

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

**Postprocesor, simulační model a PLC konfigurace robotického pracoviště
pro velkoformátový 3D tisk**

Bc. Jan Zbiral

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zbiral** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **487149**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Robotika a výrobní technika**
Specializace: **Výrobní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Postprocessor, simulační model a PLC konfigurace robotického pracoviště pro velkoformátový 3D tisk

Název diplomové práce anglicky:

Postprocessor, simulation model and PLC configuration of a robotic station for large format 3D printing

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Funkce pro řízení robotu jsou odvislé od použité pracovní hlavice (např. pro subtraktivní či aditivní technol.). Cílem tématu je postprocessor, simulační model a potřebné úpravy v PLC řízení pro pracoviště s robotem KUKA, ř.s. Sinumerik 840D a extruderem pro přípravu a verifikaci NC programů pro aditivní výrobu. Osnova práce: Představení aditivních a subtraktivních technologií využívajících roboty, včetně velkoformátového 3D tisku. Popis řízení robotu KUKA pomocí ř.s. Sinumerik. Popis funkcí v NX CAM pro aditivní technologie. Analýza PLC řízení robotu KUKA a extruderu. Návrh a realizace úprav PLC řízení, postprocesu a simulačního modelu s emulátorem ř.s. pro řízení robotu KUKA pro aditivní technologii. Návrh optimalizace parametrů řízení robotu a extruderu pro dosažení kvalitní vrstvy dílce. Příprava drah pro dílec vyráběný aditivní technologií. Ověření postprocesoru a simulačního modelu odbavením NC programů při řízení robotu v laboratorních podmínkách. Zhodnocení výsledků. Rozsah textové části: 70 - 90 stran; Rozsah grafické části: Vybrané vývojové diagramy, uživatelský manuál k postprocesoru a simulačnímu modelu, diagram propojení pracoviště.

Seznam doporučené literatury:

[1] SINUMERIK Run MyRobot /Machining. In: SiePortal. 2023. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com>; [2] RYBÍN, J. Automatické řídicí systémy. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1991. [3] AKBARI, S.; JOHANSSON, J.; JOHANSSON, E.; TÖNNÄNG, L. a HOSSEINI, S. Large-Scale Robot-Based Polymer and Composite Additive Manufacturing: Failure Modes and Thermal Simulation. Online. Polymers. 2022, roč. 14, č. 9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Tomáš Kratěna ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **11.10.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **02.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **15.09.2024**

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

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem obsah diplomové práce vytvořený umělou inteligencí zahrnul do použitých informačních zdrojů a citoval ho podle běžných pravidel. Dále prohlašuji, že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne 2. 1. 2024

.....

podpis

Poděkování

Nejprve bych rád velmi poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. Petru Varuškoví, Ph. D., za rady, konzultace a také veliké množství času, které byl ochoten věnovat. Dále patří díky všem pracovníkům RCMT, zejména pak Ing. Tomáši Kratěnovi, Ing. Tomáši Havlanovi a Ing. Michalu Rytířovi za rady pro řešení práce a za spolupráci na robotickém pracovišti.

V neposlední řadě patří obrovské poděkování mé rodině, zejména potom rodičům, díky kterým jsem měl možnost vůbec studovat. Dále také mé přítelkyni za pomoc a podporu při tvorbě této práce. Děkuji také všem mým kamarádům a blízkým.



Anotace

Autor:	Bc. Jan Zbírál
Název DP:	Postprocessor, simulační model a PLC konfigurace robotického pracoviště pro velkoformátový 3D tisk
Rozsah práce:	99 stran, 92 obrázků, 2 tabulky, 5 příloh
Školní rok zhotovení:	2023 / 2024
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135, Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Konzultant DP:	Ing. Tomáš Kratěna
Zadavatel:	ČVUT FS, Ú12135
Klíčová slova:	Postprocessor, Post Configurator, Aditivní technologie, 3D Tisk, Velkoformátový 3D Tisk, PLC, Programování PLC, Simulační model, Emulátor řídicího systému, CSE driver, NC program, Siemens NX, Robot
Abstrakt:	Diplomová práce se zabývá pracovištěm pro velkoformátový polymerní 3D tisk. Pracoviště se skládá z robotu KUKA KR60 HA a extruderu CEAD E25. Robot je řízen ŘS Sinumerik 840D sl užitím opce Run My Robot Machining. V rámci vlastního řešení byly provedeny úpravy PLC projektu pro integraci nové technologie do stávajícího pracoviště. Pro CAM software Siemens NX byl poté vytvořen postprocessor s určitými funkcemi pro aditivní výrobu na daném pracovišti. Postprocessor byl následně rozšířen o nadstavbovou funkci řešící korekci rychlosti posuvu extruderu na zakřivených úsecích. Dále byl vytvořen simulační model s emulátorem ŘS, opět v Simenes NX. Nakonec byly provedeny testovací tisky.



Annotation

Author:	Bc. Jan Zbírál
Title of thesis:	Postprocessor, simulation model and PLC configuration of a robotic station for large format 3D printing
Extent:	99 pages, 92 figures, 2 tables, 5 appendices
Academic year:	2023 / 2024
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135, Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Petr Vavruška, Ph.D.
Consultant:	Ing. Tomáš Kratěna
Submitter of the Theme:	CTU FME, Ú12135
Key words:	Postprocessor, Post Configurator, Additive Technology, 3D Printing, Large Format 3D Printing, PLC, PLC Programming, Simulation Model, Control System Emulator, CSE driver, NC program, Siemens NX, Robot
Abstract:	<p>The thesis deals with a workplace for large-format polymer 3D printing. The workplace consists of a KUKA KR60 HA robot and a CEAD E25 extruder. The robot is controlled by a Sinumerik 840D sl control system using the Run My Robot Machining option. As part of the custom solution, modifications were made to the PLC project to integrate the new technology into the existing workplace. A postprocessor with certain technology specific functions was then created for the Siemens NX CAM software for the workplace. The postprocessor was then extended with an add-on function for the correction of the extruder feed rate on curved sections. In addition, a simulation model with the controller emulator was created again in Simenes NX. Finally, test prints were made.</p>



Obsah

Seznam zkratk	9
1 Úvod a cíle práce.....	10
2 Představení robotického pracoviště.....	11
2.1 Řízení robotů pomocí Sinumeriku 840D sl.....	11
2.2 Skladba řídicího systému	13
2.3 PLC.....	14
2.4 Programování PLC.....	15
3 Aplikace robotů ve výrobě	16
3.1 Průmyslový robot	16
3.2 Roboty v aditivní výrobě.....	20
4 Aditivní technologie	22
4.1 Aditivní výroba pro kovové materiály	23
4.2 Aditivní technologie pro polymerní materiály.....	24
5 Velkoformátový 3D tisk.....	27
5.1 Materiály	29
5.2 Strojní řešení.....	30
5.3 Robot s extruderem.....	31
6 Siemens NX CAM – možnosti z pohledu robotů a aditivních technologií ..	35
6.1 Programování robotů	35
6.2 Aditivní technologie v NX CAM	37
6.3 Postprocesor.....	40
6.4 Simulační model s emulátorem řídicího systému v Siemens NX CAM	43
7 Shrnutí rešerše	45
8 Vlastní řešení.....	46
9 Editace PLC projektu	47



9.1	Podklady od dodavatele technologie	48
9.2	Hardwarová konfigurace	49
9.3	Softwarové úpravy	52
10	Tvorba postprocesoru	59
10.1	Úpravy v rozhraní Post Configurator.....	60
10.2	Uživatelské ovládání	64
10.3	Úpravy v jazyku TCL.....	65
10.4	Optimalizační vrstva	70
11	Simulační model.....	77
11.1	Kinematický model.....	77
11.2	Úprava emulátoru řídicího systému	81
11.3	Verifikace rychlosti TCP v simulaci	84
12	Testovací dílec	86
13	Závěr	88
	Seznamy	90



Seznam zkratek

Zkratka	Význam
AM	Additive Manufacturing
CAM	Computer Aided Manufacturing
CIIRC	Czech Institute of Informatics Robotics and Cybernetics
CL	Cutter Location
CNC	Computer Numerical Control
COM	Communication
CPU	Central Processing Unit
CSE	Common Simulation Engine
DED	Direct Energy Deposition
FDM	Fused Deposition Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication
GSD	General Station Description
GSDML	General Station Description Markup Language
HMI	Human Machine Interface
HPU	Handheld Programming Unit
IL	Instruction List
IO	Input Output
MCF	Machine Configuration File
MCP	Machine Control Panel
MOM	Manufacturing Output Manager
MTB	Machine Tool Builder
NC	Numerical Control
NCU	Numerical Control Unit
PBF	Powder Bed Fusion
PLC	Programmable Logic Controller
PLM	Product Lifetime Management
PN	Profinet
RMR	Run My Robot
ŘS	Řídicí systém
SCARA	Selective Compliant Articulated Robot Arm
TCL	Tool Command Language
TCP	Tool Centre Point
UDE	User Defined Event
UV	Ultraviolet
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing

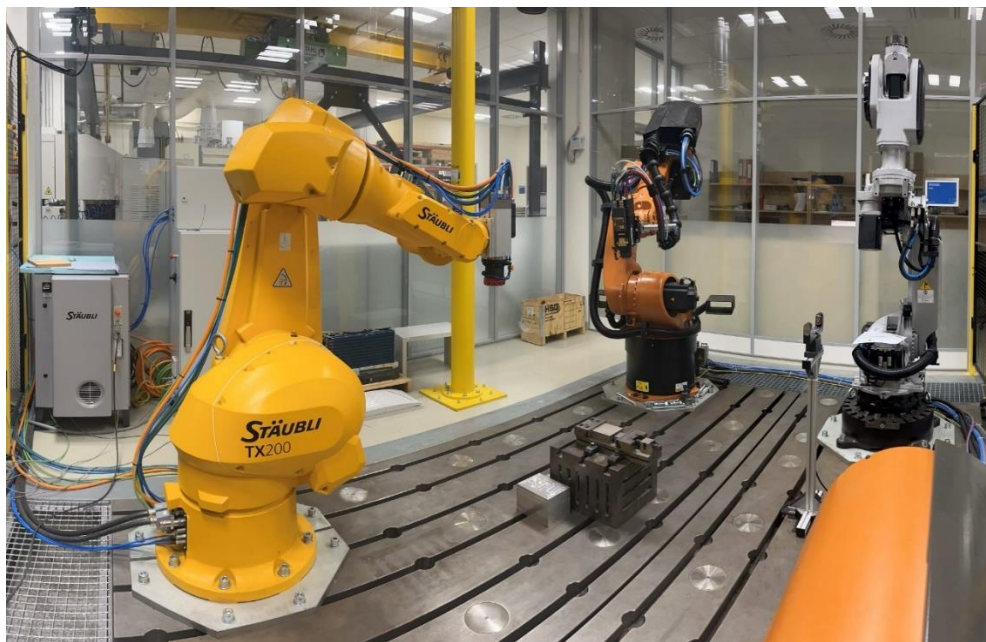
1 Úvod a cíle práce

Výroba určitých dílců využitím klasických subtraktivních technologií je velmi neekonomická. Pro tyto aplikace se obzvláště v posledních letech využívají technologie aditivní. Jednou z kategorií aditivních technologií je velkoformátový polymerní 3D tisk. Tato technologie nachází své uplatnění napříč průmyslem a dnes je především využíván pro výrobu forem pro následné laminování kompozitních dílců nebo jako způsob výroby tvarových upínacích prvků. Z názvu již vyplývá, že výrobky vznikající touto technologií bývají větších rozměrů. Pohybují se standardně v řádech desítek centimetrů až desítek metrů. Souběžně s tím se zvětšily i ostatní parametry, jako jsou například průměry trysek v extruderech – technologických hlavicích. To ve spojení s častým osazením této technologie na průmyslového robota představuje řadu výzev, které je potřeba vyřešit, aby bylo možné technologii naplno využít. Pro takovouto technologii není již možné použít jednoduchý software, který se používá například v prostředí hobby tiskáren. Existují specializované softwary pro aditivní technologie. Ty však často trpí svou uzavřeností, navíc se jedná o další software, který je potřeba koupit a udržovat. Alternativně lze využít již zaběhnutý CAM (Computer Aided Manufacturing) systém, který již často obsahuje určitou podporu aditivních technologií a pomocí úprav v řetězci toku dat ho lze použít pro programování této technologie. [1] [2] [3]

Cílem této diplomové práce je primárně zprovoznit vznikající pracoviště pro velkoformátový 3D tisk z pohledu softwaru a položit tím základní kameny pro další vývoj tohoto pracoviště. Řešení se skládá ze tří hlavních bodů. Prvním bodem je úprava PLC (Programmable Logic Controller) projektu pracoviště tak, aby bylo možné řídit technologii pomocí řídicího systému robota. Druhou částí je tvorba postprocesoru pro toto pracoviště a pro CAM systém Siemens NX. Pro dosažení kvalitního nanášení materiálu během tisku je potřeba správné řízení technologických parametrů v jednotlivých vrstvách. Toho by mělo být docíleno určitými speciálními funkcemi pro aditivní výrobu. Třetí bod tvoří simulační model, jenž doplňuje postprocesor ve zmíněném CAM systému. Tyto tři kroky dohromady umožňují programovat zmíněné pracoviště v CAM systému Siemens NX a využívat technologické možnosti v co největší míře.

2 Představení robotického pracoviště

Robotické pracoviště, jímž se tato práce zabývá, se nachází v testbedu CIIRC (Czech Institute of Informatics Robotics and Cybernetics). Pracoviště obsahuje celkem tři roboty od různých výrobců – KUKA, COMAU a STÄUBLI. Tato práce se zabývá pouze jedním z robotů, a to KUKA KR60 HA. Robot KUKA je řízen systémem Sinumerik 840D sl pomocí opce Run My Robot – Machining. Řízením robotů pomocí řídicího systému Sinumerik se podrobněji zabývá příští podkapitola. Ostatními roboty se tato práce nezabývá, ale pro úplnost se v buňce nachází STAUBLI TX200, který je řízen nativním řídicím systémem. Robot je osazen frézovacím vřetenem. Posledním z robotů je COMAU NJ130, který je řízen svým nativním řídicím systémem a je připraven na osazení frézovacího vřetena. Uspořádání robotů v testovacím pracovišti je na Obr. 1.

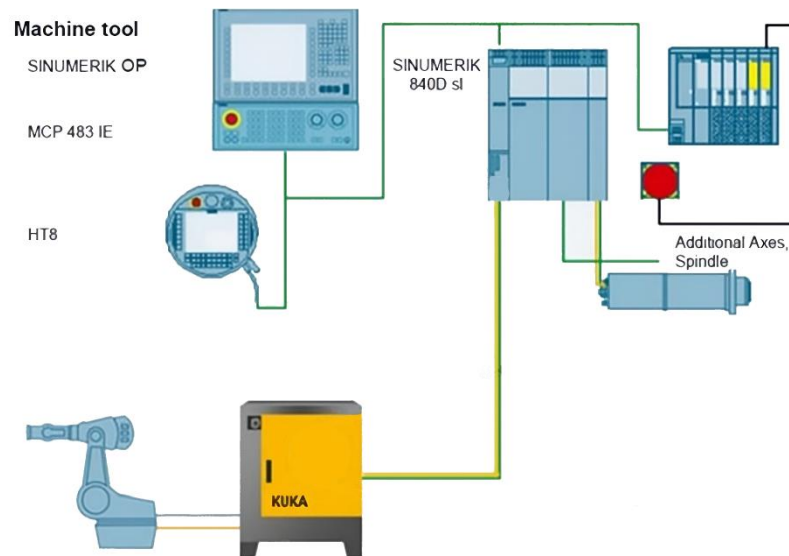


Obr. 1: Robotické pracoviště v CIIRC

2.1 Řízení robotů pomocí Sinumeriku 840D sl

Jelikož je robot mechatronická struktura, potřebuje pro své fungování řídicí systém. Každý výrobce robotů nabízí a dodává svůj řídicí systém ke svým robotům. Pro většinu operací není problém využívat nativní řídicí systém, ale v určitých aplikacích je výhodnější sáhnout po systému třetí strany. Často je toho využíváno v případě robotického obrábění nebo aditivních technologií, kdy je robot řízen systémem Sinumerik. Sinumerik je ŘS (řídicí systém) od výrobce

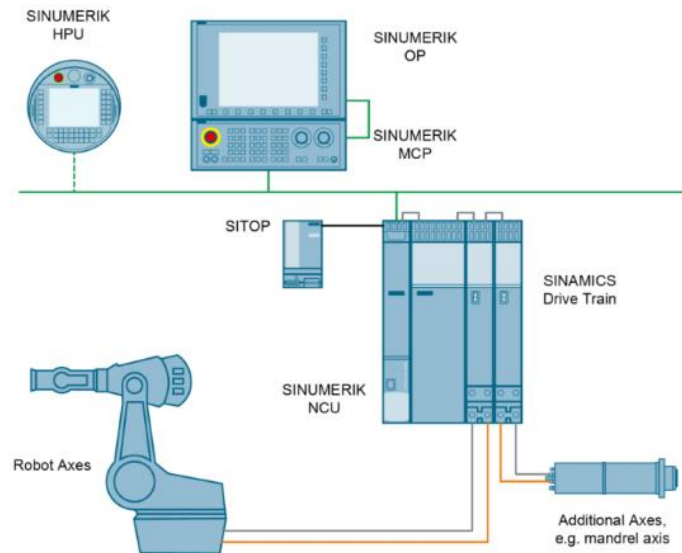
SIEMENS. Je to jeden z nejrozšířenějších řídicích systémů a primární využití nachází v obráběcích strojích. Díky tomu je možné robota programovat ve stejném známém jazyce a prostředí, jako obráběcí stroj s tímto systémem. Výhodou je také možnost využívání pokročilých funkcí pro modifikaci dráhového řízení, což často v nativním ŘS není možné. Implementace robota, který je určen pro obrábění nebo jinou aplikaci vyžadující přesné dráhové řízení, je možná pouze do verzí Sinumerik 840D sl a SINUMERIK ONE. [4] [5]



Obr. 2: Schéma propojení Run MyRobot/Machining [4]

Dříve společnost Siemens nabízela dvě možnosti, jak integrovat robota s požadavkem na dráhové řízení do Sinumerik 840D sl. První možností je využít opci RMR (Run My Robot) /Machining. Zmíněný přístup zachovává nativní řídicí systém robota jako mezikrok mezi Sinumerik a pohony robota. Sinumerik poté posílá nativnímu řídicímu systému požadavky na rychlost jednotlivých kloubů. Tato metoda byla často používána s roboty KUKA nebo STAÜBLI, jelikož není možné číst data z enkodérů jejich robotů a řídit je přímo ze Sinumerik. Schéma propojení s použitím této opce je na Obr. 2. Tento přístup ale již není nabízen a pro nové instance SINUMERIK 840D sl a SINUMERIK ONE je nabízena pouze druhá varianta, tedy opce RMR/Direct Control. Opce Run MyRobot/Direct Control vyřazuje z procesu kompletně nativní řídicí systém robota. To přináší výhody jako například jednodušší architekturu, ale i nevýhody. Hlavní nevýhodou je, že přístup není možné bez výměny osazených motorů použít s roboty, jejichž výrobci používají kódování signálů z enkodérů. Siemens spolupracuje

a demonstruje tuto opci s výrobcí COMAU, MABI a dalšími. Jelikož je zde využít pouze robot bez nativního řídicího systému, je nutné krom jednotky Sinumerik NCU (Numerical Control Unit) instalovat také měniče pro motory jednotlivých kloubů. Schéma tohoto propojení je na Obr. 3. [4] [5]



Obr. 3: Schéma Run MyRobot/Direct Control [5]

2.2 Skladba řídicího systému

Standardní řídicí systém se skládá ze tří hlavních částí. COM (Communication) část se stará o komunikaci s okolím stroje. Zejména umožňuje propojení stroje s ostatními stroji a dalšími automatizačními prvky. Samotná NC (Numerical Control) část se stará o čtení NC programu, zpracování dráhových dat a plánování dráhy. Toto probíhá v interpolátoru uvnitř NC části. Uživatelské úpravy chování NC části jsou značně omezené na úpravy strojních parametrů a použití funkcí připravených výrobcem ŘS. Poslední částí je PLC. Tato část se stará o úkony, které nejsou spojeny s přípravou řízení polohy a rychlostí jednotlivých kloubů pro dosažení požadované polohy. Standardně jsou to přídavné pohybové osy, které nejsou interpolovány, ovládání periferií, technologií atp. Tato část řeší příkazy z NC programu, jako jsou M funkce, H funkce atd. Na rozdíl od části NC je tato část upravitelná a vytváří ji výrobce stroje (nikoli řídicího systému). Typickou funkcí PLC je například blokáce pohybu stroje bez zavřených dveří stroje při spuštění programu, automatické upínání obrobků nebo řešení reakce na nouzové zastavení. [6]

2.3 PLC

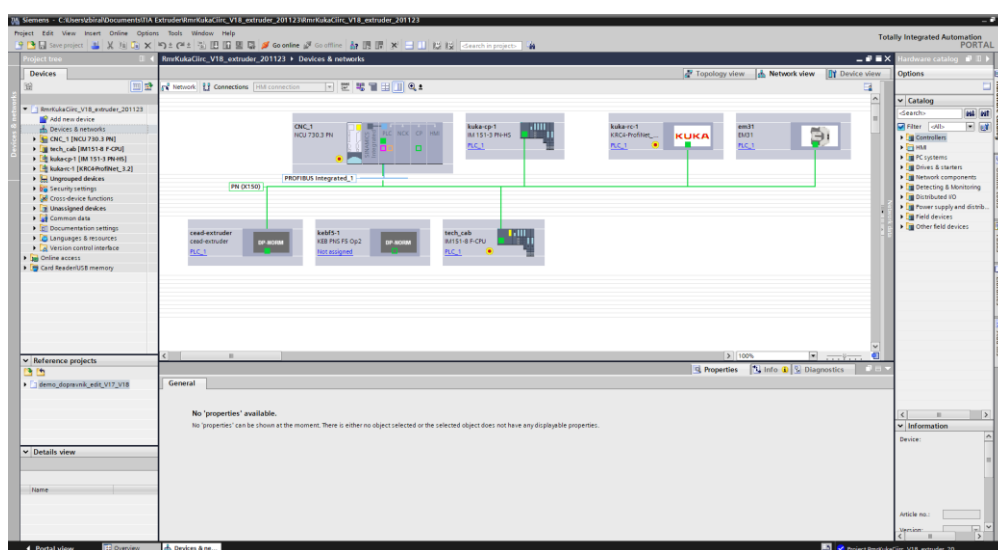
PLC, neboli programovatelný logický automat, je typ průmyslového počítače uzpůsobeného k odbavování uživatelského programu v daném taktu. Zpravidla nejnižší takt, ve kterém je program cyklicky odbavován, se pohybuje v řádech jednotek milisekund. Dle náročnosti aplikace může být čas taktu však mnohem delší. V každém jednom cyklu probíhá načítání vstupů, samotný výpočet, určitá režie operačního systému a poté nastavení výpočtů. Toto je základní zjednodušená představa, pořadí může být jiné, ale princip cyklického odbavování zůstává stejný. Samotný hardware se standardně vyskytuje ve dvou provedeních – kompaktní a modulární. Zatímco v případě kompaktního provedení obsahuje PLC zpravidla CPU (Central Processing Unit) a několik vstupů a výstupů, modulární provedení obsahuje často pouze jednotku CPU a pro získání vstupů a výstupů je potřeba rozšířit základní jednotku o rozšiřující karty, které komunikují po integrované sběrnici. Díky těmto kartám je možné mít jedno PLC s velkým množstvím různorodých vstupů a výstupů a dalších více specializovaných rozhraní. V dnešní době tato hranice pomalu mizí. Řadu PLC lze používat v jejich základní verzi jako kompaktní a dle potřeby rozšířit o moduly. Téměř každé PLC podporuje minimálně jednu průmyslovou sběrnici, často je podpora sběrnic dána výrobcem. Například PLC od výrobce Siemens nejčastěji používají sběrnice Profinet nebo starší Profibus. Porovnání mezi kompaktním a modulárním provedením je na Obr. 4. [7]



Obr. 4: PLC Siemens 1200 v kompaktním uspořádání (vlevo) a PLC Siemens 1500 v modulárním provedení (vpravo) [8]

2.4 Programování PLC

Pro programování lze použít několik programovacích jazyků. Dnes jsou všechny jazyky a postupy pro programování PLC sjednoceny normou IEC 61131. Programy je možné tvořit grafickou formou pomocí jazyků Ladder Diagram (Žebříkový diagram) nebo Function Block Diagram (Diagram z funkčních bloků). V dnešní době je však častější varianta využití textových jazyků, jako jsou Instruction List nebo Structured Text. Právě druhý zmíněný je velmi rozšířený, jelikož se jedná o programovací jazyk vyššího řádu, a je tedy v základech uživatelsky přívětivější. Pro tvorbu programových podkladů se používají tzv. vývojová prostředí. Často se jedná o specifická prostředí dle výrobce. V případě Siemens to je software TIA Portal (viz Obr. 5), ale například společnost Beckhoff využívá vývojové prostředí s názvem TwinCat, vycházející z Visual Studia. Nezávisle na použitém programovacím jazyku je poté celý projekt kompilován a nahrán na PLC v univerzální podobě. Je potřeba znát kompletní popis řešení, a to jak hardwarovou, tak softwarovou část. V rámci jednoho PLC projektu se obvykle nejdříve provádí hardwarová konfigurace, kde se definují konkrétní použité prvky, jejich revize a propojení při použití více prvků v jednom řešení propojeném sběrnici. Následuje samotná tvorba programu, a to kombinací různých softwarových jednotek, jako jsou programy, funkce nebo funkční bloky (funkce s integrovaným datovým bloky – tedy paměť). V rámci projektu je také potřeba řešit přiřazení proměnných ke konkrétním fyzickým adresám vstupů a výstupů. [9] [10]



Obr. 5: Prostředí TIA Portal V18

3 Aplikace robotů ve výrobě

Roboty nejsou ve výrobních provozech žádnou novinkou. V průmyslu se používají řadu desetiletí a s postupujícím časem jejich nasazení v průmyslu pouze roste. Hlavní výhodou průmyslového robotu je jeho univerzálnost a všestrannost. Problematikou průmyslových robotů se zabývá následující podkapitola. [11]

3.1 Průmyslový robot

Průmyslový robot je multifunkční, programovatelné zařízení schopné provádět požadované úkony samostatně a opakovaně. Roboty mají za sebou mnoho let vývoje. Nejprve nahrazovaly primárně pracovníky v rizikových provozech a lokalitách. S rostoucími požadavky konzumní společnosti se roboty začaly nasazovat téměř do všech výrobních odvětví, především za účelem zvýšení produktivity a snížení nákladů. Roboty stojí mimo jiné také za rozvojem elektroniky. Mnoho procesů například při výrobě mikročipů se bez nich neobejde. Aplikace robotů jsou velmi rozmanité. Hlavní využití robotů jsou následující [12]:

- Svařování
- Lakování
- Manipulace (tzv. Pick and Place)
- Aditivní technologie a obrábění



Obr. 6: Svařovací robot [13]

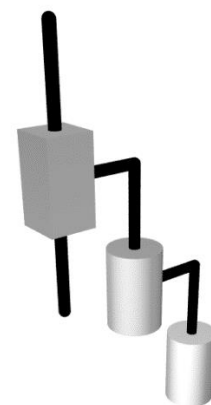
Na Obr. 6 je vidět svařovací robot. Jelikož jsou nároky na roboty v jednotlivých aplikacích velmi rozdílné, liší se roboty i svou kinematikou. Nejjednodušší je pravoúhlá (kartézská) kinematika. Skládá se ze tří lineárních ortogonálních os. Tyto roboty se velmi podobají portálovým CNC (Computer Numerical Control) strojům nebo jednodušším strojům jako jsou například 3D tiskárny nebo plotry. Široce se také využívají pro manipulaci. Není neobvyklá i jejich integrace do obráběcích strojů, kde slouží pro manipulaci s obrobky.



Obr. 7: Portálový manipulační robot [56]

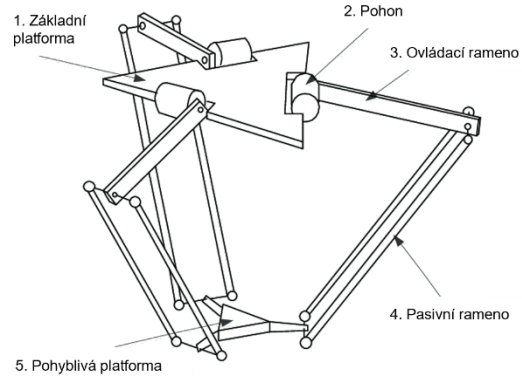
Portálová varianta kartézského robotu je především používána pro manipulaci s těžkými objekty ve skladových systémech. Takováto aplikace je vidět na Obr. 7. Výhodou této kinematiky je snadno dosažitelný velký pracovní prostor, rychlost je však obvykle nižší než u ostatních konfigurací. [14]

Mnoho aplikací však vyžaduje velmi vysoké rychlosti v malém rozsahu pracovního prostoru. Pro tuto aplikaci se hodí dva typy robotů. Prvním je SCARA (Selective Compliant Articulated Robot Arm). Struktura je tvořena dvěma rovnoběžnými rotačními osami a jednou lineární osou, umožňující pohyb v ose Z. Kinematický řetězec je na Obr. 8. Z tohoto schématu vyplývá, že kinematická struktura je sériová. Tyto roboty vynikají svou rychlostí a kompaktností. Nevýhodou je nižší nosnost, což ale nevadí, jelikož jsou tyto roboty nasazovány pro manipulaci či osazování lehkých a malých komponent. [15] [16]



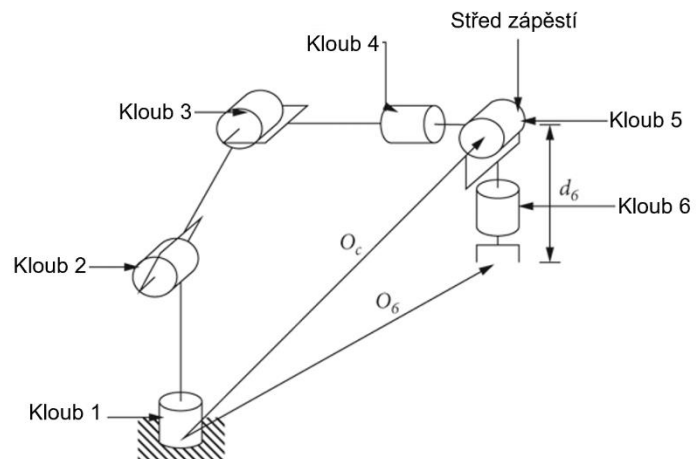
Obr. 8: Kinematika SCARA robotu [57]

Další volbou pro rychlou manipulaci je Delta robot. Jedná se o robot s paralelní strukturou. Příklad kinematické struktury pro delta robot se třemi stupni volnosti je na Obr. 9. Koncový bod tohoto typu robotu může být polohován ve třech až šesti stupních volnosti v závislosti na počtu a konfiguraci pohonů. Jde o vysoce dynamické roboty, proto se často používají ve vysokorychlostních manipulačních neboli „pick and place“ aplikacích, zejména v balicím a farmaceutickém průmyslu. Díky jejich zaměření obvykle není problém s jejich nižší nosností a menším pracovním prostorem. Nevýhodou může být složitější výpočet inverzní kinematiky v případě víceosých robotů. [17] [16]

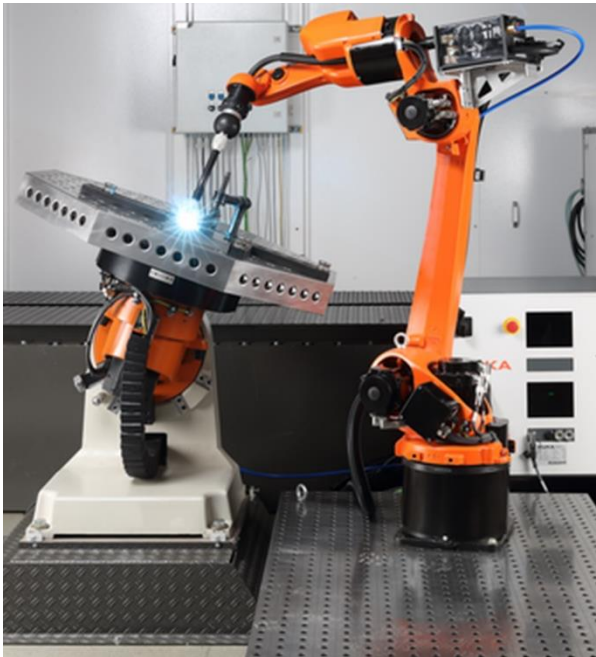


Obr. 9: Kinematika Delta robotu s třemi stupni volnosti [58]

Pokud je však požadavkem univerzálnost, relativně velký pracovní prostor, nosnost a víceosé pohyby, nabízí se použití angulárního robotu. Je to nejvíce rozšířený typ průmyslového robotu. Obvykle má šest stupňů volnosti, řízené šesti rotačními osami řazenými sériově. Kinematická struktura je na Obr. 10. Jak již bylo řečeno dříve, jedná se o velmi univerzální robot. Používá se téměř ve všech aplikacích. Často se tyto roboty používají pro svařování a lakování. Příklad svařovacího robota je vidět na již dříve zmíněném Obr. 6. Je to dáno jejich dobrým pracovním dosahem a možností polohovat koncový efektor ve všech stupních volnosti. Dle konkrétního typu je lze umisťovat do různých poloh včetně stropu, což opět zvyšuje jejich použitelnost. Rozšíření pracovního prostoru lze dosáhnout přidáním lineární osy pod robota. Kombinace robota s polohovadlem (například dvouosým otočně sklopným stolem) je běžnou záležitostí a používá se například pro svařovací



Obr. 10: Kinematika angulárního robota [59]

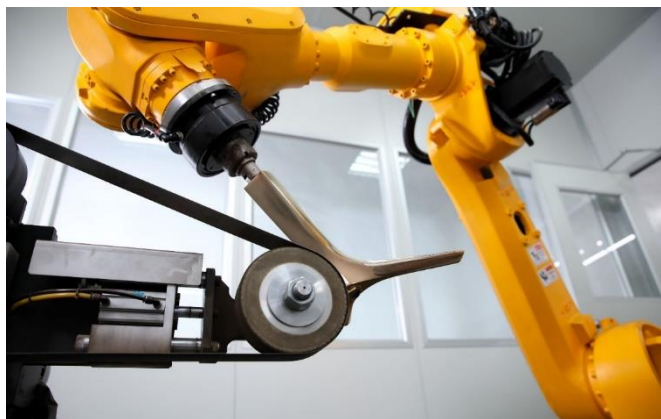


Obr. 11: Použití dvouosého polohovadla [64]

pracoviště (viz Obr. 11). Jejich použití je nenahraditelné také v paletizaci a manipulaci. Vyrábějí se v široké škále velikostí od stolních až po roboty s několika tunovou nosností. Jejich rychlost je pro většinu aplikací dostatečná a celkově se jedná o robustní řešení pro manipulaci. Často jsou implementovány k nebo dokonce do jiných strojů – například obráběcích center. Plní zde poté funkci manipulátorů pro obrobky, nástroje nebo přípravky. Roboty

nacházejí čím dál častější využití jakožto nosiče technologických hlavic. Do této kategorie spadají například frézovací vřetena, řezací hlavy nebo hlavy pro aditivní technologie. Příklad robotu s navařovací laserovou hlavou je na Obr. 13. [16] [18]

Pro obrábění se standardně používají obráběcí stroje, které vykazují dostatečnou tuhost odolávající rezným silám. Použití robotů v sektoru obrábění je omezené, ale svá uplatnění zde nacházejí. Hlavními výhodami je přirozená schopnost polohovat nástroj relativně k obrobku ve všech šesti stupních volnosti (čehož využívá např. aplikace broušení na Obr. 12) a také mnohem výhodnější poměr zástavbového prostoru a pracovního prostoru. Snadno se také získá větší pracovní prostor například osazením robota na lineární osu. Robot může na svém pracovišti plnit roli jak technologickou, tak manipulační, čímž se opět zvyšuje výhodnost tohoto řešení. Nižší dosažitelná přesnost, opakovatelnost (v řádech setin až



Obr. 12: Robot v aplikaci se statickou pásovou bruskou [61]

desetin milimetru) a tuhost, hlavně její nehomogenita v pracovním prostoru, limitují nasazení robotů v obrábění. Problematikou tuhostí robotů se zabývají například autoři těchto článků [19] a [20]. Určitá limitace také vyplývá z řídicích systémů, jelikož ŘS pro roboty standardně neobsahují určité pokročilé funkce, které se na obráběcích strojích běžně používají. Nejčastější uplatnění na poli obrábění nacházejí roboty v odjehlování nebo v podobných méně silově náročných aplikacích (např. broušení, leštění). Pokud už je robot nasazen jako primárně frézovací, jedná se většinou o obrábění hliníkových slitin, dřeva, polymerů nebo různých pěnových materiálů. Robot může nést akční člen jako brousící vřeteno nebo kartáčovací hlavu anebo manipulovat s dílem a polohovat ho vůči statickému akčnímu členu, kterých však může být na pracovišti několik a není potřeba dílec několikrát přesouvat a upínat. Příkladem je dříve zmíněná aplikace uvedená na Obr. 12. [21] [22]

3.2 Roboty v aditivní výrobě

Průmyslové roboty jsou univerzální nosiče koncových efektorů. Jedním z typů koncových efektorů je technologická hlavice pro aditivní výrobu. Takováto aplikace je v nasazení robotů čím dál častější. Objevují se jak v kovové, tak v polymerní výrobě aditivní výrobě. Příklad aplikace v kovové aditivní výrobě je vidět na Obr. 13. Jednotlivé technologie aditivní výroby pro obě skupiny materiálů jsou zmíněny v následující kapitole.

Na rozdíl od obráběcích aplikací zde není tuhost limitujícím faktorem, jelikož v procesu aditivní výroby nevznikají vnější síly působící na robota. I další nevýhody robotů zde nemají příliš velkou váhu. Přesnost je dostatečná a interpolace několika kloubů při pohybu v tomto případě také není úskalím. Převažují tedy spíše výhody robotů. Velký a snadno rozšiřitelný pracovní prostor je klíčovým faktorem při výrobě velkorozměrových dílců. Celkově se jedná o velmi flexibilní



Obr. 13: Robot s technologickou hlavou pro laserové navařování [60]

a univerzální řešení, jež umožňuje mimo jiné redukci celého výrobního procesu dílce do jednoho pracoviště. To je možné díky tomu, že roboty se často osazují přírubou pro automatickou výměnu koncových efektorů. Jeden robot v pracovišti tedy může využitím aditivní technologie vytvořit polotovár, na kterém posléze obrobí za použití vřetenové jednotky funkční plochy, a nakonec úchopnou hlavicí dílec vyloží z robotického pracoviště. Pracoviště pro hybridní polymerní výrobu je na Obr. 14. Je zde vidět robot s vyměnitelnými technologickými hlavicemi, extruderem a vřetenem (nasazeno na robotu). V pravé části obrázku jsou také vidět přidružená zařízení k aditivní technologii (základní jednotka technologie a sušička granulátu sloužící zároveň jako jeho zásobník). [23]



Obr. 14: Pracoviště hybridní polymerní výroby [23]

4 Aditivní technologie

Standardní technologie výroby přesných strojních součástí si zakládá na odebrání materiálu – obrábění. U mnoha dílců je tento přístup značně materiálově náročný a v krajních případech dochází k odebrání i 90 % materiálu polotovaru. Typickým příkladem jsou aerospace dílce, které se ještě donedávna vyráběly výhradně obráběním z plných polotovarů. Dnes je však v průmyslu již přítomná alternativa ve formě aditivní výroby (angl. Additive manufacturing - AM), někdy také nazývaná 3D tisk.

Značnou výhodou této technologie je minimalizace odpadu a zejména zkrácení času od návrhu k prototypu, popř. výrobku. Aditivní výroba, jak již název napovídá, funguje na principu přidávání materiálu takovým způsobem, aby vznikl požadovaný tvar a rozměr. Tvar a rozměr výrobku je přímo převzat z 3D modelu součástí. V drtivé většině případů se posléze obrábějí funkční plochy dílců, ale není výjimkou, že je dílec hotový již po nanesení materiálu. Tuto technologii lze použít pro celou řadu materiálů od polymerů přes keramiku, kompozitní materiály až po kovové materiály. Celkově se jedná o flexibilní technologii výroby umožňující rychlé změny výrobků s minimálním odpadem a bez vleklého procesu příprav polotovarů (výkovek, odlitků). Výhodný přístup je to tedy spíše pro malé počty kusů. [24]

Poměrně populární je aditivní technologie i pro domácí a hobby použití. 3D tiskárny na polymerní materiály ve formě filamentů jsou cenově velmi dostupné. Spolu s intuitivním a přívětivým softwarem umožňují i neprofesionálnímu uživateli vytvořit si plastový dílec v různém tvaru poměrně jednoduše, rychle a levně. Na Obr. 15 lze vidět 3D tiskárnu od českého výrobce Prusa. Rychlé rozšíření aditivní technologie mezi širokou veřejnost značně rozšířilo celkové povědomí o této technologii a pomohlo v rozvoji komplexnějších druhů a aplikací aditivní technologie.



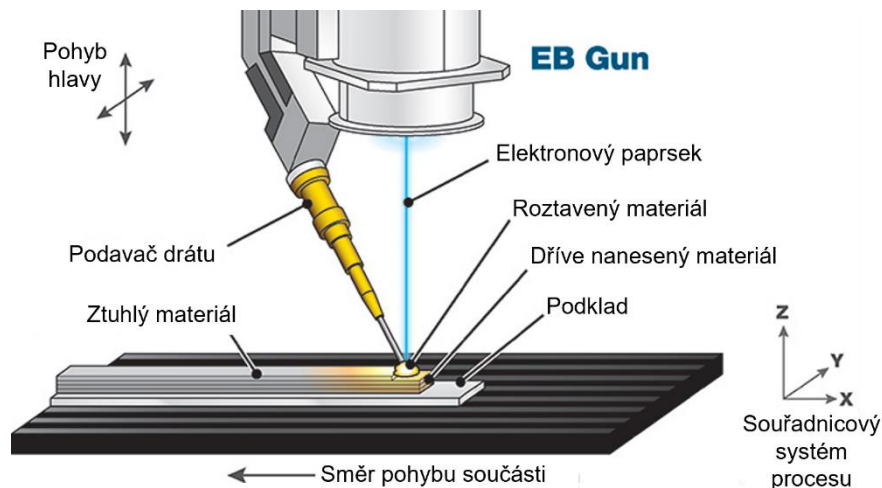
Obr. 15: 3D tiskárna Prusa Mk4 [62]

4.1 Aditivní výroba pro kovové materiály

V technické praxi se používá rozmanité množství materiálů. Obory jako aerospace, automotive nebo zdravotnictví využívají primárně kovy. I pro kovové materiály již existují aditivní technologie. Při výrobě leteckých dílců je klíčová hmotnost a tuhost. V kombinaci například s topologickou optimalizací lze poté aditivním způsobem vyrábět dílce s optimálním poměrem tuhosti a hmotnosti. Dalším klíčovým benefitem je příležitost ke snížení počtu jednotlivých dílců v sestavách. Navzdory negativům, které provázejí tento způsob výroby, jako například nehomogenita vlastností vytištěného dílce, je zmíněná technologie přítomna ve špičkových firmách po celém světě. Mezi příklady lze uvést například Boeing, SpaceX, GE Aviation či Tesla.

V automobilovém průmyslu je nasazení o něco menší. Je to dáno značně větší sériovostí produktů, nicméně své uplatnění našla aditivní technologie převážně v závodním sektoru, jelikož se v tomto případě jedná spíše o kusovou výrobu. Například McLaren využívá aditivních technologií ve Formuli 1. Pro zdravotní průmysl je klíčovým přínosem aditivní technologie velmi vysoká míra přizpůsobení pro konkrétního pacienta. Přidaným bonusem je kratší doba produkce a teoreticky nižší cena díky ušetření drahému materiálu. [25] [24]

Pro tvorbu kovových dílců aditivní technologií existuje celá řada přístupů. Liší se podobou vstupního materiálu, dosahovaným rozlišením, použitelností materiálů a z toho vyplývajícím určením pro dané průmyslové aplikace. První technologií je PBF (Powder Bed Fusion). Tento přístup klade kovový prášek do tenkých vrstev, které jsou posléze pomocí laseru nebo elektronového paprsku spékány do požadovaného tvaru. Tímto postupem lze dosáhnout velkých přesností, ale je použitelný pouze pro malé dílce. Přebytečný prášek lze dále použít a díky velké přesnosti výroby je množství odpadu velmi malé. Jedním z předních výrobců je GE Additive – sesterská společnost dříve zmíněného uživatele aditivních technologií GE Aviation. Další možností je DED (Direct Energy Deposition). Zde je již možné vyrábět větší dílce, ale rozlišení je nižší. Nanášecí hlavice přivádí materiál do místa nanášení, kde je poté laserem nebo elektronovým paprskem roztaven. Aplikační hlavice může být osazena například na industriálním robotu. Tento proces je zobrazen na Obr. 16. [24] [26]



Obr. 16: Direct Energy Deposition - drátový materiál [27]

4.2 Aditivní technologie pro polymerní materiály

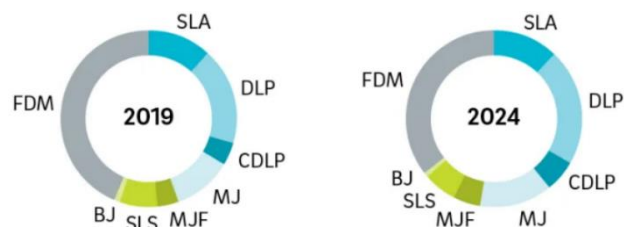
Velkým odvětvím jsou aditivní technologie s využitím polymerních materiálů. Polymery jsou materiály, které jsou tvořeny dlouhými řetězy makromolekul. Často jsou nazývány plasty, přičemž plasty spadají do kategorie polymerů. Oproti kovovým materiálům mají nižší pevnost, tvrdost a mimo jiné i teplotní odolnost. Jejich použití v technické praxi je tedy limitované a obvykle se překrývá jen minimálně s kovovými materiály. Vlastnosti polymerních materiálů se běžně zlepšují pomocí plniv. Typicky jsou do polymerní matrice přidána skleněná nebo uhlíková vlákna, popřípadě kovový prach. Takto vzniklý kompozitní materiál má posléze lepší vlastnosti a pomocí změn poměrů množství jednotlivých složek lze připravit ideální materiály pro konkrétní aplikace. I přes výše zmíněná negativa se nachází stále více příležitostí pro uplatnění polymerních materiálů, a to i v určitých případech na úkor materiálů kovových. Hlavní výhodou je relativně krátký čas od návrhu po vznik fyzického objektu díky materiálu, který je lépe obrobitelný, popřípadě ho lze použít v aditivní výrobě. Proto je tento přístup často používán pro rychlé prototypování (angl. Rapid Prototyping). Po vytištění prototypového kusu je poté možné ověřit, zda je dílec správně navržený či jestli odpovídá designovým požadavkům. Mnohé procesy využívají polymerní 3D tisk jako hlavní krok výroby, a to zejména v kusové výrobě, kdy jsou náklady na jeden kus nesrovnatelně nižší v porovnání s velkosériovými technologiemi, jako je například vstříkávání. [28] [29]

Stejně, jako v případě aditivních technologií s využitím kovových materiálů, existuje celá řada principů aditivní výroby i v segmentu polymerů. Přehled jednotlivých přístupů a jejich poměr v průmyslu v roce 2019 a odhad pro rok 2024 je na Obr. 17. Technologie znázorněné modrou barvou používají jako vstupní surovinu polymery v tekutém skupenství. Celkově tento přístup zastupuje dominantní postavení na trhu a stále roste. Hlavní výhodou je homogenita vytvořené součásti a velmi dobrá jakost povrchu. Naopak omezená je použitelnost materiálů a záporem může být také cena. Princip aditivních technologií využívajících jako vstup tekutinu je založen na vytvrzování vstupního materiálu pomocí různých druhů záření. Záření může být buď laserové, nebo UV (Ultra Violet).

Nejméně zastoupeným přístupem v polymerní výrobě je prášková technologie. Na Obr. 17 je zastoupen zelenou barvou. Prášek je v procesu výroby slinován užitím laseru a tím vzniká

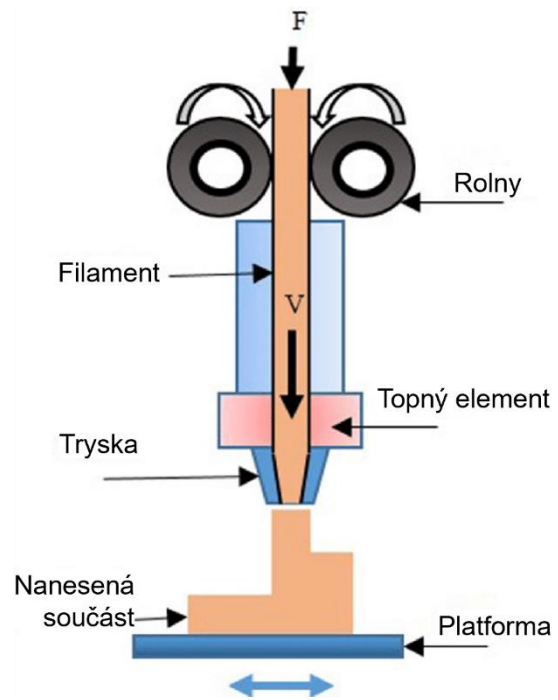
požadovaný tvar. Výrobky vytvořené tímto typem výroby vykazují skvělé mechanické vlastnosti a je možné tímto způsobem vyrábět z širokého sortimentu polymerních materiálů, ale oproti předchozí kategorii technologií je jakost povrchu horší. Značnou nevýhodou jsou velmi vysoké náklady na stroje, ale i na vstupní materiál. Stejně jako v předchozím případě je tato technologie použitelná pouze pro malé dílce. [28] [29]

Poslední kategorií je technologie typu Extruze – vytlačování. Na Obr. 17 je reprezentována šedou barvou a lze vidět, že má na trhu relativně velké zastoupení. Používané stroje jsou koncepčně poměrně jednoduché, což je jeden z důvodů, proč je tento přístup použit v hobby 3D tiskárnách. Mezi výhody lze zařadit nízké náklady, možnost tisknout ze širokého spektra materiálů, a to včetně polymerních kompozitních materiálů (tzv. Hi-tech materiálů). Výrobky mají velmi dobré mechanické vlastnosti. Bohužel rychlost výroby je velmi nízká a spolu se špatnou jakostí povrchu, která vzniká nanášením vrstev materiálu, tvoří podstatné záporné aspekty této metody. Tato metoda umožňuje jako jediná produkci velkoformátových výrobků poměrně snadno. Menší stroje, například i hobby



Obr. 17: Přehled aditivních technologií polymerů [29]

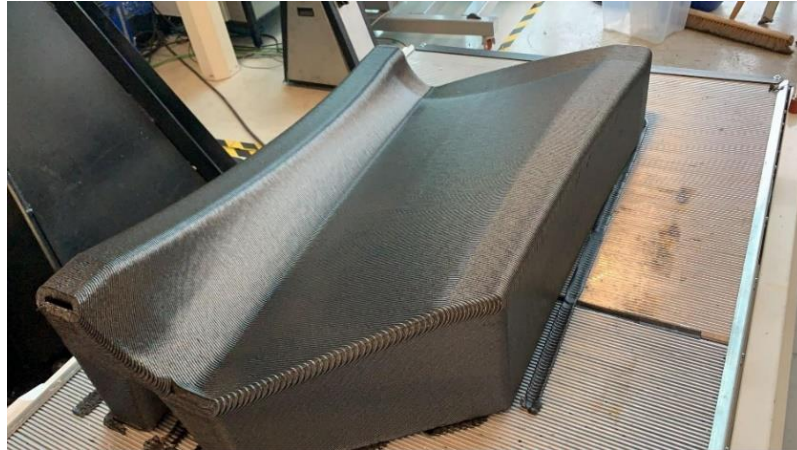
tiskárny typu Prusa, používají vstupní materiál ve formě filamentu (tisková struna). Oproti tomu stroje určené na větší výrobky využívají vstupní materiál ve formě pelet (stejný vstupní materiál jako pro vstřikolisy). Výrobky se tisknou po vrstvách, které jsou postupně nanášeny na sebe. Konkrétní označení technologie je FDM (Fused Deposition Modeling). Označována je také jako FFF (Fused Filament Fabrication). Technologická hlavice se nazývá extruder. Úkolem extruderu je roztavit materiál polotovaru a v přesném množství ho pomocí trysky, která je funkčním koncem extruderu, nanášet ve vrstvách, a tím vytvářet požadovaný tvar a rozměr. Extrudery se obecně skládají z podávacího ústrojí (zároveň plní funkci dávkovacího), topných elementů a trysky. Extruder na filament je vidět na Obr. 18. V případě menších strojů je extruder nejčastěji osazen na kartézský polohovací systém, jenž extruder vede po požadované dráze. Často se však využívá toho, že pomocí technologie FDM lze vyrábět dílce větších rozměrů. Extruder pro velkoformátový 3D tisk je poté jiné konstrukce a využívá rotující šnek. Řez tímto typem extruderu je na Obr. 23. [23] [28] [29]



Obr. 18: Extruder na filament [28]

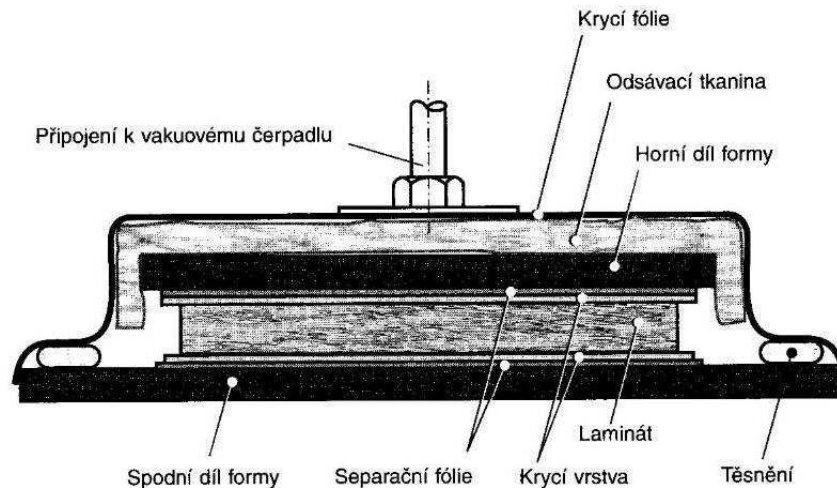
5 Velkoformátový 3D tisk

Klasický 3D tisk součástí malého rozměru se běžně používá pro rychlé prototypování již delší dobu. Avšak až rozvoj pokročilejších materiálů, technologických hlavic s větším hmotnostním průtokem a softwarových nástrojů pro aditivní technologie otevřel nové možnosti v aditivních technologiích polymerů, a to velkoformátový 3D tisk. Aplikace této technologie je poměrně specifická. V závislosti na materiálu lze vyrábět přímo polotovary finálních součástí, pokud jsou vlastnosti tištěného materiálu dostačující. Také se tento přístup využívá k rychlému prototypování, stejně jako u 3D tiskáren malých rozměrů. V dnešní době se používá primárně pro výrobu nástrojů (forem) sloužících pro výrobu součástí z kompozitních materiálů. Největšími sektory, v nichž se tento přístup využívá, je aerospace, automotive, vrcholový sport všech disciplín, energetický a transportní průmysl obecně. Své uplatnění však postupně nachází i v dalších odvětvích, jako je architektura a infrastruktura. Formy velmi často určují již finální tvar a povrch vyráběných součástí. Z toho vyplývá, že je zde požadavek na přesnost a jakost povrchu. Toho lze docílit obráběním, což je mimo jiné standardní přístup k výrobě těchto forem. Formy se obvykle obrábějí, a to nejčastěji ze dřeva, pěny či kovů. Samozřejmě vždy záleží na tom, do jakého procesu je forma určena – to definuje požadavky na její pevnost a tepelnou odolnost. Stanovený počet kusů daného výrobku, které musí forma zvládnout spolehlivě vyrobit, také klade požadavek na materiál. V případě výroby z polymerů 3D tiskem je potřeba formovací povrch také obrobit, aby odpovídal požadavkům na jakost povrchu a přesnost. Zde se nabízí přechod z pracoviště pro aditivní výrobu na pracoviště pro hybridní výrobu. Tím se integruje celý proces do jednoho pracoviště bez potřeby transportu a opakovaného upínání dílce. Na Obr. 19 lze vidět vytištěnou formu pro výrobu dveří sportovních vozů pomocí lisování v autoklávu. Po dokončení byla tato forma použita přímo ve výrobě a dle zdroje [30] vydržela 350 cyklů bez známek opotřebení. [1] [31] [32]



Obr. 19: Vytištěná forma pro laminaci dveří sportovních vozů [30]

Kompozitní dílce se vyrábějí řadou technologií. Vyjma 3D tisku kompozitních materiálů vyžaduje každá technologie určitý typ formy. Každá technologie klade různé nároky na formy a materiály těchto forem. Nejsnazším způsobem je ruční otevřené kladení, při němž jsou velmi minimální požadavky na pevnost a teplotní odolnost, jelikož se vrstvy kompozitu kladou ručně za studena. Stejně nároky klade i technologie stříkání, kdy se kompozitní materiál na formu nanáší proudem. Lisování pomocí vakua přináší mírné zvýšení požadavku na pevnost formy. První dvoudílná forma se vyskytuje v technologii lisování za studena. Forma se tedy skládá z horní a dolní poloviny, které se po naklazení materiálů silou stlačí k sobě a výsledkem je součást s oboustranně definovaným povrchem od formy. V případě této technologie je již potřeba zajistit určitou pevnost a tuhost formy. Z pohledu tepelné odolnosti nejsou žádné zvýšené požadavky. Velmi rozšířené jsou technologie lisování za tepla a tlaku a lisování v autoklávu. Jak již názvy napovídají, krom požadavku na pevnost a tuhost je zde i požadavek na zvýšenou teplotní odolnost. Lisování v autoklávu probíhá při teplotách cca mezi 120 a 200 °C a při tlaku 6 bar. Metoda lisování v autoklávu je na Obr. 20. Existují i další technologie výroby kompozitních dílců (například navíjení na negativ, vysokotlaké vstřikování), které však již nejsou tolik vhodné pro využití forem vyrobených z polymerů pomocí 3D tisku. [33] [34]



Obr. 20: Lisování v autoklávu [33]

5.1 Materiály

Technologií velkoformátového 3D tisku je možné tisknout ze širokého sortimentu materiálů. Nároky na materiál jsou dány využitím výrobku. Jak bylo uvedeno dříve, nejdůležitějšími parametry jsou pevnost (tuhost) a tepelná odolnost. Další důležitou vlastností může být chemická odolnost, která je však většinou dostačující a řeší se obvykle pouze ve speciálních aplikacích. Materiál do extruderu pro velkoformátový 3D tisk se dodává ve formě pelet (granulát) (viz Obr. 21), což je standardní druh plastikářského polotovaru používaný například na vstřikolisech. Díky tomuto univerzálnímu vstupu figuruje na trhu řada výrobců a portfolio dostupných materiálů je velmi rozmanité. Tisknout lze materiály čisté, tedy bez přidaných plniv. Do této kategorie patří například ABS, PLA nebo PP. Všechny tyto materiály jsou v praxi velmi rozšířené, ale často nesplňují požadavky vznikající v průmyslových aplikacích. Řešením, jak zlepšit vlastnosti jednotlivých polymerních materiálů tak, aby splňovaly požadavky v náročných průmyslových aplikacích, je přidání tzv. plniv. Posléze se tedy jedná o kompozitní polymerní materiál, jehož



Obr. 21: Vstupní materiál pro extruder – pelety (granulát) HDPE

matrici tvoří polymer (například jeden z výše uvedených) a plnivem jsou krátká vlákna – nejčastěji uhlíková nebo skleněná. Hmotnostní obsah plniva se pohybuje obvykle v nižších desítkách procent (10 – 40 %). Právě tyto kompozitní materiály jsou nejčastěji tisknuty průmyslovými extrudéry. Výčet materiálů, které doporučuje CEAD pro použití s jejich extrudery, lze nalézt na této webové stránce [35].

5.2 Strojní řešení

Strojní řešení pro velkoformátový 3D tisk se vyskytuje standardně ve dvou variantách. První je osazením technologické hlavy – extruderu – na kartézský polohovací systém. Často mají tyto stroje hybridní koncepci, kdy lze extruder automaticky odložit nebo odklopit a pomocí frézovacího vřetene nanesený materiál obrobít. Stroj je obvykle vybaven vyhřívanou tiskovou podložkou. Pracovní prostor může být velmi velký. Například portálový systém využitý na stroji BEAD uvedeném na Obr. 22, který vznikl spoluprací firem CEAD a Belotti, umožňuje konfigurovat rozjezdy v lineárních osách následovně: X 6000 – 50000 mm, Y 2600 – 11000 mm a Z 1500 – 5000 mm. Ze svého původu frézovacího centra si stroj převzal i hlavu se dvěma rotačními osami, jedná se tedy o pětiosý stroj. Takový stroj může být využit například pro výrobu v námořním průmyslu. Vzhledem ke konstrukci stroje se však jedná o velmi nákladné řešení. [36]

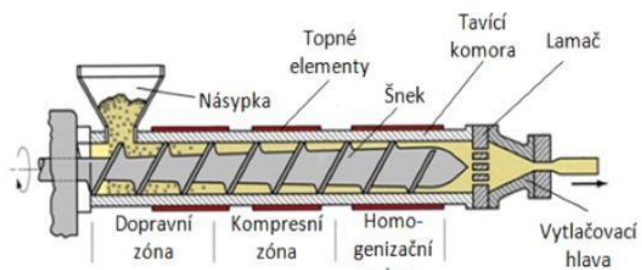


Obr. 22: Portálový stroj BEAD od výrobce Belotti a CEAD pro hybridní výrobu [36]

5.3 Robot s extruderem

Druhý přístup je využití průmyslového robota jakožto univerzálního nosiče technologických hlav, v tomto případě extruderu. Pokud je pracovní prostor robota dostačující, tak se jedná o snazší způsob, jak získat stroj pro velkoformátový 3D tisk. Toto řešení má však již pramálo společného s obecně známými 3D tiskárnami. S rostoucími maximálními rozměry výrobků vzrostly i podružné parametry. Například průměr trysky na stolní 3D tiskárně se pohybuje v řádech desetin milimetrů. V případě extruderu určeného pro osazení na průmyslový robot jsou průměry dodávaných trysek v řádech milimetrů. Běžně používané výšky vrstev a šířky kladeného materiálu také vzrostly na jednotky milimetrů. Z toho vyplývá, že je potřeba podstatně větší objemový průtok materiálu. Konstrukce extruderu tedy využívá šnek místo podávacího kola, které tlačí filament do horké trysky.

Šnek je poháněn pomocí servomotoru s převodovkou. Při otáčení poté tlačí pelety ze zásobníku přes ohřivací zóny do trysky. Pohled na koncept konstrukce šnekového extruderu je na Obr. 23. [37]



Obr. 23: Šnekový extruder [37]

Extruder je potřeba řídit, a to ve více ohledech. První hledisko je materiálové. Různé materiály vyžadují odlišné teploty. Obvykle je podél šneku více ohřivacích zón, ve kterých se postupně zvyšuje teplota směrem k trysce. V závislosti na použitém materiálu je tedy potřeba nastavit správné teploty v těchto pásmech. Možnost řídit teplotu je tedy důležitá. Jelikož je extruder veden pomocí robota po určité předem definované dráze programovanou rychlostí, je nutné mít schopnost řídit rychlost pohybu materiálu z extruderu. V případě extruderu CEAD E25 je nastavována rychlost otáčení šneku v otáčkách za minutu. Tato hodnota se určuje z rychlosti pohybu trysky extruderu, šířky a výšky vrstvy nanášeného materiálu a materiálové konstanty, jež udává objemové množství materiálu na otáčku šneku. Rychlost pohybu trysky se standardně určuje z délky dráhy na jednu vrstvu a času pro projetí této dráhy. Mezi jednotlivými vrstvami totiž nesmí příliš klesnout teplota již naneseného

materiálu, aby vrstvy správně přilnuly. Podrobněji je řešení této problematiky popsáno později při implementaci extruderu do ŘS Sinumerik a tvorbě postprocesoru samotného. [23] [38]

Aby mohly roboty samostatně a opakovaně provádět požadované úkony, je potřeba jim dodat program. Program obsahuje příkazy popisující informace o pohybech, souřadných systémech, ovládání periferií apod. Mezi informace o pohybech se řadí například typ pohybu, koncové souřadnice pohybu, rychlost pohybu programovaného bodu atd. Do kategorie ovládání periferií spadá například manipulace s čelistmi koncového efektoru, nastavování proměnných parametrů technologických hlavic a jejich celkové ovládání. Roboty, respektive ŘS různých výrobců, využívají odlišné syntaxe jazyků pro programování jejich robotů. Obvykle také poskytují doprovodné programy pro tvorbu programů. Program totiž lze získat mnoha způsoby. První způsob je online programování přímo přes příruční panel neboli „teach pendant“ daného řídicího systému. Příklad příručního panelu pro roboty KUKA a řídicí systém KRC4 je na Obr. 24. Buď se zde zadává psaním na klávesnici, častěji se však využívá tzv. teach-in mód, kdy se s robotem manuálně pohybuje na požadované souřadnice a ty se poté ukládají jako cíle v sekvencích.

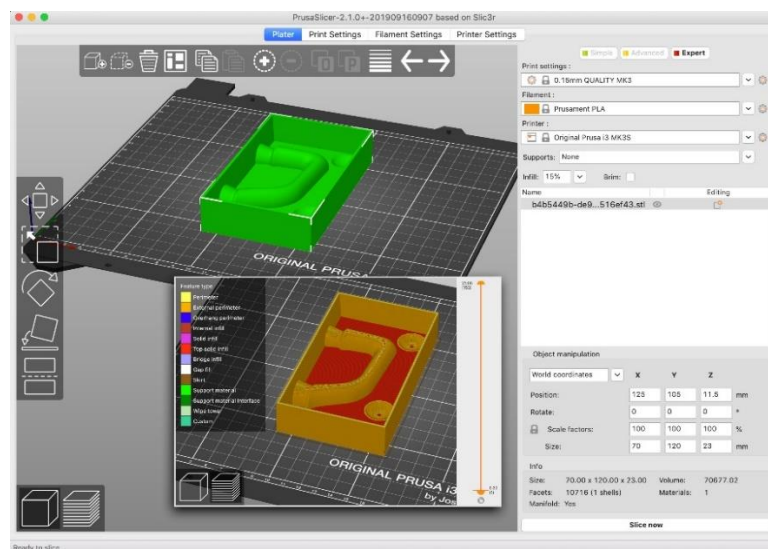


Obr. 24: Robot a příruční panel (teach pendant) KUKA [39]

Offline programování se provádí na počítači v doprovodném programu. Zde se nejčastěji v simulačním prostředí sestaví model pracoviště s komponenty a používá se hybridní tvorba s najížděním na cíle, generování dráhových prvků a psaní například cyklových procedur. Tyto přístupy jsou vhodné pro aplikace,

ve kterých se častěji využívá pouze polohovacích pohybů, nikoli dráhového řízení (typicky manipulátory). Pro složitější aplikace, jako je obrábění nebo 3D tisk, je vhodné využít tzv. CAM (Computer Aided Manufacturing). Jedná se o program, který z 3D modelu výrobku pomocí definic nástrojů, strategií a dalších parametrů, vytvoří dráhy v podobě CL (Cutting Location) dat. Jedná se o data, která nijak neodráží reálnou kinematiku stroje ani požadavky na konkrétní syntaxi jednotlivých řídicích systémů. K převodu mezi CL daty a NC programem pro konkrétní fyzickou konfiguraci slouží postprocessor a tvorba postprocesoru je jedním z cílů této práce. [22] [40]

CAM softwary byly vyvíjeny primárně pro proces obrábění. Až postupem času vznikla potřeba tvořit dráhy pro aditivní technologie a prvním řešením bylo využití standartních CAM softwarů a generování obráběcích operací s následnou úpravou programu pro aditivní výrobu. Postupem času vznikly specializované CAM softwary pro aditivní technologie. Nyní jsou již implementovány funkce a operace pro různé typy aditivní výroby do mnoha dříve pouze obráběcích CAM softwarů. Nejjednodušším a pro širokou veřejnost nejpoužívanějším softwarem jsou tzv. slicery. Primárně jsou používány ve spojení s maloformátovými 3D tiskárnami. Jejich princip funkce a nastavení je poměrně snadné a uživatelsky přívětivé. Obvykle se do nich 3D model nahrává ve formátu „.stl“. Model je poté softwarem dle nastavených hodnot rozřezán po vrstvách a jsou vygenerovány obrysy a výplně. Jak vypadá prostředí například v sliceru od Prusa, je vidět na Obr. 25. [41] [42]



Obr. 25: Pohled do prostředí PrusaSlicer [43]

Pro pokročilé aplikace aditivní výroby, jako je velkoformátový 3D tisk, existují specializované CAM softwary, jež obsahují řadu funkcí ulehčujících přípravu programů a často také funkce, které jsou schopny zlepšit výsledek výroby. Jedním z takových programů je AiSync. Je to specializovaný CAM software pro aditivní technologii FDM, popřípadě DED. Obsahuje funkce, jako je například tvorba nerovinných drah (dráha je obecně prostorová), adaptivní modulace rychlosti nebo generování drah v naklopené rovině a mnoho dalšího. Mimo jiné je možné v tomto softwaru simulovat pracoviště pro aditivní výrobu, a tím provést verifikaci a kontrolu kolizí. Jak již název napovídá, software využívá prvky umělé inteligence, a to zejména pro komunikaci s uživatelem. Pohled do prostředí tohoto softwaru je na Obr. 26. [2]



Obr. 26: Prostředí Ai Build [44]

Jak již bylo řečeno, v poslední době byly implementovány funkce pro programování aditivní výroby do řady standardních CAM softwarů. Jedním z nich je hyperMILL. V modulu pro aditivní výrobu tohoto CAM softwaru je možné vytvářet dráhy pro technologie Powder Bed Fusion a DED. Dále také podporuje simulace těchto procesů včetně podpory hybridní výroby. Výjimkou není ani Siemens NX, který obsahuje podobnou míru podpory. Výhodou je, že vychází z pokročilého jádra CAM, tudíž je možné tvořit i komplexní nerovinné dráhy apod. Neobsahuje však specifické pokročilé funkce pro aditivní výrobu jako například dříve zmíněný AiSync. [3] [42] [45]

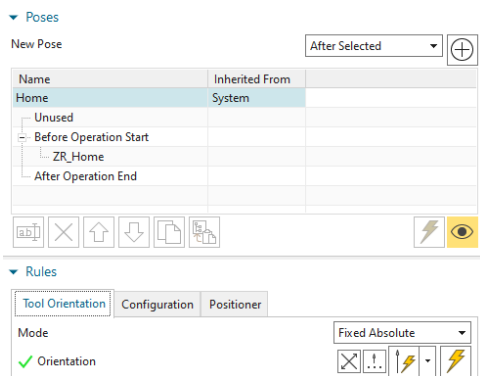
6 Siemens NX CAM – možnosti z pohledu robotů a aditivních technologií

CAM software slouží k tvorbě nástrojových drah na základě 3D modelu součásti, kterou je v plánu vyrábět. Další vstupní parametry jsou například model polotovaru (ať už explicitní nebo jen interně definovaný zjednodušený tvar), technologické podmínky, volba a definice nástrojů atd. Siemens NX je komplexní PLM (Product Lifetime Management) software a mimo jiné obsahuje i CAM prostředí. V průmyslu je poměrně široce rozšířený a nabízí velké množství funkcí a nastavení. Další silnou vlastností je otevřená podpora pro vývojáře. Siemens NX je velmi přizpůsobitelný a rozšířitelný, což je jeden z důvodů, proč bude použit i v této práci. Následující podkapitoly blíže popíší možnosti tohoto softwaru vzhledem k programování robotů a aditivním technologiím. Dále jsou zde přiblíženy stavební pilíře vlastního řešení, a to postprocesory a simulační modely v Siemens NX. [46]

6.1 Programování robotů

Obecné přístupy k programování robotů byly nastíněny dříve. Tato kapitola se blíže zabývá přístupem využití CAM softwaru, konkrétně možnostmi a postupy v prostředí Siemens NX CAM. Výhradně jsou v této kapitole popisovány možnosti pro úkony s dráhovým řízením, konkrétně obrábění a aditivní technologie. Manipulační aplikace je také možné v Siemens NX programovat, ale to už je problematika mimo rozsah této práce. [47] [48]

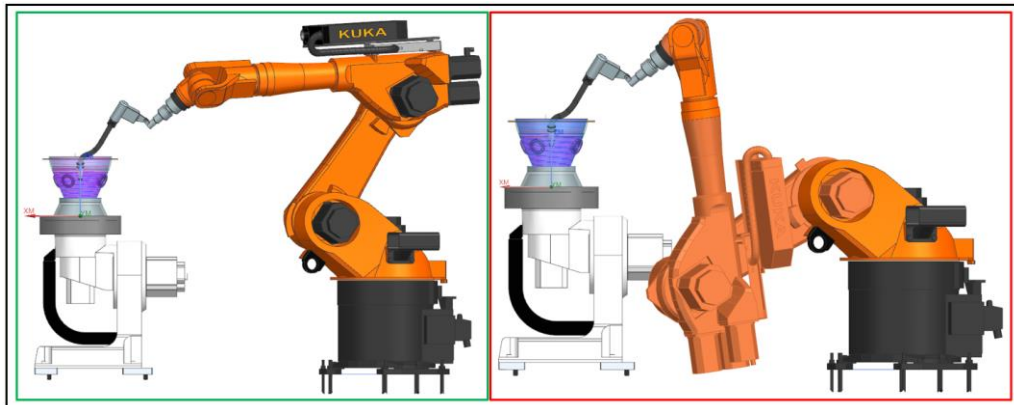
Programování robotů v NX vychází z obecných operací pro generování nástrojových drah. Na rozdíl od programování obráběcího stroje je však potřeba



Obr. 27: Okno pravidel pro robota

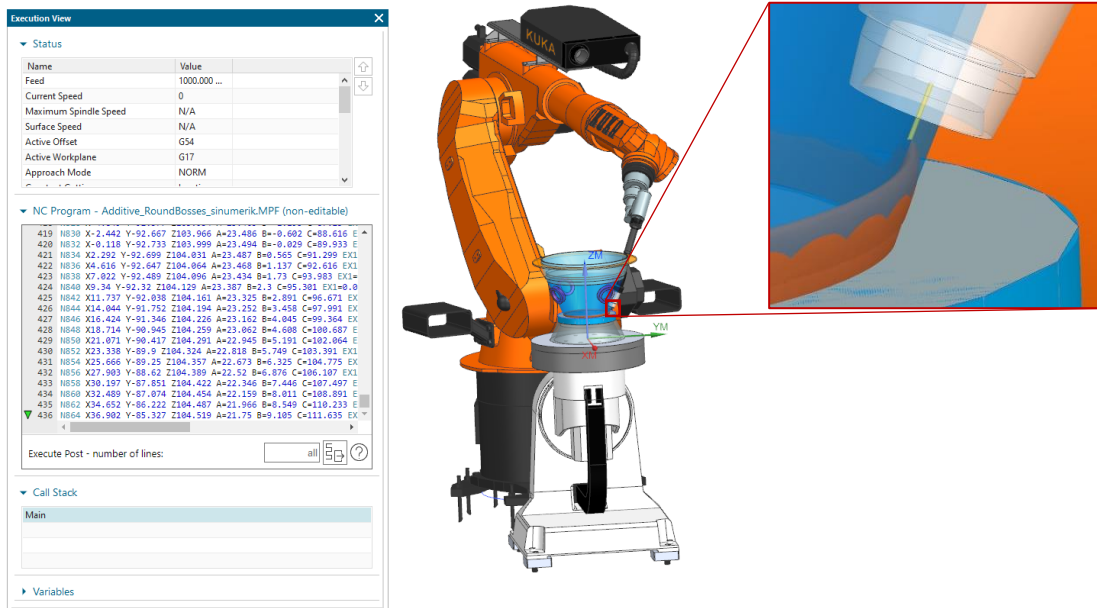
doplnit dráhu o tzv. pravidla robotu. Okno pro nastavení pravidel robotu je k vidění na Obr. 27. Tato pravidla obsahují informace, jež řeší přebytečné stupně volnosti, které vznikají kinematikou standardních průmyslových robotů. Nastavení týkající se této problematiky je nastavení orientace nástroje. K dispozici

je celá řada možností. Dále je zde také možné nastavovat konfigurace, pomocí kterých je možné se vyhnout singulárním polohám nebo nastavit konfiguraci s lepší tuhostí. Jednotlivé konfigurace značí, jakým složením smyslu natočení jednotlivých kloubů je výsledná pozice koncového efektoru dosažena. Kinematicky je totiž často možné jednu pozici koncového efektoru získat vícero kombinacemi natočení jednotlivých kloubů robotu, tak jak je vidět na Obr. 28. Singulární polohou je myšlena poloha, ve které jsou dvě osy souosé a výsledný požadavek na rychlost vychází i při sebemenším pohybu velmi vysoký (nekonečno). Těmto polohám je nutné se vyvarovat. V neposlední řadě umožňuje okno pravidel pro roboty definovat počáteční a koncové pózy robotu. Různé nastavení pro roboty je také možné vyvolat pomocí UDE (User Defined Event), nastavených na jednotlivé CAM operace. [40]



Obr. 28: Různé konfigurace robotu pro stejnou dosaženou polohu

K odhalení problémových poloh, ať nedosažitelných či singulárních, slouží verifikace. V Siemens NX je možné dráhy verifikovat s načteným modelem konkrétního robotu a rychle odhalit problémová místa. Tato předběžná simulace je specialita pro roboty a slouží k prvotnímu ověření. Roboty jsou podporovány i v pokročilé simulaci s emulátorem řídicího systému. Podpora této funkce je velmi důležitá vzhledem k tomu, že lze pro roboty vytvářet velmi komplexní operace včetně externích os a polohovadel. Podpora pro různé řídicí systémy se rozrůstá. V současné době jsou standardně pro simulace podporovány řídicí systémy ABB, Kuka a Sinumerik. Využitím tohoto stupně simulace je možné odhalit nejen problémy s dosažitelností jednotlivých poloh a singularitami, ale i kolizní stavy. Lze také mimo jiné simulovat úběr (nebo přidávání) materiálu. Pohled na takovou simulaci je na Obr. 29. [40]



Obr. 29: Simulace robota s emulátorem ŘS a simulací přidávání materiálu

Programování robotů v CAM prostředí přináší výhody zvláště pro složitější aplikace jako například obrábění nebo velkoformátový 3D tisk. Dále je možné dráhy verifikovat a simulovat včetně pokročilejších funkcí, jako jsou například externí osy, polohovadla či úběr materiálu v případě obráběcích hlav. Simulovat lze také výměnu koncových efektorů, popřípadě nástrojů v nich.

6.2 Aditivní technologie v NX CAM

Pro technologickou přípravu aditivní technologie výroby existují v Siemens NX dvě možnosti. První možností je využití modulu přímo pro aditivní výrobu, jenž je určen pro technologii práškového lože. Zmíněného modulu se tato práce nijak nedotýká, protože operace dostupné v modulu nejsou vhodné pro technologii velkoformátového 3D tisku. Pro tvorbu drah v případě velkoformátového 3D tisku a dalších technologií (například Direct Energy Deposition, Fused Deposition Modeling nebo WAAM - Wire and Arc Additive Manufacturing) slouží sada operací v kategorii `multi_axis_deposition`, a to přímo v CAM modulu. Díky tomu, že se vše nachází v jednom modulu, je snadný přechod do aditivní výroby. Podpora aditivní a potažmo hybridní technologie přesahuje i do simulace procesu, a to včetně simulace s emulátorem řídicího systému. [3] [42]

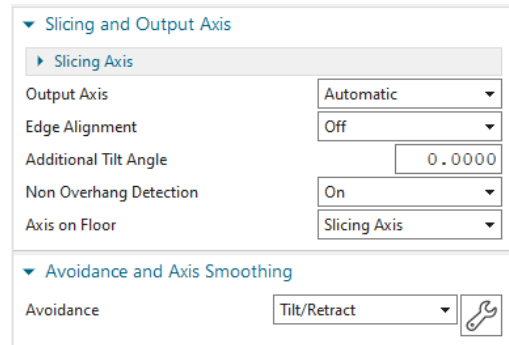
Výběr technologických operací je poměrně široký a pokrývá většinu možných potřeb. Ve verzi NX2306 je jich k dispozici celkem 17. Zkrácený typový přehled operací je na Obr. 30. Operace jsou univerzální s ohledem na použitou technologii, je ale na uživateli, aby zvolil vhodnou operaci pro danou technologii. Určité operace jsou vhodnější pro danou technologii než jiné. [42]



Obr. 30: Zkrácený přehled dostupných technologických operací z kategorie Multi Axis Deposition v Siemens NX [42]

Možnosti využití této sady operací jsou velmi široké, avšak má i své limitace a nevýhody. Nastavení operací je více komplexní a k dosažení dobrého finálního výsledku je potřeba velmi dobře odladit nastavení operace. Oproti softwarům pro maloformátový 3D tisk (slicerům) není v Siemens NX CAM žádná možnost na automatickou tvorbu podpor a složitějších výplňových struktur, automatické rozmístění součástí atd. Případné podpěry musejí být součástí již vytvořeného 3D modelu dílce. Tato omezení jsou poměrně pochopitelná. Dalším faktorem je povaha výroby, kterou tento přístup programování používá. V žádném případě se nejedná o hobby použití, ba naopak velmi často se jedná o Hi-Tech řešení, u kterých se předpokládá, že jsou prováděna zkušenými odborníky. Pro tato řešení však nabízí Siemens NX CAM velmi široké a flexibilní možnosti. Siemens NX však neumožňuje provádět výpočet posuvů a otáček extruderu pro jednotlivé vrstvy v závislosti na požadovaném času jedné vrstvy nebo proměnlivé otáčky v jedné vrstvě. Mělo by být možné tyto funkce zastoupit v postprocesoru pomocí vlastních vytvořených (optimalizačních) algoritmů. [42]

Vzhledem k nastavení aditivních operací je vhodné poukázat na určité detaily, jež odlišují nastavení těchto operací od klasických obráběcích. V případě rovinných operací se jedná o nastavení sliceru. Část nastavení sliceru je vidět na Obr. 31. Slicer zajišťuje rozdělení modelu na vrstvy. Nejdůležitějšími parametry jsou zde osa řezání a výška



Obr. 31: Náhled na nastavení sliceru v NX CAM

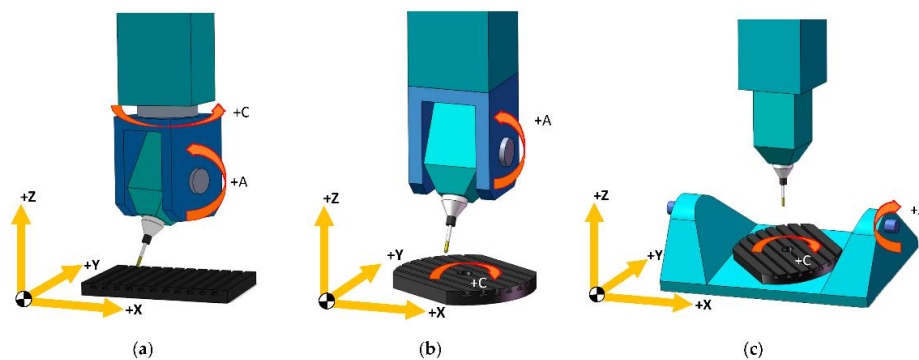
jednotlivých vrstev. Dalším podstatným nastavením je konfigurace strategie. V této části se nastavuje například typ tiskového vzoru nebo kde a kdy se má provést dokončovací průjezd. Dalším nastavitelným parametrem může být čas chladnutí sloužící k pozastavení procesu mezi jednotlivými vrstvami pro případ, pokud by byl problém s pomalým chladnutím přidaného materiálu. Zajímavou možností je aktivace detekce rohů dle definovatelných parametrů. Informace o tom, že se v daném místě dráhy nachází ostrý roh, může být poté použita při postprocesování. Informace je však dostupná jen pro určité operace. Zbýlá nastavení jsou identická s nastavením obráběcích operací, a to včetně nastavení posuvů. Zadává se tedy nominální hodnota v mm/min, a to po celé dráze.

Nakonec jsou v případě aditivních technologií mírné rozdíly i v definici geometrie a nástrojů. Z pohledu geometrie již není dostačující definovat pouze vyráběnou součást a polotovár. V rámci nastavení „Hybrid Geometry“ je také zapotřebí definovat základnu pro aditivní proces, nad kterou se poté simuluje přidávání materiálu. Jako v případě obrábění je také nutné definovat příslušné nástroje. Při vkládání nástrojů je opět k dispozici kategorie `multi_axis_deposition` obsahující tři základní typy – extruder (trysku), pokladač pásky a navařovací hořák. Jednotlivé nástroje je také možné osazovat do hlav. Je tedy možné mít v knihovně definován konkrétní extruder jako hlavu a poté sadu dostupných trysek v knihovně nástrojů. Princip fungování a nastavování je shodný s přípravou obráběcího procesu, jen se liší parametry. [42]

Nyní bylo popsáno, co je potřeba k vytvoření správné dráhy v CAM softwaru. Aby vše proběhlo v pořádku i při reálném procesu výroby, je však nutné mít správný postprocesor.

6.3 Postprocessor

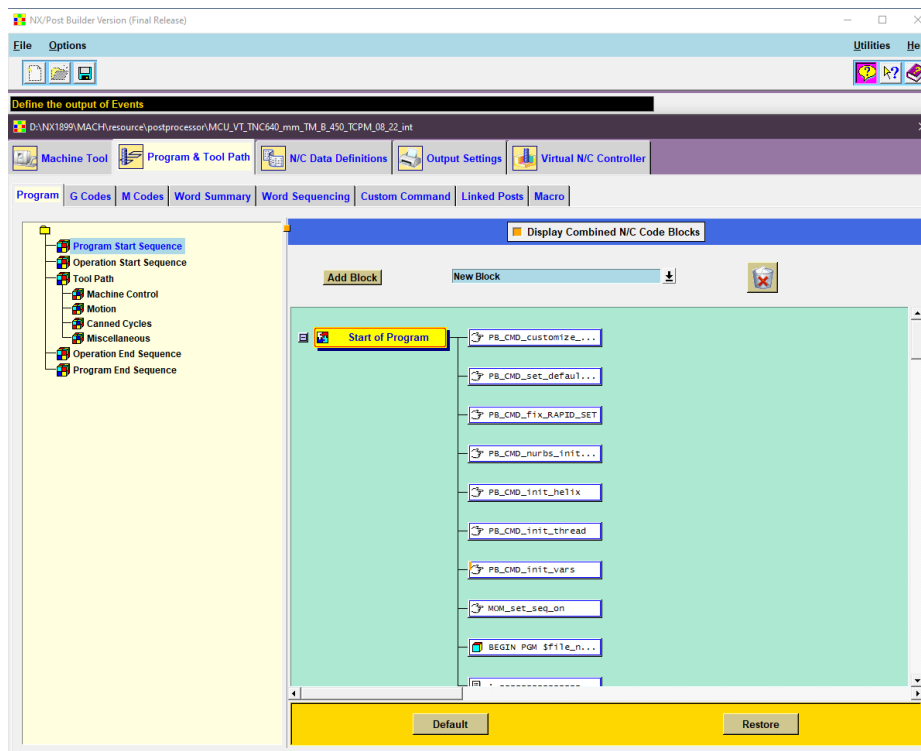
Postprocessor je určitý software, který ve své nejjednodušší formě překládá CL (Cutter Location) data na NC program pro konkrétní stroj a řídicí systém. CL data jsou dráhová a technologická data, se kterými pracuje CAM software. Vzniknou při vygenerování dráhy na základě 3D modelu dílce a obsahují informace o pohybech, přídatných funkcích nebo třeba souřadných systémech. CAM software však vůbec neuvažuje kinematiku reálného stroje, který bude posléze součást vyrábět. Při tvorbě drah je vždy uvažován obrobek statický a veškeré pohyby provádí nástroj. To na reálných strojích ne vždy platí. Příklady nejčastějších kinematik pětiosých obráběcích strojů jsou na Obr. 32. Dalším aspektem, který CL data nezohledňují, je řídicí systém skutečného stroje. Zjednodušeně řečeno syntaxe a názvy či parametry funkcí ve výsledném NC programu se liší v závislosti na řídicím systému. Nakonec se CL data mohou lišit v závislosti na použitém CAM softwaru, ale jsou to data v univerzálním formátu, který řídicí systém nedokáže přečíst. Z těchto informací lze vyvodit závěr, že postprocessor je vždy tvořen pro specifický stroj s jeho řídicím systémem a také pro používaný CAM software. [40] [49]



Obr. 32: Tři základní kinematické konfigurace víceosých obráběcích strojů [50]

CAM software často obsahují doprovodné aplikace pro tvorbu postprocesorů. Postprocesory lze tvořit i univerzální pomocí obecných programovacích jazyků a analýzy CL dat. Postprocessor určený pro konkrétní CAM systém má výhodu v tom, že může pracovat i s proměnnými, jež se explicitně v CL datech nevyskytují – tvorba je tedy snazší a možnosti funkcí podstatně širší. Postprocesory pro Siemens NX používají programovací jazyk TCL (Tool Command Language). Tvorba a úprava postprocesoru pomocí podpůrných aplikací probíhá částečně psaním kódu a částečně v grafickém

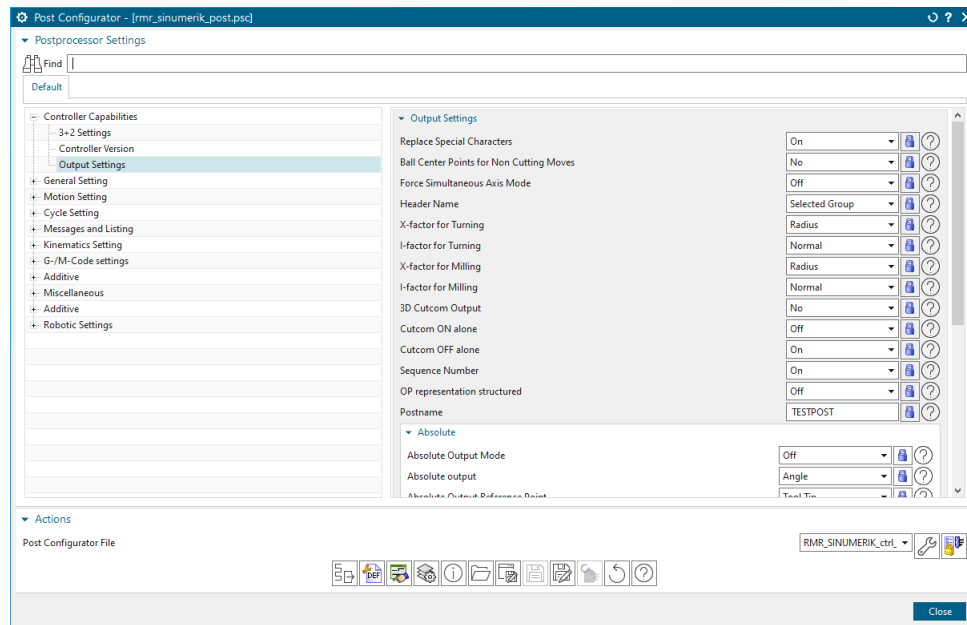
rozhraní. Siemens NX obsahuje dokonce dvě možnosti pro tvorbu postprocesorů určené pro tento CAM software. Starší aplikací je Post Builder, kterou lze vidět na Obr. 33. Jak již bylo zmíněno, kombinuje nastavení v grafickém rozhraní a psaní kódu v textovém editoru. Tato aplikace není momentálně podporována dalším vývojem, ale lze ji stále používat. Značnou výhodou je její přehledná reprezentace toku programu a možnost zásahu téměř do celého zdrojového kódu. [51]



Obr. 33: Okno Post Builder

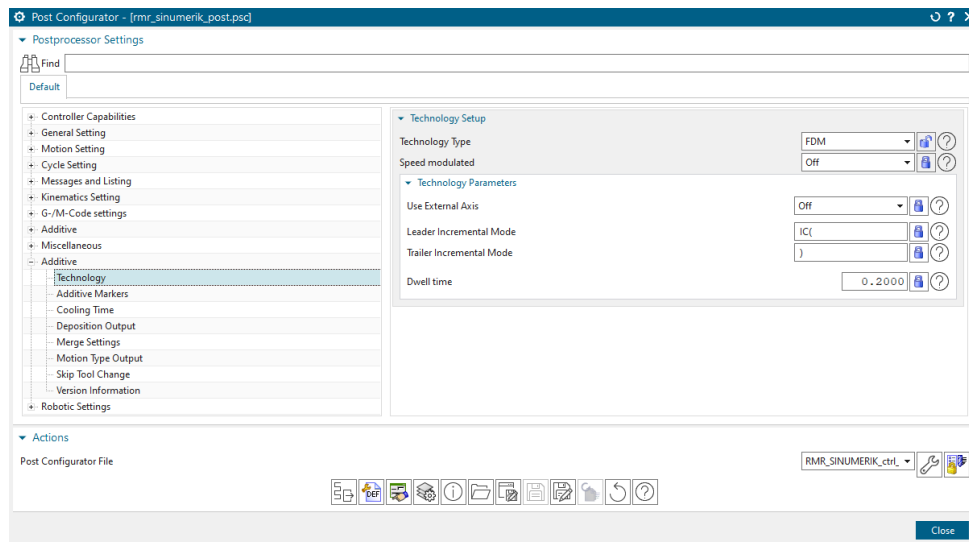
Druhý, novější nástroj pro tvorbu postprocesorů, nese název Post Configurator. Pohled do okna tohoto nástroje je na Obr. 34. Post Configurator je integrován přímo do prostředí Siemens NX CAM a hlavním rozdílem je možnost ovládání postprocesoru koncovým uživatelem pomocí grafického rozhraní. Základní tvorba postprocesoru probíhá právě v grafickém rozhraní a umožňuje poměrně snadno a rychle vytvářet jednodušší postprocesory. Grafické rozhraní je také upravitelné a je možné do něj vkládat další funkce. Další silnou stránkou je modulární přístup ke stavbě postprocesorů. Každý postprocesor vytvořený aplikací Post Configurator se skládá z několika tzv. vrstev. Každá vrstva může obsahovat svoje funkcionality a pokud je kód dobře vytvořen, je teoreticky možné tuto vrstvu s požadovanou funkcionalitou posléze načíst do dalšího

postprocesoru bez potřeby dalších úprav. V případě složitějších postprocesorů může být tvorba pomocí této aplikace poměrně náročná. Pomocí však může portál PostHub obsahující řadu postprocesorů, z nichž je většina dostupná ke stažení bez dalších plateb.



Obr. 34: Okno Post Configurator

Postprocesory mohou ve své rozšířené podobě plnit i další funkce než jen překlad CL dat na NC program. Často je tento krok mezi CAM softwarem a reálným strojem použit pro transformaci souřadnic nebo integraci optimalizačních funkcí. Optimalizačními funkcemi v postprocesorech se zabývá například [52]. V případě této práce se zde nabízí možnost integrace určitých funkcí specifických pro aditivní výrobu. Podrobněji se touto problematikou bude práce zabývat ve vlastním řešení. Za zmínku však stojí dostupnost AM (Additive Manufacturing) vrstvy do postprocesoru, která je dostupná na komunitním portálu PostHub v Siemens NX. Vrstvu lze načíst do postprocesoru, čímž dojde k rozšíření jeho funkčnosti o některé funkce příslušící aditivní výrobě. Podporovány jsou aditivní technologie typu FDM, DED a WAAM. Náhled do okna konfigurace pro FDM technologii je na Obr. 35. Jelikož však tato vrstva neobsahuje řadu funkcí, které bude potřeba vytvořit, a stávající funkce vrstvy není možné upravovat, nebude ve finálním postprocesoru zahrnuta v žádném rozsahu. [53]

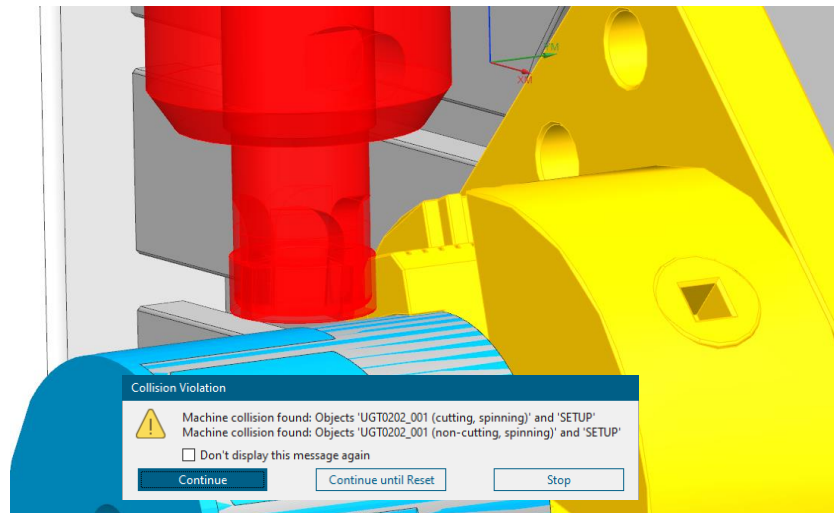


Obr. 35: Okno s nastavením aditivní vrstvy v Post Configurator

6.4 Simulační model s emulátorem řídicího systému v Siemens NX CAM

Verifikace drah a NC programů je důležitou částí řetězce přípravy NC programu. Odbavení programu ve virtuálním světě může pomoci zabránit zničení nástrojů, obrobků, či dokonce strojů. Všechny tyto prvky jsou velmi drahé, takže verifikovat dráhu bez rizika škod je vysoce žádoucí a platí to dvojnásob v případě složitější výroby.

Řezné pohyby lze simulovat na několika úrovních. Nejnižší úroveň je pouze vizualizace pohybu nástroje vůči obrobku bez uvažování jakékoliv kinematiky stroje. Tento způsob slouží pouze pro orientační prvotní ověření, zda se ve vygenerovaných drahách nenacházejí nějaké zásadní chyby. Další úroveň je simulace s kinematickým modelem stroje. Zde si lze už představit reálné pohyby stroje, avšak simulace je stále řízena CL daty, tedy vnitřními daty CAM softwaru. Další úroveň je simulace řízená NC programem. Zde je již možné odhalit chyby, které do programu mohou být vneseny postprocesováním, či jinými vlivy, jako jsou například nesprávně nastavené parametry cyklů. Tato úroveň simulace již není často podporována v CAM systému samotném, jelikož je nutné, aby byl k dispozici tzv. emulátor ŘS. Pokud v CAM systému není tento typ simulace dostupný, tak si uživatelé musejí vybrat z nabídky specializovaných nadstavbových softwarů pro simulaci a verifikaci NC programů. Řada CAM systémů však simulaci s emulátorem ŘS podporuje, včetně Siemens NX. [49]



Obr. 36: Detekovaná kolize při simulaci s emulátorem ŘS

Simulace s emulátorem ŘS (v Siemens NX nazývána CSE – Common Simulation Engine simulation), je nejvyšším nativně podporovaným stupněm simulace obrábění v Siemens NX (bez nároku na externí doplňkový software). Podporována je kontrola kolizí mezi prvky řezného procesu i mezi strojními komponenty nebo simulace úběru materiálu. Detekovaná kolize nástroje s čelistí sklíčidla je zobrazena na Obr. 36. Po nastavení kinematických parametrů jednotlivých strojních os lze tuto simulaci používat pro přesnější predikci strojních časů. Jak již bylo zmíněno dříve, simulace je řízena NC programem. Takovýto simulační model v Siemens NX se skládá ze tří hlavních částí. První částí je kinematický model včetně definice kanálu a kinematických řetězců. Kinematický model se nastavuje přímo v Siemens NX v modulu MTB (Machine Tool Builder). Druhou částí je emulátor řídicího systému – CSE driver. Úpravy se zde provádějí pomocí doprovodné aplikace Machine Configurator. Třetí částí je parser, který čte NC program a volá příslušné příkazy v emulátoru. Parser je implementován v jazyku Python. Strukturálně je toto složení znázorněno na Obr. 37. Všechny tyto části jsou upravitelné, tudíž je možné vytvářet vlastní simulační modely pro CAM software Siemens NX. Postup tvorby je popsán v části vlastního řešení. [49]

Simulační model s emulátorem ŘS		
Siemens NX	Emulátor ŘS	Parser
<ul style="list-style-type: none">• 3D model• Kinematický model• Machine Tool Builder	<ul style="list-style-type: none">• MCF soubor• Podprogramy• Machine Configurator	<ul style="list-style-type: none">• Analyzuje NC kód• Lex & Yacc• Python

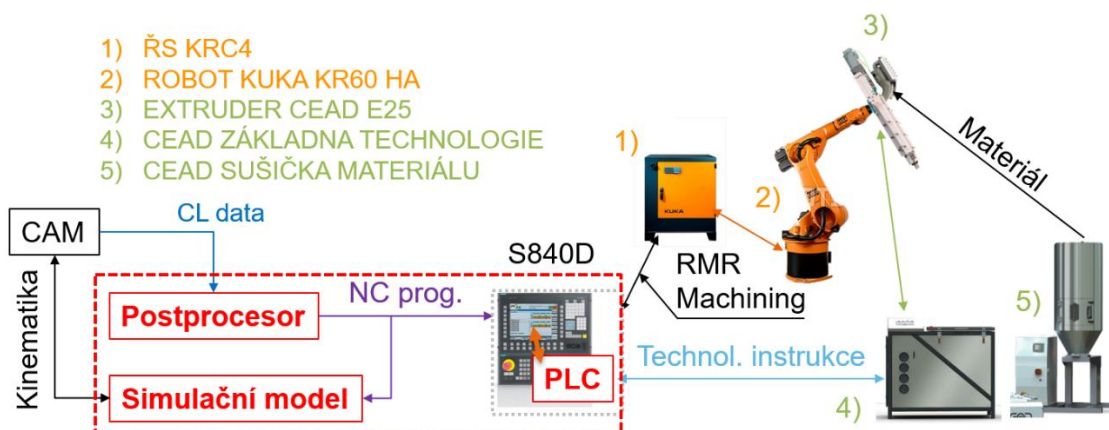
Obr. 37: Skladba simulačního modelu s emulátorem ŘS

7 Shrnutí rešerše

Rešerše předkládá náhled na problematiku hlavních součástí této práce. Představeno je reálné pracoviště, na kterém je tato práce řešena. Použitý robot KUKA KR60 HA je řízen ŘS Sinumerik 840D sl užitím opce Run My Robot Machining. Vzhledem k počáteční konfiguraci pracoviště je zřejmé, že bude potřeba provést úpravy v PLC projektu pracoviště. Přestože je použití robotů pro aditivní technologie již celkem běžné, stále se jedná o poměrně specifické řešení vyžadující odlišný přístup. Oproti obrábění mají aditivní technologie jiné nároky na roboty a bylo by možné říci, že jsou pro aplikaci na robotu vhodnější. Aditivních technologií je celá řada, jednou z nich je metoda FDM. Tato metoda se používá při velkoformátovém polymerním 3D tisku, přičemž technologickou hlavou je šnekový extruder. Vytvořené dílce technologií velkoformátového 3D tisku se nejčastěji uplatňují jako formy v kompozitní výrobě nebo upínací prvky tvarových dílců. Aditivní technologie také čelí rozdílným problémům v samotném procesu. Pro aditivní technologie je na trhu dostupná řada specializovaných softwarů, které jsou však často poměrně uzavřené. Podpora se však rozrůstá i do obecných CAM softwarů. Příkladem je i Siemens NX, který podporuje programování robotů a tvorbu drah pro aditivní technologie. Chybí však řada technologicky potřebných funkcí. Zejména možnost řídit parametry technologie na bázi jednotlivých vrstev, což je potřebné v případě dílců s proměnnými délkami vrstev z důvodu dodržení času na jednu vrstvu a správné kvality nanesených vrstev. Přestože Siemens NX umožňuje generovat dráhy, na kterých je potřeba aktivně měnit otáčky extruderu během jedné vrstvy (například v případě spirálové strategie), neexistuje způsob, jak zmíněné chování získat v NC programu. Chybějící technologické funkce je alespoň z části možné nahradit vhodnou úpravou postprocesoru. Postprocesory pro Siemens NX lze široce upravovat pomocí integrovaných nástrojů. Siemens NX pro programování robotů potřebuje i kinematický model pracoviště, ten lze zároveň použít i pro simulaci s emulátorem ŘS řízenou NC programem. Na základě provedené rešerše byly zjištěny informace a vstupní podklady, podle kterých lze postupovat ve vlastním řešení pro splnění stanovených cílů práce.

8 Vlastní řešení

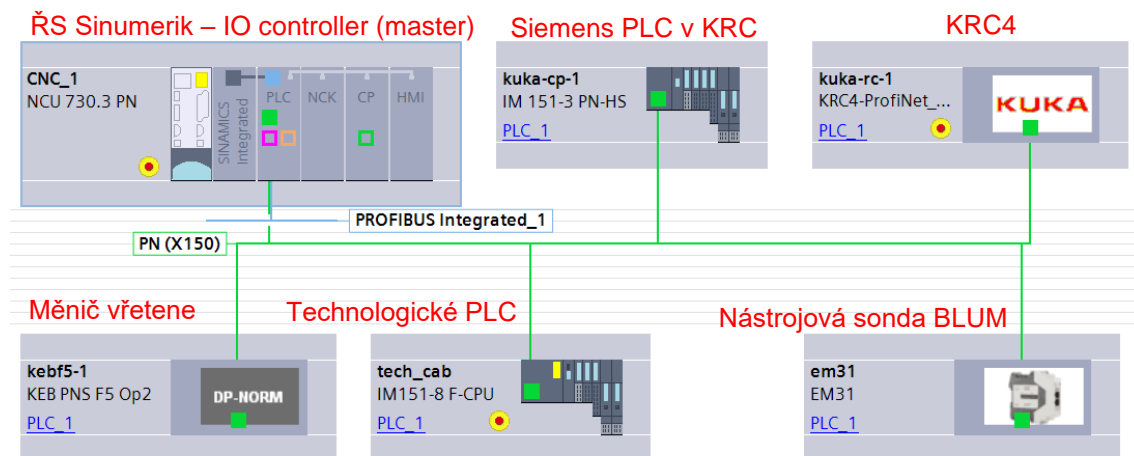
Vlastní řešení se skládá v zásadě ze tří částí. Jednotlivé části postihují tok informací od CAM až po samotné řízení technologie výroby. Díky tomuto kompletnímu pokrytí se lze rozhodnout, kde je nejlepší zahrnout určité funkcionality. První částí je úprava PLC projektu pracoviště, kterou se zabývá následující kapitola. Tuto část je potřeba řešit z důvodu změny konfigurace stávajícího pracoviště a také v návaznosti na následné řešení potřebných funkcí v postprocesoru. Postprocessor je druhou částí vlastního řešení. Stojí mezi CAM softwarem Siemens NX a řídicím systémem pracoviště Sinumerik 840D. Pro jeho tvorbu bude použit modul Post Configurator v Siemens NX, jelikož se jedná o plně podporované moderní prostředí. Postprocessor by měl podporovat vhodné operace dostupné v Siemens NX CAM, různé strategie pro nejdůležitější operace a také nastavení operací s osou nástroje svise i v naklopení. Dále je žádoucí, aby postprocessor sám ze vstupních technologických a geometrických parametrů vypočetl požadované rychlosti pohybu extruderu a otáčky šneku. Při tisku mohou vznikat nedokonalosti na nerovných úsecích, což je potřeba minimalizovat. Za tímto účelem bude řešena optimalizační vrstva v postprocesoru kompenzující rychlost pohybu v zakřivených úsecích. Třetí částí je řešení simulačního modelu s emulátorem ŘS v Simenens NX, který jednak poskytuje kinematický model pro programování drah a jednak umožňuje kontrolu kolizí, dosažitelných souřadnic a celkovou verifikaci vzniklého NC programu. Nakonec bude vyroben testovací dílec ověřující funkčnost pracoviště a vliv optimalizační funkce. Schéma rozsahu řešení je vidět na Obr. 38. Řešené jsou části uvedené v červených rámečcích.



Obr. 38: Schéma řízení pracoviště s vyznačenými řešenými částmi (červeně)

9 Editace PLC projektu

Jak již bylo řečeno, PLC projekt obsahuje kompletní informace o hardwaru, propojení a softwaru jednotlivých prvků celku. Jelikož pracoviště bylo původně vybaveno jako obráběcí, byl robot vybaven frézovacím vřetenem. To se samozřejmě projeví i v PLC projektu pracoviště. Nejdříve proto proběhla analýza stávajícího stavu projektu pracoviště. Původní členy sítě s jejich popisem a propojením jsou uvedeny na Obr. 39. Výsledkem analýzy původního projektu byl první krok úprav, a to umožnění chodu robota s ŘS Sinumerik bez připojeného vřetene. Pokud je totiž v PLC projektu zaveden prvek, který poté není fyzicky dostupný, nastane chyba na Profinet (průmyslová sběrnice) síti a pracoviště není funkční. S vřetenem jsou standardně spojeny určité bezpečnostní funkce. Při odpojení vřetene opět není možné pracoviště použít. Konkrétní úpravy jsou uvedeny v následujících kapitolách.



Obr. 39: Původní konfigurace pracoviště

Tato prvotní integrace nové technologie do pracoviště je zaměřena primárně pro rozběhnutí pracoviště v poloautomatickém režimu. Vzhledem k tomu, že je pracoviště na úplném začátku a zkušenosti s touto technologií jsou na základní úrovni, byl tento přístup určený jako bezpečnější. Záměr je takový, že operátor manuálně technologii rozběhne do stavu, kdy je vytlačován požadovaný materiál, a poté předá řízení ŘS Sinumerik. Ten odbaví program včetně řízení technologie a na konci přejde do čekajícího režimu, který neohrozí technologii, a upozorní operátora, jenž převezme řízení a technologii manuálně odstaví.

9.1 Podklady od dodavatele technologie

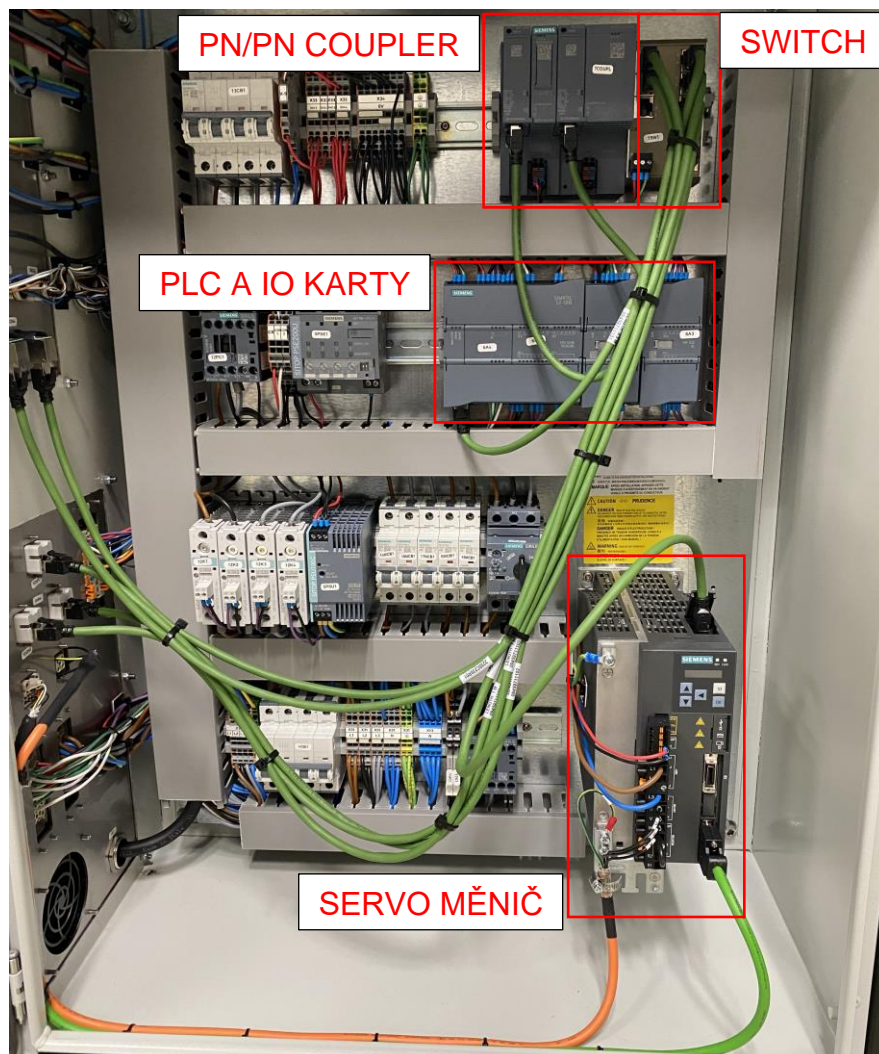
Vývojové prostředí standardně obsahuje knihovnu hardwarových prvků. Nejčastěji se jedná pouze o prvky daného výrobce – v případě TIA Portal jsou k nalezení v knihovně prvky od výrobce Siemens. Často se však v řešeních používají i prvky třetích stran, tedy od odlišného výrobce. V tom případě je potřeba získat tzv. GSD (General Station Description) nebo GSDML (General Station Description Markup Language) soubor. Pro zařízení používající sběrnici Profinet se používá právě druhá varianta, která si zakládá na jazyku XML. Obsah těchto souborů popisuje zařízení třetí strany tak, aby ho bylo možné zahrnout do hardwarové konfigurace. Název souboru musí být dle specifikace Profinet. Dodavatel technologie extruderu, společnost CEAD, poskytuje právě tento soubor spolu s tabulkou příslušných tagů (proměnných) pro navázání komunikace.

Jejich řešení se skládá ze základní jednotky (viz Obr. 40), obsahující veškerou logiku, HMI (Human Machine Interface), silové prvky a malý zásobník na granulát. K základní jednotce se poté připojuje samotný extruder a popřípadě další volitelné periferie jako vyhřívané tiskové podložky nebo sušička, sloužící zároveň jako druhý zásobník a zdroj materiálu.



Obr. 40: Základní jednotka technologie a v pozadí sušička materiálu

Díky opsi PN (Profinet) – Full je základní jednotka vybavena tzv. PN/PN Couplerem, který spojuje dvě Profinet sítě. Jedna síť je interní v základní jednotce technologie extruderu a druhá je Profinet síť pracoviště. Do vnitřní sítě a softwaru není možné zasahovat, jediné, co je po přepnutí řízení technologie na Profinet možné, je zapisovat a číst předdefinované adresy, které jsou s příslušnými funkcemi uvedeny v tabulce použitelných adres a tagů. PN/PN Coupler poté tlumočí data mezi dvěma sítěmi bez jejich vzájemného propojení. Popis řídicích prvků uvnitř rozvaděče je na Obr. 41.



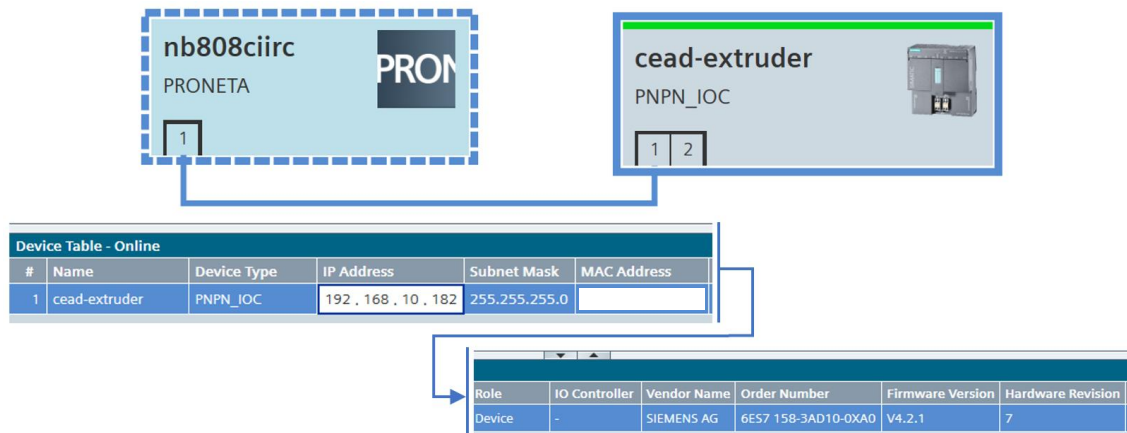
Obr. 41: Řídicí prvky v rozvaděči základní jednotky technologie

9.2 Hardwarová konfigurace

Nyní již k vlastním úpravám pomocí softwaru TIA Portal. První úpravy se týkají hardwaru. Odebrání původního měniče k vřetenu je jednoduché. Stačí ho v hardwarové konfiguraci odebrat z podsítě a odpojit ho od IO (Input Output)

controlleru, kterým je PLC v NCU Sinumerik. V tuto chvíli již nebude toto PLC hledat na síti zmíněný měnič a provoz sítě bude v pořádku. Měnič vřetena však v projektu zůstal, jednak kvůli možnosti jeho opětovného použití například pro spolupráci vřetena s extruderem do budoucna, a také z důvodu zachování informace pro další úpravy, aby bylo pochopitelné, k čemu určité funkce směřují. Fyzicky je nyní možné odpojit měnič od sítě.

Profinet coupler v základní jednotce technologie je dodáván s předdefinovanou IP adresou 192.168.0.17. Síť pracoviště však používá podsít 192.168.10.XX. Proto není možné nově přidané zařízení přidat do této podsítě, alespoň ne s použitou maskou podsítě 255.255.255.0. Pro změnu IP adresy volné strany coupleru je možné se na tento ethernet port připojit počítačem s příslušným konfiguračním programem. V tomto případě byl použit software Siemens Proneta, s jehož pomocí byla nastavena IP adresa tohoto portu na 192.168.10.182. To je vidět na Obr. 42. Tímto je zařízení fyzicky připraveno na integraci do pracoviště.



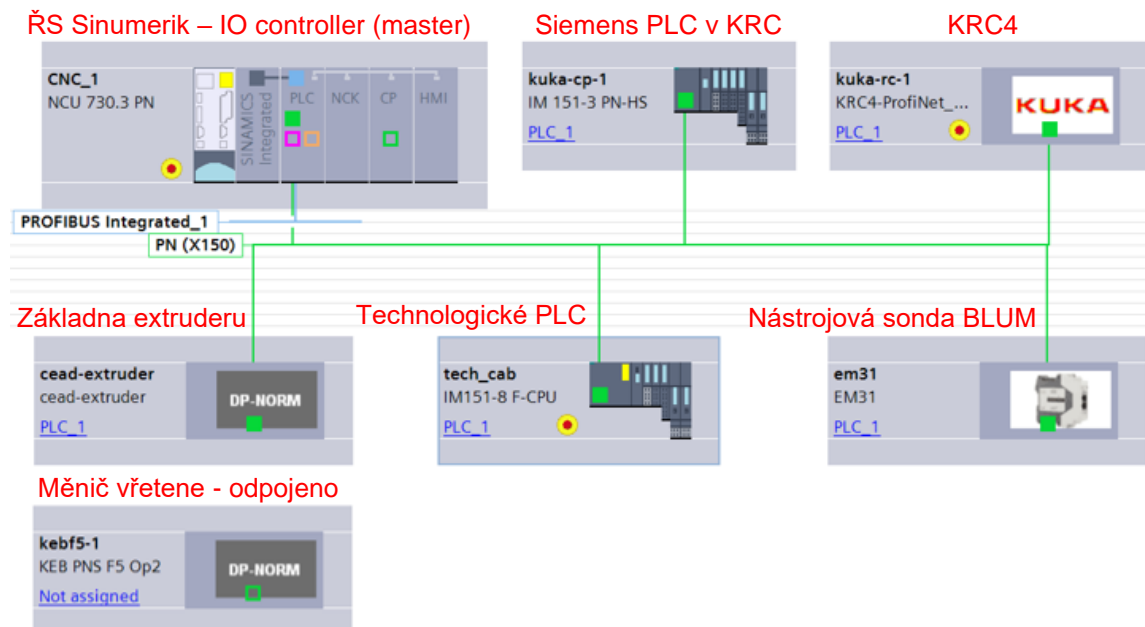
Obr. 42: Nastavení IP adresy pomocí softwaru Proneta

Po předchozím importu GSDML souboru od dodavatele je nyní možné z hardwarového katalogu v TIA Portalu přetáhnout položku cead-extruder z kategorie PN/PN Coupler do pohledu hardwarové konfigurace. Následuje nastavení IP adresy tohoto prvku dle dřívějšího nastavení v softwaru Proneta. Posledním konfiguračním krokem tohoto prvku je nastavení rozsahu adres pro toto zařízení. Při přepnutí do zobrazení Device view v TIA Portalu jsou v pravé části obrazovky vidět tabulky s komponenty a adresami. Zde jsou již vidět dvě komponenty představující příjem a odesílání dat mezi sítěmi, které tento

coupler spojuje. Kritické je nastavit tyto adresy tak, aby nedošlo ke konfliktu s již dříve použitými adresami. Z toho důvodu byly nastaveny adresy vstupů i výstupů tak, že začínají číslem 500 a končí dle potřebné velikosti přenášených dat v příslušném směru. Nastavení těchto adres je vidět na Obr. 43. Velikost dat odpovídá tabulce proměnných od dodavatele. Coupler poté přeloží adresy na straně pracoviště, jež jsou nyní nastaveny, na adresy používané v interní síti technologické základny dle dodané tabulky. Adresa Q500.0 na straně pracoviště tedy odpovídá adrese IO.0 na straně technologie. Jestli se jedná o vstup nebo výstup, se určuje vždy dle pohledu IO controlleru v dané síti. Pro připojení zařízení do sítě Profinet je potřeba vybrat IO controller, v tomto případě PLC_1, nacházející se v NCU Sinumerik. Po nahrání této konfigurace do PLC již bude zapotřebí mít fyzicky připojenou základnu technologie pomocí sběrnice Profinet. Finální hardwarová konfigurace je na Obr. 44.

Device overview					
Module	Sl...	I address	Q address
▶ cead-extruder			0 0	16361*	
▼ *send-io_1			0 1		500...539
*send-io			0 1 1		500...539
			0 1 2		
			0 1 3		
			0 1 4		
▼ *receive-io_1			0 2	500...543	
*receive-io			0 2 1	500...543	

Obr. 43: Nastavení adres pro PN/PN coupler



Obr. 44: Výsledná konfigurace a propojení pracoviště

9.3 Softwarové úpravy

V síti pracoviště se nachází více PLC. Každé PLC má svůj program. První a jediná úprava, kterou je potřeba provést v PLC pojmenovaném tech_cab, je obejít bezpečnostního vstupu z hlídání vřetene. Toto PLC se nachází v rozvaděči spolu s měničem a obsahuje safety (bezpečnostní) karty. Tyto karty jsou v reálné rovině i v rovině TIA Portalu označeny žlutě pro snadnou identifikaci.

-A20-2			
	Name	Data type	Address
1	E_Stop_ch1	Bool	%I10.0
2	Converter_enable	Bool	%I10.2
3	Tool_rack_enable	Bool	%I10.3
4	E_Stop_ch2	Bool	%I10.4
5	Gates_unlock	Bool	%I10.6
6	Converter_stop	Bool	%I10.7
7	Standstill_ch1	Bool	%M10.1
8	Standstill_ch2	Bool	%M10.5

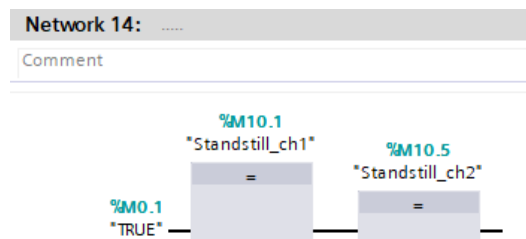
Obr. 45: Odpojení proměnných od fyzického vstupu

tyto proměnné izolují od stavu ve skutečném světě. Hodnota bezpečnostních digitálních vstupů ve funkčním stavu je zpravidla 1 (TRUE, HIGH). Na tuto hodnotu je nutné dotčené tagy nastavit. Za tímto účelem je do hlavního programu vložena část kódu na Obr. 46. V tomto stavu je již možné pracoviště používat bez připojeného vřetene, s robotem je možné hýbat apod.

CEAD_E25			
	Name	Dat...	Address
1	Rotation_enable	Bool	%Q500.0
2	Heaters_enable	Bool	%Q500.1
3	Transport_enable	Bool	%Q500.2
4	Empty_hopper_alarm_overwrite	Bool	%Q500.3
5	Filter_shot_counter_reset	Bool	%Q500.4
6	Stop_buzzer	Bool	%Q500.5
7	Start_buzzer	Bool	%Q500.6
8	Cabinet_storage_alarm_enable	Bool	%Q500.7
9	Request_parking	Bool	%Q501.0
10	Bed_1_heating_enable	Bool	%Q501.1
11	Bed_2_heating_enable	Bool	%Q501.2
12	Acknow_errors	Bool	%Q501.3
13	Pellet_source	Int	%QW502
21	Heating_bed_1_setpoint	Real	%QD532
22	Heating_bed_2_setpoint	Real	%QD536
23	Rotation_active	Bool	%I500.0
24	Heaters_active	Bool	%I500.1

Obr. 47: Náhled tabulky proměnných pro komunikaci s technologií

Úprava pro zprovoznění pracoviště bez připojeného vřetene je zde poměrně jednoduchá. Dle dokumentace pracoviště je možné identifikovat blokující bezpečnostní vstupy z hlídání vřetene a v tabulce proměnných je nahradit adresou typu Memory (paměť) namísto původního Input (vstup), jak je k vidění na Obr. 45. Tím se



Obr. 46: Nastavení konstanty TRUE do paměťových proměnných

Všechny ostatní úpravy se již odehrávají v PLC_1, které je součástí Sinumerik NCU. Dle tabulky proměnných od dodavatele je vytvořena tabulka tagů v tomto PLC s odpovídajícími datovými typy a adresami. Tyto proměnné jsou poté použity jakožto komunikační rozhraní s technologií. Náhled tabulky tagů je na Obr. 47.

Mezi další přípravné kroky patří příprava funkčních bloků pro detekci vzestupné a sestupné hrany a RS klopný obvod. Dále je potřeba si uvědomit, o co je potřeba logiku rozšířit. Z pohledu napojení na Sinumerik je potřeba řešit určité nové M funkce, H funkce a změnit nakládání s informacemi S adresy. Ostatní funkční rozšíření se zabývají hlídáním a určitou komunikací s operátorem pracoviště. Záměrem je také co nejméně zasahovat do již funkční logiky a tvořit převážně nadstavbové funkce, jež nejsou v konfliktu s již zavedenými.

Nově vytvořené funkce jsou přidány v organizačních jednotkách typu funkcí, které jsou poté volány z hlavního programu. Je to uděláno tímto způsobem z důvodu přehlednosti a také kvůli tomu, že hlavní program je vytvořen v jazyku IL (Instruction List). Přívětivější je použití jazyku strukturovaného textu, jež používají všechny vytvořené funkce. Nové funkce jsou červeně zvýrazněny na Obr. 48.

```
Network 3: user program
Comment
1
2 CALL "Fc_Reset_variables_after_chan_reset"
3 CALL "Fc_CEAD_alarms"
4 CALL "FcRunToKEB"
5 CALL "FcTechCabIO"
6 CALL "FcGuardDoors"
7 CALL "FcEStop"
8 CALL "Fc_HAddressHandler"
9 CALL "Fc_Screw_rpm"
10 CALL "Fc_ExtruderMFunctions"
```

Obr. 48: Volání přidáných funkcí v hlavním programu

První funkce plní jednoduchý účel. Po stisku tlačítka Reset na ovládacím panelu nastaví určité proměnné v datovém bloku Chan1 na výchozí stav. Toto se standardně neděje a v tomto datovém bloku zůstávají poslední nastavené hodnoty, což může způsobit řadu problému. Například se může stát, že v klidovém režimu se bude stále vyhodnocovat určitá podmínka k některé z M funkcí. Datový blok Chan1 [DB21] je pro řešení této práce podstatný, jelikož se do něj propisují informace z NC části Sinumerik. Jsou to různé stavy, hodnoty funkcí v NC programu apod. Druhá část této funkce resetuje určité hodnoty nastavené v tabulce tagů pro extruder ve chvíli, kdy se spustí program v automatickém režimu. Reset těchto hodnot je proveden při spuštění, protože

po dokončení programu je žádoucí, aby zůstaly nastavené parametry jako jsou teplota, aktivace nahřívání a otáčení do chvíle, než operátor manuálně odstaví technologii. Proto není možné hodnoty resetovat na konci programu.

Druhá funkce zastává snadnou, ale zásadní úlohu. Interně má technologická základna svou diagnostiku a je schopna posílat chybové a varovné hlášky. Tato hlášení jsou poté v řešené funkci použita pro aktivaci alarmů v ŘS Sinumerik. K tomu je použit datový blok ALMSG_DB, konkrétně skupina UserA[26]. V této skupině je možné aktivovat až 64 alarmů, přičemž prvních 32 je považováno za chybové (Fault) alarmy a zbytek jsou operativní alarmy. Chybové alarmy jsou tedy spojeny s chybovými proměnnými technologie a operativní alarmy s varováními. Pro správnou funkčnost je nutné ještě přímo v HMI definovat potřebné texty jednotlivých alarmů, jinak se po nastavení hodnoty v datovém bloku na TRUE objeví nic neříkající alarm pouze s jeho číslem. Obsah alarmové hlášky je potřeba vyplnit do souboru alarms_oem uvnitř souborové struktury Sinumerik. Textové vstupy se vkládají v konkrétním tvaru, jak je vidět na Obr. 49.

```
<message>
  <source>702638/PLC/PMC</source>
  <translation>CEAD - WARN Operation mode HMI</translation>
</message>
<message>
  <source>702640/PLC/PMC</source>
  <translation>CEAD - ERR Servo missing</translation>
</message>
```

Obr. 49: Formát textu alarmu v Sinumerik

V prvním řádku je uveden kód alarmu a druhý řádek obsahuje samotný text chybové hlášky.

V pořadí třetí funkce se stará o zpracování informací z H funkcí nacházejících se v NC programu. H funkce jsou zde použity pro nastavování teplot jednotlivých teplotních zón. Sinumerik čte obsah jednotlivých NC bloků a jejich obsah určený pro PLC ukládá do datového bloku Chan1. Vytvořená funkce poté nastavuje pro H funkce 1 – 4 jejich příslušné hodnoty do proměnných

```
IF "Chan1".ExtH1 = 2 THEN
  "Heatzone_2_setpoint" := "Chan1".H1;
END_IF;
IF "Chan1".ExtH1 = 3 THEN
  "Heatzone_3_setpoint" := "Chan1".H1;
END_IF;
IF "Chan1".ExtH1 = 4 THEN
  "Heatzone_4_setpoint" := "Chan1".H1;
END_IF;
IF "Chan1".ExtH2 = 1 THEN
  "Heatzone_1_setpoint" := "Chan1".H2;
END_IF;
```

Obr. 50: Náhled funkce nastavující H adresy

určených pro technologii. Náhled na část kódu je na Obr. 50. Informace o otáčkách je řešena v předposlední funkci. Je však implementována velmi jednoduše. Z datového bloku Chan1 je čtena hodnota proměnné S1, která reprezentuje hodnotu adresy S v NC programu. Tato hodnota je posléze nastavena do příslušné proměnné pro ovládání technologie.

Jednoznačně nejobsáhlejší funkcí je ta poslední. Je pravdou, že by část kódu z této funkce bylo lepší vložit do jiných funkcí, ale kvůli tomu, že navazuje na příkazy řešené zde, byly tyto části ponechány. Primární funkcí je řešení M funkcí. V prvním kroku implementace nejsou pokryty všechny ovládací možnosti technologie, ale jejich doplnění v budoucnu již nebude problém, díky zavedené logice. Je potřeba počítat s tím, že M funkcí může být v jednom NC bloku až pět. Příklad jedné z funkcí, která nastavuje zdroj materiálu na základě M funkce M100 je na Obr. 51.

```
//Search for M100 - material source 1
IF "Chan1".M1 = 100 OR "Chan1".M2 = 100 OR "Chan1".M3 = 100 OR "Chan1".M4 = 100 OR "Chan1".M5 = 100 THEN
  "Pellet_source" := 1;
END_IF;
```

Obr. 51: Náhled podmínky pro řešení přidanych technologických M funkcí

V případě funkce M3 je kód trochu složitější. Navíc je zde přidáno hlídání, zda je extruder připraven k použití. Tento stav nastává, když jsou dosaženy nastavené teploty a skončil časovač temperace extruderu. Jestliže tento stav není splněn, zastaví se program na tomto místě a čeká na splnění podmínky. Pozastavení je docíleno pomocí alarmu ze skupiny Chan[1].RID. Dále je také vyhlášen uživatelský alarm oznamující, proč program stojí. Část programu postihující toto chování je na Obr. 52.

```
//Search for M3 - enable rotation, IF extruder not ready set channel wait, set alarm and wait for extruder to be ready
IF "Chan1".M1 = 3 OR "Chan1".M2 = 3 OR "Chan1".M3 = 3 OR "Chan1".M4 = 3 OR "Chan1".M5 = 3 THEN
  IF "Extruder_ready_to_use" THEN
    "Program_wait_request" := 0;
    "Rotation_enable" := 1;
  ELSE
    "Rotation_enable" := 0;
    "Program_wait_request" := 1;
  END_IF;
END_IF;

"RS_Program_wait_for_extr_ready"(SET := "Program_wait_request",
  RESET := "Extruder_ready_to_use" OR "Chan1".E_ChanReset OR "Extruder_check_override",
  Q => "Wait_for_extruder_active"
);

"ALMSG_DB".Chan[1].RID[0] := "Wait_for_extruder_active";
"ALMSG_DB".UserA[25].A70UUX[32] := "Wait_for_extruder_active";
```

Obr. 52: Funkce pro zapnutí otáček s hlídáním signálu připravenosti technologie ze základní jednotky technologie

Ne vždy je vhodné mít tyto ochrany aktivní, například v případě, že je potřeba odbavit program bez aktivní technologie (např. pro verifikaci dráhy či ladění). Pro vyřešení tohoto stavu slouží funkcionalita, využívající tlačítko na MCP (Machine

Control Panel) a na přenosném ovládání HPU (Handheld Programming Unit). V případě stisku tlačítka 3 (se svítící kontrolkou na Obr. 53) dojde k vyřazení funkce hlídající připravenost extruderu. To umožňuje odbavovat program i bez připravené technologie a například pokračovat v odbavování programu při manuálním ovládání technologie na základní jednotce technologie.



Obr. 53: Ovládací rozhraní Sinumerik (MCP)

Dostupná tlačítka byla použita i pro další manuální funkcionality. Tlačítko 2 na MCP a tlačítko 2 na HPU (viz Obr. 54) slouží pro vyslání signálu umlčení zvukového alarmu v základní jednotce technologie a kvitování chyby. Poslední konfigurované tlačítko slouží pro manuální zapnutí a vypnutí otáčení extruderu. Pokud by například bylo potřeba vypnout tisk v průběhu dráhy, je vhodné nejdříve vypnout extruzi a udržovat extruder v pohybu. Tím se zamezí možnosti, že by bylo bráněno odvodu materiálu z trysky. Poté lze zastavit program, přičemž dojde k automatickému nastavení otáček zpět na hodnotu otáček „klidových“ (5 ot/min). Následně již lze odjet od tvořené součásti a pomocí tlačítka aktivovat otáčení extruderu, aby materiál nebyl dlouho statický v extruderu a nedošlo k jeho degradaci. Tato funkce je navázána na tlačítko 1 na MCP a na tlačítko 1 na HPU.



Obr. 54: Přenosné ovládání HPU

Z důvodu degradace materiálu v extruderu a z toho vyplývající možnosti nenávratného poškození extruderu je potřeba dodržovat určitá pravidla. Jednak nesmí být extruder dlouho nahřátý s tiskovým materiálem bez otáčení vřetene, a jednak je potřeba dodržovat určité minimální otáčky. Dodavatel technologie udává, že maximální doba, kdy může extruder s nahřátým tiskovým materiálem stát bez otáčení je 5 až 10 minut. Minimální otáčky jsou udány hodnotou pěti otáček za minutu. Tyto hodnoty však záleží na konkrétním materiálu. Pro snížení rizika poškození byly časy pro varování navrženy tak, že je uživatel varován po 30 sekundách nedodržení jedné z těchto podmínek pouze varovným alarmem na panelu. Po 60 sekundách se objeví na panelu hláška chybová a rozezní se alarm upozorňující operátora, že je potřeba dohled nad pracovištěm. Poslední časovač je nastaven na 90 sekund. Chybový alarm je opět doprovázen zvukovým signálem. V tuto chvíli je očekáván zásah od operátora v případě, že se nejedná o požadované chování. Funkce pro hlídání minimálních otáček funguje identicky, jen vstupní podmínky se liší. Každý alarm obsahuje i příslušnou časovou hodnotu, jak dlouho byla daná podmínka porušena. Zvukový alarm je možné kvitovat pomocí tlačítek popsanych dříve. Pokud však nedojde k odstranění závady, rozezní se alarm znovu po deseti sekundách. Obr. 55 nabízí náhled na tuto funkci.

```
"Extruder_ready_and_stopped" := "Extruder_ready_to_use" AND NOT "Rotation_active";  
  
"TON_extr_ready_and_stopped_first_time".TON(IN:="Extruder_ready_and_stopped",  
PT:=T#30s);  
  
"TON_extr_ready_and_stopped_second_time".TON(IN:="Extruder_ready_and_stopped",  
PT:=T#60s);  
  
"TON_extr_ready_and_stopped_third_time".TON(IN:="Extruder_ready_and_stopped",  
PT:=T#90s);  
  
"ALMSG_DB".UserA[25].A70UUxx[34] := "TON_extr_ready_and_stopped_first_time".Q;  
"ALMSG_DB".UserA[25].A70UUxx[22] := "TON_extr_ready_and_stopped_second_time".Q;  
"ALMSG_DB".UserA[25].A70UUxx[23] := "TON_extr_ready_and_stopped_third_time".Q;
```

Obr. 55: Funkce pro hlídání času, kdy extruder stojí nahřátý.

Jelikož je technologie momentálně integrována s velkým podílem uživatelského vstupu, a to zejména kvůli malým zkušenostem s touto technologií a s postupným zaváděním technologie na pracovišti, počítá se s tím, že operátor manuálně technologii odstaví po doběhnutí programu. Pro jeho upozornění o tomto stavu je opět použit zvukový alarm v základně technologie. Spuštění této logiky je založeno na vzestupné hraně proměnné E_M30 v datovém bloku Chan1. Tato proměnná přejde do stavu TRUE, pokud Sinumerik detekuje v bloku funkci M30. Část kódu postihující tuto funkci je na Obr. 56.

```
"R_TRIG_M30"(Signal := "Chan1".E_M30);  
IF "R_TRIG_M30".Q THEN  
    "Rotation_start" := 0;  
    "Rotation_stop" := 0;  
END_IF;  
  
"TP_M30".TP(IN := "Chan1".E_M30,  
            PT := T#500ms);  
  
"Start_buzzer" := "TP_M30".Q AND "BAG".E_AUTO;
```

Obr. 56: Spuštění alarmu po dokončení programu

Poslední funkcionalita řeší stav, kdy nedojde k řádnému dokončení programu. V případě řádného dokončení programu je na konci programu díky postprocesoru vypsáno nastavení otáček extruderu na pět otáček za minutu a zapnutí otáčení. Takto to je zatím zavedeno z důvodu snížení rizika poškození extruderu. V případě, že dojde k přerušení chodu programu před dosažením jeho konce, tedy funkce M30, je zapotřebí realizovat řízený zásah. Pokud by tak nebylo učiněno ze strany PLC, pokračoval by extruder ve vytlačování materiálu posledními nastavenými otáčkami. Zároveň je předpokládáno, že k onomu předčasnému zastavení programu došlo ze strany uživatele. Extruder lze tedy zastavit s tím, že hlídání času je stále aktivní. Otáčky se automaticky nastaví na hodnotu 5 ot/min, což umožňuje rychleji opětovně spustit extruder, aby byl čas stání co nejkratší. O to se stará část kódu znázorněná na Obr. 57.

```
"R_TRIG_program_user_stop"(Signal:=(("Chan1".E_ProgRunn OR "Chan1".E_ProgWait) AND("R_TRIG_NC_STOP".Q OR  
    "R_TRIG_A_reset".Q)) OR ("Chan1".E_ProgStop AND "R_TRIG_A_reset".Q) );  
  
IF "R_TRIG_program_user_stop".Q THEN  
    "Screw_RPM_setpoint" := 5;  
    "Chan1".S1 := 5;  
END_IF;
```

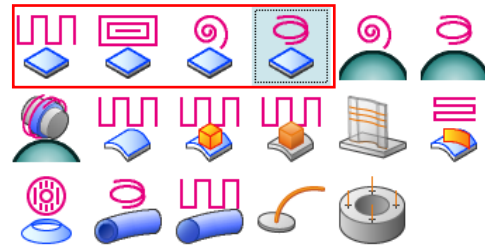
Obr. 57: Sekvence při zastavení programu v průběhu dráhy

10 Tvorba postprocesoru

Jak již bylo řečeno, postprocesor slouží primárně pro překlad obecných CL dat na NC program pro konkrétní konfiguraci stroje a řídicího systému. V tomto případě je používán CAM systém Siemens NX, který obsahuje nástroj pro tvorbu postprocesorů, Post Configurator. Konkrétní konfigurací, pro kterou je postprocesor vytvořen, je robot KUKA KR60HA, řízený pomocí ŘS Sinumerik 840D sl. Robot nese technologickou hlavu pro velkoformátový 3D tisk – extruder CEAD E25. Postprocesor je přizpůsoben tak, aby zvládnul pokrýt co nejvíce možností, jež jsou v Siemens NX pro tuto technologii dostupné. Dále také co nejvíce usnadnit programátorovi práci s nastavením operací.

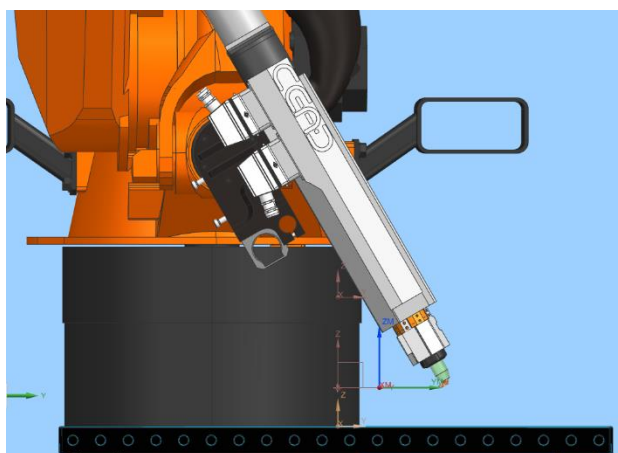
Před samotnou tvorbou je potřeba definovat, jaké náležitosti a funkce má postprocesor obsahovat. Zprv je to podpora operací, jež byly vyhodnoceny jako vhodné pro tuto technologii. Důležité operace jsou v červeném rámečku

na Obr. 58. První tři jsou operace s různými druhy výplní, které se však příliš často nepoužívají. Nejvíce využívaný je přístup tisku skořepin. Pro tento postup je určena operace Planar Thinwall. Je u ní tedy



žadoucí podpora obou možných strategií a stejně tak i práce pod naklopením, kdy je

Obr. 58: Vhodné operace pro použitou technologii

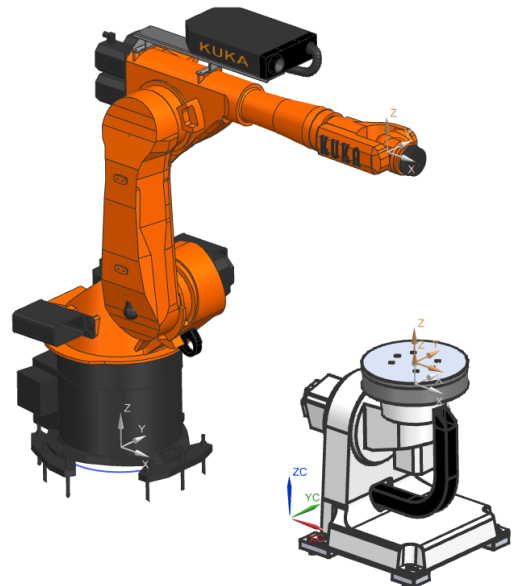


Obr. 59: Programování operace s naklopeným extruderem

obsahovat všechny zásadní informace o programu. Ta je zde velmi důležitá, jelikož v hlavičce NC programu je potřeba vypsát i technologické parametry, které jsou poté posílány do PLC a řídí technologii. Pro zadání technologických parametrů lze použít UDE (User Defined Event). Část z těchto parametrů je poté

použita pro automatický výpočet posuvové rychlosti a otáček extruderu pro jednotlivé vrstvy. To jednak představuje usnadnění pro programátora, ale také umožňuje dodržet konstantní čas jedné vrstvy v případě proměnlivých délek jednotlivých vrstev. Tím pádem je možné vytvářet dílce, které bez tohoto postprocesoru není možné při použití Siemens NX vytvářet. Čas jedné vrstvy je vstupním parametrem této technologie, jelikož následující vrstva musí být nanesena na vrstvu předchozí v určitém rozmezí teplot, takže v daném čase. Dále je zde otázka rychlosti posuvu na zakřivených úsecích. Funkce zabývající se touto problematikou bude vytvořena jako volitelná k základní funkčnosti postprocesoru.

Při tvorbě postprocesoru se většinou nezačíná úplně od nuly, přestože to možné je. Nejčastěji se nalezne postprocesor, jenž se co nejvíce podobá kýženému výsledku. Siemens NX obsahuje řadu vzorových strojů s postprocesory a simulačními modely. Jako výchozí postprocesor pro toto řešení byl zvolen postprocesor z příkladového stroje KUKA KR60 L30 2X POSITIONER DKP400. Jedná se o robota KUKA s otočně sklopným polohovadlem. K dispozici je zde postprocesor a simulační model pro nativní řídicí systém KRC, ale i ŘS Sinumerik. Pohled na tento vzorový stroj je na Obr. 60.

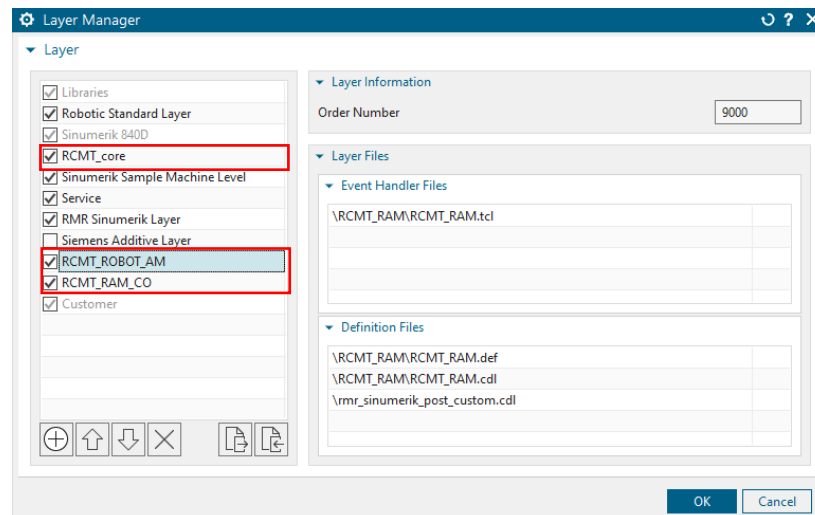


Obr. 60: Vzorové pracoviště výchozího postprocesoru

10.1 Úpravy v rozhraní Post Configurator

Post Configurator se spouští z aplikace Manufacturing v Siemens NX, kde se nachází v podmenu More. Základní úpravy se provádějí pomocí grafického dialogového okna. Jelikož je vybráný výchozí postprocesor blížký řešenému, úprav je zde minimum. Důležitá je přítomnost vrstvy RMR Sinumerik Layer, která se stará o rozšíření postprocesoru o funkce pro roboty řízené Sinumerikem. Na vrstvách si zakládá filozofie Post Configuratoru. Jsou to organizační části

samotného postprocesoru, které mohou obsahovat vše – procedury v jazyce TCL, definiční soubory s formáty bloků a slov i UDE – uživatelské ovládací prvky. Vrstvy je možné snadno exportovat a importovat, čímž je možné značně urychlit tvorbu následujících postprocesorů. Správa vrstev se provádí v Layer Manageru. Zde je také první úprava, a sice deaktivace rozšiřující vrstvy Siemens Additive Layer. Leč vrstva přináší určitá rozšíření z pohledu aditivních technologií, téměř ničím nepřispívá k řešení tohoto konkrétního postprocesoru, navíc jsou soubory v této vrstvě již kompilované, takže do nich není možné zasahovat. Pohled do okna správce vrstev včetně deaktivované vrstvy a již přítomných vrstev nových, které jsou zvýrazněny v rámečku, je na Obr. 61. Při postprocesování jsou informace z jednotlivých vrstev uvažovány shora dolů. Pokud by se jedna procedura upravila vícekrát, bude použita verze z posledního výskytu.

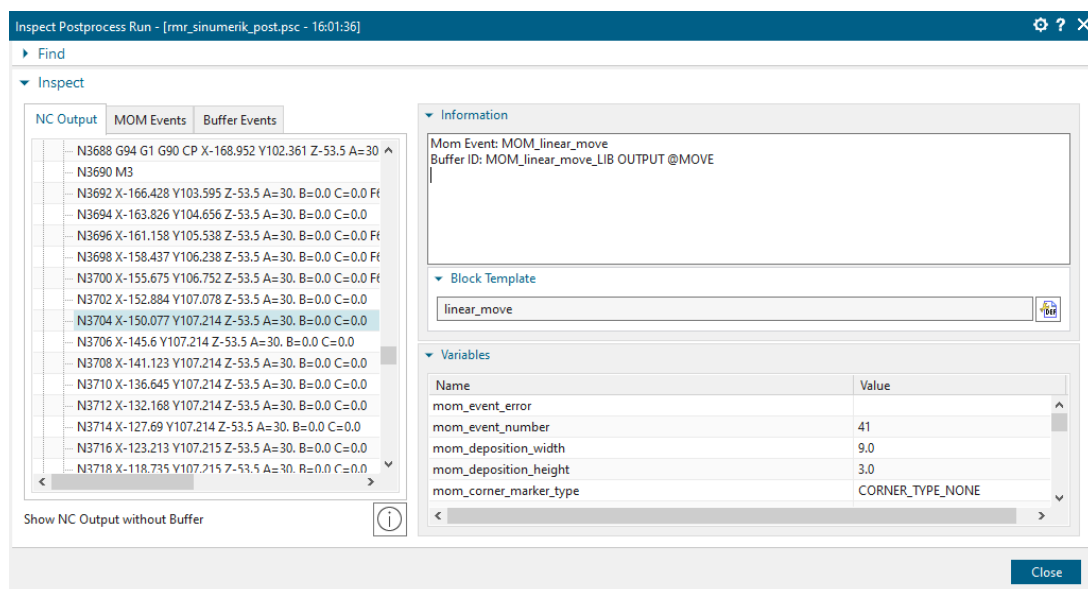


Obr. 61: Správce vrstev Post Configurator

V grafickém prostředí je potřeba ještě provést několik úprav. V kategorii Output Settings je vhodné aktivovat možnost výpisu cyklu 800. Jedná se o cyklus pro práci v nakloněných rovinách. Tato možnost je nově nastavena na All Except ZM, což v důsledku znamená, že kdykoliv bude konfigurace operace taková, že extruder nebude rovnoběžně s osou Z souřadného systému obrobku, bude vypsaný cyklus 800 s příslušným nakloněním. Souřadnice pohybu se posléze vypisují v nakloněném souřadném systému. Cyklus 800 je opce, ale ne vždy je k dispozici, v tomto případě je v ŘS aktivována. Podrobněji o cyklu 800 pojednává [54].

Vzhledem k povaze pracoviště je dále deaktivován výpis chlazení (funkce M8). Toto nastavení se nachází v kategorii General Setting – Coolant – Coolant Auto. Jelikož je aditivní část postprocesoru řešena víceméně od základu nově, je vhodné deaktivovat nastavení v kategorii Additive. Zejména je vypnuta možnost Activate Coolant Time v sekci Coolant Time. Tento přístup, kdy robot mezi vrstvami čeká mimo tiskovou podložku, není v plánu na pracovišti využívat. Pokud by se jednalo o čekací časy tak markantní, že je potřeba využít tohoto přístupu, bylo by také potřeba stále otáčet extruderem a tím pádem mařit určité množství materiálu. V sekci Output jsou přenastaveny M funkce v polích Deposition On a Off na M3 a M5 místo původních M74 a M75. Tato úprava je spíše pro názornost, jelikož není tato původní implementace využita a je nahrazena jinými procedurami z důvodu chyb, které vznikají již při výpisu dráhových dat a užitím původních procedur jim není možné zamezit.

Při vývoji postprocesoru je výhodné využívat inspekční nástroj. Tato možnost se aktivuje v kategorii Miscellaneous v sekci Debugging. Jedná se o silný nástroj umožňující do určité míry nahlížet do pozadí postprocesoru během jeho běhu. Umožňuje snadné prohlížení jednotlivých MOM (Manufacturing Output Manager) eventů a bufferů generujících příslušné části NC programu. Okno inspekčního nástroje je na Obr. 62.



Obr. 62: Inspekční nástroj postprocesování

Důležité nastavení je potřeba provést v kategorii Robotic Settings, konkrétně v sekci RMR Coordinates. Zde je potřeba definovat adresy jednotlivých kloubových os tak, jak jsou pojmenovány v ŘS Sinumerik. V tomto formátu se vypisuje pohyb robota kloubově. Nastavené adresy jsou k vidění na Obr. 63.

RMR Coordinates	
Cartesian Orientation	CARDAN
J1 Channel	RA1
J2 Channel	RA2
J3 Channel	RA3
J4 Channel	A
J5 Channel	B
J6 Channel	C

Obr. 63: Nastavení adres rotačních kloubů

Ve stejné kategorii, jen v sekci RMR Tool and Base, jsou výstupy Output Work Offset a Output ROBX Machine Data nastaveny na Commented. Následně jsou pomocí úpravy v TCL kódu kompletně potlačeny kvůli čistotě NC programu a informace, které tyto dva výstupy nesou, jsou napevno zaneseny do emulátoru ŘS.

Pro úpravy šablon jednotlivých NC bloků je možné použít Definition File editor. Zde je potřeba provést několik úprav. Z šablony rapid_move je odebráno slovo reprezentující pohyb PTP a typ pohybu je změněn z G0 na G1. Šablona je také doplněna o adresu rychlosti pohybu z UDE (viz Obr. 65). Namísto rychloposuvem se bude robot pohybovat touto uživatelsky definovanou rychlostí. V šabloně pro lineární pohyb linear_move jsou přenastaveny vstupní proměnné adres S a F na proměnné vypočítávané přidáními funkcemi. Pohled na editor a upravenou šablonu linear_move jsou na Obr. 64.

Word	Expression	Opt.	NoWS
E1	\$mom_rob_ext(0)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E2	\$mom_rob_ext(1)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E3	\$mom_rob_ext(2)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E4	\$mom_rob_ext(3)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E5	\$mom_rob_ext(4)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E6	\$mom_rob_ext(5)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
S	\$rpm_out	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D	\$mom_tool_adjust_register	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
F	\$stop_speed_out	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

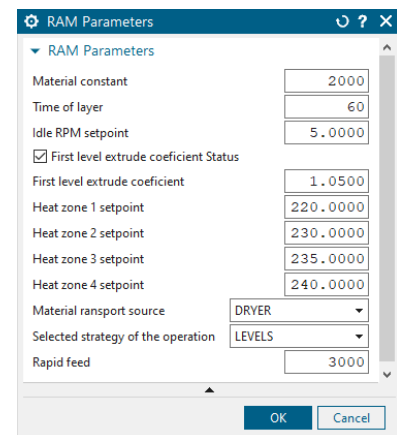
Obr. 64: Úprava šablony lineárního pohybu pomocí integrovaného editoru

10.2 Uživatelské ovládání

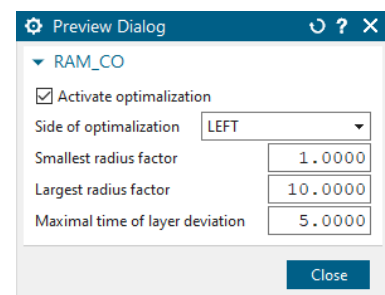
Přidané funkce se často neobejdou bez určitého uživatelského vstupu navíc. Jinak tomu není ani v tomto případě. Vstup uživatele do postprocesoru lze snadno rozšířit pomocí UDE (User Defined Event). Ty je možné buď psát manuálně v textovém editoru, nebo využít integrovaný nástroj do Post Configuratoru. Možnosti jsou ekvivalentní. V rámci řešení této práce jsou vytvořeny celkem dva takové ovládací prvky.

První z nich je vidět na Obr. 65 a slouží primárně k nastavení technologických parametrů. RAM (Robot Additive Manufacturing) Parameters je povinné nastavení potřebné pro funkčnost vzniklého postprocesoru. Je to dáno tím, že první dva parametry slouží pro výpočet otáček extruderu a posuvové rychlosti v individuálních vrstvách. Další parametr slouží pro nastavení čekacích otáček extruderu. Následuje ovládání funkce pro zvýšení množství materiálu v první vrstvě a nastavení teplot jednotlivých teplotních zón. Nakonec je možné nakonfigurovat zdroj materiálu při tisku a typ použité strategie v případě Planar Thinwall operace.

Druhé ovládání je potřebné pro nastavení parametrů pro optimalizační funkce řešící rychlost pohybu na zakřivených úsecích, kterou se zabývá kapitola 10.4. Zde je nastavení mnohem méně, primárně se jedná o aktivaci funkce a nastavení, zda se řeší levá nebo pravá strana trysky vzhledem ke směru pohybu. Následují okrajové podmínky, kdy se má optimalizace aplikovat a maximální časová odchylka pro vrstvu s přepočteným posuvem. Náhled na toto UDE je na Obr. 66.



Obr. 65: UDE pro základní ovládání postprocesoru



Obr. 66: UDE pro optimalizační funkci

10.3 Úpravy v jazyku TCL

Značná část úprav je realizována přímo v programovacím jazyku TCL (Tool Command Language). Post Configurator obsahuje integrovaný editor s řadou funkcí právě pro tento jazyk. Také je možné upravovat kód v jakémkoli textovém editoru. Celkem jsou vytvořeny tři vrstvy obsahující TCL kód.

První vrstva je základní a obsahuje pouze logiku pro výpis upravené hlavičky NC programu. Tato vrstva by jinak standardně obsahovala ještě další procedury například pro tvorbu a výpis seznamu nástrojů nebo definice určitých přidávaných nastaveních v grafickém rozhraní Post Configuratoru pro daný postprocesor. Příklad vypsané hlavičky NC programu je na Obr. 67. Jsou zde snadno zjištěitelné důležité informace o programu.

```
N10 ;|=====|
N12 ; TESTING VERSION OF POSTPROCESSOR KUKA KR60HA WITH EXTRUDER - VERSION 30_11_23
N14 ; MACHINE TOOL: KUKA KR60HA + CEAD E25
N16 ; CNC : SINUMERIK 840D s1
N18 ; CAM SYSTEM USER : zbiral
N20 ; DATE AND TIME : 04.12.2023 20:17
N22 ; PART NAME : Bedna.prt
N24 ; PART PATH : C:\Users\zbiral\Documents\Extruder tisky\Bedna.prt
N26 ; PATH GENERATED ON : NX 2306.1700 2023/11/12 21:07:59
N28 ;|=====|
```

Obr. 67: Příklad upravené hlavičky NC programu

Ve zdrojové části se nachází jedna procedura využívající pouze příkaz `MOM_output_literal`, jenž slouží k výpisu textu včetně čísla řádku v NC programu. Přidanou proceduru je nutné také volat ve vhodný okamžik při překladu dat. K navázání volání procedury v konkrétní okamžik slouží příkazy pro manipulaci s tzv. buffery. Buffery jsou zásobníky, ve kterých jsou dočasně uloženy proměnné a výstupní data do NC programu. Podrobné informace týkající se těchto příkazů jsou k dispozici v dokumentaci Post Configuratoru. Konkrétní použitý příkaz zařadí volání požadované nově vytvořené procedury za výchozí proceduru v příslušném MOM eventu. Dále je potřeba specifikovat parametr, který reprezentuje libovolné unikátní označení nově volané procedury. Příkazy pro manipulaci s buffery lze snadno zkopírovat pro konkrétně nalezené místo v NC programu pomocí inspekčního nástroje zmíněného dříve.

Druhá vrstva obsahuje všechny funkce a procedury týkající se hlavní aditivní funkcionality postprocesoru. Postprocesory vytvořené v Post Configuratoru obsahují bez potřeby žádných dalších úprav dva průchody. První

průchod je speciální a je označován jako pretreatment. Neodbavují se všechny procedury a celkově slouží pro získání dat pro rozhodovací logiku, která se nachází dříve, než jsou potřebné informace dostupné ve skutečném průchodu. Standardně se během tohoto běhu schraňuje řada dat. Zaznamenávají jsou proměnné týkající se například operací nebo nástrojů. Tento průchod lze rozšířit o libovolné proměnné vycházející ze Siemens NX CAM a hodnoty lze zaznamenávat několika způsoby. Podrobnější informace lze nalézt v dokumentaci k Post Configuratoru. Náhled na proceduru obsahující definici proměnných, jež se mají zaznamenávat, je na Obr. 68. Použití tohoto přístupu pro záznam dráhových dat před začátkem samotného postprocesování je vlastně podmínkou, jelikož informace o délkách jednotlivých vrstev je potřeba znát na začátku dané vrstvy. Alternativně by bylo možné udělat postprocessor vyloženě dvouprůchodový, nicméně je výhodnější použít již zaběhnutý způsob pretreatment průchodu.

```
43 #-----
44 proc LIB_SPF_pt_additional_variables_motion_length {} {
45 #-----
46 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_linear_move mom_motion_distance 1
47 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_linear_move mom_level_number 1
48 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_linear_move mom_motion_type 1
49 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_linear_move mom_event_number 2
50 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_level_marker mom_seqnum 1
51 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_deposition_on mom_deposition_width
52 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_deposition_on mom_deposition_height
53 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_deposition_on mom_deposition_status 1
54 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_RAM_parameters mom_RAM_temp_1
55 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_RAM_parameters mom_RAM_temp_2
56 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_RAM_parameters mom_RAM_temp_3
57 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_RAM_parameters mom_RAM_temp_4
58 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_RAM_parameters mom_RAM_pellet_source
59 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_RAM_parameters mom_RAM_idle_rpm
60 LIB_SPF_pretreatment_add_var MOM_linear_move mom_pos 1
61 }
```

Obr. 68: Procedura definující přídavné proměnné pro záznam jejich hodnot

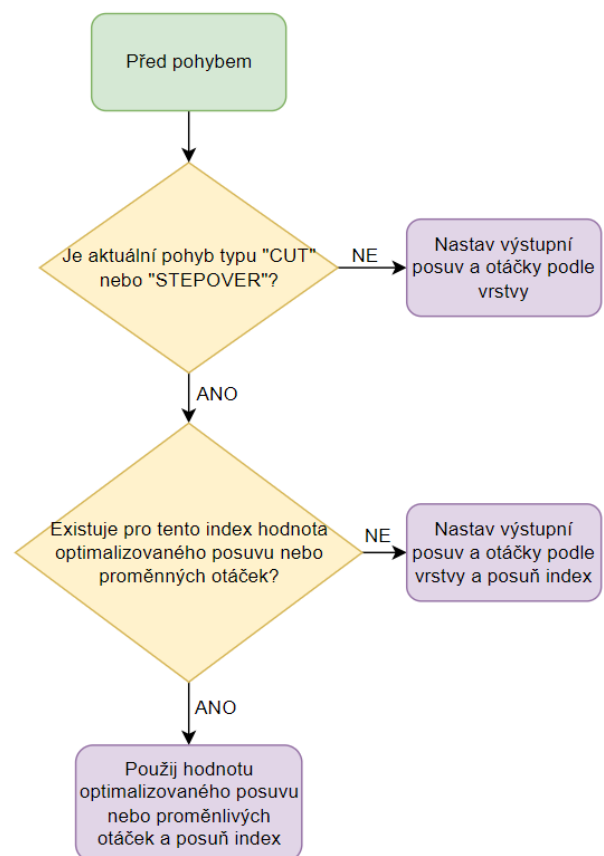
Pro zpřehlednění NC programu jsou potlačeny určité výpisy obsahující informace o nástrojové hlavě a posunutí souřadnicového systému základny. Tyto informace není potřeba v NC programu obsáhnout, jelikož na reálném pracovišti jsou zavedeny v ŘS a simulační model má tato data také k dispozici v jednom ze svých inicializačních souborů. Potlačení vytipovaných výstupů do NC programu je docíleno opět pomocí příkazů pro manipulaci s buffery. Konkrétně je použita varianta příkazu pro manipulaci s buffery remove – odebrat, která potlačí

při odbavování postprocesoru zamezené provedení definované procedury. Hned na úvod NC programu se promítne procedura technologického výstupu. Stejně jako v případě upravené hlavičky NC programu jsou zde použity primárně příkazy `MOM_output_literal` a základní podmínky pro rozhodování. Většina zde vypsáných parametrů je nastavena v základním UDE. Příklad výstupu je k vidění na Obr. 69.

```
N32 ; TECHNOLOGY INFORMATIONS
N34 ; DEPOSITION WIDTH=9.0
N36 ; DEPOSITION HEIGHT=3.0
N38 S5.0 ;Idle rpm setpoint
N40 H1=200.0 ;Temperature setpoint 1
N42 H2=200.0 ;Temperature setpoint 2
N44 H3=200.0 ;Temperature setpoint 3
N46 H4=200.0 ;Temperature setpoint 4
N48 M100 ;M100 = DRYER M101 = CABINET
N50 M102 ;M102 = HEATING ON
N52 M103 ;M103 = TRANSPORT ON
N54 M3 ;IDLE EXTRUDING ENABLE
N56 M0
N58 M5 ;Stop extruding for approach
N60 M0
N62 ;|=====
```

Obr. 69: Náhled na výpis technologických informací pod hlavičkou NC programu

Další procedura je volaná před každou pohybovou událostí. Její účel spočívá v plnění výstupních proměnných nesoucích informace o posuvové rychlosti a o otáčkách extruderu. V případě použití optimalizační vrstvy (popsána v kapitole 10.4) jdou data také přes tuto proceduru. Logika této procedury je znázorněna na Obr. 70. Původní procedury pro zapínání a vypínání ukládání materiálu jsou nahrazeny implementací vlastní, jež kontroluje, zda se skutečně má informace z CL dat o zapnutí či vypnutí propsat do NC programu v daném místě, či nikoli. Již v CL datech se vyskytují místa, kde je vypsáno



Obr. 70: Vývojový diagram procedury nastavující hodnoty posuvu a otáček

zastavení a opětovné spuštění extruze, a to zcela bezdůvodně. Aby bylo možné tento nežádoucí jev potlačit, je potřeba zavést vlastní implementaci řešící výstup funkcí M3 a M5. Chování nových procedur se liší s nastavením operace. Lze totiž konfigurovat, zda má extruze setrvávat aktivní během přejezdu mezi vrstvami, nebo nikoli, což je potřeba v implementaci nové logiky zahrnout.

Hlavní procedura má na starost zpracování dat posbíraných z pretreatment průchodu a dat z ovládacího UDE. Dále výpočet délek jednotlivých vrstev a spolu s uživatelem definovaným časem na jednu vrstvu vyplývající rychlost posuvu. V následujícím kroku jsou vypočteny hodnoty otáček extruderu podle vztahu (1) z dokumentace dodavatele technologie CEAD. Popis jednotlivých proměnných je v Tab. 1. Materiálová konstanta je vztažena na definovaný objem (značeno cc v popisu jednotky proměnné). Dodavatel technologie používá dvě různé definice materiálové konstanty vztažené na různé objemy. Proto je v tabulce uvedeno cc, jakožto obecně definovaná vztažná jednotka objemu. Standardně se hodnoty materiálové konstanty pohybují v tisících, alespoň pro tuto variantu vztahu (1). Například pro materiál PIPG s 30 % skleněných vláken a trysku o průměru 6 mm je uvažována materiálová konstanta 2000.

$$RPM\ Setpoint = \frac{v_{TCP} \cdot LH \cdot LW}{MC \cdot 1000} \cdot EM \quad (1)$$

Tab. 1: Popis veličin ve vztahu (1)

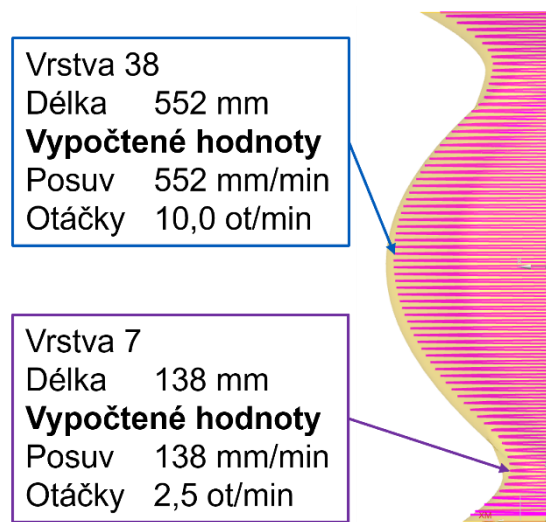
v_{TCP}	Rychlost TCP (Tool Centre Point)	mm/min
LH	Výška vrstvy	mm
LW	Šířka vrstvy	mm
MC	Materiálová konstanta	otáčky/cc
EM	Uživatelský koeficient extruze (ve výpočtu nepoužíváno)	-

Hodnoty posuvů a otáček extruderu pro jednotlivé vrstvy jsou vypsány do externího textového souboru pro snadné ověření, že jsou hodnoty v pořádku. Automatický výpočet posuvu a otáček extruderu na základě individuálních vrstev odemyká řadu možností, které by jinak s použitím Siemens NX nebyly možné. V zásadě tato funkce umožňuje tisknout dílce s proměnnými délkami vrstev s konsistentní kvalitou. Obzvláště důležité je to v případě tisku pod naklopením, kdy nejčastěji vyráběné dílce – formy – mají tvar typu kvádr. Pod naklopením

poté dochází k značným variacím délek vrstev. Příklad rozdílu v hodnotách jednotlivých veličin na ukázkovém dílci je k vidění na Obr. 71. Jedná se o rozdíl mezi nejkratší a nejdelší vrstvou na daném dílci, s časem vrstvy 60 s.

V případě použité strategie Spiral v operaci Planar Thinwall jsou zapotřebí další výpočty. Dle nastavení dokončovacích průjezdů je potřeba plynule měnit otáčky extruderu po dráze v první a v poslední vrstvě, jelikož se mění me-

zera mezi tryskou a předchozím materiál či podložkou, čímž se mění potřebné množství materiálu. Případy, které mohou nastat, jsou s příslušnými nároky na výpočet zobrazeny v Tab. 2. Řešení se také liší podle toho, zda je tištěno pod naklopením nebo svisle k podložce. To je dáno tím, že pretreatment průchod nemá k dispozici transformované souřadnice do nakloněného souřadnicového systému. Před algoritmus výpočtu otáček extruderu v případě naklonění je tedy ještě zařazena transformační funkce pro transformaci souřadnic do zmíněného nakloněného systému pro správné určení mezery pod tryskou. Logika celé hlavní procedury postprocesoru je zjednodušeně zobrazena v Příloze č. 1.



Obr. 71: Rozdíly v hodnotách posuvé rychlosti a otáček extruderu pro nejkratší a nejdelší vrstvu

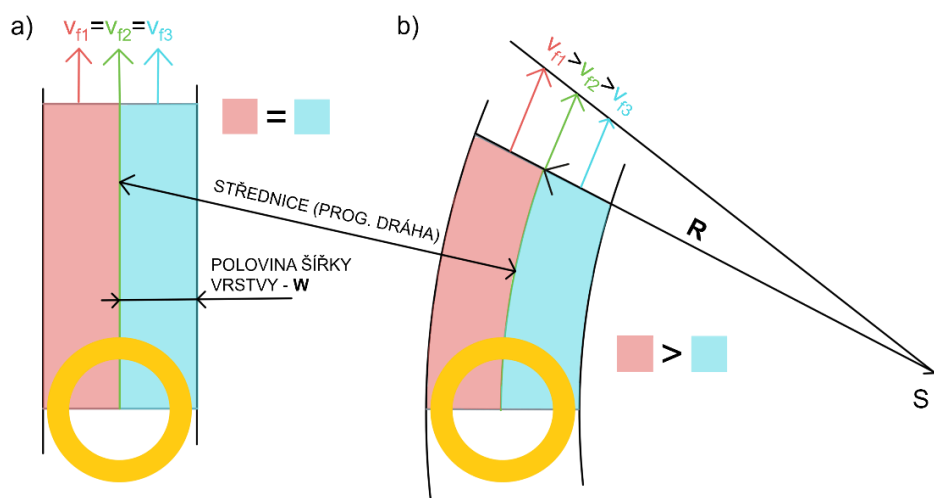
Tab. 2: Varianty nastavení strategií pro operaci Planar Thinwall

Strategie a nastavení	Charakteristika	Potřebný výpočet
Profile	Pohyb v konstantních hladinách	Není potřeba doplňující výpočet
Helical bez dokončení	Dráha začíná na výšce jedné vrstvy a postupně stoupá na výšku druhé	Potřeba postupně zvyšovat otáčky z nominálních na dvojnásobné
Helical s dokončením na začátku	Nejprve projede celý obrys na konstantní hladině první vrstvy a poté stoupá na hladinu druhé vrstvy	Postupné zvyšování otáček od nuly do nominálních během přechodu na druhou hladinu
Helical s dokončením na konci	Po dosažení finální hladiny projede obrys ještě jednou na této hladině	Postupné snižování otáček z nominálních na nulové při dokončovacím průjezdu poslední vrstvy
Helical s oběma dokončeními	Dříve popsané chování kombinované dohromady	Potřeba modulovat otáčky extruderu na začátku i na konci

10.4 Optimalizační vrstva

Požadované funkce pro splnění základní implementace postprocesoru jsou tímto hotovy. Nyní je možné postprocesor rozšířit o nadstavbové funkce. V tomto případě je takovou funkcí řízení rychlosti pohybu extruderu na zakřivených úsecích. Myšlenka výpočtu je k vidění na Obr. 72. Proměnná R v rovnici (2) reprezentuje poloměr zakřivení a W polovinu šířky nanášené vrstvy. Výstupem z rovnice je optimalizovaný posuv, vstupem je posuv nominální.

$$F_{opt} = F_{nom} \cdot \frac{R}{R \pm W/2} \quad (3)$$



Obr. 72: Porovnání rychlostí při nanášení materiálu na a) rovném úseku a b) zakřiveném úseku

Na rovném úseku jsou si plochy (červená a modrá) na obou stranách střednice rovny. Ve chvíli, kdy je dráha zakřivená, dochází ke vzniku nerovnosti velikostí ploch a vzhledem k tomu, že jsou otáčky extruderu konstantní, vznikne rozdíl mezi naneseným materiálem vpravo a vlevo od střednice. Ve středech těchto ploch jsou také kvůli zakřivení jiné obvodové rychlosti, což ovlivní výsledný objem materiálu nanesený na daném úseku, ve zvolené polovině vrstvy. Aby byl snížen rozdíl absolutního objemu materiálu naneseného na daném úseku od jedné poloviny extruderu (na jedné z barevně vyznačených ploch v Obr. 72) vůči stavu, kdy by se tryska pohybovala po přímé dráze, je posuvová rychlost upravena. Uživatel CAM softwaru volí, která strana od střednice je důležitější (např. pohledová) a ta je použita jako řídicí pro výpočet.

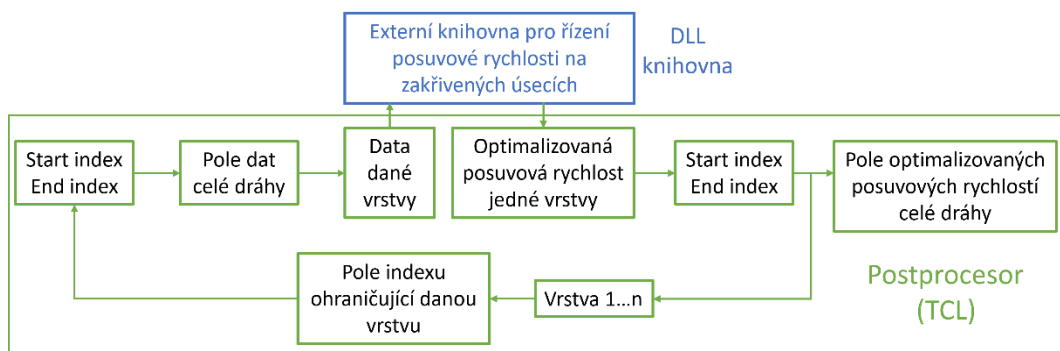


Pro takový výpočet je potřeba určit poloměr zakřivení dráhy. Tato informace není z CL dat nebo CAM softwaru nijak dostupná. Poloměr zakřivení dráhy v každém bodě je tedy potřeba dopočítat z dostupných dat. Jelikož jsou k dispozici souřadnice jednotlivých bodů dráhy, je možné z několika bodů dráhy poloměr zakřivení dopočítat. Jeden ze způsobů možností je využití „best fit“ metody, jak je popsáno v práci [52]. Algoritmus z této práce slouží jako výchozí pro tvorbu dříve zmíněné optimalizační funkce řízení posuvové rychlosti extruderu na zakřivených úsecích. Pro výpočet je použito šest bodů dráhy – aktuální a pět následujících.

Využito je možnosti rozšíření postprocesoru o externí doplňkovou knihovnu ve formátu dll. Tento přístup je výhodný zejména díky možnosti využití výkonnějších programovacích jazyků jako je C++ nebo C#. V řešení této práce je jádro optimalizační funkce řešeno v jazyce C# a poté sestaveno právě do dll knihovny. Použita je syntaxe a šablona umožňující komunikaci se Siemens NX přes modul NX Open. Při tvorbě funkce bylo postupováno podle výpočtové knihovny z [52], jejíž část sloužila jako výchozí. Tento přístup byl použit zejména z důvodu již vytvořené a ozkoušené formy pro navázání knihovny na běh NX a funkce pro výpočet křivosti dráhy. Zdrojový kód knihovny je silně modifikován pro specifické účely této práce a nad funkci počítající křivost dráhy navazuje řešení vyplývající z aditivních technologií. Pro integraci externí knihovny je nejprve však nutné připravit samotný postprocesor v jazyku TCL.

Z pohledu získávání dat je přístup stejný jako v základním postprocesoru. Potřebné proměnné byly definovány již v základní vrstvě. Jedná se zejména o proměnnou `mom_pos` obsahující souřadnice každého pohybu. Tyto hodnoty jsou nezbytné v základním postprocesoru pro řešení spirálové strategie. Další procedury jsou potřebné pro načtení externí knihovny, která je přiložená ke standardním souborům postprocesoru. Připojení, respektive definice cesty, na které se nachází, do proměnné `external_lib`, je potřeba provést na začátku programu, což je splněné přiřazením ke správnému bufferu. Knihovnu je na konci potřeba opět odpojit. To se provede pomocí příkazu `MOM_unload_library`.

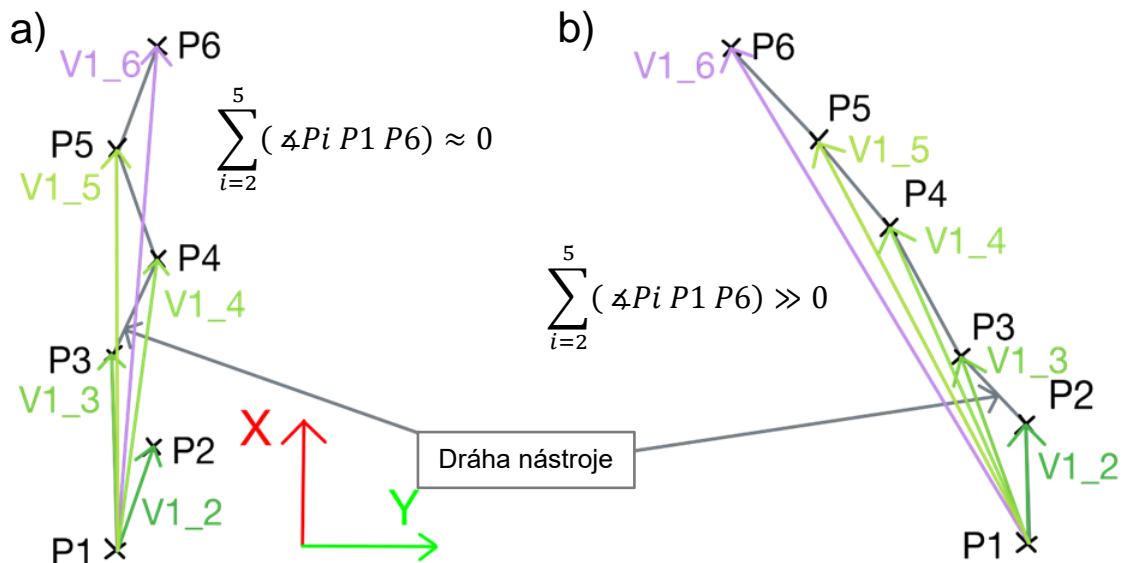
V hlavní proceduře dochází k přípravě dat pro externí knihovnu. Do a také z knihovny se předávají data přes připravené proměnné a lze načítat pouze pole. Optimalizační výpočet v externí knihovně je prováděn na bázi jedné vrstvy. Původně bylo řešení zamýšleno s jedním voláním knihovny a výpočet by poté probíhal na celé dráze. Problém nastal ve chvíli, kdy velikost načítaných polí souřadnic překročila deset tisíc, což je pravděpodobně limit předání hodnot do knihovny. Jelikož je na jednom dílci poměrně snadné překročit tento limit, je knihovna volána cyklicky po každé vrstvě. V samotném postprocesoru je tedy připraveno pole souřadnic a nominálního posuvu na základě indexu ohraničujícím jednotlivé vrstvy v celkovém poli hodnot. Následuje volání externí knihovny pomocí příkazu `MOM_run_user_function`. Poté, co proběhne tento výpočet, jsou získané hodnoty vráceny zpět do postprocesoru a rekonstruovány zpět do globálního pole posuvové rychlosti. Logiku přípravy dat a volání funkce popisuje Obr. 73. Z globálního pole jsou poté hodnoty přiřazovány jednotlivým pohybům při výpisu NC programu tak, jak je popsáno na Obr. 70. Nyní je postprocesor připraven na implementaci externí nadstavbové funkce.



Obr. 73: Schéma přípravy dat a volání externí knihovny

Původní funkce pro výpočet křivosti je popsána v [52]. Zde jsou zmíněny tedy jen provedené modifikace výpočtové funkce křivosti pro účely této práce. Je eliminováno užití kontaktního bodu, které pro aditivní technologie nemá smysl. Z důvodu, že určité vlastnosti výpočtu způsobovaly problémy, kdy se na úsecích velmi blízkých lineárním objevovaly vypočtené velmi malé hodnoty rádia zakřivení na jednom nebo několika málo blocích, je po výpočtu zařazena filtrovací funkce, která má za úkol odhalit tyto chybové hodnoty a nahradit hodnotu v tomto bloku hodnotou reprezentující rovnou křivku. Funkce pro potlačení chybných výpočtů na úsecích blízkých se lineárním je popsána na Obr. 74. Body označené

P1 až P6 jsou body dráhy nástroje vstupující do funkce pro výpočet křivosti, vektory značené V1_2 až V1_6 směřují vždy z bodu P1 do zbývajících pěti bodů.

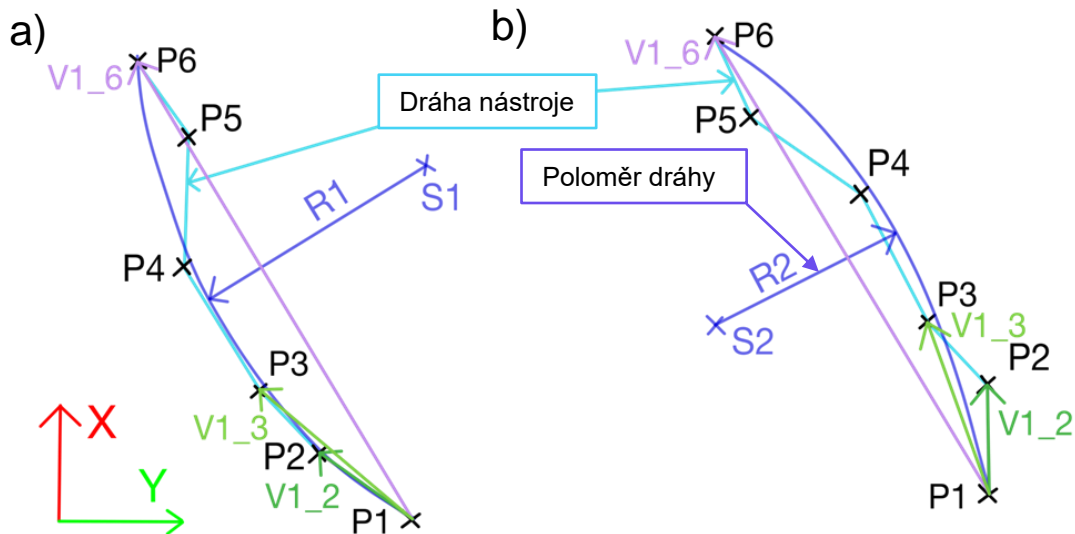


Obr. 74: Znárodnění sčítání velikosti úhlů mezi vektory za účelem filtrace - a) příklad lineárního úseku a b) příklad zakřiveného úseku

Funkce funguje na základě výpočtu úhlů mezi vektory spojujícími jednotlivé body vstupující do výpočtu. Jejich suma je poté porovnávána s hraniční hodnotou a pokud je menší, je proveden zásah. Hraniční hodnota byla určena pozorováním chování této sumy na blocích vzniklých z lineárního úseku a v úsecích, v nichž je očekáváno zakřivení. Jakmile dojde k náběhu do zakřivení, hodnota součtu úhlů ihned roste a je tedy takto možné relativně spolehlivě vyřešit daný problém. Existují však případy, kdy může být tato funkce nespolehlivá. Například v inflexních bodech dráhy (přechod mezi dvěma zakřiveními s opačným smyslem zakřivení), nicméně pro použítou technologii lze tyto úseky považovat za rovné vcelku bezpečně, a to díky značně menším nárokům na geometrickou přesnost než v případě obrábění. Problém s výpočtem může být způsoben tolerancí generování dráhy v CAM softwaru, která se pohybuje v řádech nižších (pro obrábění většinou tisíce mm, v aditivních technologiích setiny až desetiny mm), než jsou relevantní pro tuto technologii, takže je možné tyto informace vyfiltrovat.

Funkce pro výpočet zakřivení je dále rozšířena o určení polohy středu křivosti (označené jako S1 a S2 na Obr. 75) vůči směru pohybu. Tato informace je získána pomocí vektorového součinu mezi vektory V1_2 a V1_6 a mezi vektory V1_3 a V1_6 (viz Obr. 75). Konkrétně je zjišťována složka Z vzniklých vektorů.

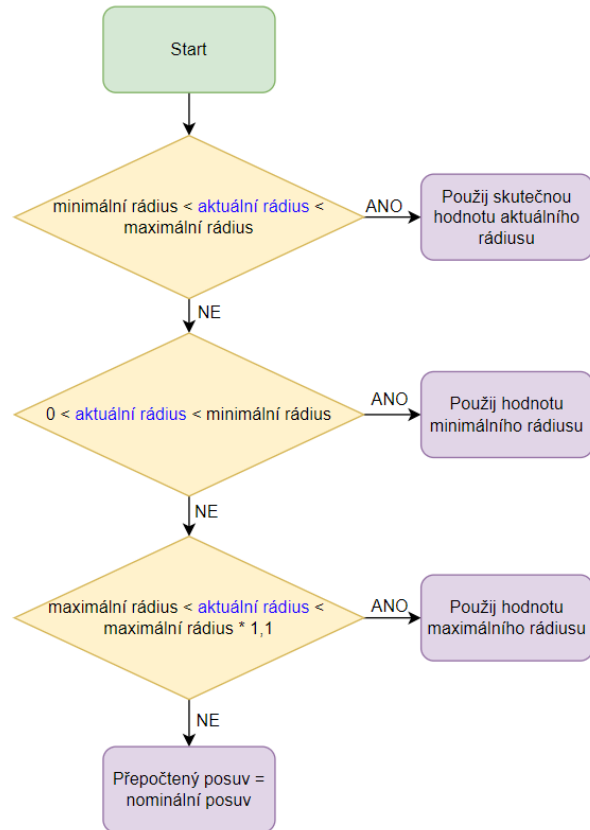
Podle toho, zda je kladná nebo záporná, se určí, zda je střed vlevo nebo vpravo od křivky. Nakonec byla použita implementace, kdy se porovnávají hodnoty složky Z pouze prvních dvou vektorů vzniklých vektorovým součinem. Často totiž jeden z bodů P3 nebo P4 ležel na druhé straně od vektoru V1_6 (pro názornost zobrazeno v Obr. 75), a poté negativně ovlivňoval algoritmus. Funkce vrací pro každý bod v daném vstupním poli hodnotu velikosti rádia a zda se jedná o zakřivení doleva nebo doprava vzhledem ke směru pohybu.



Obr. 75: Znázornění způsobu určení zakřivení a) doprava nebo b) doleva

V samotném těle knihovny se nejprve využitím funkcí z knihovny NX Open načtou pole potřebných proměnných připravená v postprocesoru. Následně se přes celé vstupní pole cyklicky nastavují dočasné body ze vstupních polí, které poté vstupují do funkce pro výpočet křivosti. Tato funkce je posléze volána a její výstupy jsou ukládány do polí stejných velikostí, jako je velikost polí vstupů. V dalším kroku jsou vypočteny okrajové podmínky pro aplikaci optimalizace. Jedná se o hodnoty nastavené v UDE pro optimalizační funkci, které udávají násobek průměru trysky. Následně je cyklicky přes celé pole rádia porovnáváno, zda se daná hodnota rádia nachází mezi minimální a maximální hodnotou definovanou uživatelem. Podrobněji popisuje tuto logiku následující strana. Pokud je podmínka splněna, dochází k přepočtu nominálního posuvu dle vztahu (2).

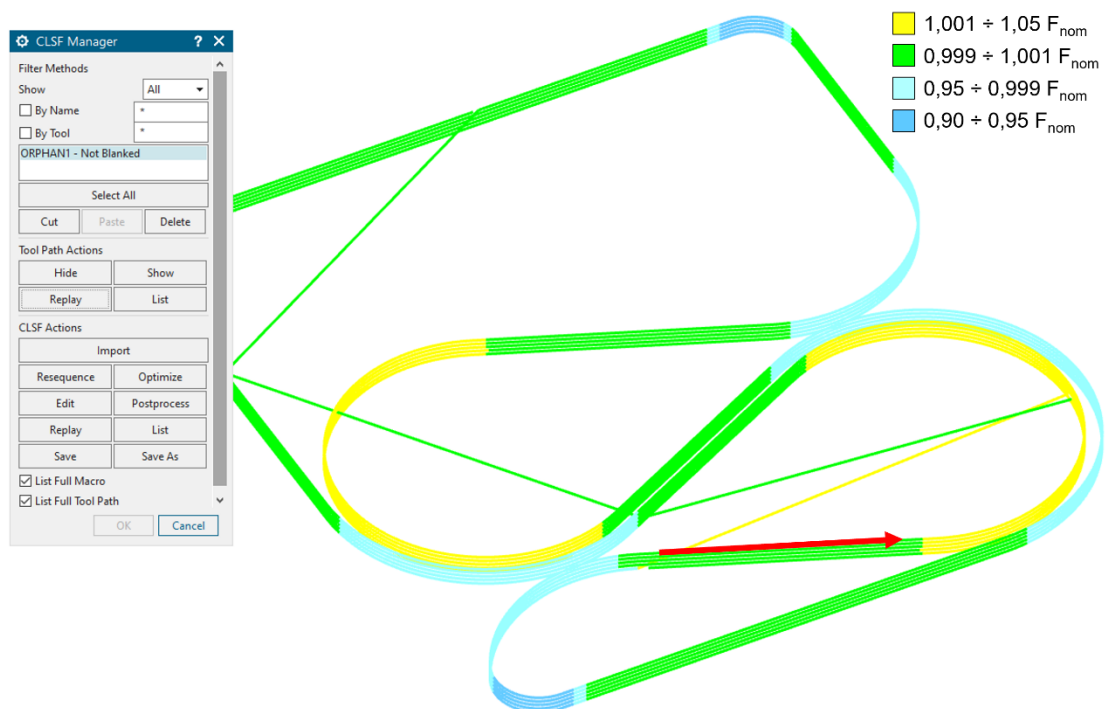
Nachází-li se aktuální hodnota poloměru zakřivení pod uživatelem definovanou minimální hodnotou, je pro výpočet použita hodnota právě nejmenšího přípustného poloměru. Je-li hodnota poloměru větší než maximální přípustná, ale zároveň jen o maximálně deset procent, je ve výpočtu uvažována hodnota maximálního dovoleného poloměru. Tato poslední podmínka má za úkol snížit šanci výskytu míst, kde osciluje hodnota poloměru kolem maximální dovolené hodnoty a střídají se přepočtený posuv s nominálním, který je použit vždy, když je hodnota poloměru větší než 1,1 násobek limitu. Graficky je toto znázorněno na Obr. 76.



Obr. 76: Logika okrajových podmínek pro optimalizační funkci

Spolu s přepočtem posuvu se počítá čas trvání dané vrstvy. Získaný čas vrstvy je poté porovnán se zadanou hodnotou v základním UDE. Pokud odchylka času překročí přípustnou procentuální hodnotu definovanou v UDE pro optimalizační funkci, proběhne celá optimalizační funkce znovu s pozměněným nominálním posuvem a opět se porovná čas. Maximální počet iterací je nastaven na pět. Pokud se nepodaří během těchto pěti iterací splnit podmínku maximální odchylky času, postprocesování bude pokračovat a uživatel bude obeznámen v informačním oknu, že nebylo možné iteračně dopočítat vyhovující řešení. Během testování se však ukázalo, že většinou není problém splnit limit odchylky času jednoho procenta užitím jedné nebo maximálně dvou iterací. Pokud by nebylo pět iterací dostačujících, pravděpodobně nastala nějaká chyba například v přiřazení indexů pro jednotlivé vrstvy. Nakonec jsou opět pomocí funkcí z knihovny NX Open zapsány hodnoty proměnných v knihovně do hodnot proměnných v postprocesoru.

Pro lepší možnost vizualizace a verifikace, že výsledky z knihovny jsou smysluplné, je tato vrstva ještě obohacena o proceduru pro tvorbu a výpis CL dat doplněných o parametry pro vizuální kontrolu průběhu posuvové rychlosti. Při samotném výpisu NC programu poté vzniká další textový soubor, do kterého se postupně vyplňují příslušné souřadnice pohybu s určitou barvou podle definované škály. Barva reprezentuje, jak moc se přepočtená hodnota v zakřivených částech dráhy liší od hodnoty nominální a jestli se jedná o zpomalení, nebo naopak zrychlení. Implementace v tomto postprocesoru vychází z řešení [55], jedná se však o značně modifikovanou variantu pro toto konkrétní řešení. Textový soubor s příponou .cls se vytváří ve speciální proceduře na začátku programu. Tento soubor je poté možné načíst v Siemens NX CAM pomocí klávesové zkratky Ctrl Alt C. Volbou Replay se zobrazí načtená dráha s příslušně barevnými úseky v prostředí Siemens NX CAM. Náhled finálního průběhu rychlosti po dráze již po optimalizaci a veškerých krocích, které jsou popsány následujícími stránkami, je k vidění na Obr. 77. Žluté úseky znázorňují rychlost vyšší než nominální a modré úseky naopak rychlost nižší. Zelená barva znázorňuje úseky, kde je programována nominální posuvová rychlost. Optimalizace je nastavena zleva vzhledem ke směru pohybu (naznačený červenou šipkou).



Obr. 77: Načtená CL data pro vizuální verifikaci průběhu posuvové rychlosti

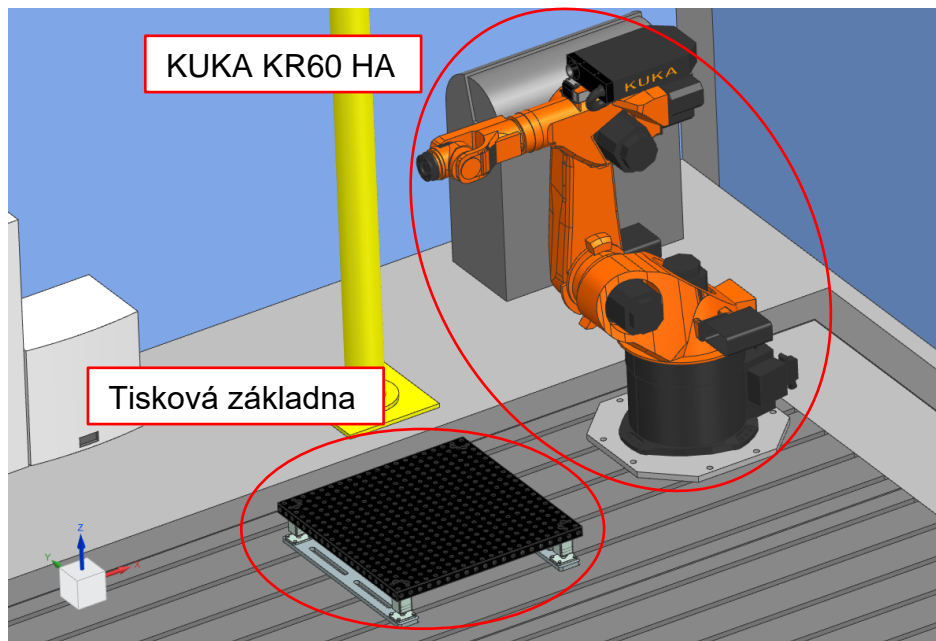
11 Simulační model

V rámci řešení této práce plní simulační model několik rolí. První je využita již při návrhu dráhy, respektive aplikaci pravidel pro robotické operace, kdy je využit kinematický model pro výpočet inverzní kinematiky a verifikaci dosažitelnosti. Dále při samotné simulaci slouží pro včasné odhalení chyb, ať už dráhových nebo chyb vzniklých v NC programu při postprocesování. Nakonec je po doplnění správných kinematických parametrů možné verifikovat, zda má robot šanci požadované rychlosti dosáhnout.

Jak již bylo řečeno v kapitole 6.4, simulační model se skládá ze tří částí. Do části obsahující parser není potřeba v tomto případě zasahovat. V této části se úpravy provádějí v případě složitějších a méně standardních funkcí či nestandardních ŘS, kdy je potřeba specifikovat nová slova či syntaxi obecně. V případě této práce je potřeba v emulátoru ŘS přidat nové M a H funkce a přizpůsobit simulaci přidávání materiálu požadovaným příkazům v NC programu. Nejprve je však potřeba vytvořit kinematický model stroje (pracoviště).

11.1 Kinematický model

Definování kinematického modelu se provádí v prostředí Machine Tool Builder v Siemens NX. Vstupem je 3D model stroje nebo pracoviště. Mělo by se jednat o vhodně zjednodušený model. Nesmějí chybět žádné důležité prvky tak, aby simulace pohybů byla blízká realitě. Na druhou stranu příliš detailní model je pomalý při simulaci a celkově degraduje použitelnost simulace. Pokud je k dispozici model komplexní, je vhodné ho zjednodušit, ať už za pomoci dostupných funkcí, nebo manuálně. Přirozeně musí být model složen tak, že je rozdělen na několik těles. Pokud by byl model jednodušší, není možné s jednotlivými prvky hýbat a bylo by potřeba provést další krok, a to rozdělení těles dle příslušné struktury. Model pracoviště s robotem KUKA KR60 HA a nízkým svařovacím stolem, jenž slouží jako tisková základna, je k vidění na Obr. 78.



Obr. 78: 3D model pracoviště

Po získání vhodného 3D modelu je možné přejít na samotnou tvorbu kinematického modelu. Po zapnutí modulu Machine Tool Builder je možné definovat jednotlivé komponenty. Vždy se začíná komponentou třídy `_MACHINE_BASE`. Od té se poté postupuje přes všechny komponenty až na nástrojový konec řetězce, který je zakončen nástrojovou kapsou, v tomto případě klasifikace `_STATIC_POCKET`, která obsahuje souřadný systém pro umístění hlav. Zvolená klasifikace udává, že použitá hlava bude zobrazena vždy. Aby bylo možné uzavřít vztah mezi nástrojem a obrobkem, je potřeba také definovat cestu od základní komponenty stroje (`_MACHINE_BASE`) do komponenty reprezentující obrobek. Komponenta reprezentující obrobkový konec je klasifikována jako `_SETUP_ELEMENT` a skládá se z pod-částí umožňujících definovat samotný model dílce, polotovaru, upínací prvky či aditivní materiál. Do tohoto souřadného systému se posléze umisťují příslušné modely v CAM prostředí. Podrobněji je tvorba kinematického modelu popsána například v této práci [49]. Vzniklý kinematický strom je na Obr. 79.

Name	Classification	Junctions	Axis Name	Initial Value
KUKA_KR60HA_AM_CELL				
ROBOT_BASE	_MACHINE_BASE	ROBOT_BASE_JCT*		
J1		J1_JCT	J1	0
J2		J2_JCT	J2	-90
J3		J3_JCT	J3	90
J4		J4_JCT	J4	0
J5		J5_JCT	J5	0
J6		J6_JCT	J6	0
POCK...	_STATIC_POCKET	POCKET_JCT*		
TABLE				
SETUP	_SETUP_ELEMENT	TABLE_JCT		
PART	_PART_SETUP_ELEMENT			
BLANK	_WORKPIECE_SETUP_EL...			
FIXTURE	_SETUP_ELEMENT			
ADDITIVE_MATERIAL	_SETUP_ELEMENT_ADDI...			

Obr. 79: Pohled na finální strom kinematiky v modulu Machine Tool Builder

Dalším krokem je přidání veškerých pohybových os. Vzhledem k použitému robotu je potřeba definovat šest rotačních os s příslušnými rozsahy a smysly otáčení. Důležité jsou také výchozí hodnoty natočení kloubů. Tyto hodnoty se musejí shodovat s realitou, jinak při pohybu zadávaném pomocí natočení kloubů bude dosažená pozice jiná a bude hrozit kolize. Do jednotlivých komponent jsou přidány příslušné pohybové osy a nastaveny správné parametry. V tomto kroku je také vhodné nastavit osám správné hodnoty kinematických parametrů. Tyto parametry se nastavují ve spodní části okna pro konfiguraci strojní osy, které je na Obr. 80. Reálné hodnoty potřebných parametrů se získávají z řídicího systému nebo z dokumentace stroje a slouží pro přesnější predikci chování stroje v časové oblasti. Při správné konfiguraci parametrů je možné přesněji predikovat strojní časy nebo identifikovat nedosažitelné rychlosti. Podrobněji se problematikou predikce strojních časů zabývá například [49].

Edit Axis

Name
Axis Name: J3

Junction
Selection: Name
Name: J3@J3_JCT
Direction: [Green Arrow]

Axis Settings
Axis Type: Rotary
 NC Axis
Axis Number: 3
Initial Value [deg]: 90.0000
Upper Limit [deg]: 158.0000
Upper Soft Limit [deg]: 158.0000
Lower Soft Limit [deg]: -120.0000
Lower Limit [deg]: -120.0000

Dynamic Properties
Max Velocity [deg/s]: 128.0000
Max Acceleration [deg/s^2]: 250.0000
Max Deceleration [deg/s^2]: 250.0000
Jerk Limit [deg/s^3]: -1.0000
Jump Velocity [deg/s]: 0.0000
Kv: 0.0000
Fine Precision [deg]: 0.0100
Coarse Precision [deg]: 0.0100

Preview Motion

OK Cancel

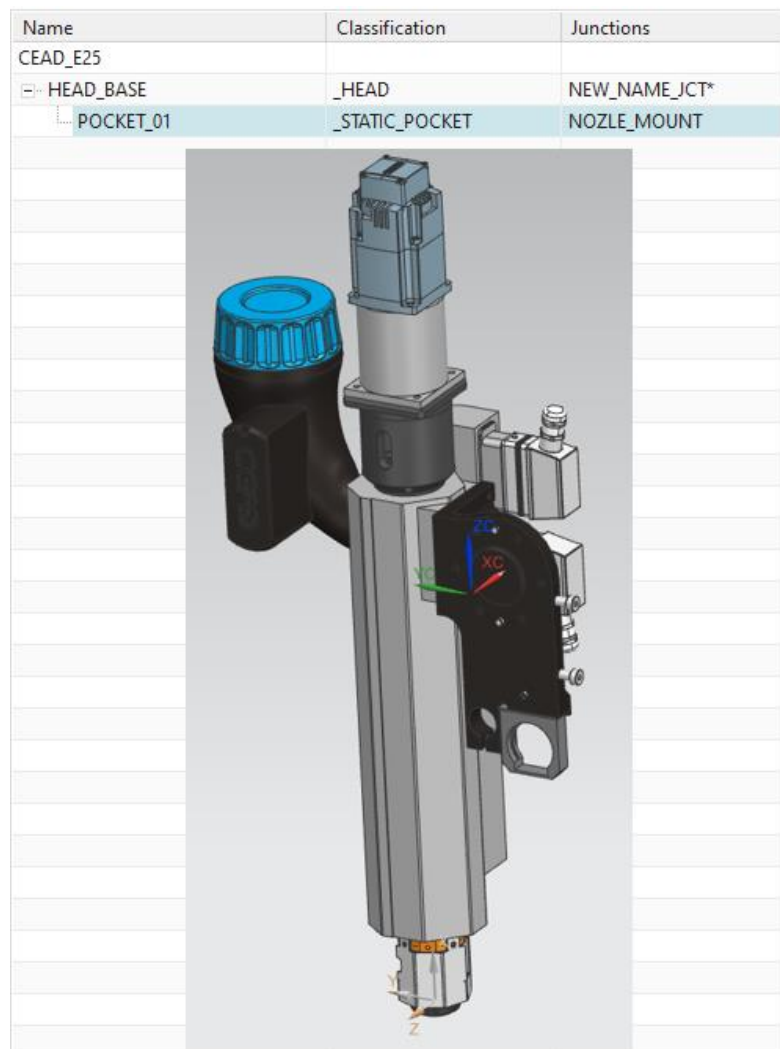
Obr. 80: Nastavení strojní osy v MTB

Posledním krokem k dokončení kinematického modelu je definice kinematického řetězce a přiřazení os do kanálu řídicího systému. Obě tyto operace lze provést v nabídce po kliknutí na název pracoviště (nejvyšší text v tabulce kinematického stromu, červeně označeno v Obr. 79) pravým tlačítkem

myší. V tomto případě je vytvořen kinematický řetězec typu Robot a k šesti rotačním uzlům jsou přiřazeny dříve vytvořené rotační osy J1 až J6. Definice kanálu je stejně jednoduchá. Do jediného kanálu s názvem Main jsou přiřazeny všechny rotační osy. Nyní je kinematický model plně definován.

Vytvořený model pracoviště s robotem umožňuje upnout libovolný koncový efektor na přírubu robotu. Jelikož bude robot nyní nastálo osazen extrudérem, bylo by možné tento extrudér zanést přímo do modelu pracoviště napevno. S ohledem na univerzálnost je lepší praxe mít efektor (technologické hlavy) zavedené v knihovně v Siemens NX a do modelu je načítat v rámci CAM prostředí. Definice hlavy využívá stejný modul v Siemens NX – Machine Tool

Builder. Po otevření vhodného modelu hlavy v tomto modulu je potřeba definovat výchozí komponentu s klasifikací `_HEAD`, se souřadným systémem Head Mount ve stejné konvenci, jako je v modelu robotu kapsa pro nástroje (hlavy). Druhou komponentou je opět kapsa, která tentokrát ponese jednotlivé trysky v extruderu. Vzniklý model hlavy vložitelný do knihovny v Siemens NX je na Obr. 81. Tímto je práce v modulu Machine Tool Builder hotova.

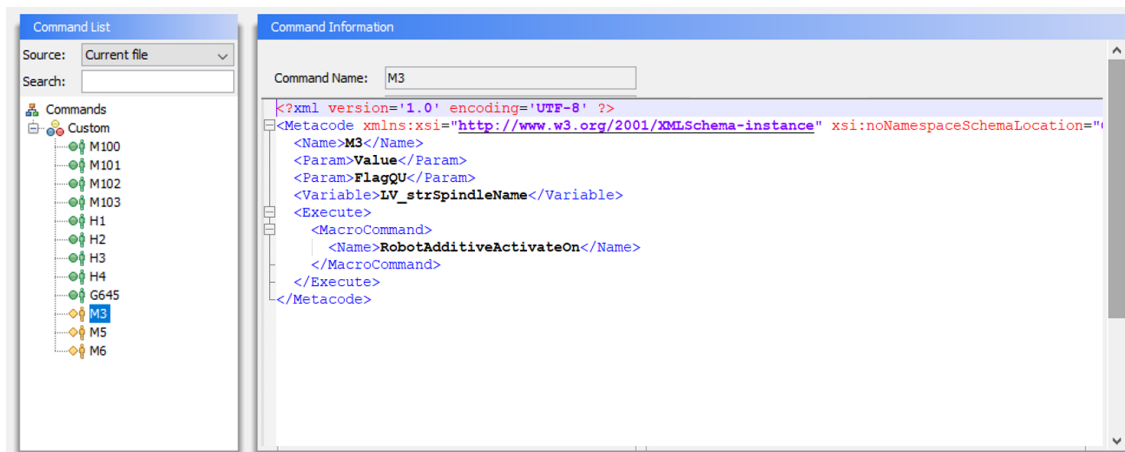


Obr. 81: 3D model extruder a konfigurace v MTB

11.2 Úprava emulátoru řídicího systému

Emulátor řídicího systému je druhá část simulačního modelu, ve které je potřeba udělat úpravy. Zde nutné úpravy navazují primárně na nově přidané funkce v postprocesoru, které emulátor před úpravami nezvládne zpracovat. Momentálně jsou emulátory ŘS v uživatelsky poměrně nepřívětivé situaci, jelikož jsou roztrženy do několika částí, prostředí, a dokonce do různých programovacích jazyků. Úpravy vycházejí ze vzorového emulátoru ŘS pro model KUKA_KR60_L30_2X_POSITIONER_DKP400.

Pro výchozí úpravy MCF (Machine Configuration File) souborů je potřeba doplňkový program Machine Configurator. Ten využívá kombinaci grafické konfigurace a jazyka XML pro úpravy příkazů. V rámci tohoto prostředí jsou úpravy provedeny pouze na záložce Commands. Zde jsou definovány přidané M a H funkce, které na reálném pracovišti ovládají technologii. V rámci simulace tyto příkazy nemají žádný efekt, ale musejí být definovány, aby simulace proběhla. Pohled na seznam přidaných a upravených příkazů v okně Machine Configurator je na Obr. 82.



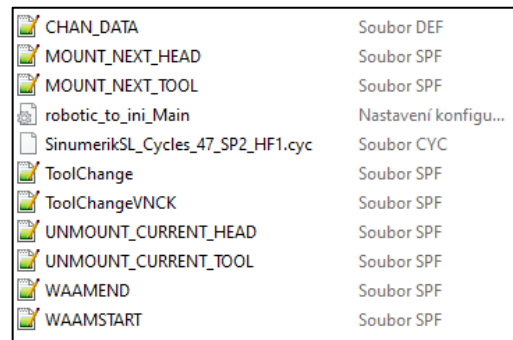
Obr. 82: Machine Configurator a chování funkce M3

Implementace aditivní technologie ve vzorovém emulátoru využívá příkazy M74 a M75 pro zapínání a vypínání přidávání materiálu. V rámci řešení tohoto pracoviště bylo rozhodnuto, že ovládání otáčení extruderu bude využívat standardní funkce pro otáčení po směru hodinových ručiček M3 a zastavení otáčení M5. Z původní implementace je použit pouze příkaz COMMENT, který hledá NC blok obsahující informace o výšce a šířce vrstvy v konkrétním tvaru.

Pokud nejsou informace v tomto tvaru zadány v NC programu, nezobrazuje se přidávání materiálu v simulaci. Pro tuto funkcionalitu byla provedena úprava na straně postprocesoru.

Do příkazů M3 a M5 jsou vloženy základní příkazy pro zapnutí a vypnutí nanášení materiálu, které jsou standardně využity v původních příkazech M74 a M75. Na Obr. 82 v pravé části okna je vidět náhled implementace funkce M3. Díky vhodně zvolenému výchozímu emulátoru nebylo potřeba dalších úprav.

Ve složce subprog (viz Obr. 83) jsou doplňující soubory a podprogramy pro emulátor ŘS. Nacházejí se zde například podprogramy zajišťující výměny nástrojů a hlav. V této složce se také vytvoří po spuštění simulace řízené NC programem (s emulátorem ŘS) soubor `robotic_to_ini_Main.ini`, který doplňuje specifické informace pro roboty nad rámec standardního `to_ini`, obsahující informace o nástroji. Tento soubor se generuje správně a nebylo potřeba žádných úprav.



CHAN_DATA	Soubor DEF
MOUNT_NEXT_HEAD	Soubor SPF
MOUNT_NEXT_TOOL	Soubor SPF
robotic_to_ini_Main	Nastavení konfigu...
SinumerikSL_Cycles_47_SP2_HF1.cyc	Soubor CYC
ToolChange	Soubor SPF
ToolChangeVNCK	Soubor SPF
UNMOUNT_CURRENT_HEAD	Soubor SPF
UNMOUNT_CURRENT_TOOL	Soubor SPF
WAAMEND	Soubor SPF
WAAMSTART	Soubor SPF

Obr. 83: Složka s podprogramy

V původní implementaci se pod hlavičkou NC programu vypsala data pro posunutí nástroje a polohovadla. Tyto hodnoty jsou kritické pro správné odbavení simulace. Pokud se technologické hlavy během běhu nemění, jsou jejich parametry pevně zadány v ŘS a není potřeba je na reálném pracovišti číst z programu. Jelikož je reálné pracoviště momentálně provozováno s jednou hlavou – extruderem, je možné v postprocesoru potlačit výpis těchto hodnot, tím ulehčit čitelnosti NC programu pro uživatele (viz kapitola 10.3). Simulace tyto hodnoty musí někde získat. Výchozí hodnoty jsou uvedeny v souboru `CHAN_DATA.def` ve složce subprog. Původní hodnoty jsou nahrazeny hodnotami pro extruder a pro polohovadlo (které na pracovišti není, hodnoty jsou tedy nulové). Hodnoty pro extruder byly odečteny z 3D modelu. Na reálném pracovišti jsou nastaveny hodnoty mírně odlišné, získané změřením skutečně nasazeného extruderu a trysky. Díky tomu, že je programována špička nástroje,

respektive v tomto případě střed trysky, tento rozdíl nehraje roli. Důležité je, aby hodnoty posunutí odpovídaly rozměrům extruderu v daném prostředí (simulace nebo skutečné pracoviště). Po provedení této úpravy jsou hodnoty posunutí a natočení hlavy k dispozici pro simulaci, ale nezatěžují NC program pro skutečný stroj. Náhled tohoto souboru je na Obr. 84.

```
$MN_MM_NUM_TOOL_CARRIER=0
$MN_G53_TOOLCORR='H0'
$MC_ROB_X_CC_TOA_START_NUM = 1
N32 $MC_ROB_X_TTCFL_POS[0]=-506.000000
N34 $MC_ROB_X_TTCFL_POS[1]=134.726753
N36 $MC_ROB_X_TTCFL_POS[2]=-57.500000
N38 $MC_ROB_X_TTCFL_RPY[0]=0.000000
N40 $MC_ROB_X_TTCFL_RPY[1]=90.000000
N42 $MC_ROB_X_TTCFL_RPY[2]=0.000000
$MC_ROB_X_TOOL_DIR=1
$MC_ROB_X_EXT_ROT_BASE_OFFSET[0]=0.0
$MC_ROB_X_EXT_ROT_BASE_OFFSET[1]=0.0
$MC_ROB_X_EXT_ROT_BASE_OFFSET[2]=0.0
$MC_ROB_X_EXT_ROT_PART_OFFSET[0]=0.0
$MC_ROB_X_EXT_ROT_PART_OFFSET[1]=0.0
$MC_ROB_X_EXT_ROT_PART_OFFSET[2]=0.0
```

Obr. 84: Upravený obsah CHAN_DATA definičního souboru

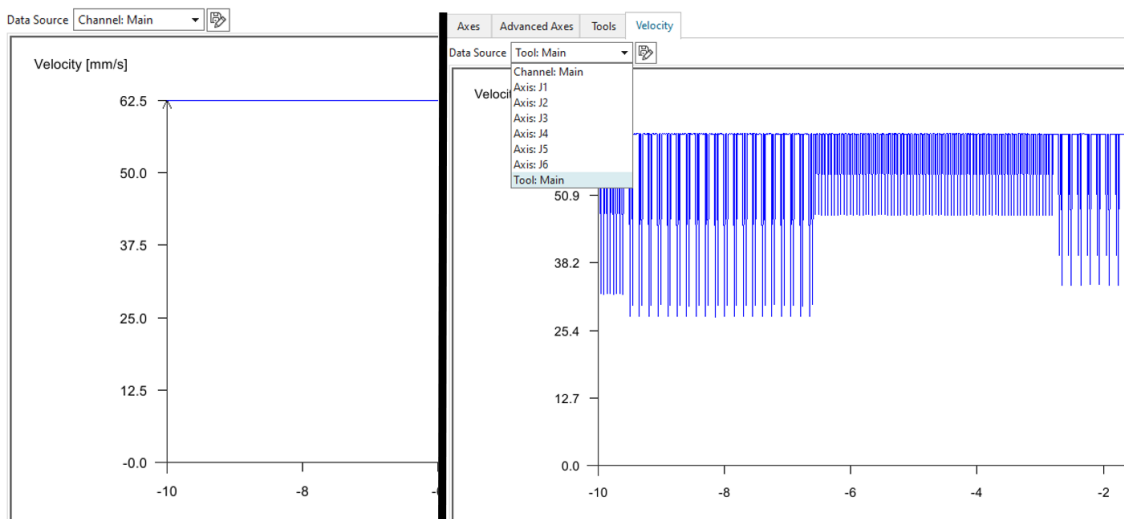
Určité novější funkce emulátorů ŘS, jako je podpora robotů a aditivních technologií, jsou implementovány mimo původní MCF soubor. Řešeny jsou v jazyce Python a tyto soubory mohou být umístěny u konkrétního stroje ve složce CSE driver nebo jsou centrální pro všechny modely v souborové struktuře Siemens NX. V tomto případě jsou provedeny dvě úpravy v Python souboru u tohoto konkrétního pracoviště. Úprava přidává kontrolu aktuálního čísla nosiče nástrojů, respektive toho, jestli je nástroj načten – proběhla výměna nástroje. Konkrétně se jedná o proceduru, která je volána příkazem M3. V hlavičce NC programu je z postprocesoru vypsána hodnota čekacích otáček, vypnutí a zapnutí extruze před začátkem samotné dráhy – tedy před voláním výměny nástroje. Po přidání této ověřující podmínky, která přeruší odbavení této procedury, funguje simulace správně. Provedená úprava je na Obr. 85. Stejně opatření je provedeno u funkce zvané pomocí funkce M5.

```
def RobotAdditiveActivateOn(channel: ChannelState) -> bool:
    nCurrentIdx = channel.GetControllerState().m_currentToolCarrierIndex
    if nCurrentIdx < 0:
        return False
    channel.Assert(nCurrentIdx >= 0, "Fatal", "Invalid current tool carrier index " + str(nCurrentIdx) + ".")
    sToolName = channel.GetControllerState().GetToolCarrierDataWithCheck(channel, nCurrentIdx).m_toolName
    if channel.GetToolParameter(sToolName, "purpose") == "additive":
        channel.SetToolMode(sToolName, "AddMaterial")
    elif channel.GetToolParameter(sToolName, "purpose") == "coloring":
        channel.SetToolMode(sToolName, "AddMaterial")
    return True
```

Obr. 85: Přidaná podmínka v python souboru CSE driveru

11.3 Verifikace rychlosti TCP v simulaci

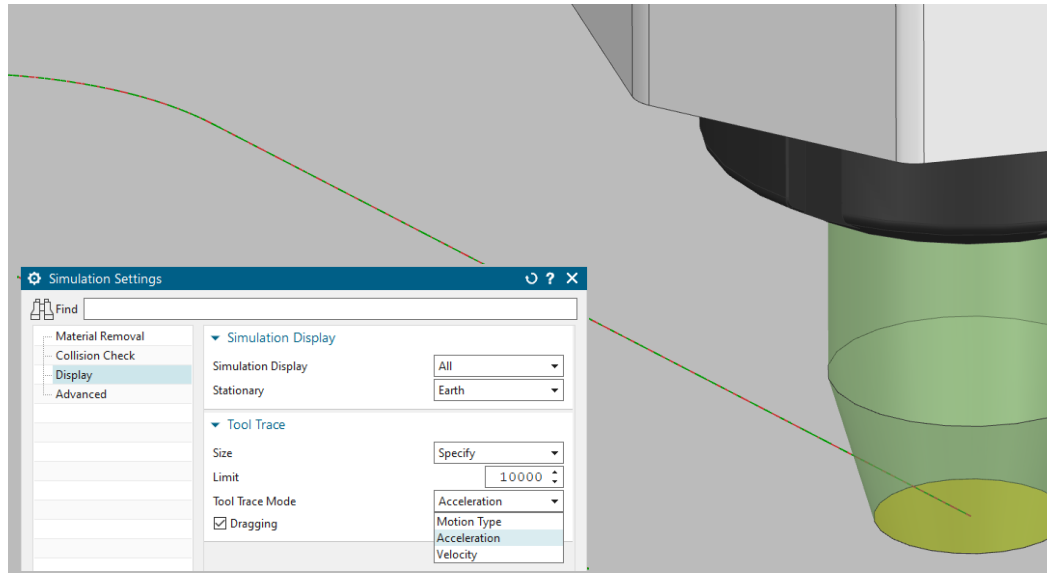
Simulační model s emulátorem řídicího systému lze po nastavení korektních kinematických parametrů jednotlivých strojních os použít i k poměrně přesné predikci strojích časů a verifikaci dosažitelnosti požadované rychlosti. V tomto případě je také možné tímto přístupem ověřit čas na jednu vrstvu. Při spuštění simulaci je možné sledovat aktuální rychlost a její průběh s několika sekundovým záznamem. Toto zobrazení se nachází na záložce Velocity v podokně Machine Status. V základním nastavení je dostupná pouze možnost vykreslovat profil rychlosti celého kanálu bez zahrnutí vlivů zrychlení tak, jak je vidět na Obr. 86 vlevo. Pravá část Obr. 86 ukazuje pokročilejší možnosti, například rychlosti jednotlivých os. Finální varianta umožňuje sledovat rychlost pohybu TCP s vykreslováním vlivu zrychlení a dalších parametrů. Bohužel ve verzi NX2306 v případě robotických emulátorů pravděpodobně nefunguje správně režim Fly-By (režim, kdy není požadováno zastavení, respektive přesné najetí na každém bloku). V případě ŘS Sinumerik je toto chování vyvoláno rodinou funkcí G64. Pravděpodobně z tohoto důvodu je průběh velmi zakmitaný a je těžko interpretovatelný.



Obr. 86: Graf rychlosti při simulaci s porovnáním zdroje výstupu

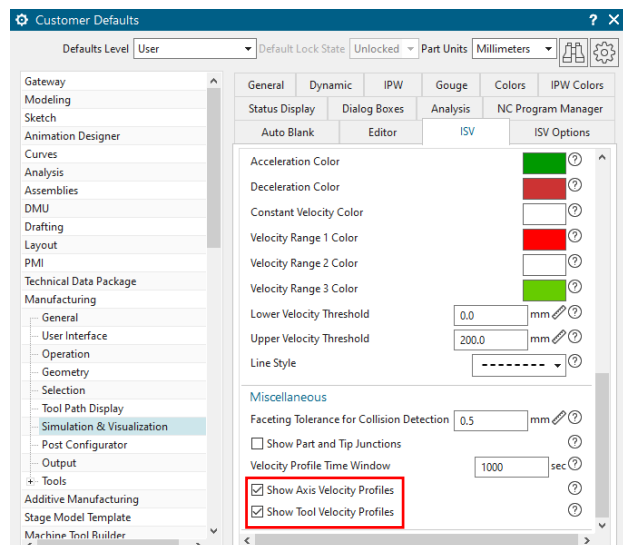
Toto se propisuje i na obarvené dráze dle zrychlování, která je k vidění na Obr. 87, kde jsou vidět střídající se úseky zrychlování (zeleně) a brždění (červeně) místo pohybu konstantní rychlostí. Konfigurace obarvení dráhy se provádí v nastavení simulace a je možné obarvovat podle typu pohybu, rychlosti

nebo zrychlení. Limit určuje maximální délku zobrazených úseků. Zaškrtnuté pole Dragging poté zapne uvažování kinematických parametrů pro obarvení dráhy, je tedy nutné tuto volbu použít. Okno s nastavením je rovněž zobrazeno na Obr. 87.



Obr. 87: Obarvená dráha dle zrychlení při simulaci

Pro zobrazení pokročilých možností zobrazování, je nutné aktivovat dvě funkce v nastavení. Konkrétně se jedná o možnosti v červeném rámečku na Obr. 88. Obrázek také ukazuje, kde se tyto možnosti nacházejí. Na stejné kartě je možné konfigurovat i barvy jednotlivých jevů. Změny zde provedené se projeví až po restartu Siemens NX.



Obr. 88: Aktivace pokročilých možností simulace

12 Testovací dílec

Pro ověření funkčnosti pracoviště a softwarových součástí vytvořených v rámci této práce byly provedeny testovací tisky. Pro ověření základní funkčnosti byl zvolen dílec vycházející z komerčně dostupného stolku, který je na Obr. 89.



Obr. 89: Stolek vyráběný komerčně 3D tiskem [63]

Tento stolek je vyráběn technologií velkoformátového 3D tisku, takže není potřeba řešit otázku jeho vyrobitelnosti. Jelikož není 3D model tohoto objektu nikde dostupný, bylo potřeba model vytvořit. Po jeho vytvoření následovala příprava v CAMu. Jako nejvhodnější operace vyplynula Planar Thinwall. Díky vytvořenému postprocesoru stačí v nastavení operace vybrat řídicí geometrii, nastavit parametry trysky a parametry strategie a slicování. V tomto případě byla použita strategie Levels, tedy tvorba vrstev v rovině.

Naklopení extruderu bylo nulové. Do UDE na danou operaci byly nastaveny příslušné hodnoty. Hlavní parametry jsou uvedeny v tabulce v Příloze č. 2. Pro tisk byl použit materiál PIPG 30 – Post Industrial PETG s 30 % skleněných vláken. Vzniklý dílec je na Obr. 90. Celkově lze říci, že testovací tisk proběhl v pořádku. Tím bylo ověřeno, že úpravy v PLC části jsou správně provedeny a že program, jenž vystupuje z postprocesoru, neobsahuje žádné chyby. Automaticky vypočtené hodnoty posuvu a otáček extruderu byly také správné. Čas na jednu vrstvu odpovídal a množství materiálu udávající šířku vrstvy bylo také adekvátní. Základní funkčnost pracoviště je tímto ověřena.



Obr. 90: Stolek vytištěný na pracovišti

Druhý tisk byl zaměřen na otestování vlivu přidané funkce pro řízení rychlosti pohybu extruderu na nerovinných úsecích. Testovací dílec i parametry byly shodné s prvním tiskem. Hned po začátku tisku však docházelo k přetěžování extruderu a bylo potřeba manuálně snížit otáčky a posuvovou rychlost. Přímé srovnání tedy není možné, avšak na Obr. 91 ukazuje porovnání stejného místa na dílci. Vlevo je pohled na výtisk bez optimalizační funkce a vpravo je výtisk s aktivní funkcí. Z tohoto testu lze vyvodit, že optimalizační funkce nepřináší pozorovatelnou změnu v kvalitě výtisku. Může to být dáno zanedbatelným zásahem do posuvové rychlosti, jelikož maximální odchylka od nominální rychlosti na tomto dílci činí cca 7 %. Každopádně i bez optimalizační funkce je se správnými parametry tisku kvalita výtisků velmi dobrá, takže v tomto ohledu není moc velký prostor ke zlepšení.



Obr. 91: Porovnání rohu výtisku vlevo konvenčně a vpravo s optimalizační funkcí

Nakonec byl vytištěn dílec demonstrující schopnost tisknout modely s proměnnými délkami vrstev. Na Obr. 92 je k vidění vzniklý dílec. Rozdíly v hodnotách pro vybrané vrstvy jsou zaneseny v Příloze č. 2. Tento tisk se podařil bez problému a ukázalo se, že celé pracoviště včetně přípravy NC programu funguje správně. Vytisknout takovýto dílec by bez vzniklého postprocesoru nebylo proveditelné, jelikož je potřeba měnit parametry tisku v průběhu dráhy.



Obr. 92: Dílec s rozdílnými délkami vrstev

13 Závěr

V rámci rešerše jsou popsány potřebné znalosti a souvislosti o problematice. Popsáno je také řešené pracoviště a jeho výchozí stav včetně problematiky řízení robotů pomocí řídicího systému Sinumerik 840D sl. Rešerše se věnuje i tématu robotů obecně, poznatkům ohledně aditivních technologií a velkoformátovému 3D tisku. Součástí je také popis softwaru včetně analýzy možností využití Siemens NX pro řešené pracoviště.

Vlastní řešení se skládá z více dílčích částí. První část spočívá v integraci nové technologie (extruderu CEAD E25) do stávajícího pracoviště (robot KUKA KR60 HA s ŘS Sinumerik 840D). V PLC projektu byly definovány nové funkce pro ovládání technologie vycházející z M a H funkcí v NC programu. Důležité je propojení pracoviště s uživatelem, k čemuž slouží nově zavedená tlačítka na ovládacím panelu Sinumerik. V PLC byly také zavedeny např. hlídací funkce pro eliminaci nenávratného poškození technologického zařízení. Pozornost byla také věnována alarmům a chybovým hláškám pro správné předání informací o stavech obsluhy. Popsanými úpravami byl splněn první cíl práce.

V rámci další části byl vyřešen postprocesor pomocí nástroje Post Configurator v Siemens NX. Vytvořené řešení odemyká řadu možností, které bez tohoto postprocesoru není možné s CAM systémem Siemens NX použít. Kromě přizpůsobení standardních funkcí, které musí postprocesor běžně zajišťovat při generaci NC programů, byla vytvořena nová funkce, která počítá posuvovou rychlost a otáčky extruderu pro každou vrstvu. Díky tomu je možné tisknout dílce s rozdílnými délkami vrstev při dodržení správného množství materiálu a času jedné vrstvy. Nemálo proto ulehčuje práci technologovi s technologickou přípravou výroby. Další důležitou funkcí je plynulá změna otáček extruderu při použití spirálové strategie, kdy se na začátku a na konci dráhy mění mezera mezi tryskou a podložkou nebo předchozí vrstvou. Tyto dvě funkce je možné používat i pod naklopením, což je častý případ užití této technologie. Opět se jedná o funkce, které nejsou při použití Siemens NX běžně dostupné a jsou nově vytvořené. Pro vstup technologických parametrů nad rámec operace v Siemens NX vzniklo uživatelské rozhraní. Tímto byl splněn druhý cíl práce.

Optimalizační funkce, která byla implementována do postprocesoru jakožto jeho nadstavba, byla vytvořena v podobě externí knihovny napsané v jazyce C# a sestavené do dll knihovny. Hlavní myšlenka této funkce spočívá v řízení posuvové rychlosti na zakřivených úsecích podle poloměru křivosti těchto úseků. Porovnávána je velikost plochy na zvolené straně od střednice pro daný pohybový blok na zakřivené dráze vůči velikosti plochy pro případ úseku rovného. V závislosti na zvolené straně od střednice a smyslu zakřivení (vlevo nebo vpravo) se poté na zakřivených úsecích rychlost sníží nebo zvýší, čímž dojde ke změně objemu přidaného materiálu na daném úseku. Návrhem optimalizační funkce byl splněn další cíl práce. Implementace a ověření této funkce byly realizovány nad rámec definovaných cílů práce.

Výstupem z řešení je i simulační model s emulátorem řídicího systému. Vytvořený kinematický model vycházející z 3D modelu pracoviště je mimo jiné potřebný i pro návrh a verifikaci dráhy při programování robotů pomocí Siemens NX. Úpravy v emulátoru řídicího systému spočívaly primárně v jeho rozšíření o funkce ovládající technologie přidané postprocesorem. Vytvořený simulační model s emulátorem řídicího systému plní třetí cíl práce.

Nakonec byla ověřena celková funkčnost pracoviště. Z výtisků lze vyvodit, že pracoviště se podařilo zprovoznit a nyní je možné ho plně využívat díky vzniklému softwaru, jenž značně rozšiřuje možnosti pracoviště s použitím Siemens NX. Zkušební tisky proběhly bez problému a ukázaly, že užitím vzniklého postprocesoru je možné tisknout i dílce s rozdílnými délkami vrstev ve velmi dobré kvalitě. Testována byla též nadstavbová optimalizační funkce, jejíž přínos nebyl patrný, jelikož kvalita výtisků byla i bez této funkce velmi dobrá. Tisk v naklopené rovině, použití dalších operací a využití spirálové strategie pro hlavní operaci bylo ověřeno pouze virtuálně pomocí vytvořeného simulačního modelu s emulátorem ŘS.

V předešlých odstavcích je uvedeno, jakým způsobem toho bylo dosaženo splnění všech definovaných cílů práce. Implementace a ověření optimalizační funkce pro řízení posuvové rychlosti na zakřivených úsecích byly provedeny nad rámec zadaných cílů.

Seznamy

Seznam literatury

- [1] AKBARI, Saeed, Jan JOHANSSON, Emil JOHANSSON, Lenny TÖNNÄNG a Seyed HOSSEINI. Large-Scale Robot-Based Polymer and Composite Additive Manufacturing: Failure Modes and Thermal Simulation. *Polymers* [online]. 2022, **14**(9) [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14091731>
- [2] *Ai Build* [online]. 2023 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://ai-build.com/>
- [3] Additive manufacturing with NX. In: *GEO PLM* [online]. 2018 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.geoplmm.com/knowledge-base-resources/GEOPLM-Siemens-PLM-Additive-Manufacturing-with-NX-.pdf>
- [4] SINUMERIK Run MyRobot /Machining. In: *SiePortal* [online]. 2023 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109478857/sinumerik-run-myrobot-machining?dti=0&lc=en-CZ>
- [5] SINUMERIK Run MyRobot /Direct Control. In: *SiePortal* [online]. 2023 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109758486/sinumerik-run-myrobot-direct-control-plc?dti=0&lc=en-CZ>
- [6] RYBÍN, J. *Automatické řídicí systémy*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00694-8.
- [7] What is a PLC. In: *UnitronicsPLC* [online]. [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://www.unitronicsplc.com/what-is-plc-programmable-logic-controller/>
- [8] SIEMENS. Řídicí systémy SIMATIC. In: *SIEMENS* [online]. [cit. 2024-01-01]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/cz/cs/products/automation/systems/industrial/plc.html>
- [9] IEC. *Programmable controllers - Part 3: Programming languages*. 2013.
- [10] STEP 7 and WinCC Engineering V18: System Manual. In: *SiePortal* [online]. [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: https://support.industry.siemens.com/dl/files/056/109815056/att_1121875/v5/STEP_7_WinCC_V18_enUS_en-US.pdf



- [11] NETOPIIL, Ing. Jiří. Programování a možnosti nasazení robotů. In: *MM Spektrum* [online]. 2011 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/programovani-a-moznosti-nasazeni-robotu>
- [12] What is an industrial robot? Industrial robot definition. In: *Robotnik* [online]. 2022 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://robotnik.eu/what-is-an-industrial-robot-industrial-robot-definition/>
- [13] Robot welding in car factory. In: *Metalworking World Magazine* [online]. 2020 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://www.metalworkingworldmagazine.com/files/2020/03/Apertura.jpg>
- [14] ZHANG, Dan a Bin WEI. *Mechatronics and Robotics Engineering for Advanced and Intelligent Manufacturing* [online]. In: . [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: doi:/978-3-319-33581-0
- [15] FANUC - SCARA Robots. In: *FANUC* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/de/en/robots/robot-filter-page/scara-series/selection-support>
- [16] *International Federation of Robotics* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://ifr.org/>
- [17] What Are Delta Robots Used For?. In: *ACROME* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://acrome.net/post/what-are-delta-robots-used-for>
- [18] PANTELEEV, Bc. Alexander. *Integrace robotu do pracovního prostoru stroje pro pomocné funkce*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [19] KRATĚNA, Tomáš, Petr VAVRUŠKA, Jiří ŠVÉDA a Michael VALÁŠEK. Postprocessor for Verification of Robot Movements with Additional Axis after Toolpath Optimization. *CIRP* [online]. 2021, **2021**(101), 154-157 [cit. 2023-07-27]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.018>
- [20] XIONG, Gang, Ye DING a LiMin ZHU. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2019, (55), 19-28 [cit. 2023-07-27]. ISSN 0736-5845. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.001>
- [21] KOLÁŘ, Bc. BRONISLAV. *OBRÁBĚNÍ PROSTOROVÝCH OBJEKTŮ POMOCÍ PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU*. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT V Brně.



- [22] JARKOVSKÝ, Tomáš. *Robotické obrábění prostorových dílů*. Liberec, 2019. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci.
- [23] CEAD AM Flexbot. In: *CEAD Group* [online]. [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://ceadgroup.com/solutions/robot-based-solutions/>
- [24] *GE Additive* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/>
- [25] What is additive manufacturing?. In: *GE Additive* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- [26] *RAMLAB* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.ramlab.com/>
- [27] EBDM_Illustration. In: *SCI AKY inc* [online]. [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder>
- [28] Technology overview polymer Additive Manufacturing. In: *AM POWER* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://ampower.eu/infographics/polymer-additive-manufacturing/>
- [29] XU, Alex, Bernhard LANGEFELD, Martin ERHARTER a Vatche KOURKEJIAN. Market, machines and materials: The new playground for large chemical companies. In: *Roland Berger* [online]. 2020 [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Polymer-additive-manufacturing-Market-today-and-in-the-future.html>
- [30] SCALING BACK PRODUCTION TIME OF AUTOMOTIVE AUTOCLAVE TOOL FROM WEEKS TO DAYS. In: *CEAD Group* [online]. 2021 [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://ceadgroup.com/portfolio-items/scaling-back-production-time-automotive-autoclave-tool/>
- [31] 3D Printing Composite Tooling vs. Traditional Composite Tooling: What are the Differences?. In: *RobotExtruder* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://robotextruder.com/3d-printing/3d-printing-composite-tooling-vs-traditional-composite-tooling-what-are-the-differences/>
- [32] Composite Tooling. In: *Stratasys* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/industries-and-applications/3d-printing-applications/tooling/composite-tooling/>



- [33] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [34] BOUCHAL, Petr. *TECHNOLOGIE VÝROBY A ZPRACOVÁNÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT V Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [35] MATERIALS. In: *CEAD Group* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://ceadgroup.com/materials/>
- [36] BEAD. In: *CEAD Group* [online]. [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://ceadgroup.com/solutions/gantry-based-solutions/bead/>
- [37] SEIDL, Ing. Martin. Další stroje pro zpracování plastů. In: *Publi* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/14.html>
- [38] CEAD E25. In: *CEAD Group* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://ceadgroup.com/solutions/technology-components/e25/>
- [39] Kuka Robot Systems. In: *KUKA* [online]. [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/home/stage/kuka-robot-systems.jpg?rev=b6b7cc90d2094221a4bceadba5d10e2c&w=767&hash=17F9F8C68F32FE4516E2C5C02336E2A0>
- [40] KRATĚNA, Bc. Tomáš. *Postprocesor a simulační model pro robota s přídatnými osami*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [41] Prusa Slicer. In: *Prusa Research* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/prusaslicer_424/
- [42] NX AM Multi-Axis. In: *Siemens sw* [online]. [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/nx/products/nx-am-multi-axis/>
- [43] Prusa Slicer. In: *DigitalFire* [online]. [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://digitalfire.com/picture/BomERYouPN>
- [44] Ai BUILD software. In: *Ai BUILD* [online]. 2022 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: https://i0.wp.com/ai-build.com/wp-content/uploads/2022/05/AiSync_MOBILE_3.jpg?w=1872&ssl=1
- [45] HyperMILL Additive Manufacturing. In: *OPEN MIND* [online]. [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://www.openmind-tech.com/en/cam/additive-manufacturing/>

- [46] NX CAM software. In: *SIEMENS sw* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/nx/manufacturing/cam-software/>
- [47] NX CAM Robotics Programming. In: *GEO PLM* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.geoplms.com/knowledge-base-resources/GEOPLM-Siemens-PLM-NX-CAM-Robotics-Programming.pdf>
- [48] Robotic programming. In: *SIEMENS sw* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/nx/manufacturing/robotic-machining-programming/>
- [49] ZBÍRAL, Jan. *Simulační model obráběcího stroje v CAM systému Siemens NX s verifikací strojního času*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [50] SUN, Pengpeng, Qiang LIU, Jian WANG, Zhenshuo YIN a Liuquan WANG. Rotation-Angle Solution and Singularity Handling of Five-Axis Machine Tools for Dual NURBS Interpolation. *Machines* [online]. 2023, **11**(2) [cit. 2023-07-16]. ISSN 2075-1702. Dostupné z: doi:10.3390/machines11020281
- [51] Postprocessing and machining simulation. In: *SIEMENS sw* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/nx/manufacturing/cam-software/postprocessing-simulation/>
- [52] BARTOŠ, Filip. *Effective Control of CNC Milling Machine Tool when Machining Complex Parts* [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-12-26]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/99600>. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Vavruška, Ph. D.
- [53] *SIEMENS Post Hub* [online]. In: . [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: https://posthub.sws.siemens.com/#/resources?locale=en_US
- [54] Cycle 800 - Swiveling. In: *SIEMENS* [online]. 2023 [cit. 2023-12-26]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/industries/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/cnc4you-videos/ttt-mill/cycle800.html>
- [55] GÓRECKI, Jan. *Postprocesor s korekcí posuvové rychlosti o úhlovou rychlost pohybu pro CNC stroje* [online]. Praha, 2020 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/89753>. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Vavruška, Ph. D.



- [56] Gantry robot tecno-840. In: *TecNoWey* [online]. 2010 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Robot_Portico_tecno-840.jpg
- [57] SMOLENSKI, Nikola. *SCARA configuration* [online]. In: . [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SCARA_configuration.png
- [58] LU, Xingguo a Ming LIU. Optimal Design and Tuning of PID-Type Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Delta Parallel Robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. 2016, **13**(3) [cit. 2023-07-16]. ISSN 1729-8814. Dostupné z: doi:10.5772/63941
- [59] SPONG, , HUTCHINSON a VIDYASAGAR. Kinematics decoupling. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Kinematics-decoupling-Spong-Hutchinson-and-Vidyasagar-2006_fig8_348976058
- [60] Robot research cell with automatic processing head changing system during wire laser material deposition at Fraunhofer ILT. In: *Tctmagazine* [online]. 2020 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: https://www.tctmagazine.com/downloads/15012/download/Fraunhofer_ILT.jpg?cb=70ed3e14e485c539cf40f66784c17204&w=620&h=
- [61] Polishing and grinding robot. In: *ITRI TODAY* [online]. 2020 [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: https://itritoday.itri.org/100/content/en/unit_02-5.html
- [62] Prusa MK4. In: *Prusa Research* [online]. [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-mk4-2/?gad=1&gclid=Cj0KCQjwqs6lBhCxARIsAG8YcDhvSLbVJx6DhwXHqywUrl7M5TTgJ2cMjD7EEyMgzng5DGRF8MxXWGUaAjJ5EALw_wcB
- [63] Side table. In: *YANKO DESIGN* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.yankodesign.com/2023/06/20/this-minimal-3d-printed-side-table-features-unique-interlocking-storage-sections/>
- [64] Robot arc welding. In: *KUKA* [online]. [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/products/process-technologies/welding/rob_arc_welding_1.png?rev=-1&w=767&hash=08A709558734C9086CDC5AF68C6A3D23

Seznam použitého softwaru

Siemens NX 2306
Siemens Proneta
Siemens TIA Portal V18
Siemens Machine Configurator
Notepad++
Microsoft Word
Visual Studio 2022

Seznam obrázků

Obr. 1: Robotické pracoviště v CIIRC	11
Obr. 2: Schéma propojení Run MyRobot/Machining [4]	12
Obr. 3: Schéma Run MyRobot/Direct Control [5]	13
Obr. 4: PLC Siemens 1200 v kompaktním uspořádání (vlevo) a PLC Siemens 1500 v modulárním provedení (vpravo) [8]	14
Obr. 5: Prostředí TIA Portal V18	15
Obr. 6: Svařovací robot [13]	16
Obr. 7: Portálový manipulační robot [56]	17
Obr. 8: Kinematika SCARA robotu [57]	17
Obr. 9: Kinematika Delta robotu s třemi stupni volnosti [58]	18
Obr. 10: Kinematika angulárního robota [59]	18
Obr. 11: Použití dvouosého polohovadla [64]	19
Obr. 12: Robot v aplikaci se statickou pásovou bruskou [61]	19
Obr. 13: Robot s technologickou hlavou pro laserové navařování [60]	20
Obr. 14: Pracoviště hybridní polymerní výroby [23]	21
Obr. 15: 3D tiskárna Prusa Mk4 [62]	22
Obr. 16: Direct Energy Deposition - drátový materiál [27]	24
Obr. 17: Přehled aditivních technologií polymerů [29]	25
Obr. 18: Extruder na filament [28]	26
Obr. 19: Vytíštěná forma pro laminaci dveří sportovních vozů [30]	28
Obr. 20: Lisování v autoklávu [33]	29
Obr. 21: Vstupní materiál pro extruder – pelety (granulát) HDPE	29
Obr. 22: Portálový stroj BEAD od výrobce Belotti a CEAD pro hybridní výrobu [36]	30
Obr. 23: Šnekový extruder [37]	31
Obr. 24: Robot a příruční panel (teach pendant) KUKA [39]	32
Obr. 25: Pohled do prostředí PrusaSlicer [43]	33
Obr. 26: Prostředí AI Build [44]	34
Obr. 27: Okno pravidel pro robota	35



Obr. 28: Různé konfigurace robota pro stejnou dosaženou polohu	36
Obr. 29: Simulace robota s emulátorem ŘS a simulací přidávání materiálu	37
Obr. 30: Zkrácený přehled dostupných technologických operací z kategorie Multi Axis Deposition v Siemens NX [42]	38
Obr. 31: Náhled na nastavení sliceru v NX CAM	39
Obr. 32: Tři základní kinematické konfigurace víceosých obráběcích strojů [50]	40
Obr. 33: Okno Post Builder	41
Obr. 34: Okno Post Configurator	42
Obr. 35: Okno s nastavením aditivní vrstvy v Post Configurator	43
Obr. 36: Detekovaná kolize při simulaci s emulátorem ŘS	44
Obr. 37: Skladba simulačního modelu s emulátorem ŘS	44
Obr. 38: Schéma řízení pracoviště s vyznačenými řešenými částmi (červeně)	46
Obr. 39: Původní konfigurace pracoviště	47
Obr. 40: Základní jednotka technologie a v pozadí sušička materiálu	48
Obr. 41: Řídící prvky v rozvaděči základní jednotky technologie	49
Obr. 42: Nastavení IP adresy pomocí softwaru Proneta	50
Obr. 43: Nastavení adres pro PN/PN coupler	51
Obr. 44: Výsledná konfigurace a propojení pracoviště	51
Obr. 45: Odpojení proměnných od fyzického vstupu	52
Obr. 46: Nastavení konstanty TRUE do paměťových proměnných	52
Obr. 47: Náhled tabulky proměnných pro komunikaci s technologií	52
Obr. 48: Volání přidanych funkcí v hlavním programu	53
Obr. 49: Formát textu alarmu v Sinumerik	54
Obr. 50: Náhled funkce nastavující H adresy	54
Obr. 51: Náhled podmínky pro řešení přidanych technologických M funkcí	55
Obr. 52: Funkce pro zapnutí otáček s hlídáním signálu připravenosti technologie ze základní jednotky technologie	55
Obr. 53: Ovládací rozhraní Sinumerik (MCP)	56
Obr. 54: Přenosné ovládání HPU	56
Obr. 55: Funkce pro hlídání času, kdy extruder stojí nahřátý	57
Obr. 56: Spuštění alarmu po dokončení programu	58
Obr. 57: Sekvence při zastavení programu v průběhu dráhy	58
Obr. 58: Vhodné operace pro použitou technologii	59
Obr. 59: Programování operace s naklopeným extruderem	59
Obr. 60: Vzorové pracoviště výchozího postprocesoru	60
Obr. 61: Správce vrstev Post Configurator	61



Obr. 62: Inspekční nástroj postprocesování	62
Obr. 63: Nastavení adres rotačních kloubů	63
Obr. 64: Úprava šablony lineárního pohybu pomocí integrovaného editoru.....	63
Obr. 65: UDE pro základní ovládání postprocesoru.....	64
Obr. 66: UDE pro optimalizační funkci.....	64
Obr. 67: Příklad upravené hlavičky NC programu.....	65
Obr. 68: Procedura definující přídavné proměnné pro záznam jejich hodnot.....	66
Obr. 69: Náhled na výpis technologických informací pod hlavičkou NC programu.....	67
Obr. 70: Vývojový diagram procedury nastavující hodnoty posuvu a otáček	67
Obr. 71: Rozdíly v hodnotách posuvé rychlosti a otáček extruderu pro nejkratší a nejdelší vrstvu.....	69
Obr. 72: Porovnání rychlostí při nanášení materiálu na a) rovném úseku a b) zakřiveném úseku.....	70
Obr. 73: Schéma přípravy dat a volání externí knihovny	72
Obr. 74: Znázornění sčítání velikosti úhlů mezi vektory za účelem filtrace - a) příklad lineárního úseku a b) příklad zakřiveného úseku	73
Obr. 75: Znázornění způsobu určení zakřivení a) doprava nebo b) doleva	74
Obr. 76: Logika okrajových podmínek pro optimalizační funkci	75
Obr. 77: Načtená CL data pro vizuální verifikaci průběhu posuvové rychlosti	76
Obr. 78: 3D model pracoviště	78
Obr. 79: Pohled na finální strom kinematiky v modulu Machine Tool Builder.....	79
Obr. 80: Nastavení strojní osy v MTB.....	79
Obr. 81: 3D model extruder a konfigurace v MTB.....	80
Obr. 82: Machine Configurator a chování funkce M3.....	81
Obr. 83: Složka s podprogramy	82
Obr. 84: Upravený obsah CHAN_DATA definičního souboru	83
Obr. 85: Přidaná podmínka v python souboru CSE driveru	83
Obr. 86: Graf rychlosti při simulaci s porovnáním zdroje výstupu.....	84
Obr. 87: Obarvená dráha dle zrychlení při simulaci	85
Obr. 88: Aktivace pokročilých možností simulace	85
Obr. 89: Stolek vyráběný komerčně 3D tiskem [63].....	86
Obr. 90: Stolek vytištěný na pracovišti.....	86
Obr. 91: Porovnání rohu výtisku vlevo konvenčně a vpravo s optimalizační funkcí.....	87
Obr. 92: Dílec s rozdílnými délkami vrstev.....	87



Seznam tabulek

Tab. 1: Popis veličin ve vztahu (1).....	68
Tab. 2: Varianty nastavení strategií pro operaci Planar Thinwall	69

Seznam příloh

Textové přílohy:

Příloha č. 1: Vývojový diagram hlavní procedury základního postprocesoru	str. P2
Příloha č. 2: Tabulky s parametry testovacích tisků	str. P3
Příloha č. 3: Uživatelský manuál k simulačnímu modelu	str. P4
Příloha č. 4: Uživatelský manuál k postprocesoru	str. P7
Příloha č. 5: Schéma propojení pracoviště	str. P10

Elektronické přílohy:

NC_programy.zip
Testovaci_dilce_foto.zip
Testovaci_dilce_prt.zip
Simulace_tisku.mp4

Přílohy na SD kartě:

NC_programy.zip
Testovaci_dilce_foto.zip
Testovaci_dilce_prt.zip
Testovaci_dilce_prt_SM.zip
KUKA_KR60HA_AM_CELL_sinumerik.mtk – obsahuje simulační model a postprocesor
RmrKukaCiirc_V18_extruder.zap – archiv PLC projektu
Simulace_tisku.mp4

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



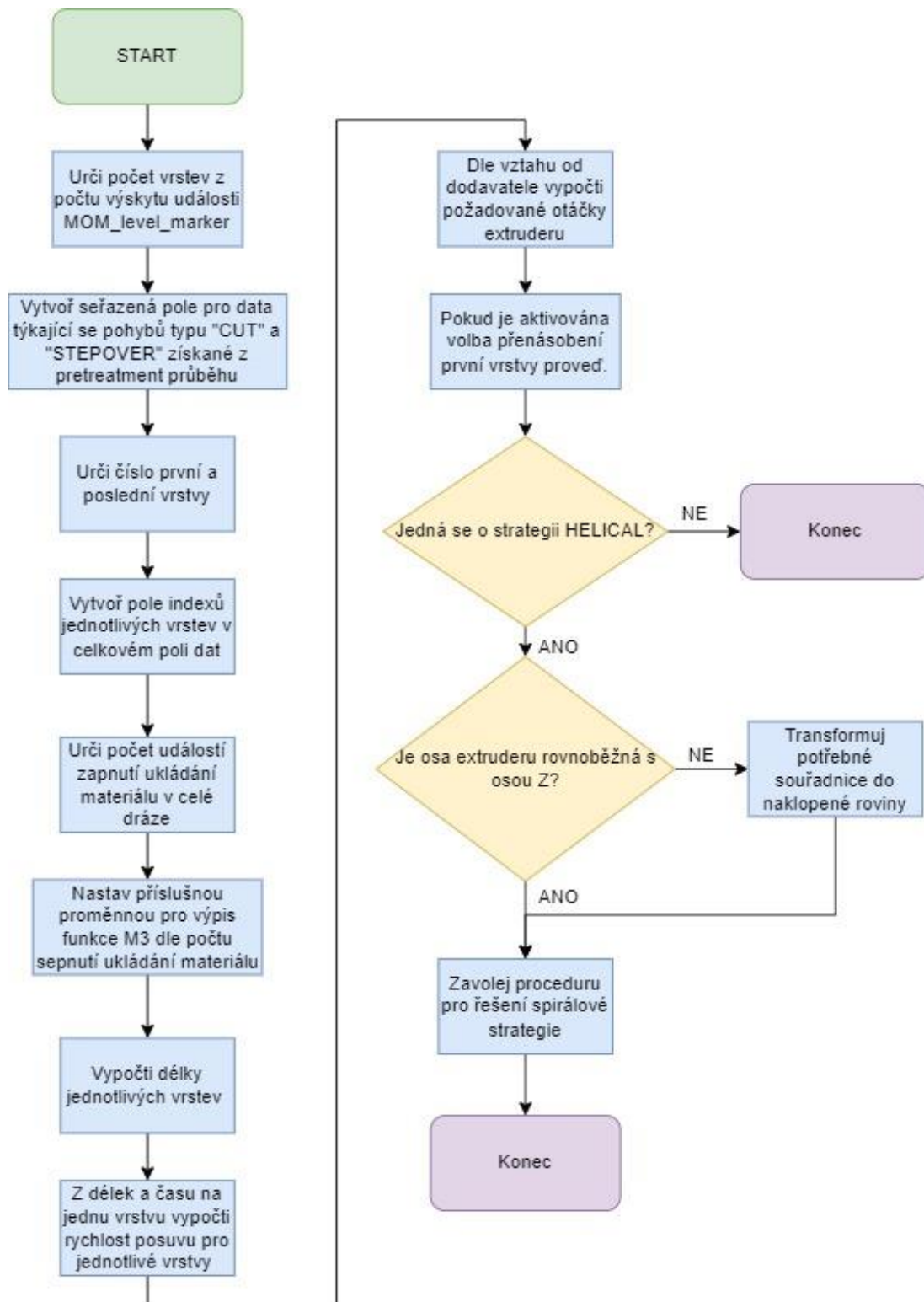
Diplomová práce

Textové přílohy

Bc. Jan Zbiral

Příloha č. 1

Vývojový diagram hlavní procedury základního postprocesoru



Příloha č. 2

Tabulky s parametry testovacích tisků

Výtisk	Materiál	Teplota sušení	Doba sušení	Teplota 1	Teplota 2	Teplota 3	Teplota 4	Otáčky šneku	Rychlost TCP	Požadovaný čas na vrstvu	Délka vrstvy	Požadovaná šířka vrstvy	Výška vrstvy	Tryska a	Uvazovaná mat. konst.
		[°C]	[hodiny]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[rpm]	[mm/min]	[sekundy]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Stolek neopt.	PIPG 30 GF MCPP	65	1	220	235	240	250	28,95	3217	70	3753	9	2	6 (flat)	2000
Stolek opt.	PIPG 30 GF MCPP	65	4	220	235	240	250	28,95	3217	70	3753	9	2	6 (flat)	2000
Vaza - různé délky vrstev	PIPG 30 GF MCPP	65	2	220	235	240	250	5,4 / 8,6	600 / 957	60	600 / 957	9	2	6 (flat)	2000

Parametry vrstev pro poslední testovací výtisk s proměnnými délkami vrstev												
Číslo vrstvy	[-]	1	10	30	50	70	90	110	130	150		
Délka vrstvy	[mm]	958	918	836	760	693	640	608	595	600		
Vypočtená posuvová rychlost	[mm/min]	958	918	836	760	693	640	608	595	600		
Vypočtené otáčky extruderu	[ot/min]	8,6	8,3	7,5	6,8	6,2	5,8	5,5	5,3	5,4		
Odhylka od střední hodnoty (mezi nejkratší a nejdelší vrstvou)	[%]	23%	18%	8%	-2%	-11%	-18%	-22%	-23%	-23%		

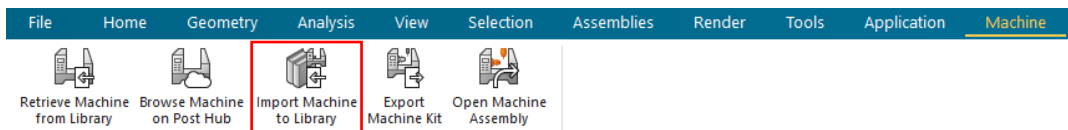
Příloha č. 3

Uživatelský manuál k simulačnímu modelu

1) Instalace simulačního modelu

Instalace probíhá načtením tzv. Machine Kitu. Jedná se o soubor s přílohou .mtk a obsahuje kompletní softwarové řešení vytvořené pro Siemens NX – simulační model, postprocesor i nastavenou nástrojovou hlavu (extruder).

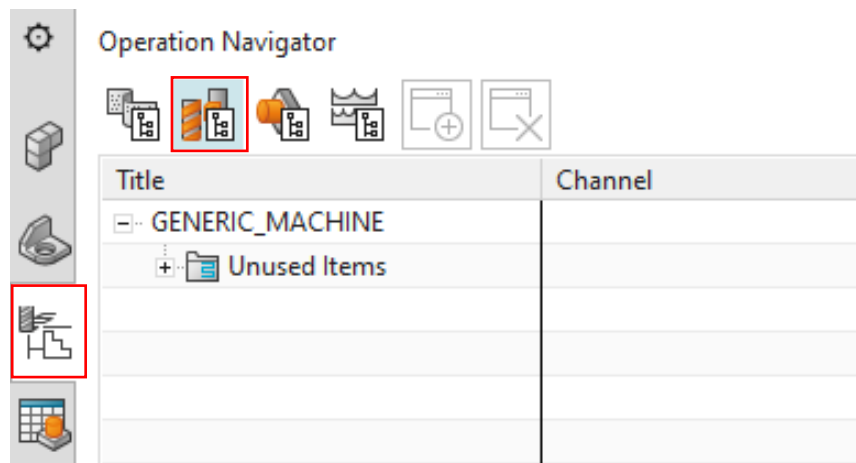
Prvně je potřeba otevřít libovolnou (i prázdnou) součást v modulu Manufacturing v NX. Následně vybrat volbu Import Machine to Library (viz obrázek níže) z karty Machine.



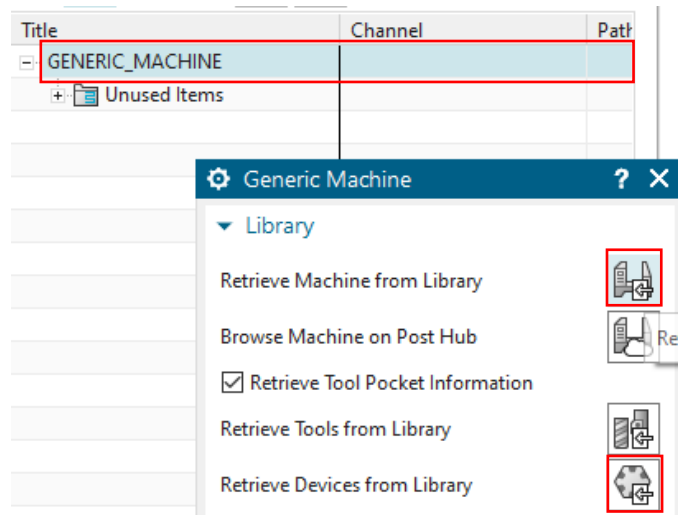
Následně se pomocí průzkumníka souborů zvolí Machine Kit soubor pracoviště. V okně, které se objeví není potřeba nic měnit a stačí potvrdit import tlačítkem OK. Pokud všechno proběhlo bez chyb, je nyní vše nainstalováno a připraveno pro použití. Pozn.: Může být potřeba manuálně zrušit příznak „Jen pro čtení“ složky MACH v nainstalovaných souborech Siemens NX.

2) Použití simulačního modelu

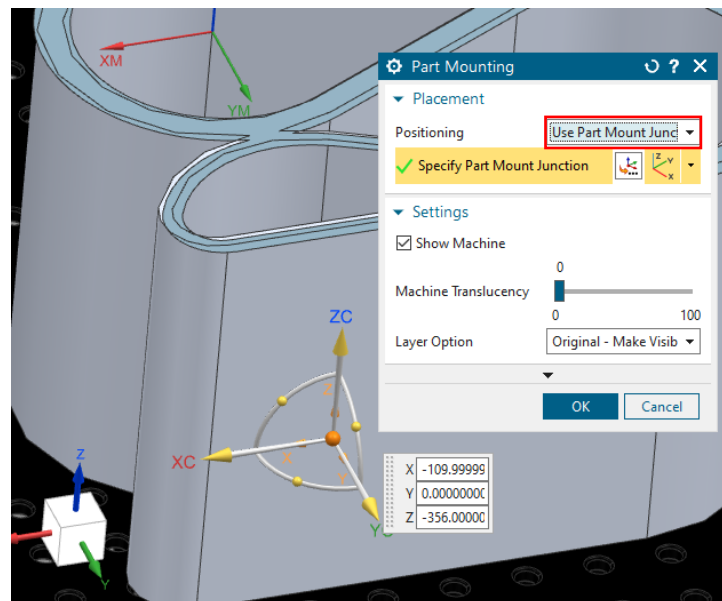
Načtení simulačního modelu do prostředí CAM součásti se provede v zobrazení Operation Navigator – Machine Tool View, tak jak je vidět na obrázku níže.



Pomocí dvojkliku v horní části zobrazení na nápis GENERIC_MACHINE se zobrazí okno pro načítání z knihoven. Zde se zvolí možnost Retrieve Machine from Library pro výběr požadovaného stroje. Tento krok je na obrázku níže.



Model tohoto pracoviště se nachází v kategorii ROBOT pod názvem KUKA_KR60HA_AM_CELL_sinumerik. Stroj ze seznamu lze zvolit jeho označením a poté tlačítkem OK nebo dvojklikem na jeho název. Okno, které se poté zobrazí slouží k umístění součásti do pracovního prostoru. Volbu Positioning je vhodné změnit na Use Part Mount Junction a poté napozicovat dílec tak, jak je žádoucí. Díky vizualizaci celého stroje v novějších verzích Siemens NX, je tento krok již poměrně intuitivní. Pohled na tento krok je na obrázku níže.



Důležité je poslední okno opět potvrdit volbou OK, jinak se veškeré volby zruší a načtení stroje neproběhne. Podobným způsobem se importuje do CAM nastavení extruder. V okně načítání z knihoven je potřeba vybrat možnost Import Devices from Library. V kategorii Head se poté pod názvem CEAD_E25 nachází extruder. Ten je poté nutné vložit do kapsy pro hlavy na robotu. Samotný extruder obsahuje kapsy pro jednotlivé trysky. Příklad této konfigurace je na následujícím obrázku.

KUKA_KR60HA_AM_CELL_SINUMERIK_1	
Unused Items	
POCKET	Main Kapsa robota
CEAD_E25_FDM_EXTRUDER	Main Extruder
POCKET_01	Main Kapsa extruderu
MATERIAL_EXTRUDER	Main Tryska
STOLEK_V1_9MM	Main

3) Ovládání simulace

Pro spuštění simulace s emulátorem ŘS je potřeba mít označenou operaci. Eventuálně je možnost simulovat externí NC program, ale prvně je nutné spustit simulaci operace s daným nástrojem, aby došlo k vygenerování souboru to_ini.ini obsahující potřebné informace pro simulaci (tabulka nástrojů). Simulace se spouští možností Simulace Machine na domovské kartě modulu Manufacturing. Ovládání simulace je následující:

Ukončit simulaci	Čas běhu	Volba typu simulace	Krok zpět	Spustit pozpátku	Spustit	Krok vpřed	Zastavit	Resetovat stroj	Rychlost simulace
------------------	----------	---------------------	-----------	------------------	---------	------------	----------	-----------------	-------------------

Kolize nástroje a IPW	Kolize nástroje a součásti	Kolize strojních částí mezi sebou	Úběr (přidávání) materiálu	Details z jádra simulace	Zobrazení komponent stroje	Stavy stroje
-----------------------	----------------------------	-----------------------------------	----------------------------	--------------------------	----------------------------	--------------

Okno s programem a proměnnými	Prohlížeč programů	Není uživatelská možnost	Nastavení simulace
-------------------------------	--------------------	--------------------------	--------------------

Příloha č. 4

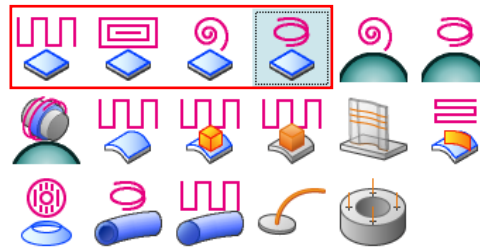
Uživatelský manuál k postprocesoru

1) Instalace postprocesoru

Po předchozí instalaci simulačního modelu není potřeba již nic instalovat. Jelikož pro programování robotů v Siemens NX je nutné mít načtený simulační model pracoviště, je postprocesor i potřebná UDE k dispozici.

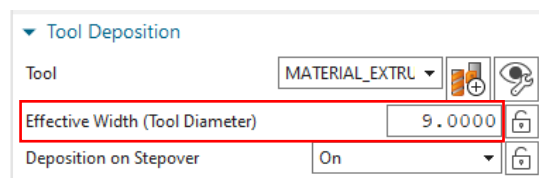
2) Podporované operace

Z kategorie operací multi_axis_deposition jsou podporovány operace zvýrazněné na obrázku níže. Primární vývoj a testování však probíhalo se čtvrtou zvýrazněnou operací – Planar Thinwall. Tato operace je podporována včetně všech možností a voleb.



3) Nastavení operace

Z hlediska postprocesoru je důležité zmínit definici několika parametrů v operaci. Na záložce Main je potřeba správně definovat parametr zvýrazněný na obrázku níže. Bylo definováno, že tato hodnota odpovídá požadované šířce vrstvy a je poté použita pro výpočet potřebných otáček extruderu. Nejedná se tedy přímo o průměr trysky.

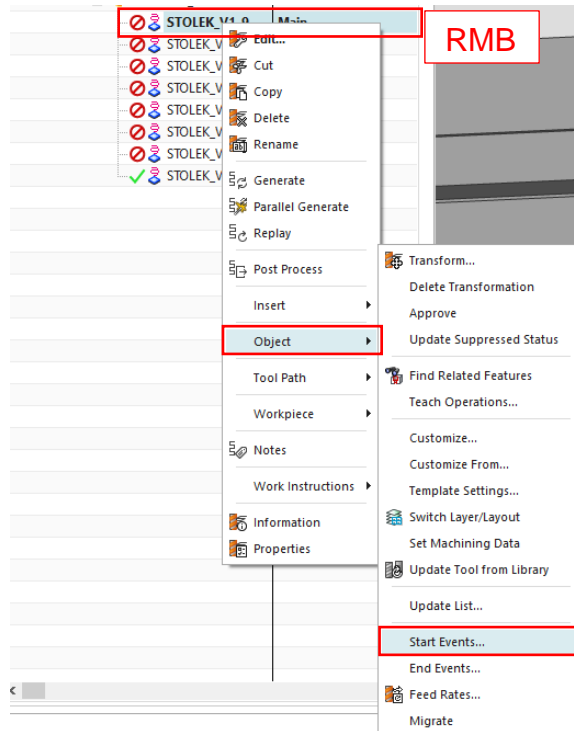


V záložce Strategy lze nastavovat použitou strategii, její parametry a typ přechodu mezi vrstvami. Pro operace Planar Thinwall jsou podporovány všechny možnosti. Na záložce Slicing Parameters je nutné správně definovat výšku vrstvy (Layer Thickness). Jedná se opět o parametr použit mimo jiné pro výpočet otáček extruderu. Volba Layer Control umožňuje generovat dráhu v celé součásti nebo jen určitý rozsah vrstev, což je opět v postprocesoru podporováno. V operaci není nutné zadávat žádné další parametry pro chod postprocesoru.

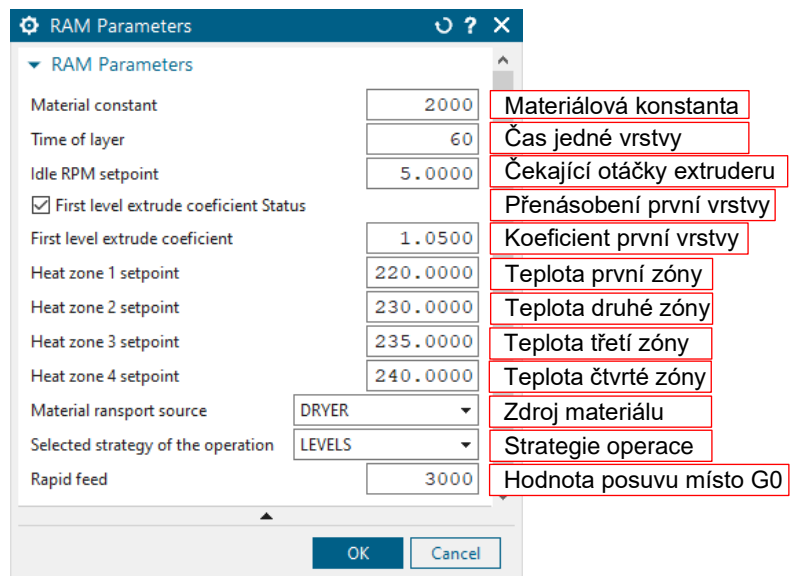
Důležitý krok je nastavení a aplikace pravidel pro roboty. To se provede pomocí tlačítka Robot Control (může být skryto a je potřeba ho nejprve zobrazit v prostředí NX). Zde se nastavují konfigurace robota, pózy a orientace nástroje pro danou operaci. Pokud tato pravidla nejsou aplikována, výsledný NC program bude chybný a nepoužitelný.

4) Nastavení UDE

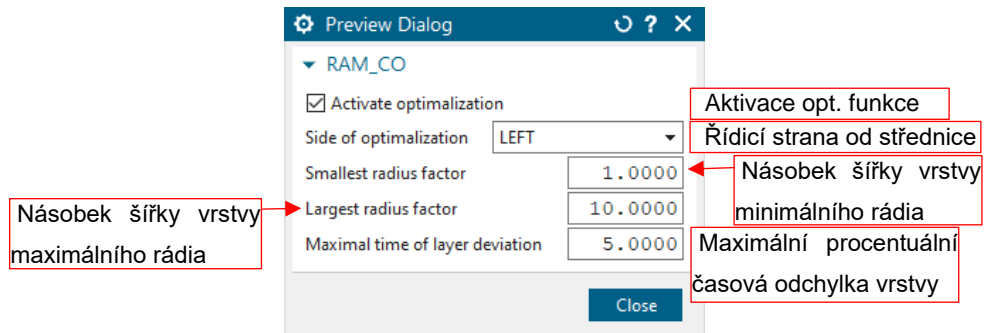
Doplňková nastavení pro postprocessor se provádějí pomocí UDE To lze vložit do daní operace dvěma způsoby. Jeden ze způsobů je zobrazen na obrázku níže. Druhou možností je přidání UDE v samotném nastavení operace na záložce Program and Machine Control v kategorii User Defined Events.



Nyní k nastavení UDE pro tento postprocessor. První slouží k základnímu nastavení a je nutné vždy. Volba strategie je potřebná pouze pro operaci Planar Thinwall a musí odpovídat nastavení operace. Volby UDE jsou následující:



Druhé UDE slouží ke konfiguraci optimalizační funkce a je potřebný jen v případě, že je v plánu tuto doplňkovou funkci využívat.



5) Doplňkový výstup postprocesoru

Základní verze postprocesoru obsahuje rozšířený výstup o soubor zobrazující přehledně vypočtené hodnoty posuvů a otáček extruderu pro jednotlivé vrstvy. Tento soubor se generuje vždy a slouží k rychlé kontrole těchto parametrů v NC programu. Při použití optimalizační funkce je výstup rozšířen o další soubor. Jedná se o soubor s doplněnými CL daty o barevné informace reprezentující vyšší či nižší rychlost vůči nominální. Tento soubor je poté možné v modulu Manufacturing načíst pomocí klávesové kombinace Ctrl Alt C a vizuálně zkontrolovat smysluplnost vypočtených dat.

Příloha č. 5

Schéma propojení pracoviště

