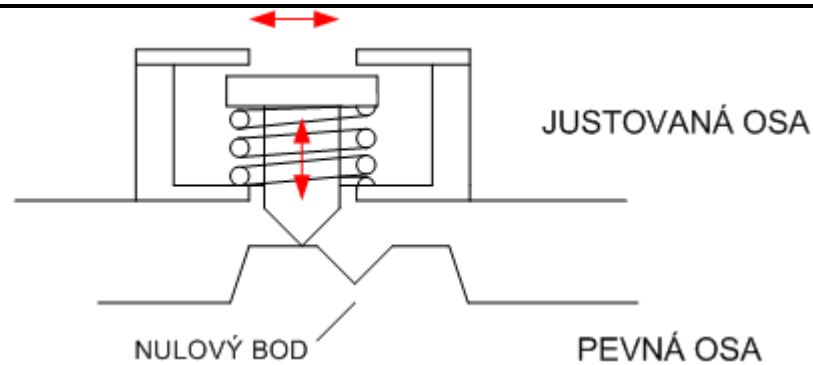


Obr. 11.3 Upevnění průmyslového robotu na základové desce

## 11.3 Kalibrace nulových poloh os

Po spuštění robotu a ověření jeho funkčnosti bylo zapotřebí s každou osou najet do nulových poloh a tyto zaznamenat. Jako indikátor nulové polohy slouží obsluze buď orientační značky (rysky) na každé z os. Ty jsou vždy umístěny na styku obou sousedních os. Nastavení pomocí těchto značek se ovšem ukázalo jako velice nepřesné, protože odchylka při lineárním pohybu v rovině stolu činila asi 20 mm na 500 mm ujeté vzdálenosti. Tato chyba byla navíc umocněna nesprávným způsobem najetí rysek na sebe.

V praxi se běžně používá způsob tzv. „justáže“. Princip spočívá v tom, že na ose robotu, která se při kalibraci pohybuje, je umístěn vysouvateľný hrot na pružině. Na ose, která s ní sousedí, a je při kalibraci pevná, je umístěn výstupek s drážkou. Do této drážky postupně zajíždí hrot indikačního zařízení. Indikace nulové polohy pro kalibrovanou osu je dána okamžikem nejnižší polohy hrotu (Obr. 11.4).



Obr. 11.4 Princip justování os robotu

Po této proceduře činila odchylka od předchozí metody u os A4,A5 a A6 až 3°. U os A1,A2 a A3 činila odchylka do 1°. K dispozici byla pouze mechanická část celého justačního zařízení, a proto byl proces také nepřesný.

#### 11.4 Upevnění měřícího hrotu

Po oživení robotu mu bylo zapotřebí zadat jeden bod v prostoru. Pro tyto úkony je určen měřící hrot, který je upevněn na přírubě robotu ISO 100 (Obr. 11.5). K tomuto libovolně zvolenému bodu je potřeba najet celkově 4 krát pokaždé z jiného směru.



Obr. 11.5 Měřící hrot

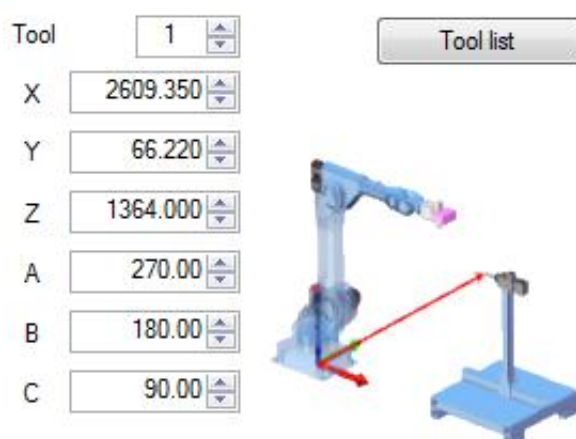
## 11.5 Naměření pracoviště

Dalším krokem bylo upevnění stolu k montážní plotně. Ten je upnut stejným způsobem jako základová deska robotu, tedy pomocí t-drážek a kamenů. Pomocí měřicího hrotu byla následně naměřena poloha špičky nástroje ve frézce (Obr. 11.6). Vysunutí frézy bylo ručně, pomocí posuvného měřítka, nastaveno na hodnotu 45 mm (dle údajů v Kap. 7).

Naměřené souřadnice špičky nástroje byly zpětně změněny v globálním nastavení Robotmasteru (kap. 9.2) Obr. 11.7.



Obr. 11.6 Měření špičky nástroje pomocí měřicího hrotu



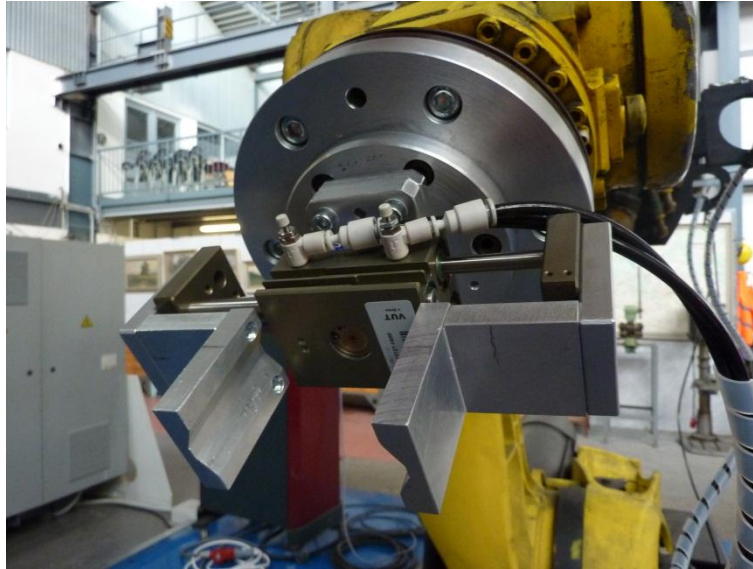
Obr. 11.7 Nové určení špičky nástroje v programu Robotmaster

Dále byla přesně naměřena výška stolu, vůči souřadnému systému robotu. Údaje o souřadnici špičky nástroje a o výšce stolu byly dále použity na úpravu 3D dat stolu. Ten byl v grafickém prostředí Autodesk Inventor posunut vůči svému souřadnému systému tak, aby odpovídal skutečnosti.



## 11.6 Koncový efektor

Měřicí hrot byl po naměření pracoviště vyměněn za koncový efektor. Napojení hadic pro pneumatické médium je patrné z Obr. 11.8. Tyto hadice jsou vedeny v bužírce, aby při pohybech robotu neohrožovali proces výroby. Samotná bužírka je potom vedena v energetických nosičích robotu. Tím je zajištěno, že se obě hadice mohou otočit kolem poslední osy při jejím pohybu  $\pm 350^\circ$ .



Obr. 11.8 Koncový efektor s napojením hadic

## 11.7 Ovládání koncového efektoru

Jako zdroj tlakového vzduchu byl použit kompresor SilentMaster SEM. Dále byla mezi efektor a tento kompresor zařazena jednotka na úpravu vzduchu, která také obsahuje uzavírací ventil. Dle výpočtu v kap. 4.8.1.1 byla zprvu na vstupu do efektoru nastavena hodnota tlaku 4 bar. Při praktickém pokusu se ovšem osvědčila spíše hodnota 5 bar. Při nižším tlaku nebyl polotovar v efektoru řádně a pevně upnut.

## 12. VÝROBNÍ CYKLUS

Jak bylo uvedeno v kap. 4.3, celý výrobní cyklus byl rozdělen na tři části. Prostřední Off-line část byla detailně popsána v kap. 8 a 9. Té ovšem ve skutečnosti předchází uchopení dílce a následuje odložení hotové součásti.

### 12.1 On-line programování robotu – uchopení, odložení dílce

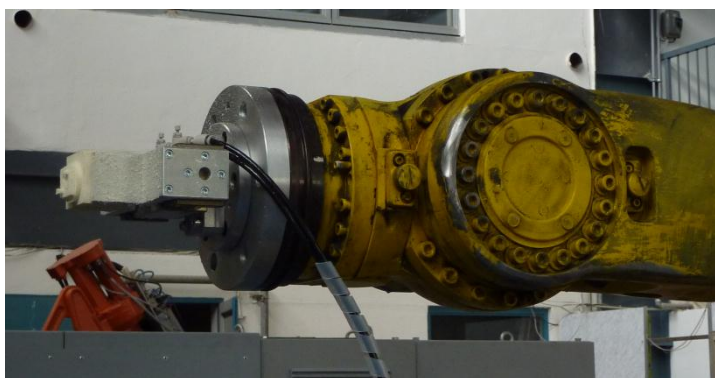
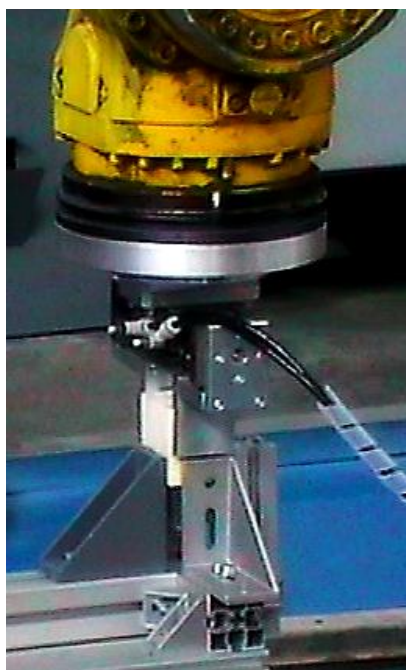
On-line část programování robotu byla provedena přímo na pracovišti pomocí Teachpendantu (Obr. 12.1). Všechny dílce byly navrženy tak, aby programy pro uchycení a odložení byly pro všechny dílce stejné. Výrobní cykly se pak liší v prostřední off-line části (Obráběcí strategie kap. 8).



Obr. 12.1 Použitý teach-pendant

## 12.2 Spojení všech částí programu

Spojení On-line a Off-line částí bylo provedeno přímo pomocí teach-pendantu. První operace uchopení (programována On-line) je stejná pro všechny dílce (Obr. 12.2).



Obr. 12.2 Operace uchopení dílce (On-line programování)

## 12.3 Vzhled obrobeneých dílců

Po odladění všech programů a jejich částí byl spuštěn celý výrobní cyklus pro každý z dílců. Dosažené výsledky jednotlivých dílců jsou uvedeny v následujících kapitolách.

### 12.3.1 Součást pro 2,5D obrábění

Tato součást měla být zaměřena na zjištění přesnosti obrábění robotu ve třech osách. Ukázalo se zde, že největší problém má robot při projíždění kruhových křivek (válce). S lineárními prvky (kvádr) neměl robot, co se týče přesnosti, žádný problém. Výsledný vzhled dílce je na Obr. 12.3. Je zde také vidět výrazný posun dílce vůči polotovaru (dle výkresu má být přesně ose).



Obr. 12.3 Výsledný vzhled součásti obrábění 2,5D

Jednotlivé rozměry byly posléze změřeny posuvným měřítkem. Výsledky těchto orientačních měření jsou patrné z Tab. 12.1. Rozměry například na válcích byly změřeny celkově ze čtyř pozic a následně byl z těchto hodnot vypočten aritmetický průměr. Tab. 12.1 potom uvádí už pouze tyto průměry. Dále je přiřazena nejmenší a největší naměřená hodnota pro daný rozměr.

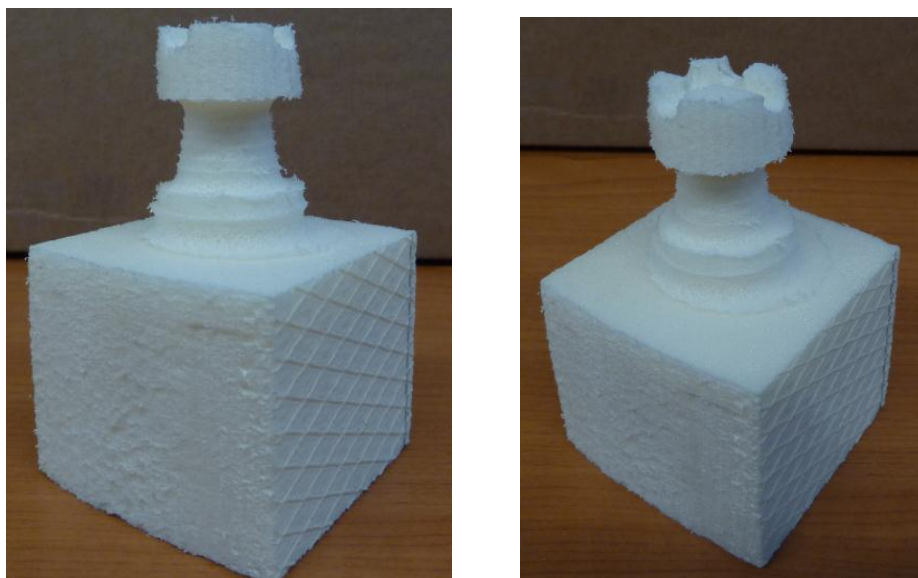
Prvek	Navržený rozměr [mm]	Naměřený rozměr [mm]	Nejmenší / největší naměřený rozměr [mm]
Válec	Ø 40	Ø 39,88	39,6/40,5
Kvádr	28x28	28,0x27,5	-
Menší válce	2x Ø 8	Ø 7,8 Ø 7,75	Ø 7,3 / Ø 8,4
Rozteč válců	30	29,8	-
Drážka	22x8	20,7x9	8,7 / 9,2
Výška válce	5	5	-
Výška kvádru	5	5	-
Výška menších válců	5	5	-
Hloubka drážky	5	5	-

Tab. 12.1 Změřené hodnoty kontrolních rozměrů součásti pro obrábění 2,5 D

Nutno podotknout, že měření probíhalo ručně s posuvným měřítkem, které mělo přesnost v řádech desetin milimetru.

### 12.3.2 Součást šachovnicová figurka - věž

Tato součást měla především za úkol prověřit přesnost obrábění „part to tool“ při plném využití všech os robotu. Zobrazená poslední verze věže (Obr. 12.4) je výsledkem celkem šesti vývojových verzí stylů obrábění. Přesto, že tato součást prošla velice dlouhým odladováním, nepodařilo se dosáhnout požadovaného vzhledu. Změřené orientační rozměry jsou uvedeny v Tab. 12.2



Obr. 12.4 Výsledný vzhled součásti šachovnicová figurka – věž

Prvek	Navržený rozměr [mm]	Naměřený rozměr [mm]	Nejmenší / největší naměřený rozměr [mm]
Spodní válec	Ø 32	Ø 33	Ø 32,4/ Ø 34,2
Drážka cimbuří	6	7,2	-
Výška věže	35	34	-
Průměr kulové plochy	23	24	23/25
Hloubka vnitřní kulové plochy	6	6	-
Hloubka drážek	4	4	-

Tab. 12.2 Změřené hodnoty orientačních rozměrů součásti šachovnicová figurka – věž


### 12.3.3 Součást obecná plocha s textem

Součást s obecnou plochou měla ukázat možnosti obrábění ve všech osách robotu. Především schopnost vytvořit obecně definovaný povrch nejdříve hrubovaný a poté dokončený malým úběrem. Měla také ukázat schopnost nástroje následovat tento povrch ve třech osách a vyfrézovat do něj text.

Výsledný obrobený dílec je zobrazen na Obr. 12.5. U této operace bylo vytvoření obecné plochy plně splněno. Stejně tak kvalita povrchu je velice dobrá. Obráběcí procedury pro tento dílec prošly pouze mírnými úpravami. Jednalo se především o úpravu velikosti textu, protože v předešlé verzi kraj písma nevyšel do kraje dílce, přestože zde měl ještě asi 1 mm rezervu. Také je patrné, že jeden okraj dílce je nedokončený. Je to způsobeno nepřesností najetí nástroje na začátek obráběcí dráhy.



Obr. 12.5 Výsledný vzhled součásti obecná plocha s textem


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 92
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### 13. ZHODNOCENÍ PRÁCE S PROGRAMY MASTERCAM A ROBOTMASTER

Mastercam jako nástroj pro vytváření obráběcích drah je na jednu stranu vyřešený velice dobře. Je v něm obsažen modul skicáře pro kreslení jednoduchých tvarů nebo křivek. Z nich lze vytvářet jednoduché plochy apod. Velká nevýhoda konkrétně skicáře je nemožnost editovat dříve nakreslené útvary. Při potřebě úpravy je vždy potřeba danou křivku nebo útvar smazat a nakreslit novou. Mastercam také obsahuje modul 3D těles. Osobně si nedovedu představit, po zkušenostech s profesionálními CAD systémy, že by se Mastercam hodil pro navrhování, třebaže jednodušších zařízení. Co Mastercam ztrácí nemožností editovat nakreslené útvary, plně dohání úžasnou možností vytváření obráběcích strategií pro CAM. Vše je velice intuitivní a téměř u všech nastavení je vždy přítomná ilustrace, co pomocí daného nastavení uživatel edituje. K dispozici je až neuvěřitelné množství možností, jak vytvořit řídicí křivky nástroje pro určitý útvar na dílci. Lze zde vytvářet vlastní knihovny nástrojů i držáků, přejímat jednotlivé nástroje z jiných knihoven nebo je pouze editovat.

Co se týče ověřování správnosti nastavení obráběcích procedur, má uživatel k dispozici dvě metody. Ani jedna z nich ovšem netvoří ultimátní nástroj, jak spolehlivě zkoumat navržené řešení. V případě funkce Ověr („Verify“) jsem nenalezl způsob jak účinně zkoumat operace, které jsou např. na dílci až desáté v pořadí. Uživatel totiž musí v tomto případě simulovat také všechny předcházející operace. To i při nejvyšší rychlosti simulace nějaký čas zabere a nového uživatele v tu chvíli hodně zdržuje.

Přechod do prostředí Robotmaster a celková práce s ním je velice snadná. Základem je ovšem precizně udělaná CAM část, kdy uživatel dopředu bere v potaz limity robotu apod. Výborným nástrojem je modul Optimalizace, který umožňuje jednoduché vyřešení kolizí, singularit a dosažení limitních poloh. V prostředí simulace lze s jednotlivými osami robotu pohybovat a tím zkoumat např. dosahy efektoru. Samozřejmostí je hlídání kolizí. Nevýhoda programu Robotmaster je občasná nestabilita, kdy z nepochopitelných důvodů simulace selže a celý program je nutné restartovat.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 93
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ZÁVĚR

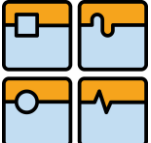
Tato práce měla za úkol ověřit funkčnost metody obrábění pomocí průmyslových robotů, kdy na přírubě robotu je upnut obrobek a díky stacionárně upnuté frézce, robot svými pohyby obrábí materiál. Dále měla za úkol navrhnout metodický přístup k vytváření těchto operací. V této práci byl proveden kompletní návrh metodiky pro obrábění pomocí robotů při využití externího nástroje („Part to tool“). Lze dle ní zamýšlený průmyslový robot vytvořit ve virtuálním prostředí, a pomocí testovaných metod obrábění navrhnout obráběcí postup pro obrobení dílce pomocí robotu. Byly navrženy a obrobeny celkově tři dílce, kdy každý z nich měl ukázat co největší chyby obrábění pomocí průmyslových robotů.

Při zpracovávání této práce byl kladen důraz na využití co nejvíce obráběcích strategií. V některých případech bylo možné určité operace řešit stejným způsobem, avšak z důvodu co nejširšího záběru, byla zvolena odlišná obráběcí strategie.

Více než na minimalizaci výrobního času konkrétního dílce, byl kladen větší důraz na pokud možno největší využití robotu. V některých případech bylo jistě možné zvolit dle technologického hlediska lepší postup, avšak obrábění dílců v této práci mělo hlavně za úkol odhalit možné problémy, nedostatky a nepřesnosti metody obrábění robotem za využití externího nástroje.

Využívané programy Mastercam a Robotmaster vykazují několik zásadních nedostatků, které byly popsány v kapitole 13. Pro účely této práce byly tyto programy vhodné. Programy mají mnoho ilustrací vedle jednotlivých nastavení, takže i nevyškolený uživatel poměrně snadno pochopí, k čemu daná nastavení jsou. Záporně ovšem hodnotím prostředí simulace obou programů. Pro účely rychlé kontroly je simulace velice zdlouhavá. Úplně chybí jistá zpětná vazba ze simulace Robotmasteru a Mastercamu. Uživatel může v prostředí Mastercam vytvořit téměř libovolné procedury bez zjevných problémů a případných kolizí, avšak po spuštění prostředí Robotmaster je zaznamenán kolizní stav nebo dosažení limitu natočení os. Simulace v prostředí Mastercam totiž neuvažuje pohyby mezi jednotlivými operacemi, ani pohyby robotu. Nástroj se jednoduše objeví na místě, kde začíná řez (případně v nájezdní výšce). Jak se do tohoto místa dostane je záležitost prostředí Robotmaster. Uživatel ve většině případů nevystačí s nastavením pohybů v prostředí Robotmaster, ale musí zpátky do nastavení Mastercam a změnit danou operaci tak, aby byla vyrobitelná robotem. Ideální by byla situace propojení simulací Mastercam i Robotmaster, kde lze vidět úběry dílce, stejně jako pohyby robotu.

Obrobené dílce nenaplnily očekávání o přesnosti metody. V případě obrábění pouze ve třech osách (součást 2,5 D) byla dosažena přijatelná odchylka  $\pm 0,5$  mm. Zásadní vliv na přesnost obrobku měl směr najíždění na začátek obráběcích drah. Při změně tohoto místa např. do jiného kvadrantu obrobku, docházelo k obrovským nepřesnostem v řádu až několika milimetrů. Po změně najíždění a také zadání menších úběrů měl robot největší problém

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 94
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

s kruhovou interpolací při vytváření válců. Na nich lze vidět velká absolutní odchylka okolo 1 mm (rozměry činily  $\varnothing$  40 mm a  $\varnothing$  8 mm, viz. kap.12.3.1). Je ovšem zajímavé, že výškové rozměry dílce, jsou v rámci možností ručního měření, naprosto přesné.

V případě obrábění pomocí všech os robotu vykazují dílce značné chyby Především rozměrové, ale i tvarové. Po optimalizaci směru a místa nájezdů stejně dílce (především dílec věž), vykazovaly velké chyby tvaru (patrně z obrázků kapitoly 12.3.2, Tab. 12.2). Velkou chybu dílec obsahuje na horní části věže. Drážky v ní vykazují viditelné posunutí orientace vůči zamýšlené ose věže. Dále bylo zjištěno, že nejpřesnějším obráběním je situace z Obr. 9.12 a 9.13, kdy si robot dílec napoložuje k nástroji a poté pouze točí poslední osou a přidává jednotlivé úběry.

U dílce obecná plocha s textem je sice dosaženo kvalitního povrchu, ale jeho přesnost je otázkou. Nelze totiž jednoduše naměřit, s jakou přesností je tento povrch obroben. Veškeré nepřesnosti se mohou v této obecné ploše skrýt. Vytvořený text nedosahuje takových kvalit, jak se očekávalo. Text je sice vůči ploše v daném místě relativně stejně hluboký, jeho tvar je ovšem nepřesný, zejména u písmena „S“. Zde se opět projevila špatná kruhová interpolace robotu. Otázkou zůstává, co mělo největší vliv na všechny tyto nepřesnosti.

Největší nepřesnost byla zcela určitě způsobena nepřesnou justáží jednotlivých os robotu (kap. 11.3). Byla provedena mechanicky a také neověřeným přípravkem. Dalším faktorem byla samotná přesnost robotu. Tento robot totiž pracoval po dobu několika let mnoho hodin denně v karosárně, a tato doba a zátěž se projevila nejen na jeho vzhledu, ale určitě také na jeho přesnosti. Při obrábění také docházelo při zastavení v koncových polohách k viditelnému zakmitání koncové polohy robotu. Velký vliv na přesnost tvaru dílců měla také chybná orientace nástroje. Ten je poměrně přesně upnut ve vřetenu frézky, která je připevněna ke stolu. Tento stůl ovšem nebyl nijak vyrovnán vůči robotu, a proto vyosení tohoto stolu hrálo jistou roli. Určitou nepřesnost lze také hledat v použitém materiálu. Extrudovaný polystyren se při obrábění viditelně rozkmitával. Také uříznutí polotovaru probíhalo ručně, kdy přesnost se pohybovala jistě v řádu  $\pm$  1 mm.

Off-line programování robotů je poměrně snadné. Co ovšem má hlavně off-line programování přinášet do praxe, je vytvoření fungujícího programu pro robot, který již není potřeba ve velké míře korigovat. Z výsledků této práce je ovšem patrné, že bylo zapotřebí značného odladování programů pro všechny dílce. Přesto ale došlo pouze k průměrným až špatným výsledkům co se týče dosažené přesnosti. V současné době existují určité přístupy, jak ve velké míře eliminovat tyto nepřesnosti. Tyto způsoby ovšem nebyly součástí této práce.


Závěrem nelze říci, že by obrábění pomocí robotů bylo nepřesné. Dosažené nepřesnosti jsou způsobeny mnoha uvedenými faktory. Pro úspěšnou implementaci obrábění pomocí průmyslových robotů do praxe, je ovšem nutné věnovat zvýšené úsilí přesnostem všech částí, a také mít nejlépe pro tento úkol průmyslový robot s vysokou přesností.



## SLOVNÍK

ANGLICKÝ NÁZEV	ČESKÝ VÝZNAM	KATEGORIE
Angle range	Obráběný úhel plochy	Nastavení procedury
Arc circle central point	Oblouk – kružnice se středem	2D kreslení
Axis configuration	Konfigurace osy	Nastavení procedury
Box	Kvádr	Ostatní
Configuration	Konfigurace	Nastavení
Contour 2D	Plošné frézování kontur	Obráběcí procedura
Create letters	Vytvořit text	Nástroj Mastercam
Curve	Prostorové křivky	Obráběcí procedura
Customize	Přizpůsobit	Nástroj Mastercam
Cut pattern (2D)	Parametry řezu	Nastavení procedury
Cut pattern (5D)	Obráběcí vzor	Nastavení procedury
Cylinder	Válec	Ostatní
Default with no Z rotation	Základní pohyb bez rotace kolem osy Z	Nastavení Robotmaster
Default with Z rotation	Základní pohyb s rotací kolem osy Z	Nastavení Robotmaster
Depth	Hodnota celkového úběru	Nastavení procedury
Draft surface	Návrh/vytvoření povrchu	2D kreslení
Facing	Čelní frézování	Obráběcí procedura
Finishing	Dokončování	Obráběcí procedura
Flow parameters	Nastavení začátku a směru úběru	Nastavení procedury
Line parallel	Rovnoběžná přímka	2D kreslení
Linking – Entry/Exit	Nastavení nájezdů, výjezdů a přejezdů	Nastavení procedury
Linking parameters	Parametry přejezdů	Nastavení procedury
Measure	Měřit	Nástroj Mastercam
Multi-axis curve	Víceosé křivkové obrábění	Obráběcí procedura
Multi-axis milling	Víceosé obrábění	Obráběcí procedura
Multi passes	Přejezdy	Nastavení procedury
Multi surface (MSurf)	Obrábění více povrchů	Obráběcí procedura
One way	Jedním směrem	Způsob obrábění
Optimalization	Optimalizace	Nástroj Robotmaster
Parallel cuts	Obrábění paralelních řezů	Obráběcí procedura
Part to tool	Dílec k nástroji	Způsob obrábění
Pocket facing	Čelní frézování kapes	Obráběcí procedura
Rectangular shapes	Obdélníkové tvary	2D kreslení
Roughing	Hrubování	Obráběcí procedura

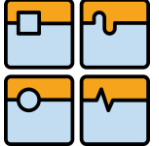
<b>Slot milling</b>	Frézování drážek	Obráběcí procedura
<b>Sphere</b>	Koule	Ostatní
<b>Spindle</b>	Vřeteno	Způsob obrábění
<b>Stepover/Stepdown</b>	Boční krok/Hodnota úběru	Nastavení procedury
<b>Stock to leave on drive</b>	Přídavek pro další operace na obráběných plochách	Nastavení procedury
<b>Surface finish – Parallel</b>	Paralelní dokončování povrchu	Obráběcí procedura
<b>Surface rough parallel</b>	Paralelní hrubování povrchu	Obráběcí procedura
<b>Swarf</b>	Obrábění bokem frézy	Obráběcí procedura
<b>Tip control</b>	Řízení špičky nástroje	Nastavení procedury
<b>Tool axis control</b>	Řízení osy nástroje	Nastavení procedury
<b>Top of stock</b>	Horní plocha polotovaru	Ostatní
<b>Verify</b>	Ověř	Nástroj Mastercam
<b>Wristflip</b>	Přetočení	Ostatní
<b>Zig-zag</b>	Cik-cak	Způsob obrábění

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 97
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

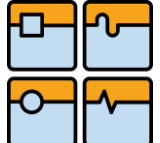
## SEZNAM ZDROJŮ

- [1] MATSUOKA, Shin-ichi, Kazunori SHIMIZU, Nobuyuki YAMAZAKI a Yoshinari OKI. *High-speed end milling of an articulated robot and its characteristics* [online]. Journal of Materials Processing Technology, 1999 [cit. 2013-05-09]. ISSN 0924-0136; 10.1016/S0924-0136(99)00315-5. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013699003155>
- [2] *Průručka Automatizační a robotická technika* [online]. Semtember 2011. Košice [cit. 2013-05-09]. VITRALAB. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/pgs/index.php?pg=page>
- [3] SADÍLEK, Marek. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *POČÍTAČOVÁ PODPORA VÝROBY: Studijní opora* [online]. první. Ostrava, 2011 [cit. 2013-05-09]. CZ.1.07/2.3.00/09.0147. Dostupné z: <http://www.346.vsb.cz/Po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dov%C3%A1%20podpora%20v%C3%BDroby.pdf>
- [4] PALOUŠEK, D. *Virtual Prototyping CAD/CAE*. Brno, 2007. Dostupné z DVD: Příprava lektorů, konzultantů a učitelů dalšího profesního vzdělávání v oboru digitálního designu.
- [5] PROTOOL. *Návod k použití: SGP 30-8, SGP 30-8 E*. Protool GmbH, 55 s. 625037D
- [6] JABEZ TECHNOLOGIES INC. *Robotmaster Tutorial Series*. March 1, 2011. ISBN 978-1-926955-17-9.
- [7] NETOPIL, Jiří. MasterCAM nově na českém trhu. *MM Průmyslové spektrum: v rubrice Trendy / CAD/CAM/CAE*. 06.02.2008, str.64. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mastercam-nove-na-ceskem-trhu.html>
- [8] NETOPIL, Jiří. Revoluce v programování robotů. *MM Průmyslové spektrum: v rubrice Trendy / CAD/CAM/CAE* [online]. 24.06.2009, str.36 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/revoluce-v-programovani-robotu.html>
- [9] NETOPIL, Jiří. Off-line programování robotů, které funguje. *MM Průmyslové spektrum: v rubrice Trendy / CAD/CAM/CAE* [online]. 13.03.2012, str.82 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/off-line-programovani-robotu-ktere-funguje.html>

- [10] Obrábění pomocí robotů. *Víceosé frézování: Frézování - 5 os* [online]. 2010 [cit. 2013-05-09].  
Dostupné z: <http://www.frezovani-5os.cz/clanky/obrabeni-pomoci-robotu.html>
- [11] KR 150-2 – KR 150 L130-2 – KR 150 L110-2 (Serie 2000). *Technical data*. Germany: KUKA Roboter GmbH. Dostupné z:  
[http://www.roboticturnkeysolutions.com/robots/kuka/datasheet/kr\\_150.pdf](http://www.roboticturnkeysolutions.com/robots/kuka/datasheet/kr_150.pdf)
- [12] KR 150-2 K, KR 180-2 K, KR 210-2 K: Specification. KUKA ROBOTER GMBH. [online]. 09/2004 [cit. 2013-05-18].  
Dostupné z: [http://www.kuka-robotics.com/res/sps/e6c77545-9030-49b1-93f5-4d17c92173aa\\_Spez\\_KR\\_150\\_2\\_K\\_en.pdf](http://www.kuka-robotics.com/res/sps/e6c77545-9030-49b1-93f5-4d17c92173aa_Spez_KR_150_2_K_en.pdf)
- [13] Catalog of Ideas: 2010. KUKA ROBOTER GMBH. [online]. 2010 [cit. 2013-05-18].  
Dostupné z: [http://www.kuka-robotics.com/res/sps/a737ee03-5832-4c95-9d91-84e0de80c664\\_Ideenkatalog\\_en.pdf](http://www.kuka-robotics.com/res/sps/a737ee03-5832-4c95-9d91-84e0de80c664_Ideenkatalog_en.pdf)
- [14] Bruska přímá, PROTOOL, SGP 30-8 : Specifikace výrobku. M&V. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://katalog.mav.cz/detail.php?id=57869>
- [15] Styrisol: Description. ABRISO. *Packaging material* [online]. 2010 [cit. 2013-05-09].  
Dostupné z:  
<http://www.abriso.com/files/cms1/technische%20fiche%20lambda%2035.pdf>
- [16] Pneumatic 2-Finger Parallel Gripper. SHUNK. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: [http://www.schunk.com/schunk\\_files/attachments/PSH\\_metrisch\\_gesamt\\_EN.pdf](http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/PSH_metrisch_gesamt_EN.pdf)
- [17] Seco tools: VHM. SECO. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z:  
[http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Milling/Solid\\_carbide\\_end\\_mills/vhm\\_106\\_161.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Milling/Solid_carbide_end_mills/vhm_106_161.pdf)
- [18] Extrudovaný polystyren: Vlastnosti a použití. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z:  
<http://www.extrudovanypolystyren.info/>
- [19] Polystyreny EU: Pěnový polystyren, Extrudovaný polystyren. I STAVBY S.R.O. - INTERNETOVÉ STAVEBNINY. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z:  
<http://www.polystyreny.eu/>
- [20] Základní vzorce pro frézování. TAEGUTEC. *Innotool* [online]. [cit. 2013-05-09].  
Dostupné z: [http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka\\_obrabeni\\_2114.pdf](http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_2114.pdf)
- [21] Teach pendant. PC MAG. *PC Magazine Encyklopedia* [online]. [cit. 2013-05-09].  
Dostupné z: <http://www.pcmag.com/encyclopedia/term/61185/teach-pendant>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 99
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

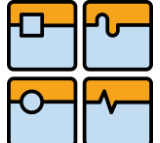
- [22] SMERobot: Automatica. GPS GMBH. *SMERobot™ Exhibit Descriptions* [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: [http://www.smerobot.org/14\\_automatica/](http://www.smerobot.org/14_automatica/)
- [23] Mastercam: Products. CNC SOFTWARE, Inc. *Mastercam Family of Products* [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.mastercam.com/products/default.aspx>
- [24] Mastercam: CIMdata 2012. CNC SOFTWARE, Inc. *Mastercam Ranks #1 in Installed Seats Worldwide* [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: [http://www.mastercam.com/CamZone/NewsZone/PressKits/Oct\\_Cimdata/default.htm](http://www.mastercam.com/CamZone/NewsZone/PressKits/Oct_Cimdata/default.htm)
- [25] Sonetech. © SONETECH. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.sonetech.cz/>
- [26] Autodesk Inventor: Features for Inventor and Inventor Professional. AUTODESK INC. [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.autodesk.com/products/autodesk-inventor-family/features>
- [27] 3ds industrial robot: Industrial robot by Guido Vrola. TURBOSQUID. [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.turbosquid.com/3d-models/3ds-industrial-robot/633096>
- [28] DIE Roboter: Kuka. DIE ROBOTER GMBH & CO. KG. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.die-roboter.de/kuka/>
- [29] Types of Personal Computers: Industry forum. TRADEFORD.COM. [online]. 2009-2012 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://forum.tradeford.com/topic-315/types-of-personal-computers.html>
- [30] Kuka Industrial Robots: KR 1000 1300 TITAN PA. KUKA ROBOTER GMBH. [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: [http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial\\_robots/special/palletizer\\_robots/kr1000\\_1300\\_titan\\_pa/](http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/special/palletizer_robots/kr1000_1300_titan_pa/)
- [31] Mastercam: Xtras: Showing off Some Blade Expertise at Westec 2012. CNC SOFTWARE, Inc. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://blog.mastercam.com/2012/03/showing-off-some-blade-expertise-at.html>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 100
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [32] Programming A Robot The Way You Program A CNC Machine Tool. GARDNER BUSINESS MEDIA, Inc. [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/programming-a-robot-the-way-you-program-a-cnc-machine-tool>
- [33] You might be suprised what Autodesk Inventor LT 2012 can do. *Manufacturing Toolbox* [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://manufacturingtoolbox.typepad.com/my-blog/2011/06/you-might-be-suprised-what-autodesk-inventor-lt-2012-can-do.html>
- [34] Eps og xps isolasjon. FLICKR. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.flickr.com/photos/klifbilder/6806759707/in/set-72157627200068410/>
- [35] CNC informace: 1D - 5D. B3 KOVO. *O CNC technologii* [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://b3kovo.cz/cnc-informace-1d5d/>
- [36] SICILIANO, B.KHATIB, O. Springer Handbook of Robotics. Springer-Verlag New York, Inc., 2008. 1611 s. ISBN 978-3-540-23957-4

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Použitá zkratka	Význam	Překlad
CAD	Computer aided drawing	Počítačem podporovaný návrh
CAM	Computer aided manufacturing	Počítačem podporovaná výroba
XPS	Extruded polystyrene	Extrudovaný polystyren
OC	Obráběcí centrum	-
CNC	Computer numerical control	Číslicové řízení pomocí počítače

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 102
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## PŘÍLOHY

### Seznam příloh:

**Příloha I:** Výkres koncového efektoru

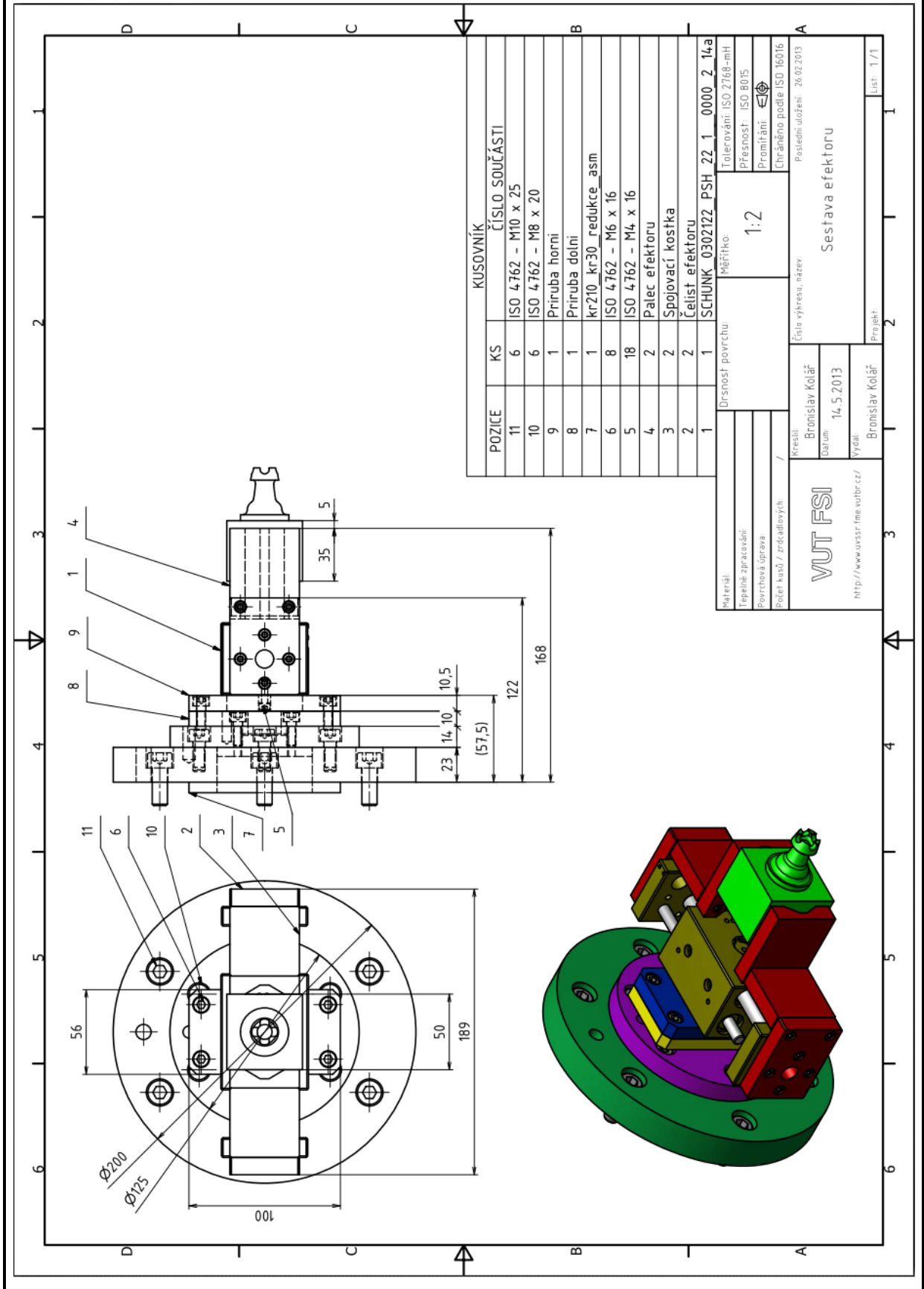
**Příloha II:** Výkres pracoviště

**Příloha III:** Řídící soubor ROBX pro Kuka KR 210-2 K Part to tool

**Příloha IV:** Řídící soubor XML pro Kuka KR 210-2 K Part to tool

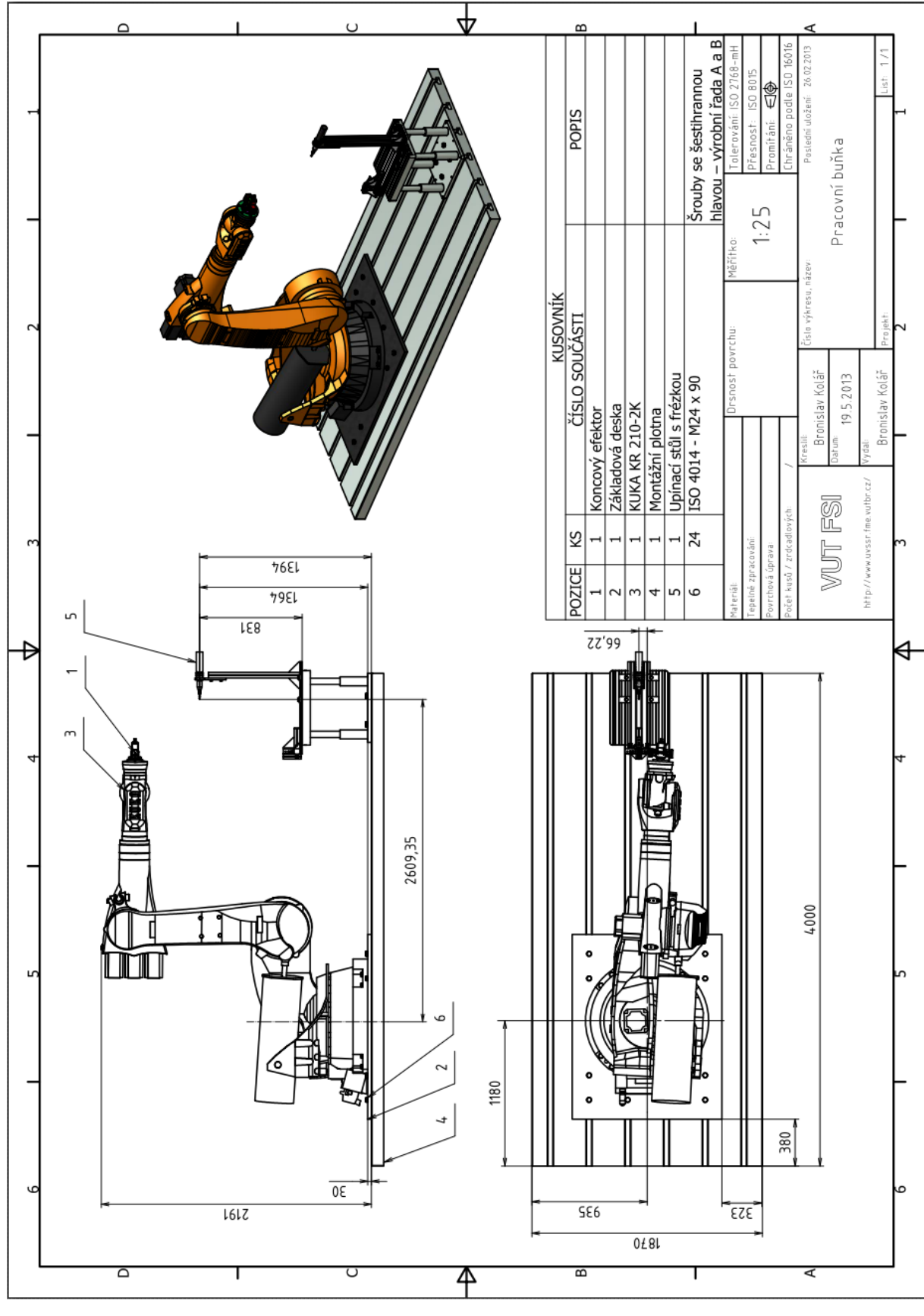



**Příloha I: Výkres koncového efektoru**





**Příloha II: Výkres pracoviště**



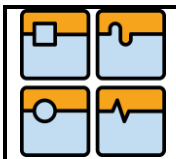
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 105
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### Příloha III: Řídicí soubor ROBX pro Kuka KR 210-2 K Part to tool

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8" standalone="yes"?>
<robotCell version="9924">
  <robotDefinition label="ROB1" id="rob1" child="part" name="KR210-2"
manufacturer="kuka" groupNumber="1">
    <calculationSettings>
      <significantDigits simulator="6" posting="7" />
      <orientationFormat input="EulerRzRyRx" output="EulerRzRyRx" />
      <toolAVector rotateAround="" />
      <baseSingularity allow="false" detectionZone="0.5" />
      <elbowSingularity allow="false" detectionZone="6.0" />
      <wristSingularity allow="false" detectionZone="0.8" />
      <wristFlip allow="false" detectionZone="5.0" />
      <multiTurnJointOverTravel checkFromLimits="90.0" maxDelta="100.0" />
    </calculationSettings>
    <simulationSettings>
      <toolDisplay visible="true" />
      <spindleCalculation useToolLength="true" useHolderLength="true" />
      <feedMotionInterpolation linearStepSize="2.0" circularStepSize="1.5"
maximumPointsForInterpolation="14000" />
      <jointMotionInterpolation cartesianMaxIncrement="6.0" />
    </simulationSettings>
    <outputSettings>
      <fanucConfigurations turns1="true" turns2="true" turns3="true" tbSwitch="true"
lrSwitch="false" udSwitch="true" nfSwitch="true" />
    </outputSettings>
    <customSettings>
      <customValue id="1" enable="false" label="" value="0.0" />
      <customValue id="2" enable="false" label="" value="0.0" />
      <customValue id="3" enable="false" label="" value="0.0" />
      <customValue id="4" enable="false" label="" value="0.0" />
      <customValue id="5" enable="false" label="" value="0.0" />
    </customSettings>
    <kinematicParameters>
      <generalSettings>
        <robotArchitecture type="DECOUPLED_6R" parallelLink="false" />
        <joint3AngleMode fromHorizontal="False" />
        <elbowConfiguration flip="false" />
        <jointMotion type="by_joint_speed" />
        <userFrame dynamic="false" />
        <programmingCoordinates fromFrameToTool="false" />
      </generalSettings>

```

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 106
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

```

<dhParameters>
  <joints joint1="0.0" joint2="0.0" joint3="-90.0" joint4="0.0" joint5="0.0"
joint6="180.0" />
  <offsets offset1="-700.0" offset2="0.0" offset3="0.0" offset4="-1100.0"
offset5="0.0" offset6="-230.0" />
  <lengths length1="750.0" length2="1250" length3="-55.0" length4="0.0"
length5="0.0" length6="0.0" />
  <twists twist1="90.0" twist2="0.0" twist3="90.0" twist4="-90.0" twist5="90.0"
twist6="180.0" />
</dhParameters>
<joints>
  <joint label="J1" id="j1" child="j2">
    <limits minValue="-185.000" maxValue="185.000" maxVelocity="88.000" />
    <simulationParameters interpolationStepSize="2.0" />
  </joint>
  <joint label="J2" id="j2" child="j3">
    <limits minValue="-120.00" maxValue="70.000" maxVelocity="74.000" />
    <simulationParameters interpolationStepSize="2.0" />
  </joint>
  <joint label="J3" id="j3" child="j4">
    <limits minValue="-119.000" maxValue="155.000" maxVelocity="81.000" />
    <simulationParameters interpolationStepSize="2.0" />
  </joint>
  <joint label="J4" id="j4" child="j5">
    <limits minValue="-350.000" maxValue="350.000" maxVelocity="121.000" />
    <simulationParameters interpolationStepSize="3.0" />
  </joint>
  <joint label="J5" id="j5" child="j6">
    <limits minValue="-125.000" maxValue="125.000" maxVelocity="120.000" />
    <simulationParameters interpolationStepSize="3.0" />
  </joint>
  <joint label="J6" id="j6" child="">
    <limits minValue="-350.000" maxValue="350.000" maxVelocity="184.000" />
    <simulationParameters interpolationStepSize="3.0" />
  </joint>
</joints>
  <interferences>
    <interference type="elbow" minValue="5.0" maxValue="355.0" />
  </interferences>
<baseFrame>
  <position px="0.000" py="0.000" pz="0.000" />
  <orientation nx="1.000" ny="0.000" nz="0.000" ox="0.000" oy="-1.000"
oz="0.000" ax="0.000" ay="0.000" az="-1.000" />
</baseFrame>

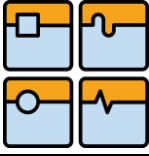
```

```
<endEffectorFrame>
  <toolMounting rotationRz="180.000" />
</endEffectorFrame>
</kinematicParameters>
<tempVariables>
  <customValue id="t1" enable="false" label="" value="0.0" />
  <customValue id="t2" enable="false" label="" value="0.0" />
  <customValue id="t3" enable="false" label="" value="0.0" />
  <customValue id="t4" enable="false" label="" value="0.0" />
  <customValue id="t5" enable="false" label="" value="0.0" />
</tempVariables>
</robotDefinition>
<externalAxis>
  <rails />
  <rotaries />
</externalAxis>
<robotImage />
</robotCell>
```

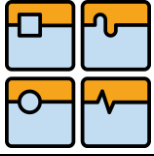


### Příloha IV: Řídící soubor XML pro Kuka KR 210-2 K Part to tool

```
<?xml version="1.0" encoding="iso-8859-1" ?>
<machine_definition>
  <machine_data name="KR210-2" version="1.1" units="metric" />
  <transform id="world_trans"
initialvalue="1.000,0.000,0.000,0.000,1.000,0.000,0.000,0.000,1.000,0.000,0.000,0.000,1.000">
  <geometry alpha="0.0" clrb="0.6" clrg="0.6" clrr="0.6" geo="Sestava_stolu.stl" name="Stul" objtype="geometry"/>
  <geometry alpha="0.0" clrb="0.2" clrg="0.2" clrr="0.2" geo="montazniplotna.stl" name="Plotna" objtype="geometry"/>
  <geometry alpha="0.0" clrb="0.5" clrg="0.5" clrr="0.5" geo="zakladovadeska.stl" name="Deska" objtype="geometry"/>
  <geometry name="xx_ax_base" geo="xx_ax.stl" clrb="1.000" clrg="0.000" clrr="0.000" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <geometry name="yy_ax_base" geo="yy_ax.stl" clrb="1.000" clrg="1.000" clrr="0.000" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <geometry name="zz_ax_base" geo="zz_ax.stl" clrb="1.000" clrg="0.000" clrr="1.000" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <geometry name="Base" geo="base.stl" clrb="0.200" clrg="0.200" clrr="0.200" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <axis id="J1" type="rotation" x="0.000" y="0.000" z="-1.000" minvalue="-185.000" maxvalue="185.000" valuetype="cont" rzx="0.000"
rzy="0.000" rzz="0.000">
  <axis id="J2" type="rotation" x="0.000" y="1.000" z="0.000" minvalue="-120.000" maxvalue="70.000" valuetype="cont" rzx="750.000"
rzy="0.000" rzz="700.000">
  <axis id="J3" type="rotation" x="0.000" y="1.000" z="0.000" minvalue="-119.000" maxvalue="155.000" valuetype="cont"
rZX="2000.000" rzy="0.000" rzz="700.000">
  <axis id="J4" type="rotation" x="-1.000" y="0.000" z="0.000" minvalue="-350.000" maxvalue="350.000" valuetype="cont"
rZX="2000.000" rzy="0.000" rzz="645.000000">
  <axis id="J5" type="rotation" x="0.000" y="1.000" z="0.000" minvalue="-125.000" maxvalue="125.000" valuetype="cont"
rZX="3100.000" rzy="0.000" rzz="645.000">
  <axis id="J6" type="rotation" x="-1.000000000" y="0.000" z="0.000" minvalue="-350.000" maxvalue="350.0000000">
```



```
<transform id="workpiece_transform"
initialvalue="1.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,1.000">
  <geometry name="Part" geo="part_scaled.stl" clrr="0.0" clrg="1.0" clrb="0.0"
alpha="0.0" reflectivity="0.0" reflectivityBitmapFileName="" objtype="workpiece" />
  <geometry name="xx_ax_workpiece" geo="xx_ax.stl" clrr="1.000" clrg="0.000" clrb="0.000"
alpha="0.0" reflectivity="0.0" reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <geometry name="yy_ax_workpiece" geo="yy_ax.stl" clrr="0.000" clrg="1.000" clrb="0.000"
alpha="0.0" reflectivity="0.0" reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <geometry name="zz_ax_workpiece" geo="zz_ax.stl" clrr="0.000" clrg="0.000" clrb="1.000"
alpha="0.0" reflectivity="0.0" reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
</transform>
</axis>
  <geometry name="Joint5" geo="joint5.stl" clrr="1.0" clrg="0.757" clrb="0.0" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
</axis>
  <geometry name="Joint4" geo="joint4.stl" clrr="1.0" clrg="0.757" clrb="0.0" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <geometry name="Joint4Link" geo="joint4link.stl" clrr="0.200" clrg="0.200" clrb="0.200" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
</axis>
  <geometry name="Joint3" geo="joint3.stl" clrr="1.0" clrg="0.757" clrb="0.0" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <geometry name="Joint3Link" geo="joint3link.stl" clrr="0.200" clrg="0.200" clrb="0.200" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
</axis>
  <geometry name="Joint2" geo="joint2.stl" clrr="1.0" clrg="0.757" clrb="0.0" alpha="0.0" reflectivity="0.0" reflectivityBitmapFileName=""
objtype="geometry" />
</axis>
  <geometry name="Joint1" geo="joint1.stl" clrr="1.0" clrg="0.757" clrb="0.0" alpha="0.0" reflectivity="0.0" reflectivityBitmapFileName=""
```



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

```
<transform id="holder_transform"
initialvalue="1.000,0.000,0.000,0.000,1.000,0.000,0.000,0.000,1.000,0.000,0.000,0.000,0.000,1.000">
  <geometry name="tool" geo="tool.stl" clrr="0.400" clrg="0.400" clrb="0.40" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="tool" holder="0.600" holderg="0.600" holderb="0.600" />
  <geometry name="x_ax_tool" geo="x_ax.stl" clrr="1.000" clrg="0.000" clrb="0.000" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <geometry name="y_ax_tool" geo="y_ax.stl" clrr="0.000" clrg="1.000" clrb="0.000" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
  <geometry name="z_ax_tool" geo="z_ax.stl" clrr="0.000" clrg="0.000" clrb="1.000" alpha="0.0" reflectivity="0.0"
reflectivityBitmapFileName="" objtype="geometry" />
</transform>
</transform>
<collcheck id="cc1" group1="Joint2,Joint3,Joint4,Joint5,Part" dynamic1="true" dynamic2="false" active="true" group2="Stul,tool"/>
</machine_definition>
```