



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

DIGITÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ VÝROBNÍHO SYSTÉMU

DIGITAL COMMISSIONING OF THE PRODUCTION SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Serhii Andriievskiyi

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Serhii Andriievskiy**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vetiška, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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

Digitální zprovoznění výrobního systému

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stále aktuálním cílem průmyslu je zvyšování produktivity práce. Možností jak tohoto cíle dosáhnout je robotizace rutinních činností. Cílem práce je zjistit aktuální stav v oblasti virtuálního zprovoznění robotizovaných výrobních systémů a zpracovat konkrétní příklad.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše dané problematiky.
Tvorba modelové úlohy.
Digitální zprovoznění.

Seznam doporučené literatury:

SICILIANO, Bruno a Oussama. KHATIB. Springer handbook of robotics. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.

KOLÍBAL,Z. a kol.: Roboty a robotizované výrobní technologie. VUTIUM Brno, 2016, ISBN 978-80-214-4828-5.

NOF, S. Y. Springer Handbook of Automation. Springer, 2009. 1812 s. ISBN 978-3-540-78830-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá digitálním zprovozněním robotizovaného výrobního systému pro 3D tisk velkorozměrných součástek. V teoretické části práce je popsána problematika virtuálního digitálního zprovoznění, následována specifikou řešerší pro dané robotické pracoviště. V praktické části je popsána řešerše modelové úlohy daného pracoviště. Pro realizaci digitálního zprovoznění bylo použito ABB RobotStudio a zprovozněno bylo robotizované pracoviště.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the digital commissioning of a robotic manufacturing system for 3D printing of large-scale components. The theoretical part of the thesis describes the issues of virtual digital commissioning, followed by a specification of the research for the given robotic workplace. The practical part describes the research of the model task of the workplace. ABB RobotStudio was used for the implementation of digital commissioning, and the robotic workplace was commissioned..

KLÍČOVÁ SLOVA

digitální zprovoznění, ABB Robotstudio, RAPID, kontroler, 3D model, simulace robotického pracoviště

KEYWORDS

digital commissioning, ABB Robotstudio, RAPID, controller, 3D model, robotic workplace simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ANDRIIEVSKYI, Serhii. *Digitální zprovoznění výrobního systému* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/148763>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Vetiška.

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěl poděkovat celé své rodině za poskytnutí příležitosti získat kvalitní evropské vzdělání. Také všem učitelům, kteří mě v průběhu mého života učili. Děkuji Bohu, že mi vždy dával sílu v těžkých chvílích. Zejména bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Janovi Vetišku, Ph.D za jeho proaktivní přístup, bez jeho moudrých a profesionálních rad by tato práce nevznikla.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vetišky, Ph. D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26.05.2023

.....

Andriievskyyi Serhii

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE	17
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	18
3.1	Průmyslový robot.....	18
3.2	Rozdělení robotů	18
3.3	Pracovní prostor robotu.....	18
3.4	Souřadné systémy robotů	21
3.5	Pohyby robotů	22
3.6	Programování průmyslových robotů.....	23
3.6.1	Online programování	23
3.6.2	Off-line programování	26
3.7	Digitální zprovoznění.....	28
3.8	Simulační softwary.....	29
3.8.1	ABB RobotStudio	30
3.8.2	KUKA.Sim.....	31
3.8.3	Digitální továrna	31
3.8.4	Digitální továrna TECNOMATIX.....	31
3.8.5	Digitální továrna Delmia.....	32
3.9	Aditivní technologii	33
3.9.1	Využití aditivní výroby	34
3.10	Rozdělení aditivních technologií.....	35
3.10.1	Metody založené na tekutém základě	35
3.10.2	Metody založené na práškovém základě.....	37
3.10.3	Metody založené na pevném základě	39
3.10.4	FDM (Fused Deposition Modelling)	41
3.11	Plastové a kompozitní materiály pro tisk metodou FDM	42
3.12	Druhy FDM tiskáren z hlediska konstrukce.....	43
3.12.1	Tiskárny FDM kartézského typu	43
3.12.2	Tiskárny FDM delta typu	44
3.12.3	Tiskárny FDM polar typu	45
3.12.4	Extrudery FDM tiskárny	45
3.13	Analýza využití robotického 3D tisku.....	47
3.13.1	Bezpodporový tisk	48
4	HLAVNÍ ČÁST	49
4.1	Příprava pracoviště.....	49
4.1.1	3D Printing PowerPac	49
4.1.2	Příprava kontroléru	49
4.1.3	Import součásti pracoviště	49
4.1.4	Tisková hlava	50
4.1.5	Tiskové místo.....	52
4.2	Příprava testovacího modelu	52
4.3	Vygenerování drah G-code	52
4.4	Simulace v 3D Printing PowerPac	53
4.5	Nastavení propojení extruderu a robotu	55

5	ZÁVĚR.....	57
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59
7	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	64
7.1	Seznam tabulek	64
7.2	Seznam obrázků	64

1 ÚVOD

Od začátku průmyslové výroby je snaha o zvyšování produktivity práce a její kvality. Jedním z „průlomů“ v historii při uplatňování zvyšování produktivity výroby byl vznik prvního průmyslového robota „Unimate“ v roce 1954. Od té doby se představa o budoucím průmyslu změnila, a bylo jasné, že průmysloví roboti budou hrát jednou z nejvýznamnějších rolí.

V dnešní době aktuální průmysloví roboti zachovali koncepci založenou prvními prototypy, jenom fungují mnohem rychleji, univerzálněji a přesněji. Což způsobilo rozvoj v širokém smyslu použití.

Jeden z negativních faktorů výrobních robotizovaných systémů je jejich vysoká pořizovací cena a doba zprovoznění. Kvůli vysoké ceně a následovné obrovské zodpovědnosti, vynechání chyb ve stádiu plánování musí být pečlivě ověřeny. Digitální zprovoznění dokáže být částečným řešením těchto problémů. Digitální zprovoznění umožňuje ušetřit čas při zavádění nové výrobní linky do provozu díky simulaci, při níž jsou odhaleny mnohé chyby. Tvorba digitální továrny navíc umožňuje lépe optimalizovat výrobu a navrhnout výrobní linku tak, aby byla co nejvýhodnější. Zavedení linky do provozu a optimalizace pracoviště tak přispívají i ke snížení celkových nákladů.

V rámci této práce se bude nejprve provádět rešerše na danou problematiku, kde se vysvětlí, co vlastně je to digitální zprovoznění a další věci s ním související. V bakalářské práci jsou rozebrány jak novinky z odvětví v aditivních technologiích, tak populární technologie 3D tisku (nebo vzhledem k ASTM standardům formálně nazvané Additive Manufacturing (AM), aditivní výroba), která se stala dostupná pro každého, taky našla svoje místo s použitím manipulátora, především pro průmyslovou výrobu. Vzhledem k tomu, že průmyslové manipulátory dokážou zajistit přesnost trajektorii pohybu do desetin milimetrů, tak je našlo jejich významné uplatnění pro 3D tisk plastových vícerozměrných konstrukcí a architekturních součástí.

2 MOTIVACE

Tato práce byla vytvořena, jako podklad pro vznikající 3D tiskové pracoviště s využitím robotického manipulátoru pro velkorozměrové součástky. Práce poukazuje na novinku v strategii aditivních technologií – robotizované tiskové pracoviště, které lze realizovat s využitím robotického ramene jako nosiče tiskové hlavy, a shrnuje současný stav poznání v této rychle se rozvíjející oblasti. Informace a odkazy na zajímavé články, které jsou shrnuty v této bakalářské práci by měly poskytnout dostatek informací pro další vývoj robotizovaného 3D tiskového pracoviště.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Průmyslový robot

Definice průmyslových robotů podle ISO dle normy ISO 8373:

„Automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být upevněn na místě nebo mobilní k užití v průmyslových automatických aplikacích.“ [12]

Průmyslový robot je automatizovaný stroj skládající se z manipulátoru a programovatelného řídicího systému, pomocí něho je umožněné nastavovat funkci jakkoliv. Dnešní průmyslový robot je vrcholem lidské činnosti, sloganem, které je “zvýšení efektivity všemi možnými způsoby”. Hlavní cíl při výzkumu průmyslového robota je nahradit člověka jako součástky průmyslového procesu. Ke nejvýznamnější výhodě robota patří vynechávání “lidského faktoru nepřesnosti“, kde robot bude vyplňovat svou funkci co nejpřesněji bez vmylu, bez předběžného placení, bez nemoci – ideální pracovník.

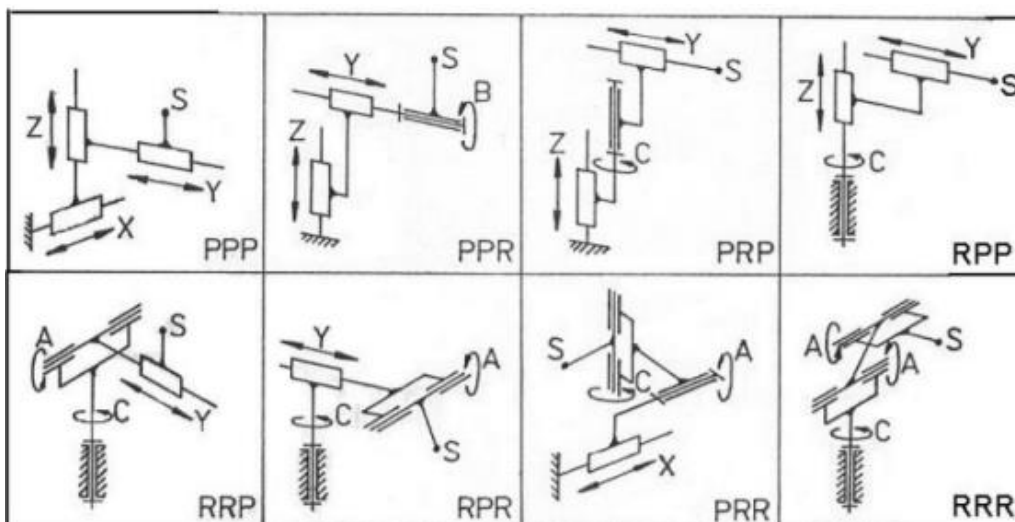
3.2 Rozdělení robotů

Průmyslové roboty se vyvíjeli se do takového širokého měřítku, že ani nelze rozdělovat podle univerzální hierarchie, jenom dle různých specifikačních kategorií. Průmyslové roboty je možné rozdělit podle různých ukazatelů [13]:

- Počtu os (3 nebo více os)
- Typu pracovního prostoru (více obr. 4)
- Nosnosti (lehký do 10 kg, střední do 100 kg, těžký do 1000 kg, supertěžký nad 1000 kg)
- Typu pohonu (pneumatický, hydraulický, elektrický, kombinovaný)
- přesnosti a vyhotovení
- Použití v průmyslu (automobilní, potravinářský, aj.)
- Vývojové generace (inteligence)
- Uspořádání kinematických vazeb

3.3 Pracovní prostor robotu

Pracovní prostor průmyslového robotu lze definovat jako množina všech jednotlivých bodů, kam může dosáhnout nulový bod Nástrojového souřadného systému (viz kapitola 3.4). Tento prostor závisí na typu a uspořádání jednotlivých kinematických vazeb. Pro prostorový pohyb v kartézském souřadném systému (x,y,z) potřebujeme alespoň jednu kinematickou vazbu pro každé ze tří osy. Standardní typové vazby, kteří se využívají pro realizace prostorového pohybu, jsou buď translační (posuvné – P) nebo Rotační (R). Dvě varianty možnosti realizace prostorového pohybu pro tři osy: existuje $2^3 = 8$ možných kinematických řetězců pro obecný pohyb v prostoru. Však některé řetězce jsou ve technickém smyslu náročné pro uskutečnění, proto se často nevyužívají.

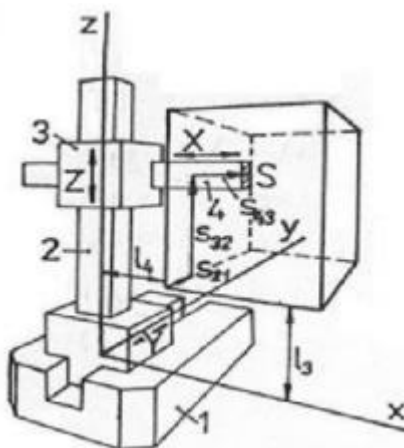


Obr. 1) Možné uspořádání kinematických řetězců v prostoru [14]

Nejčastější typy řetězců průmyslových robotů:

Kinematický řetězec PPP

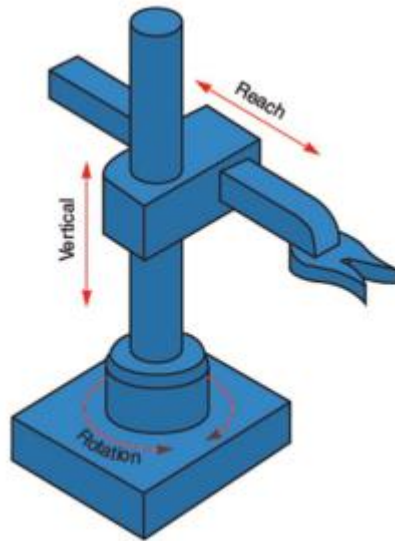
Robot typu PPP (kartézský) je často realizován jako stavebnice, což má výhodu v tom, že pracovní prostor téměř vždy odpovídá přesným požadavkům zákazníka. Zákazník si může vybrat délky jednotlivých os z katalogu výrobce. Pracovní prostor je obecný kvádr, jehož rozměry jsou ovlivněny velikostí lineárních os, po kterých se pohybuje robot.



Obr. 2) Perokresba kinematiky PPP [14]

Kinematický řetězec RPP

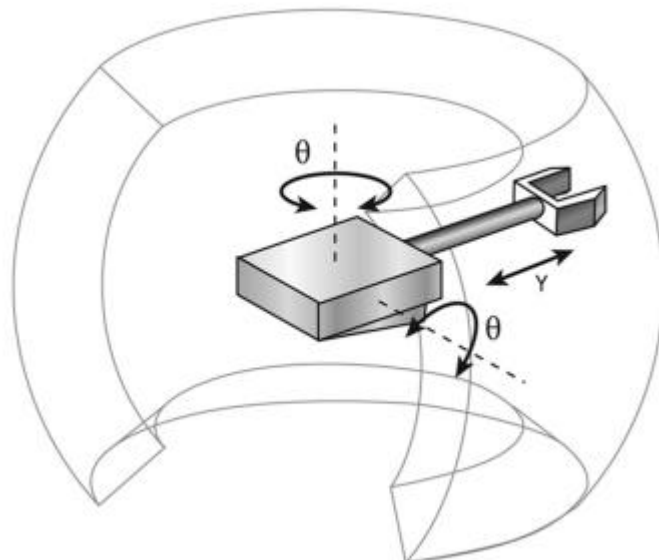
Robot typu RPP (cylindrický) je konstruován s centrálním vertikálním sloupem, po kterém se pohybuje robotické rameno. Tato konstrukce umožňuje pokrýt velkou plochu. Pracovním prostorem je válec.



Obr. 3) Model robotu typu RPP [15]

Kinematický řetězec RRP

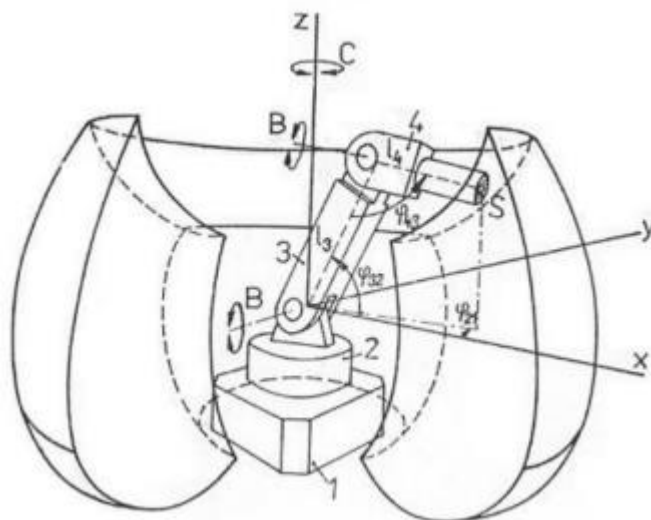
Pracovním prostorem robotu RRP (sférický, polární) je koulový prostor, jehož poloměr je omezen délkou výsuvného ramene. Tento typ robota je vhodný pouze pro práci ve sférickém prostředí.



Obr. 4) Model robotu typu RPP [16]

Kinematický řetězec RRR

Kombinace tří sériových rotačních vazeb vytváří pracovní prostor podobný anuloidu. Tento kinematický řetězec je nejpoužívanější koncept v praxi a slouží jako základ univerzálních robotů – Angulární 6-osy robot (6DOF) skladný z 6 rotačních vazeb). Výhody tohoto provedení zahrnují snadnější výrobu ve srovnání s jinými typy kinematických řetězců a zejména lepší pohyblivost v prostoru.



Obr. 5) Model robotu typu RPP [14]

3.4 Souřadné systémy robotů

Standartní průmyslový robot pracuje v základním globálním kartézském souřadnicovém systému – WORLD. Skoro vždy se pracuje robot s použitím nástroje, který taky zadává svoje souřadnicové přetvoření a vzniká Nástrojový souřadnicový systém – TOOL. Při použití vedlejšího externího nástroje výrobní linky je zapotřebí uvést Externí souřadnicový systém – BASE. [10]

Základní souřadnicový systém – WORLD

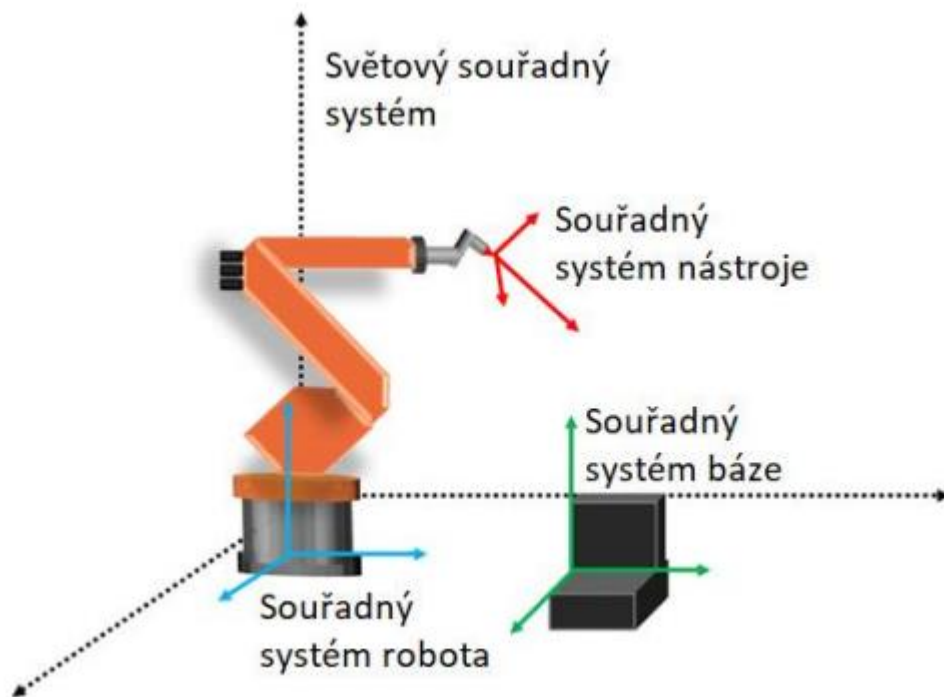
Defaultní hlavní souřadnicový kartézský systém. Obecně se umísťuje v patě robotu. Neprovádí se s tím systémem skoro žádné manipulace. [10]

Nástrojový souřadnicový systém – TOOL

Důležitý systém umístěný v TCP (Tool Centr Point neboli střed nástroje), který přivádí „objemovou“ kalkulaci nástroje k použití s robotem. Pomocí tohoto systému standartní robot se bude využívat s nástrojem jako jeden celek. Orientace tohoto systému obvykle zpravidla zvolená tak, že osa X je identická s pracovním směrem nástroje. [10]

Externí souřadnicový systém – BASE

Souřadnicový kartézský systém ležící v externím zařízení pro koordinační komunikace robota a vedlejšího zařízení, součásti, palety, piedestalu, obrobku výrobní linky. [10]



Obr. 6) Souřadné systémy robota [11]

3.5 Pohyby robotů

Především se využívá tyto standartní hlavní typy pohybů robotů:

Obecný pohyb

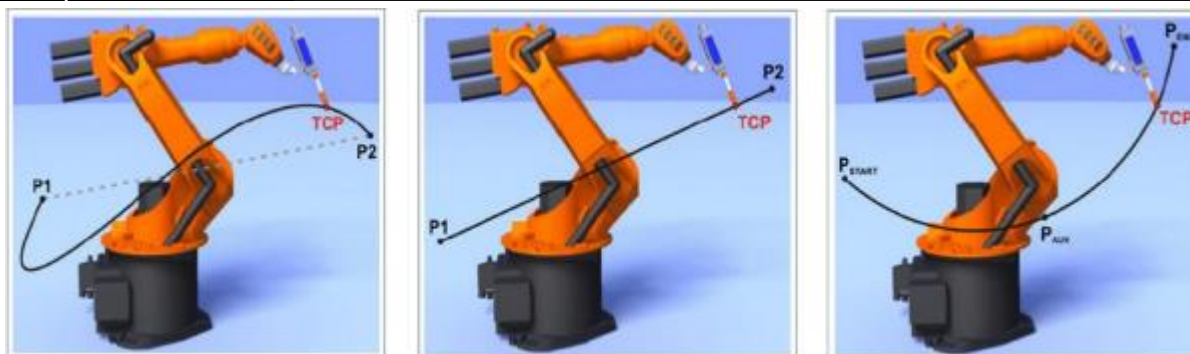
Při tomto typu pohybu se koncový efektor (TCP) robota pohybuje z bodu P1 do bodu P2 nejrychlejším možným způsobem. Avšak to nezahrnuje, aby dráha mezi body byla nejkratší, a obecně to není přímka. Tento typ pohybu se často používá pro rychlé (pomocné) polohování v prostoru, zejména tam, kde nehrozí žádná kolize. [10]

Lineární pohyb

Při tomto typu pohybu se koncový efektor (TCP) robota pohybuje přesně po přímce mezi definovanými body P1 a P2 s konstantní rychlostí. [10]

Kruhový pohyb

Při tomto typu pohybu se koncový efektor (TCP) robota pohybuje po kruhové dráze s definovanou konstantní rychlostí z počátečního bodu PSTART do koncového bodu PEND. Tento kruhový pohyb je definován také pomocným bodem PAUX, který určuje samotnou kruhovou dráhu mezi počátečním a koncovým bodem. [10]



Obr. 7) Hlavní typy pohybů robotů [16]

Při použití jen výše uvedených typu pohybu, drahá koncového efektoru (TCP) by byla značně „stupňovitou“ a „sekanou“. Neboť v koncových bodech pohybu se rychlost a zrychlení přibližují nule. Proto v novějších generaci průmyslových robotu se přidala důležitá součást pohybu dnešního robota – aproximace bodů, která slouží k dosažení plynulosti pohybů. Pokud se nevyžaduje, aby robot přesně dosáhl těchto bodů např. při použití pomocných bodů, může se použít aproximace bodů pomocí obálky. Obálka umožňuje robotu přiblížit se ke koncovým bodům a plynule pokračovat v dalším pohybu po dosažení této oblasti.

3.6 Programování průmyslových robotů

V aktuálně době už není možné představit moderní automatizovaný operaci bez robotů. Nejčastěji se jedná o operacích svařování (kontinuální nebo bodové), lepení, kalení, dále tzv. „pick and place“ operace, zakládání do stroje, odkládání obrobených součástí na palety a spoustu dalších.

Standartní průmyslový robot pracuje za předem připraveným programem, za kterým vykonává svou činnost. Program je vytvořen jako algoritmus nebo posloupnost z příkazů, které jsou nastavitelné pomocí bodů a pohybů robotu a dalších možností manipulaci nástrojem. Pro zjednodušení celého procesu vývoje programu, pracuje se v určit jsou od řádné systémech a za použití různých druhů pohybu robota. Aktuálně máme několik způsobů programování průmyslových robotů. [4]

3.6.1 Online programování

Online programování robota umožňuje operátorovi ovládat robota ručně prostřednictvím programovacího panelu a navádět ho na jednotlivé manipulační body, které jsou uloženy v paměti řídicího systému. Poté se vytváří logická část řízení nástroje a periferních zařízení a nastavují se rychlosti pohybu jednotlivých drah robota. Výhodou tohoto přístupu je, že programování probíhá v reálném prostředí a během programování lze provádět testování funkčnosti robota. [4] [5]

Moderní programovací jednotky (Teach-pendant) jsou dnes založeny na bázi počítači. Ovládání je snadné díky funkčním klávesám. Displej umožňuje zobrazení více oken pro vizuální zobrazení funkcí robota, nebo technologického programu a jeho parametrů. Barevný displej umožňuje přímé programování vstupů a výstupů pomocí I/O operací operátorem. [4]



Obr. 8) Teach-pendant ABB [6]



Obr. 9) Teach-pendant KUKA [7]

Programování metodou Play-back

Metoda je vhodná pro nenáročné na přesnost pohybu jednoduché aplikací/programy jako např. stroje na stříkání. Operátor řídí celý pohyb robota manuálně a souběžně s tím řídicí jednotka zapisuje do paměti tento postup, udají o poloze, orientace nástroje každých 20 ms. Po dokončení nahrávání takovým „přímým programováním“ posléze robot v automatickém režimu vykonává tuto naučenou trajektorii/program, avšak dráha pohybu není úplně přesná kvůli odchylkám vymezeným volnostmi v uloženích a pružnosti konstrukce s opačnou orientací.

Programování metodou Teach-in

Při „nepřímým programování“ hlavní roli zase hraje obsluha, která pomocí teach-pendantu navede polohu a orientaci celého robota do významných a průběžných bodů. Následovně v teach-pendantu se vybere typ dráhy, jaká má být vykonána mezi každé body. V průběhu nastavování je možné přidat řízení periferních zařízení např. chapadel, vstříkání, svářečky. Standartně se zadává binární logika, kde 0 – vypnutý stav zařízení, 1 – zapnutý stav zařízení. [4]



Obr. 10) Programování metodou Teach-in

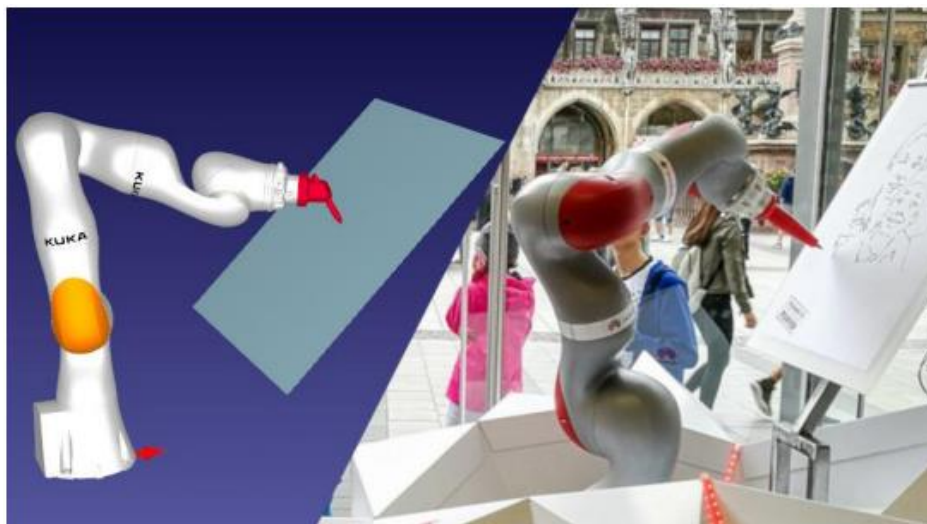
3.6.2 Off-line programování

Off-line programování je jedná z nejvýznamnějších metod programování robot, neboť odkazuje na praxi programování stroje (obvykle robota nebo CNC stroje) bez fyzické přítomnosti reálného zařízení. Popularita této metody je jasná: není potřeba se nacházet fyzicky vedle robotizovaného pracoviště, možnost předběžného testování výrobní linky a hlavně možnost vynechávání okamžitých investic na zakoupení robota, nástroje a jejich náklady s nastavováním a zaučením obsluhy. Což ukazuje na značnou úsporu peněz a času, z důvodu eliminace nutnosti čekání na doručení, nastavení zařízení a robota. Přitom že není jinými slovy, off-line programování umožňuje vytvoření a odladění programu celého výrobního robotizovaného systému a následovně nahrání tohoto programu do fyzického systému. [8]

Simulační a off-line programovací software umožňuje programovat robot na počítači bez nutnosti zastavení výroby. Umožňuje také připravit programy předem. Běžné software poskytuje nástroje pro zvýšení efektivity nákladů robotického systému tím, že mu umožní provádět úkoly například školení, programování a optimalizace bez nutnosti zásahu do výrobního procesu.

Pro vysokou efektivitu a zvýšení ziskovosti robotizovaného výrobního systému se vyžaduje dosažení co nejlepší přístupnosti a přesnosti k jmenovitým/požadovaným bodům. Pomocí této přesnosti výrobní systém se může využívat pro co nejkomplicovanější účely např. svařování, obrábění. Jedním z hlavních nástrojů pro takovou „jakost“ nám slouží simulace dosahu robota, pomocí, kterou se kontroluje na virtuálních modelech podmínky, se kterými se budeme jednat ve fyzických systémech a aktuálních programech. Nástroj umožňuje kontrolu každého bodu pohybu robota, vynechávání a další řešení problematického bodu například změnou souřadnicí nebo vynahrazení jiným bodem. Oproti relativně vysoké ceně pořízení takových softwaru, off-line systémy zajišťují v simulaci dosahu robota a simulaci celého výrobního systému „pojistku“ od zničení robota, nástroje a vedlejšího zařízení výrobní linky. Při dodržování přesnosti odpovídající s realitou modelů se může kontrolovat kolize robota a dalšího zařízení. [9]

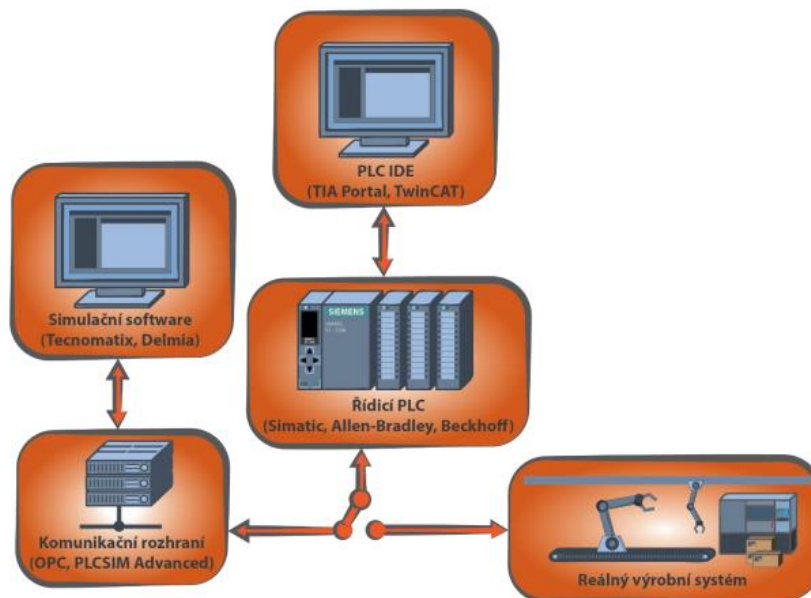
Jednotlivé významné softwary sloužící k off-line programování a virtuálnímu zprovoznění jsou přiblíženy v další kapitole (viz kapitolu 3.8).



Obr. 11) Porovnání simulovaného a skutečného robota [8]

3.7 Digitální zprovoznění

V důsledku Průmysl 4.0 se stále častěji skloňuje pojem „digitální zprovoznění“. Využitím vhodných softwarových nástrojů, digitální zprovoznění uvádění do provozu stalo významnou součástí zavádění výrobních systémů a strojů do provozu, což vede k podstatným úsporám nákladů na výrobu, zprovoznění, odladění a následnou údržbu. Tato metodika odráží současné požadavky výrobců strojů a linek na snížení celkových nákladů a zároveň čelí protichůdným požadavkům na složitější, variabilnější a flexibilnější návrhy zařízení. Pro řešení těchto požadavků se nabízí digitální zprovoznění neboli „virtualizace“ řešení povýšením tradičního CAD modelu na komplexní virtuální model, který zahrnuje kompletní kinematiku pohyblivých součástí, strukturu senzorů a logickou řídicí strukturu. Takový model lze následně použít k simulaci chování vyvíjejícího se zařízení ve 3D prostředí, což umožňuje celkové ověření návrhu, kontrolu kolizí, potvrzení doby trvání operace, a nakonec ověření navrženého řídicího programu PLC, ovládacích panelů (HMI) a zkoumání scénářů „co kdyby“. [2]



Obr. 12) Schéma digitálního zprovoznění [1]

Význam propracovaného virtuálního modelu výrobního systému a jeho následné simulace spočívá především ve schopnosti odhalit a eliminovat chyby ještě před samotnou výrobou takového systému. Pokud výrobní systém, a následovně výrobní proces, není dostatečně propracovaný a chyby neodladěné, už během fáze plánování a vývoje, náklady exponenciálně rostou. V tomto případě platí tzv. „pravidlo desítek“ (Obr. 3-12), z něhož vyplývá, že náklady na opravu chyb se v průběhu fází životního cyklu produktu desetinásobně zvyšují. Pokud tedy v příkladu na následujícím obrázku, náklady na chybu při plánování stojí 1€, tak při vývoji již tyto náklady jsou 10€. Pokud bychom takto pokračovali i nadále, zjistíme, že při realizaci je již tato hodnota stonásobná. Pokud se chyba odhalí až při sériové výrobě, je potřeba počítat s velkými náklady tisícinásobku [3]



Obr. 13) Pravidlo desítek [3]

I přesto že cena chyby může docházet i do tisícovek eura (např. zničení robotu, pracovní uraz zaměstnance), digitální zprovoznění dokáže přinést nezaměňující benefity, které nemůžou být zajištěné výhodnějším způsobem. Mezi hlavní benefity digitálního zprovoznění tedy patří:

- Verifikace a odladění programu v řídicích jednotkách (PLC)
- Značná úspora času na inženýring
- Ověření správného návrhu senzoru a jejich napojení na PLC
- Testování blokačí a bezpečnostních prvků
- Testování různých variant konstrukčních řešení
- Testování různých variant řídicích programů
- Odladění chybových scénářů
- Optimalizace celkového návrhu bez nutnosti testování na reálném zařízení
- Významná úspora času při ožívování a ladění reálného zařízení
- Velmi brzké zaškolení obsluhy ještě před samotným reálným zprovozněním
- Opravdový mechatronický přístup díky propojení mechaniky, elektroniky a softwaru [1]

3.8 Simulační softwary

Pro kompletní digitální zprovoznění výrobního systému se musí disponovat několik softwarových nástrojů. Jako první softwarový nástroj je nutné využít simulační software, kde je vytvořen zjednodušený 3D model navrhovaného systému s veškerými kinematickými strukturami a s prvky logiky, které následně slouží pro řízení a tvorbu simulací jednotlivých operací, jež bude výrobní systém vykonávat.

V dnešní době existuje dvě hlavní klasifikaci simulačních softwarů pro digitální zprovoznění výrobního systému. První kategorie softwarů je doporučené a vyvinuté přímo od výrobci průmyslových robotů. Výhoda je v tom, že naladění robota a externího „rodinného“ zařízení je značně snadnější a rychlejší, než u druhé kategorii. Je doporučeno pro malé robotizované pracovišti, dodávanými hlavně jedním výrobcem. Nevýhoda je v značné komplikaci naladění externího mimo „rodinného“ zařízení anebo jeho úplné neschopnosti

podporování. Druhá kategorie jsou softwary umožňující použití robotů od různých výrobců. Je doporučeno pro virtualizaci velkých pracovišť, zahrnující ve svých linkách kombinování více robotů od rozdílných výrobců. [1]

3.8.1 ABB RobotStudio

ABB RobotStudio je simulační softwarový nástroj vyvinutý společností ABB pro off-line programování průmyslových robotů na počítači. RobotStudio je založeno na virtuálním řídicím systému od ABB – přesné kopii reálného softwaru, který řídí roboty ABB ve výrobě. Proto umožňuje velmi realistické simulace s využitím reálných robotických programů a konfiguračních souborů, identických s těmi, které jsou využívány ve výrobě. Následovně, časy simulovaných pracovních cyklů odpovídají hodnotám v reálném provozu.

Mezi hlavní charakteristické funkce ABB RobotStudio patří:

AutoConfiguration: umožňuje automaticky definovat konfiguraci robotického ramene pro celou trajektorii.

AutoPath: Generuje body dráhy robota na základě importovaného 3D modelu.

AutoReach: Analyzuje dosah robota a ověřuje vhodnost jeho umístění.

CollisionDetection: Sleduje přítomnost kolizí mezi vybranými součástmi modelu během provádění programu.

3D import: umožňuje snadné vytvoření 3D modelu výrobního systému importem standardizovaných CAD formátů (IGES, STEP, CATIA atd.).

Mechanism Modeler: lze modelovat vlastní dopravníky, nástroje a chapadla, které lze poté využít v simulacích.

Multimove: umožňuje řídit více robotů pomocí jednoho kontroléru.

PathOptimization: analyzuje trajektorie, ve kterých robot prochází blízko singulárním bodům a umožňuje jejich včasnou korekci.

Transfer: umožňuje snadný přenos programů vytvořených off-line v RobotStudiosu do reálného robota na pracovišti. Další funkcí je porovnávání programů běžících na reálných a virtuálních kontrolérech.

VirtualFlexPendant: umožňuje ovládání a monitorování virtuálním kontrolérem stejným způsobem jako reálný kontrolér.

Visual SafeMove: umožňuje nastavovat bezpečnostní zóny, parametry a podmínky, lze současně vizualizovat ve 3D zobrazení.

Hlavní nevýhodou RobotStudio, je zaměření pouze na roboty firmy ABB a tím pádem nekompatibilita s roboty a řídicími systémy ostatních výrobců. Virtuální zprovoznění je rovněž omezeno pouze na řídicí systémy ABB.

3.8.2 KUKA.Sim

Software KUKA.Sim umožňuje oživit robotické aplikace ve virtuálním prostředí ještě před jejich nasazením do provozu. Pohybové sekvence robota, které jsou naprogramovány off-line, jsou zobrazovány v reálném čase a jejich doby cyklů jsou analyzovány a optimalizovány. Díky funkcím, jako je kontrola dosažitelnosti a detekce kolizí, je možné zajistit proveditelnost robotových programů a uspořádání pracovních stanic. Digitální simulace tak poskytuje maximální spolehlivost při plánování výrobních procesů s minimálními náklady a riziky prostoje ve výrobě.

Oproti konkurentům, KUKA.Sim je postaven na tzv. modulární softwarové architektuře, která zajišťuje flexibilitu s dlouhou životností. Základní balíček je možné rozšířit o tři doplňky: knihovnu komponent pro pokročilé modelování, modul pro virtuální nasazení do provozu a simulaci svařovacích aplikací. To znamená, že zákazníci platí pouze za potřebná rozšíření. Pokud se jejich požadavky změni, mohou snadno přidat další doplňky. Modulární systém se vyznačuje flexibilitou a dlouhou životností, která odpovídá potřebám uživatelů. [17]

3.8.3 Digitální továrna

Digitální továrny jsou soubory softwarových balíčků, které slouží ke komplexnímu řízení a správě celého životního cyklu výrobku (PLM - Product Lifecycle Management). Tento proces zahrnuje návrh výrobku a jeho výrobu, která se skládá z mnoha různých úkonů. Například optimalizace rozložení výrobní haly, uspořádání jednotlivých výrobních buněk, plánování logistiky, řízení toku materiálu a správa kapacit skladů.

Pro každý z těchto úkonů existuje v rámci balíku digitální továrny konkrétní software, který se specializuje na danou oblast. Tímto způsobem lze vytvořit kombinaci softwarů, která odpovídá specifickým požadavkům a potřebám zákazníka.

3.8.4 Digitální továrna TECNOMATIX

Pojem Digitální továrna označuje rozsáhlou síť digitálních metod, modelů a nástrojů, které jsou integrovány v rámci průběžného řízení dat. Cílem je komplexní a systémové plánování, projektování, ověřování a průběžné zlepšování všech důležitých struktur, procesů a zdrojů reálné továrny v souvislosti s jejími výrobky. Díky přesnému digitálnímu modelování, simulacím a 3D vizualizaci všichni ti, kteří spolupracují během vývoje, mohou vizualizovat a analyzovat budoucí výrobní procesy. Omezí se tak chyby, které by se jinak objevily až při náběhu výroby. [18]

Plant Simulation

Tecnomatix Plant Simulation je efektivní nástroj pro dynamickou simulaci diskrétních událostí, který umožňuje vytvářet digitální modely výrobních a logistických systémů a následně zkoumat charakteristiky systémů a optimalizovat jejich výkonnost. Na těchto digitálních modelech lze následně provádět v dostupném čase rozsáhlé experimenty a scénáře bez narušení stávajících výrobních systémů. V případě použití již v procesu plánování, je možné získávat pravděpodobné výsledky dlouho před instalací skutečných výrobních systémů. Klíčové vlastnosti Tecnomatix Plant Simulation, dle [18] literatury:

- zvýšení produktivity stávajícího systému o 12-20%
- snížení investičních nákladů při plánování nového systému až o 20%
- snížení zásob a doby průchodu o 20-60%
- snížení investičního rizika včasným ověřením simulacemi
- maximální využití výrobních zdrojů
- zrychlení a zkvalitnění projekce a konstrukce výrobních linek
- zkrácení náběhu nových výrobních zařízení

Process Simulate Robotics

Process Simulate Robotics umožňuje práci jak v serverové verzi (data manage), tak i v samostatné (standalone file based) verzi. Nástroj slouží pro návrh a vývoj robotických aplikací od konceptu, přes plánování dráhy, stažení programu robotu až po virtuální zprovoznění. Software podporuje širokou škálu technologií: manipulace, kontinuální operace (obloukové svařování, lepení, broušení, ...), bodové operace atd. Vytvoří off-line program pro roboty: ABB, CLOOS, COMAU, DENSO, DUERR, EPSON, FANUC, IGM, KAWASAKI, KUKA, MITSUBISHI, NACHI, NC, PANASONIC, REIS, STAUBLI, TRALFA, UNIVERSAL, YASKAWA. [18]

Process Simulate Human

S Tecnomatix Process Simulate Human můžete simulovat lidskou práci v reálném čase, reálném prostředí s reálným zatížením. Díky tomu zlepšíte či navrhnete nové pracovní prostředí člověka. Simulace, analýzy a reporty jsou připraveny na základě skutečných dat a analýz, připravených na vědeckých studiích. [18]

Mechatronics Concept Designer

Mechatronics Concept Designer (MCD) je koncept návrhu stroje umožňující zohlednit požadavky zákazníků, vývojářů a všech zainteresovaných oborů od raného stadia návrhu stroje, až po uzavření jeho konstrukce. Řešení pokrývá celý proces vývoje, dle [18] literatury:

- nabídka
- layout a koncepční návrh
- upřesnění technického řešení
- vyřešení automatizačního layoutu
- definice základní struktury
- sdílení dat elektro a software
- simulace a virtuální zprovoznění

3.8.5 Digitální továrna Delmia

Konkrétně se jedná o software Delmia V5 Robotics, který slouží k tomuto účelu.

Jednou z významných výhod softwaru Delmia V5 Robotics je jeho rozsáhlá knihovna obsahující přes 700 přesných modelů průmyslových robotů. Tento software poskytuje přístupné, flexibilní a uživatelsky přívětivé řešení pro programování robotů, návrh a simulaci

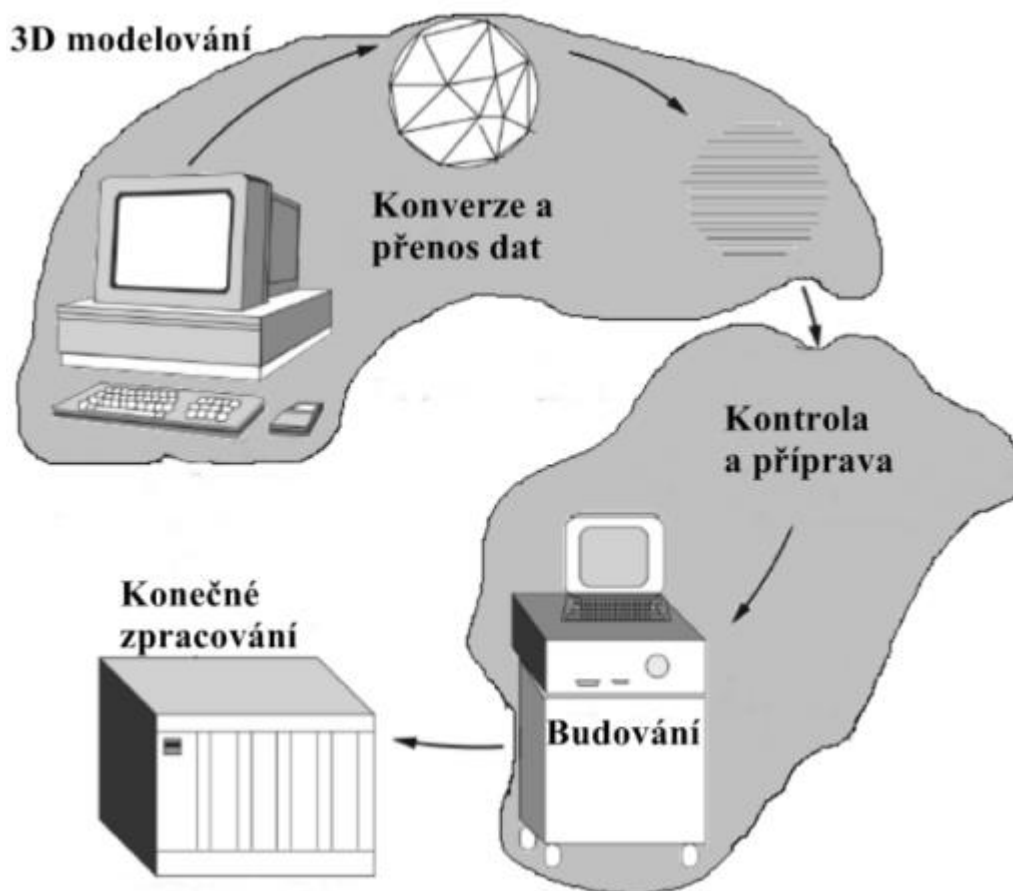
výrobních buněk. Díky struktuře V5 je také zajištěna snadná integrace s dalšími nástroji, které slouží například k plánování výroby a optimalizaci rozložení výrobních prostor podniků (Delmia Process Engineer).

Systém Delmia je rovněž rozšiřitelný o modul Delmia V5 Human, který umožňuje nejen navrhování pracoviště z hlediska mechatronického, ale také ověřování ergonomie, bezpečnosti a rozvrhování operací prováděných lidskou obsluhou s cílem dosáhnout maximální efektivity práce.

3.9 Aditivní technologii

Aditivní technologie, také nazývaná 3D tisk nebo aditivní výroba, je inovativní metoda výroby, která umožňuje vytváření fyzických objektů na základě digitálních dat z 3D CAD systému. Při aditivní technologii se materiál postupně přidává ve formě tenkých vrstev, které jsou navzájem spojeny a vytvářejí výsledný výrobek. To je zcela odlišné od tradičních metod výroby, které se zaměřují na odebrání materiálu.

Při aditivní výrobě je klíčovým prvkem vstupní 3D CAD model, který je následně připraven pro výrobu pomocí CAM systému. CAD model je rozdělen na jednotlivé tiskové vrstvy. Pomocí CAM systému, každá vrstva vytvořená v aditivním procesu odpovídá průřezu modelu z 3D CAD dat., a na základě těchto vrstev je generován G-kód, který řídí tiskový stroj. Podle různých technologických metod, materiály jako termoplast, vosk, ocel či keramika jsou aplikovány vrstva po vrstvě a postupně vytvrzovány, aby vytvořily konečný výrobek. [19]



Obr. 14) Obecný postup výroby aditivními technologiemi [20]

Aditivní technologie přináší několik výhod. Jednou z nich je možnost rychlého zhotovení prototypů. Tato technologie je často spojována s pojmem "Rapid Prototyping" (rychlé zhotovení prototypu), neboť umožňuje rychlou výrobu prototypů.

Aditivní výroba pokračuje ve svém rozvoji a zdokonalování. Kromě rychlého prototypování se aditivní technologie využívá i v oblasti sériové výroby. Díky neustálému rozšiřování materiálového spektra a zvyšování přesnosti tisku je možné vytvářet komplexní a funkční výrobky s vysokou kvalitou [21].

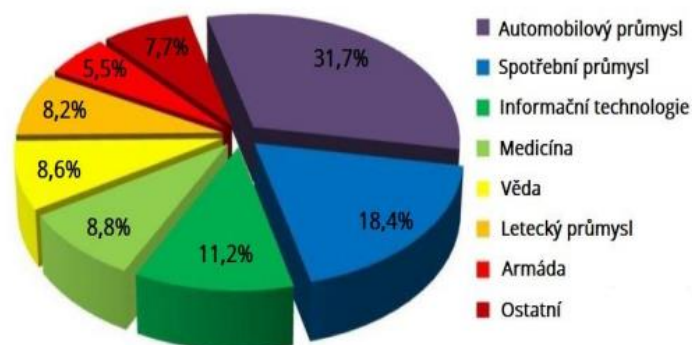
Ve výsledku lze říct, že aditivní technologie přináší revoluční změny do průmyslu a otevírá nové perspektivy ve výrobě. Její využití umožňuje rychlost, přesnost, individualitu a efektivitu, což přispívá k inovacím a pokroku ve výrobním sektoru. S dalším rozvojem a zdokonalováním aditivních technologií se očekává, že se stane nedílnou součástí moderního průmyslu a přinese další revoluční změny v budoucnosti.

3.9.1 Využití aditivní výroby

Aditivní výroba se v současnosti uplatňuje převážně v různých technických odvětvích. Díky neustálému pokroku v technologiích a rostoucímu počtu firem zaměřených na vývoj 3D tisku se očekává rozšíření aditivní výroby i do dalších oblastí. Zde jsou některé z hlavních oblastí, kde aditivní výroba nachází uplatnění:

- Medicína – Dnes už se běžně využívá pro tvorbu protéz, tkání, orgánů nebo kostí.
- Architektura a stavebnictví – Využití primárně pro výrobu architektonických modelů, nebo prototypů produktů pro architektonické či inženýrské kanceláře. Mohou tak svému klientovi relativně rychle ukázat svůj návrh ještě před jeho realizací v 3D podobě. V posledních letech lze zaznamenat velký pokrok i v tisku celých budov.
- Hydraulika a hydrologie – Lze vytvářet modely terénu pro simulaci hydraulických a hydrologických jevů.
- Letecký a automobilový průmysl – Výroba jednotlivých složitých součástí na zakázku.
- Umění a šperky, vesmír, optika, elektronika atd. [23]

Podíl jednotlivých technických odvětví na využití aditivní výroby:



Obr. 15) Použití aditivní výroby v jednotlivých oborech [24]

3.10 Rozdělení aditivních technologií

Aditivní technologie se v současné době liší v mnoha ohledech, včetně způsobu nanášení vrstev, zdroje energie, použitých materiálů a způsobu dodávání materiálu. Existuje mnoho způsobů klasifikace aditivních technologií na základě těchto charakteristik. Jednotlivé metody vyžadují odlišnou konstrukci tiskové hlavy a často i odlišný přístup při programování tiskové trajektorie

V této práci se zaměřuji na nejobecnější klasifikaci a v následujících podkapitolách bude podrobněji popsání v závislosti na použití surového materiálu – tekuté, pevné a práškové. Následovně, z toho tohoto rozdělení vyplývá celá řada technologií aditivní výroby a v následujících podkapitolách jsou podrobněji popsány.

3.10.1 Metody založené na tekutém základě

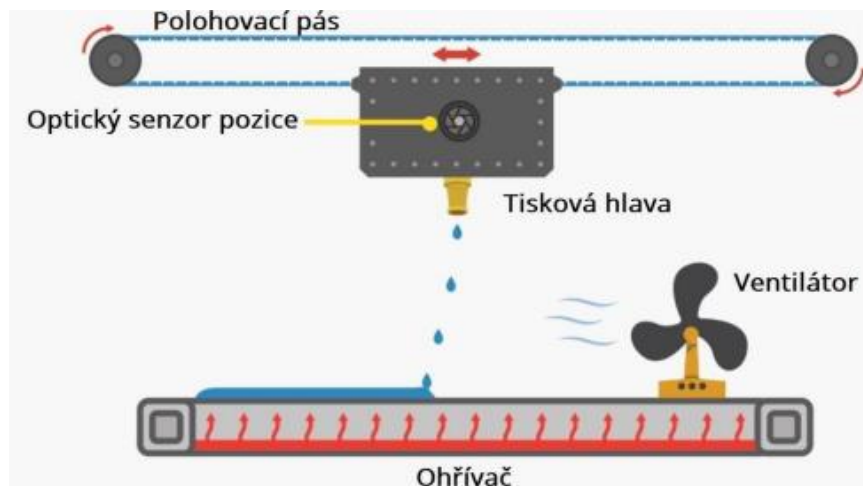
MATERIAL JETTING (Materiálové tryskání)

Materiálové tryskání (Material Jetting) je proces, při kterém jsou kapky materiálu selektivně ukládány na tiskovou plochu. Tento proces umožňuje dosáhnout vysoké přesnosti a rozlišení tisku a umožňuje použití široké škály materiálů a barev. Při materiálovém tryskání se často využívají materiály jako vosk nebo polymery.

Jednou z výhod materiálového tryskání je možnost dosáhnout vysoké přesnosti tisku a detailů vytvářeného objektu. Díky selektivnímu ukládání kapének materiálu lze dosáhnout velmi jemných struktur a přesného zakreslení detailů. Tato technologie také umožňuje využití širokého spektra materiálů a barev, což poskytuje větší volnost při tvorbě a designu.

Nevýhodou materiálového tryskání je nutnost dotvoření výrobku po dokončení procesu. Toto dokončení může být náchylné na poškození tenkých struktur vytvořených během tisku. Je tedy důležité provést vhodné postprocesní úpravy, aby byl výsledný výrobek pevný a funkční.

Mezi technologie fungující na principu materiálového tryskání patří například *MJM* (MultiJet Modeling), *DOD* (Drop-on-Demand), *NPJ* (Nano Particle Jetting), *PolyJet* a další. Tyto technologie se liší v použitém systému tiskové hlavy a způsobu selektivního nanášení materiálu, ale obecně sdílejí princip tryskání kapének materiálu pro vytváření objektů s vysokou přesností a rozlišením. [25] [26]



Obr. 16) Použití aditivní výroby v jednotlivých oborech [27]

PolyJet – Technologie umožňující tisk z velké škály tekutých materiálů, průsvitných i barevných. Každou vrstvu musí vytvrdit UV lampa. U složitějších tvarů jsou nutné podpory, které je po procesu možné rozpustit ve vodě. Výhodou je široká škála materiálů s různými fyzikálními vlastnostmi a vysoká přesnost této technologie. Tloušťka vrstvy je asi 0,016–0,030 mm, což zaručuje velmi přesný a hladký povrch. [28]

MJM (MultiJet Modelling) – Tisková hlava obsahuje velké množství trysek v jedné rovině, z nichž vychází termoplast, který je vytvrzován UV lampou. Tiskne se opět po vrstvách. Tisková hlava se pohybuje pouze po ose X. Pohyb po ose Y a Z je zajištěn pohybem tiskové plochy. [28]

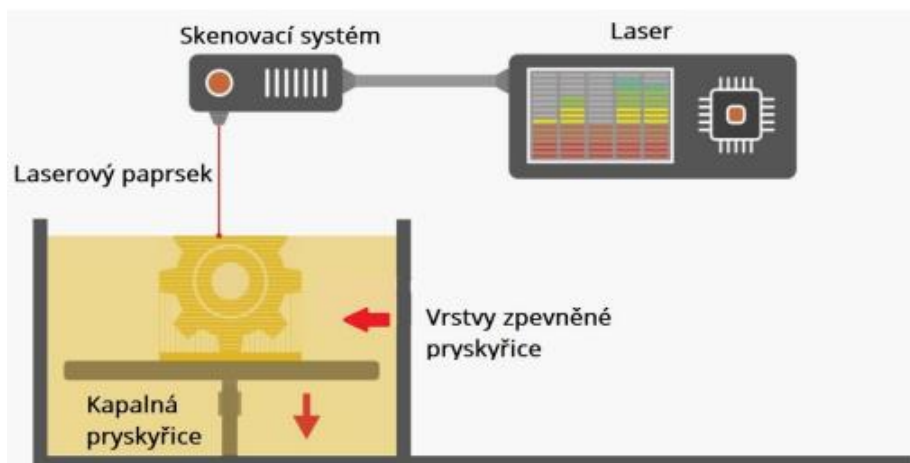
VAT PHOTOPOLYMERIZATION (Fotopolymerizace)

Jedna z nejstarších metod aditivní výroby. Tento proces spočívá ve vrstveném vytvrzování fotopolymeru v nádobě pomocí polymeračního světla. Fotopolymerizace je známá svou vysokou přesností výroby, rychlou stavební rychlostí a vynikající kvalitou vytvořených dílů, zejména jejich povrchu.

Při fotopolymerizaci se využívají dva hlavní typy polymerace: radikálová a kationtová. Radikálová polymerace se zahajuje reakcí mezi monomery a fotoiniciátorem, zatímco kationtová polymerace je založena na tvorbě kladných iontů a jejich reakcí s monomery. Technologie založené na fotopolymerizaci zahrnují metody jako *SLA* (Stereolitografie), *DLP* (Digital Light Processing), *CDLP* (Continuous Digital Light Processing) a *3SP* (Sweep Solidification Process).

Jako materiály pro fotopolymerizaci se nejčastěji používají fotopolymery, zejména akryláty a epoxidy. Tyto materiály se v procesu vytvrzování pod vlivem světelného záření proměňují z kapalného stavu na pevný a tím tvoří požadovaný objekt. Při fotopolymerizaci je důležité zajistit vhodné podpory a následně provést dotvoření výrobku, pokud je to nutné. [25] [26]

SLA (Stereolitografie) – Nejstarší ze všech aditivních technologií. Tekutá fotopolymerová pryskyřice je koncentrována v nádrži. Plošina, na které leží nádrž s pryskyřicí, je ponořena do hloubky odpovídající jedné vrstvě. Lasery se poté používají k aktivaci pryskyřice a jejímu ztuhnutí, jak lze vidět na Obr. 5. Tisková plocha je následně spuštěna níže o tloušťku jedné vrstvy a poté je zpevněna další vrstva atd. Rozlišení vrstev tisku se pohybuje mezi 0,05–0,15 mm. [29]



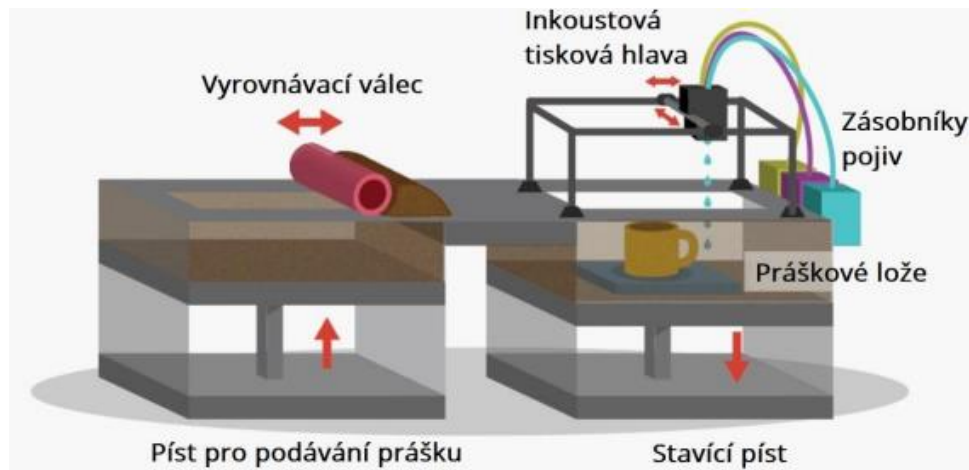
Obr. 17) Stereolitografie [27]

3.10.2 Metody založené na práškovém základě

BINDER JETTING (Tryskání pojiva)

Tryskání pojiva (Binder Jetting) je proces, při kterém jsou kapalná pojiva selektivně aplikována na tenké vrstvy práškového materiálu. Kontakt pojiva s práškem způsobuje vytvrzení materiálu. Pro dosažení úplného vytvrzení je často potřeba provést následné tepelné zpracování. Po dokončení procesu je nutné provést úpravy výrobku, například odstranění zbytků pojiva.

Tryskání pojiva může být prováděno i na mokré prášky, kde je důležité sledovat velikost a tvar zrn prášku. Jako materiály se často využívá sádra nebo kov. Jednou z výhod tohoto procesu je široká škála použitelných materiálů a možnost zahrnutí podpory přímo do výrobního procesu. Tryskání pojiva může mít i některé nevýhody: hrubý nebo zrnitý povrch výrobku, snížená pevnost a nutnost provedení dotvoření konečného výrobku, například odstranění vlhkosti nebo zlepšení pevnosti a tvaru. [25] [26]



Obr. 18) Metoda založena na tryskání pojiva [27]

DIRECTED ENERGY DEPOSITION (Přímé energetické nanášení)

Proces využívající tepelnou energii k roztavení a spojení práškových materiálů při změně jejich polohy. Práškový materiál je přiveden do tavné lázně, kde je roztaven pomocí laserového, elektronového nebo plazmového paprsku. Mezi používané technologie patří LMD, EBF3, DMD nebo LENS. Tato metoda se převážně používá pro tisk kovové materiály.

Metoda přímého energetického nanášení se především využívá pro úpravu tvarů nebo povrchů existujících součástí. Tímto procesem lze například opravit poškozené části nebo aplikovat vrstvy materiálu s požadovanými vlastnostmi. Dále se tato technologie využívá i pro výrobu celých prvků, kdy je možné postupným nanášením materiálu vytvářet složité a přesné geometrie. [25] [26]

LENS (Laser Engineered Net Shaping) – Jde o vyfukování práškového materiálu pod přesně nastavený laserový paprsek, kde je část prášku zasažena paprskem roztavena a spojena s okolním povrchem, zbytek materiálu odpadá mimo. Výhodou je využití tvrdých materiálů, jako je titan nebo nerezová ocel (výroba titanových turbínových lopatek s vnitřním chlazením). Je možné použít více tiskových hlav a tím i více kovů najednou k vytvoření slitin. [23]

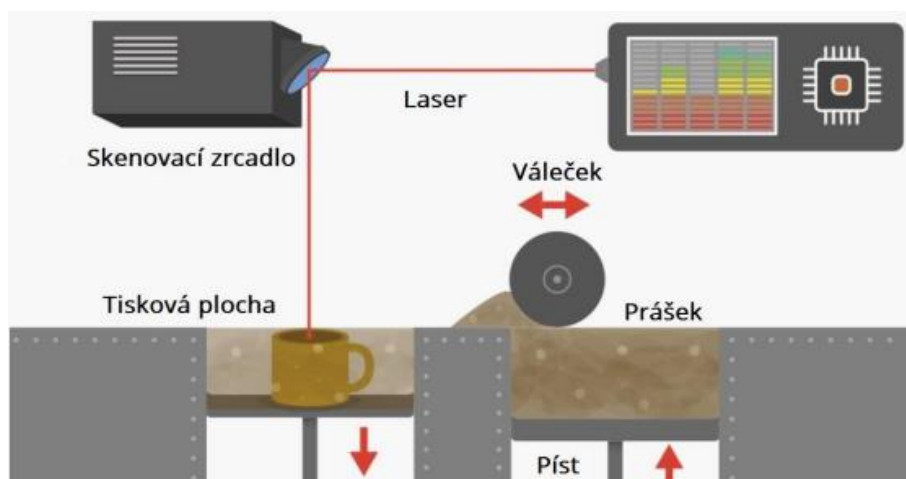
DMD (Direct Metal Deposition) – Jedná se o generativní laserovou technologii, která kovy ukládá na stávající komponenty ve vrstvách. Rozlišení vrstev je 0,1–1,8 mm. DMD byla vyvinuta pro opravu průmyslových nástrojů a pro vylepšení povrchů. Kombinace s keramickými nebo nekovovými materiály může vést k optimalizaci vlastností nástrojů, jako je odolnost proti otěru a prodloužená životnost [30]

POWDER BED FUSION (Spékání práškové vrstvy)

Proces využívající tepelnou energii generovanou laserovým nebo elektronovým paprskem k působení na práškový materiál. Teplo způsobuje spékání a spojování vrstev prášku postupně, vrstvu po vrstvě. Po dokončení procesu je důležité provést pomalé ochlazování. Tato metoda se používá především pro tavení kovů, jako jsou oceli,

hliníkové a titanové slitiny nebo kobalt-chromové slitiny. Mezi používané technologie patří SLS, MJF, EBM, DMLS a 3DP.

Spékání práškové vrstvy má několik výhod. U kovových materiálů dosahuje dobré přesnosti tisku a při použití polymerů nevyžaduje použití podpurných struktur. Nicméně existují i některé nevýhody tohoto procesu. Tisk je omezen na menší velikosti výrobků, pořizovací náklady mohou být vysoké a proces je obecně pomalejší ve srovnání s jinými aditivními technologiemi. [25] [26]



Obr. 19) Metody založené na spékání prášku [27]

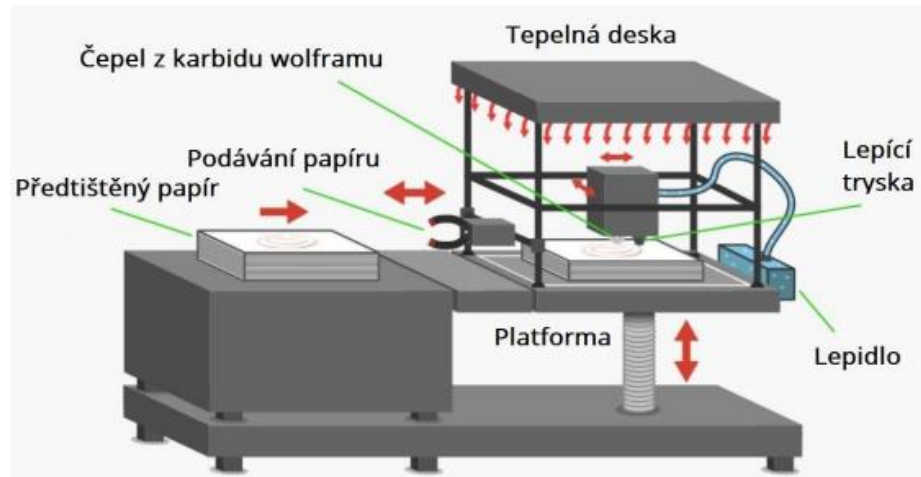
SLS (Selective Laser Sintering) – Výrobek při této technologii vzniká tavením práškového materiálu, který je po tenkých vrstvách spékán v ploše řezů dle digitálního modelu, vysoce výkonným laserem. Nejprve je nanesena vrstva prášku v celé ploše stavěcí platformy a stroj tento materiál přehřeje na teplotu blízkou jeho bodu tání. Cílem je umožnit laseru využití veškeré jeho energie ke spečení materiálu v ploše právě vytvářeného řezu. Jakmile laser zpevní příslušnou plochu, klesne stavěcí platforma o tloušťku jedné stavební vrstvy níže, nanese se další vrstva materiálu a takto se celý proces opakuje až do dokončení výrobku. Výhodou tohoto postupu, kdy je vytvářený model neustále obklopen zbytkovým práškovým materiálem, je eliminace potřeby dočasných podpor. [23]

3.10.3 Metody založené na pevném základě

SHEET LAMINATION (Laminace plátů)

Proces využívající suroviny ve formě plátů. Tyto pláty jsou ořezány do požadovaného tvaru a následně přilepeny na ostatní vrstvy. Laminace může být prováděna buď pomocí tepla a tlaku, nebo pomocí lepení, svařování a pájení. Mezi technologie založené na laminaci plátů patří LOM, SDL a UAM. Tento proces je aplikovatelný na různé materiály, jako je papír, kompozity nebo kovy.

Laminace plátů má několik výhod. Patří sem vysoká rychlost tisku, nepotřeba použití podpurných struktur a možnost barevného tisku. Nicméně existuje také nevýhoda spočívající v produkovaní velkého množství odpadu, zejména ve formě ořezaných nevyužitých částí materiálu.



Obr. 20) Laminace plátů materiálu [27]

LOM (Laminated Object Manufacturing) – Technologie nevyžívající tiskovou hlavu. Vrství malé množství materiálu do tenkých vrstev, které tvoří výsledný 3D objekt. Místo tiskové hlavy je použit nůž nebo laser. Jde o slepování vrstev lepicího papíru, plastu nebo kovové fólie na sebe a následné tvarování nožem nebo laserem. Je možné i tavení hliníkové fólie ultrazvukovými vibracemi. [23]

MATERIAL EXTRUSION (Vytlačování materiálu)

Vytlačování materiálu je nejčastěji používaná metoda aditivní výroby. Při tomto procesu je surovina protlačována přes trysku nebo distribuční otvor, kde dochází k jejímu roztavení. Kapky roztaveného materiálu jsou pak postupně ukládány na sebe vrstvu po vrstvě. Tato metoda funguje na podobném principu jako tavná pistole. Mezi technologie založené na vytlačování materiálu patří FFF (Fused Filament Fabrication) a FDM (Fused Deposition Modeling).

Nejčastěji používanými materiály při vytlačování materiálu jsou různé druhy plastů a kompozitů. Tato metoda má několik výhod, mezi které patří relativně nízké pořizovací náklady na stroje, snadná obsluha a široká škála dostupných materiálů. Nicméně existují také některé nevýhody, jako je nižší preciznost tisku ve srovnání s jinými metodami, delší doba výroby a omezení při vytváření ostrých hran.



Obr. 21) Metody založené na extruzi (FDM, FFF) [27]

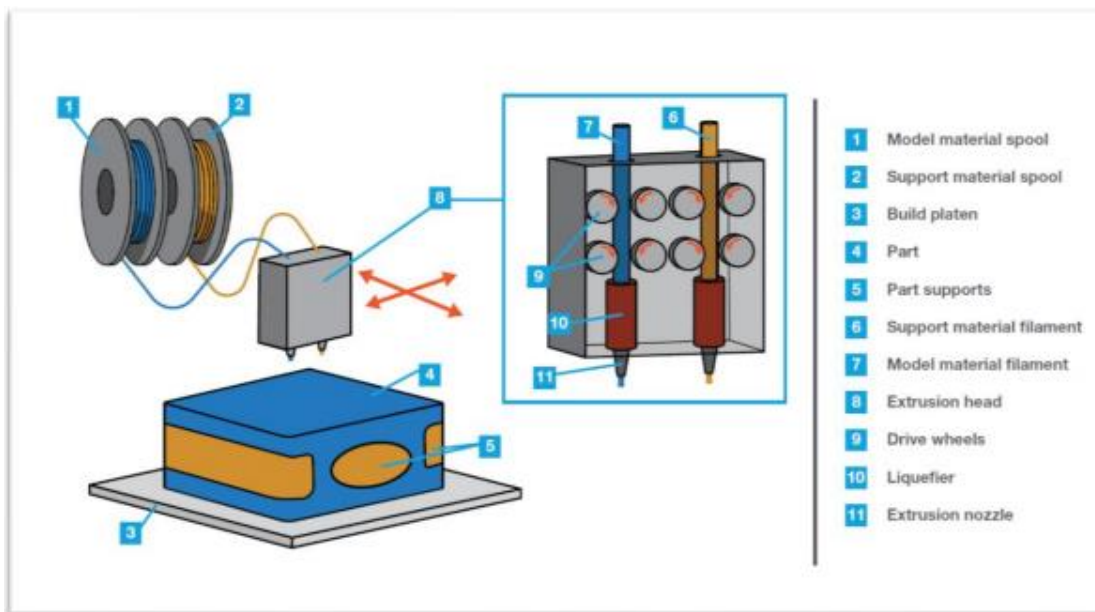
FFF (Fused Filament Fabrication) – Technologie využívající vlákno z termoplastického materiálu. Vlákno je přiváděno do tiskové hlavy z velké cívky přes pohyblivou vyhřívanou hlavu extruderu tiskárny. Roztavený materiál je vytlačen z trysky tiskové hlavy a je uložen na tiskovou plochu. Pro tisk jsou využívány polymery [28].

3.10.4 FDM (Fused Deposition Modelling)

Využívá struny z různých materiálů namotané na cívkách, které jsou protlačovány vyhřívanou tryskou. V té se materiál zahřívá na teplotu o něco málo vyšší, než je teplota tání materiálu. Po vytlačení se přilepí ke spodní vrstvě a okamžitě ztuhne.

Tryska vrstvy při vytlačování materiálu se obvykle pohybuje mezi 0,05 až 0,5 mm a je nastavitelná uživatelem. Nižší výška vrstvy znamená lepší přesnost a kvalitu povrchu tištěné součásti. Avšak při použití příliš tenkých vrstev může dojít k nežádoucímu slévání již vytištěných struktur. Z tohoto důvodu je minimální nastavitelná výška vrstvy v současnosti obvykle 0,05 mm. Při tisku objektů s převislými plochami se současně s modelem tisknou i podpory. V případě, že jsou použity „rozpustitelné“ podpory vyrobené z odlišného materiálu, než je zbytek součásti, je tisková hlava vybavena dvěma tryskami. Jedna je pro hlavní stavební materiál, ze kterého je tvořen model, a druhá pro podpurný materiál. Podpory lze z konečného výrobku odstranit chemicky či mechanicky, záleží na použitém materiálu [31] [32].

FDM je oproti ostatním poměrně jednoduchá technologie, proto se stává čím dál populárnější. Tiskárny založené na FDM se dostávají do běžných domácností díky svým nízkým nákladům, jak pořizovacím, tak i provozním.



Obr. 22) Schéma tiskové technologie FDM s dvěma tryskami [31]

3.11 Plastové a kompozitní materiály pro tisk metodou FDM

Materiály používané pro tisk modelu

Jelikož se jedná o metodu využívající univerzální proces natavování, lze použít širokou škálu materiálů. Nejčastěji jsou používány plasty, které mohou být smíchány např. se dřevem či kovovým materiálem, to ovlivňuje mechanické vlastnosti těchto kompozitů [33].

ABS (Akrylonitril Butadien Styren)

ABS patří mezi nejpoužívanější materiály pro FDM tisk díky svým dobrým vlastnostem. Odolává vysokým teplotám, chemikáliím a vlhkosti. Má vysokou pevnost a může být použit i jako konečný výrobek. Nevýhodou ABS je jeho teplotní roztažnost, která může způsobit deformaci výrobku. Proto při tisku ABS je nutné použít vyhřívanou podložku [31] [34] [35] [36].

PLA (Polyactil Acid)

PLA je křehký materiál s nižší teplotní odolností než ABS (do 60 stupňů Celsia). Má nízkou teplotní roztažnost, a proto při tisku není nutná vyhřívaná podložka. Kvůli nízké teplotě plasticity jsou výrobky z PLA hůře obrobitelné než výrobky z ABS [33] [38]. PLA je bioplast, vyrábí se z rostlinných materiálů např. kukuřičný škrob a cukrová třtina a je snadno recyklovatelný. Má zdravotní nezávadnost a lze ho používat v potravinářství.

PC (Polykarbonát)

PC je průmyslový termoplast, který lze opakovaně tavit a převádět mezi taveným a pevným stavem, dobrá recyklace. Má vysokou pevnost v tahu, ohybu a rázu, a proto je vhodný pro namáhané výrobky např. nářadí, upínače. V současnosti se jedná o jedním z nejtvrdších materiálů, kterým lze tisknout na FDM tiskárnách. PC má nejvyšší teplotní odolnost mezi materiály pro FDM tisk (130 stupňů Celsia). Jeho nevýhodou je velká teplotní roztažnost, která může způsobit deformace. Proto se využívá při tisku malých modelů, kde teplotní roztažnost tolik neprojevuje. [34] [35] [38] [39]

PET (Polyetylen)

PET je pevný materiál s nízkou teplotní roztažností. Odolává teplotám vyšším než 100 stupňů Celsia. Je dostupný pouze v čiré variantě, což ho činí dražším než běžný ABS. PET není toxický a lze ho používat v potravinářství [33].

Materiály používané pro tisk podpor

HIPS (High Impact Polystyrene) HIPS je rozpustný termoplast (polystyrén s přídavkem kaučuku), využívaný u 3D tiskáren se dvěma tiskovými hlavami (Dual-Extruder). Podpůrné konstrukce z HIPS lze chemicky odstranit lemonsolom. Po aplikaci HIPS měkne a lze ho jednoduše vyjmout. Práce s lemonsolom je doporučena ve větraných prostorech [38].

PVA (Polyvinylalkohol) PVA je vyroben z polymeru, který je rozpustný ve vodě, je tedy stejně jako HIPS vhodný pro dvouhlavé tiskárny, kde se používá jako snadno odstranitelný podpůrný materiál. Výhodou PVA je toxická nezávadnost, je proto bezpečný pro lidi, zvířata i životní prostředí, navíc při tisku nezapáchá. Nevýhodami jsou špatná přilnavost k ostatním materiálům, nízká teplota varu a náchylnost na okolní vlhkost, při které materiál velmi rychle měkne [38].

3.12 Druhy FDM tiskáren z hlediska konstrukce

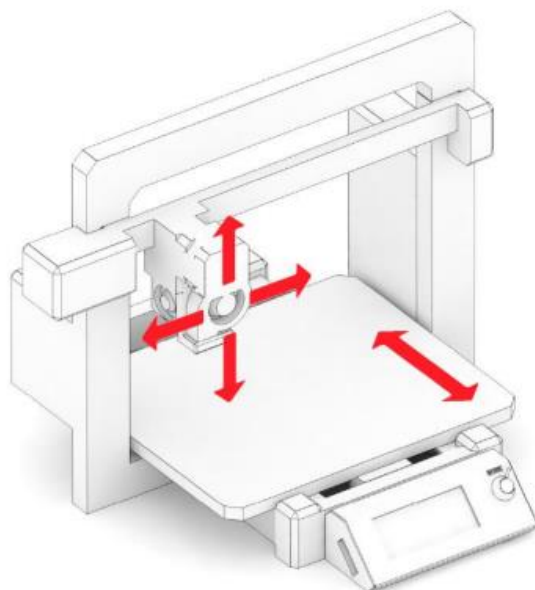
3D tiskárny jsou konstrukčně velmi podobné běžným CNC strojům, případně robotům. Mezi nejzákladnější tři druhy konstrukce patří: Kartézská, Delta, Polar. Každá z těchto konstrukcí má své specifické vlastnosti.

3.12.1 Tiskárny FDM kartézského typu

Kartézské 3D tiskárny jsou jedním z nejběžnějších typů tiskáren a vycházejí z původního návrhu RepRap. Tyto tiskárny pracují s pohybem ve třech osách - X, Y, Z. Nejčastěji se tisková hlava pohybuje v ose X a Z, zatímco podložka se pohybuje v ose Y. Tento způsob pohybu je používán například u tiskáren od firmy Prusa Research. Další možností je pohyb tiskové hlavy v osách X a Y, zatímco podložka se pohybuje v ose Z. Tento způsob pohybu je především charakteristický pro kartézské tiskárny, jejichž rámy mají tvar krychle. U většiny kartézských tiskáren je tisková podložka pravoúhlá [40].

Nevýhodou kartézských tiskáren je, že pohyblivé části, zejména při pohybu osy Y, jsou obvykle relativně těžké a vznikají při pohybu velké setrvačné síly. Při rychlých změnách směru pohybu se mohou tyto setrvačné síly projevit až utržením tisknutého objektu od podložky.

Kartézské tiskárny dosahují polohovací přesnosti v desítkách mikronů (obvykle od $\pm 0,01$ do $\pm 0,09$ mm) v závislosti na tuhosti konstrukce a přesnosti nastavení [41].

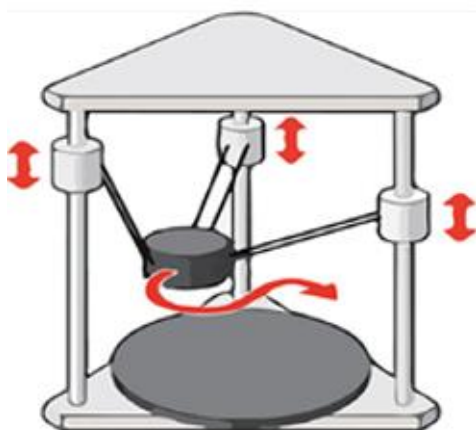


Obr. 23) Schématické znázornění kartézské tiskárny Prusa i3 MK3S [40]

3.12.2 Tiskárny FDM delta typu

Tiskárny typu Delta se liší od kartézských tiskáren svou konstrukcí, která má kruhovou tiskovou plochu. Na těchto tiskárnách je tisková hlava zavěšená na třech stejně dlouhých ramenech, které jsou spojeny právě v místě tiskové hlavy. Konce ramen jsou uchyceny ve třech vertikálních věžích, které jsou pevně spojeny se základnou tiskárny. Každé rameno se pohybuje pouze v ose Z, což umožňuje rychlé pohyby a poskytuje velký tiskový prostor ve vertikálním směru. Tento typ tiskáren je tedy vhodný pro vytváření vysokých objektů.

Pohyb tiskové hlavy je zajištěn translačními posuvy ramen po nosných věžích. Všechny pohyblivé části tiskárny jsou umístěny v její základně, což znamená, že samotná tisková hlava je lehčí a schopná rychle reagovat na změny směru pohybu bez výrazné ztráty polohovací přesnosti. Díky těmto vlastnostem dosahují tiskárny typu delta polohovací přesnosti až 0,0125 mm, což je velmi přesné [41].



Obr. 24) Schématické znázornění Delta tiskárny [40].

3.12.3 Tiskárny FDM polar typu

Tiskárny typu Polar se liší od kartézských tiskáren i tiskáren typu Delta svou konstrukcí. Na těchto tiskárnách se tisková hlava pohybuje ve dvou osách (obvykle X a Y) a je umístěna nad rotační podložkou. Tento systém je konstrukčně velmi jednoduchý a snadno sestavitelný.

Tiskárny typu Polar mají obvykle o jeden krokový motor méně než jiné typy tiskáren, což může snížit náklady na jejich stavbu. Nicméně, příprava modelu pro tisk na těchto tiskárnách je obvykle složitější a podporuje ji málo programů. To může být omezující faktor při používání těchto tiskáren.

Je třeba poznamenat, že tiskárny typu Polar zatím nejsou příliš rozšířené ve srovnání s jinými typy tiskáren. To znamená, že mohou být méně dostupné na trhu a mohou existovat omezené možnosti podpory a sdílení zkušeností s nimi. Nicméně, i přes tyto omezení mohou být tiskárny typu Polar zajímavou volbou pro některé specifické aplikace [40].



Obr. 25) 3D tiskárny R-360 konstrukčního typu Polar [42]

3.12.4 Extrudery FDM tiskárny

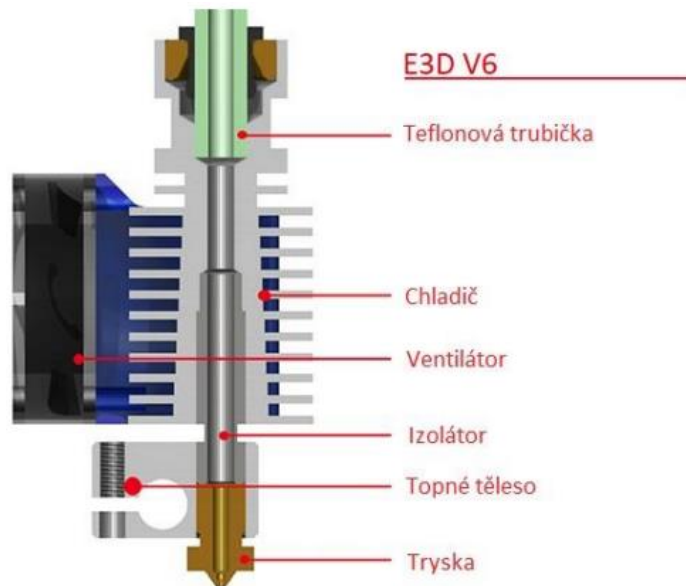
Konstrukce malých extruderů

Tisková hlava, známá také jako extruder, je klíčovým prvkem 3D tiskárny. Její úlohou je nanášet jednotlivé vrstvy tiskového materiálu. Extruder se skládá z několika částí, které slouží k předávání, zahřívání a nanášení roztaveného materiálu na tiskovou podložku, a případně také k chlazení [40].

Hlavní součástí tiskové hlavy je tzv. hotend (horký konec). Tiskový materiál je do hotendu vstřikován pomocí ozubeného kola, které je připojeno k krokovému motoru. Materiál je do hotendu přiváděn nejčastěji teflonovou trubičkou, která vedoucím koncem vstupuje do chladiče. Chladičem je materiál následně vedena přes izolátor do topného tělesa, kde dochází k jeho roztavení. Roztavený materiál je poté vytlačován ven skrz trysku na tiskovou podložku.

Chladič je obvykle vybaven žebrovaným provedením, které zajišťuje lepší odvod tepla, a musí být dostatečně chlazen pomocí ventilátoru nebo jiného chladicího systému. Během tisku dochází k expanzi tepla, zejména při procesu retrakce, kdy se roztavený materiál natahuje zpět nahoru. Chlazení je důležité pro správnou kontrolu teploty a minimalizaci problémů spojených s výtěrem materiálu [43].

Hotend je zakončen tryskou, skrz kterou je roztavený materiál vytlačován po tavení v topném tělese. Trysky se vyrábějí v různých průměrech a z různých materiálů, které se liší odolností. Pro specifické materiály je potřeba použít příslušnou trysku [43].



Obr. 26) Konstrukce hotendu výrobce E3D [43]

Konstrukce velkých extruderů

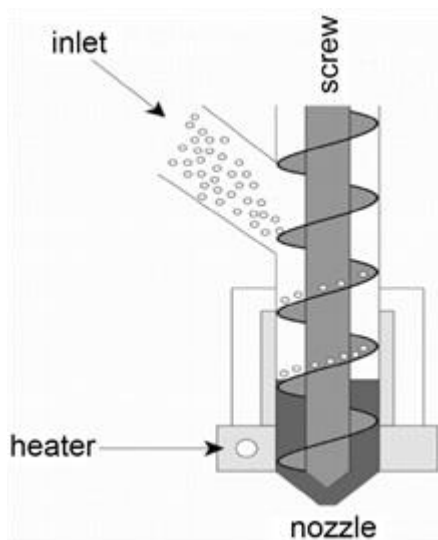
Pellet Extruder (granulový extruder) pracuje za stejným principem jako filamentový extruder, jen místo filamentu se používá granule. S uvážením toho, že granule mají průměr od 2 mm do 4,5 mm, tak podávací konstrukce velkých extruderů se značně liší od malých. Jsou přítomny některé další části, jako například zásobník a šnek. Šnek pomáhá přenášet granule z vstupu do otevření trysky. Před extruzí tryskou prochází roztavený plast vysokým tlakem, způsobeným šnekem, který má transportní zónu, tavicí zónu a míchací zónu. Granule se přeměňují z pevného stavu na tekutou pastovitou formu pomocí ohřívače, který zahřívá šnek a válcovitou část [44].

Výhody konstrukci velkých extruderů [45]:

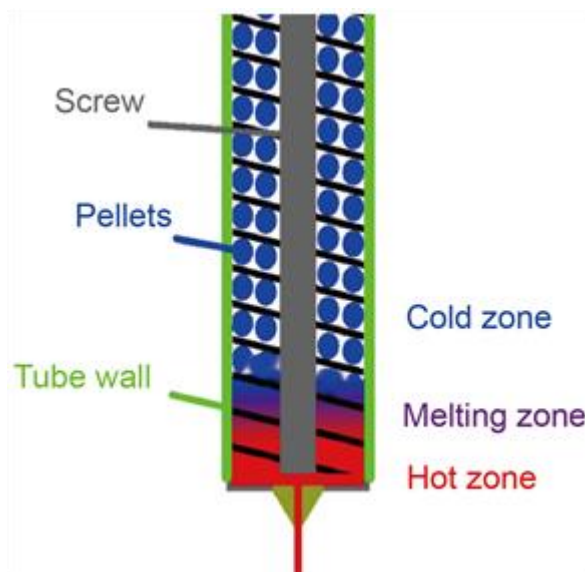
- Nákladově efektivní: Výrobní náklady na výrobek s granulovým extruderem jsou nižší ve srovnání s extruderem na filament, protože náklady na granule jsou mnohem nižší než náklady na filament. To vede ke snížení výrobních nákladů.
- Tisk velkých dílů: Většina průmyslových odvětví používá pelletový extruder k tisku velkých dílů v kratším čase s možností použití různých materiálů. Díky velkým velikostem trysky je tok materiálu vysoký, což umožňuje rychlejší tisk dílů.

- Široká škála materiálů: S pelletovým extruderem je možné použít množství materiálů, včetně technických materiálů jako je polykarbonát (PC), TPU, EVA atd., které jsou dražší ve formě filamentu. Navíc je možné přidávat různé přísady do pelletových extruderů.
- Možnost recyklace: V pelletovém extruderu je možné použít recyklovaný plast z předchozích vytisknutých dílů.
- Zkrácení času tisku: Díky velké velikosti trysky u pelletového extruderu je rychlost výtisku materiálu vyšší, což vede ke zkrácení doby tisku ve srovnání s extruderem na filament.

Důležitým bodem, který je třeba zvážit, je, že čím menší je velikost granulí, tím vyšší je rychlost tání. Rychlost otáčení šneku je zodpovědná za dobu vystavení materiálu teplotním zdrojům. Proto je nezbytné provést pečlivé nastavení teploty v teplotním zdrojů extruderu dle konkrétních granul. Problémy způsobené vysokou teplotou, jako předehřívání granulí na vstupu, co vede k úplnému zablokování systému a k hoření granulí, což způsobuje snížení viskózní povahy u trysky. Stejně tak problémy způsobené nízkou teplotou vedou k zaseknutí, což přerušuje extruzi. Granule v chladné zóně jsou tlačeny do horké zóny. Kolem šroubu je použita teflonová trubice, aby se granule lépe posouvaly po stěnách trubice a dosáhlo se plynulejšímu ohřátí. Čím menší je průměr šroubu, tím lépe se granule přenášejí. Čím menší je objem granulí přesunutých při jednom otáčení extruderu, tím lépe se ovládá tok plastu vycházejícího z trysky. [46]



Obr. 27) Konstrukce Pellet Extruderu [46]



Obr. 28) Teplotní zóny Pellet Extruderu [46]

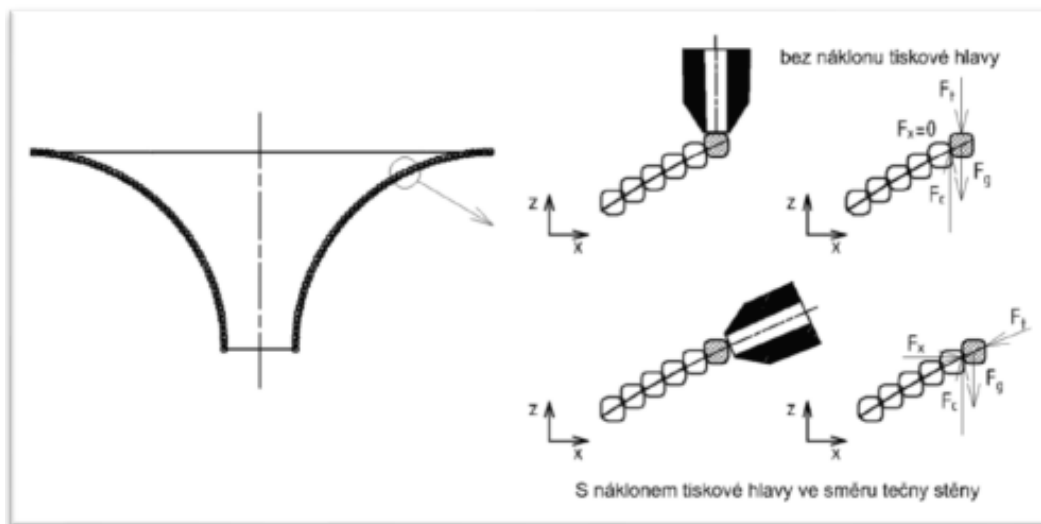
3.13 Analýza využití robotického 3D tisku

Proces tisku plastů a kompozitních materiálů lze provádět různými technologiemi, jako je například Selective Laser Sintering (SLS) nebo Laminated Object Manufacturing (LOM). Tyto a další tiskové technologie pracují na principu postupného přidávání materiálu v horizontální rovině, což znamená, že tiskové zařízení potřebuje pouze tři stupně volnosti a umožňuje pohyb ve třech základních osách. Použití robotického ramene jako nosiče tiskové hlavy (nebo laseru

pro vytvrzování) by bylo zbytečné, protože by nebylo možné efektivně využít šest stupňů volnosti, které robotické rameno poskytuje. Výjimkou je však metoda FDM, kde využití robotického ramene otevírá nové možnosti pro tuto technologii. Užitím robotického ramene se šesti stupni volnosti mají inženýři a vývojáři nové možnosti při vývoji 3D tiskových metod.

3.13.1 Bezpodporový tisk

Během procesu tisku je poloroztavený materiál vytlačován z extruderu a ukládán do vrstvy ve směru působení gravitační síly. Pokud není tištěné vrstvě poskytnuta dostatečná podpora ze strany předchozí vrstvy, může se nanášený materiál deformovat pod vlastní vahou před ztuhnutím [47]. V extrémních případech může dojít k oddělení materiálu od struktury a vzniku vad na povrchu tištěné součásti. Pokud je u tisku skloněných nebo převislých prvků úhel sklonu menší než kritický úhel, je nutné použít podpurné struktury. Většina tradičních aditivních technologií využívá tyto struktury k zajištění pevného podkladu pro tisk nových vrstev. Nicméně je vhodné se podpurným strukturám vyhýbat, protože jejich použití zvyšuje dobu tisku, zbytečně se spotřebovává materiál a po dokončení tisku je nutné tyto podpory odstranit pomocí dalších technologických kroků [48].



Obr. 29) Rozbor silového působení na vlákno při tisku převisu [49]

Tiskové systémy se třemi stupni volnosti nejsou schopny poskytnout dostatečnou flexibilitu, aby bylo možné se vyhnout použití podpor. Přidáním dalších stupňů volnosti umožňuje sestava polohovat tiskovou hlavu vůči tiskovému podkladu pod různými úhly, které nejsou omezeny na devadesátistupňové úhly. Tím se extruder lépe přizpůsobuje již vytištěným plochám [47]. Tyto metody jsou označovány jako "multi-direction deposition" v anglické literatuře. Při tisku převislých ploch a objemů to znamená, že tisková hlava může být nasměrována tak, aby byla ve směru vznikajícího převisu. To pozitivně ovlivňuje silové působení mezi extruderem a vytištěným objektem [49].

4 HLAVNÍ ČÁST

Cílem této části bylo digitálně zprovoznit modelovou úlohu robotického pracoviště. Reálná aplikace této práce by pak mohla sloužit jako vstupní pomůcka pro realizaci daného projektu. V jednotlivých podkapitolách bude popsán postup, jak bylo digitální zprovoznění provedeno.

4.1 Příprava pracoviště

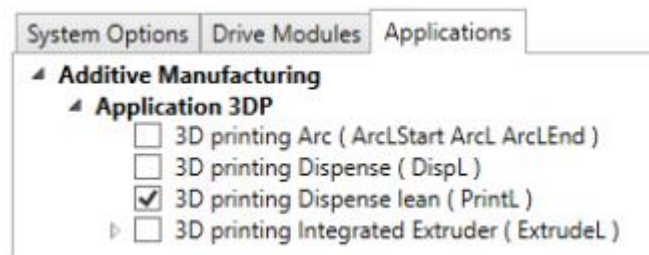
4.1.1 3D Printing PowerPac

Klíčovým prvkem pro realizaci digitální verze pracoviště je balíček 3D Printing PowerPac, rozšiřující možnosti návrhového software ABB RobotStudio. Jeho instalací dostane uživatel k dispozici všechny potřebné nástroje 3D tisk – od zpracování modelu, optimalizaci tiskového procesu, až po vygenerování a provedení samotného tiskového programu. Jeho tvůrcem je přímo společnost ABB, takže kompatibilita je zaručena.

Doplňek je možné stáhnout přímo z webových stránek ABB a jeho instalaci bylo při zprovoznění nutné začít.

4.1.2 Příprava kontroléru

Po vytvoření prázdného pracoviště v RobotStudio následovalo vytvoření nového kontroléru. V záložce *Controller* tlačítko *Installation Manager* vyvolá průvodce, který slouží ke konfiguraci kontrolérů. Stiskem tlačítka *New* začíná tvorba nového kontroléru – po zvolení jeho názvu následují důležité kroky pro další práci. V druhém kroku *Products* je potřeba zvolit *3DP*, čímž je kontrolér obohacen o tiskové funkce. Nakonec je nutné přidat instrukci *PrintL* v posledním kroku průvodce. Pak už stačí nastavení potvrdit a vytvořit virtuální kontrolér, který se stane součástí pracoviště.



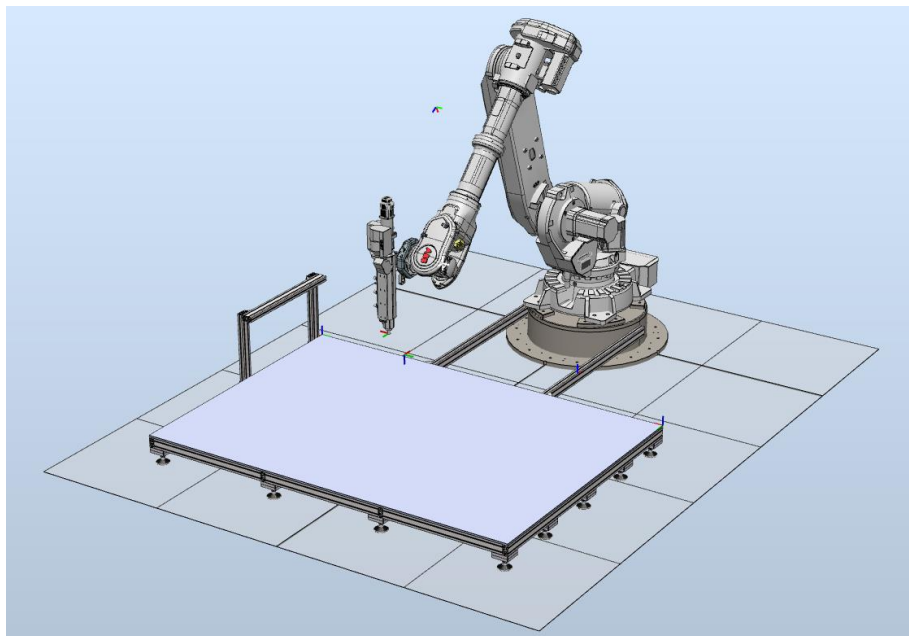
Obr. 30) Přidání instrukce PrintL

4.1.3 Import součásti pracoviště

Po nastavení kontroléru následoval import modelů všech prvků pracoviště. Robot IRB 6640 je dostupný přímo v knihovně ABB RobotStudio, ostatní 3D modely součásti pracoviště se předali od vedoucího na obstarání a následovně sestavení pracoviště. Díky schopnosti RobotStudio pracovat se širokou škálou formátů 3D formátů, přemístění 3D modelu součásti pracoviště z SolidWorksu bylo snadné a bezproblémové.

Dané robotické pracoviště se skládá ze 3D modelů:

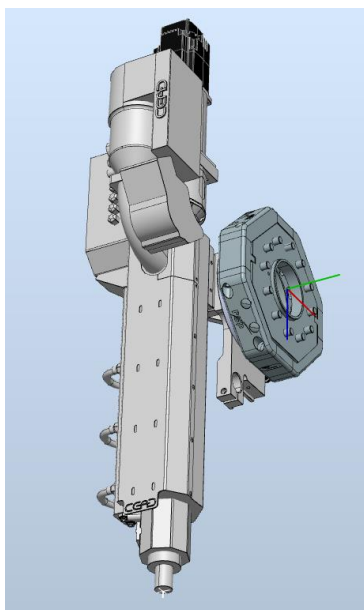
- Robotu IRB 6640
- Piedestalu pro robot – jeho funkčnost spoléhá v nastavení horizontální přesnosti robota
- Extruder (tisková hlava)
- PrintBed (tiskové místo)



Obr. 31) Výsledný model pracoviště

4.1.4 Tisková hlava

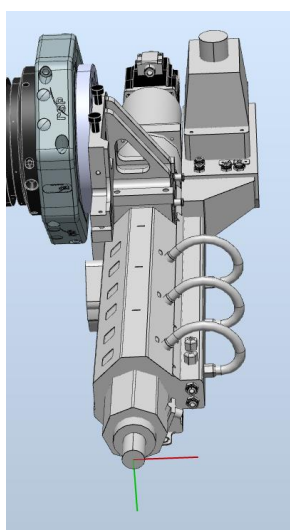
Zadaný 3D model Pellet Extruderu od společnosti CEAD (dle [46] katalogu, řadový model E25), se základními charakteristikami podle katalogu:



Obr. 32) Původní model Extruderu E25 CEAB

Type	E25
Hmotnost [kg]	30
Rozměry [mm^2]	230x340x980
Max. output [kg/hod]	12
Průměr trysky [mm]	2–18

Nejprve musí být určen bod, který bude reprezentovat souřadnicový systém nástroje Tool Center Point (TCP) – místo, ve kterém bude směřovat tiskovou hlavu – Hotend (tryska extruderu).



Obr. 33) Extruder E25 CEAB na robotu s nastaveným TCP (Pohled zdola)

Pro definici nástroje je v RobotStudio funkce *Create Tool*. Pro správné chování nástroje v simulaci je nutné dbát na správné nastavení hmotnosti a těžiště nástroje. Což bylo nastavené automaticky pomocí předem propracovanému nastavování modelů od výrobce. V posledním kroku tvorby nástroje byl dříve vytvořený bod ve středu trysky definován jako TCP. Takto vytvořený nástroj s názvem *ToolPlast* byl připojen k robotu, přetažením v seznamu *Layout*.

Důležitým bodem, na který je třeba ukázat, je správná volba směru osy Z. Standardně smysly os souřadnicového systému nástroje jsou nastavené ven z nástroje. Což v tomto případě není vhodné, kvůli slicování modelů. Slicer (viz kapitola 4.3) používá osu Z pro „nařezání“ modelů po vrstvách takovým způsobem, že osa Z se začíná nulou v PrintBed (tisková plocha) a poslední, horní vrstva přijímá nejvyšší hodnotu. Aby zabránit zmetku mezi souřadnicovým systémem a pohyblivými kódy je zapotřebí zvolit TCP podle progresu vrstvy ze sliceru – smysl osy Z je vertikálně nahoru.

4.1.5 Tiskové místo

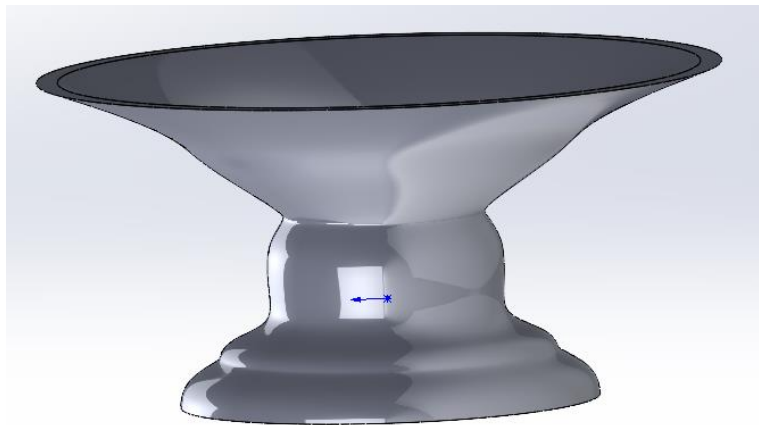
V pracovišti bude jedné tiskové místo s dostupnou plochou o rozměru 2920 x 2040 mm. S ohledem na velkou pracovní plochu, byla zajištěna možnost manuální nastavitelných noh, pro korekce horizontální rovinnosti, což je nezbytné při tisku.

Pro toto místo bylo nutné vytvořit nový souřadný systém pomocí *Create workobject*, ke kterému se budou vztahovat všechny body z G-codu tištěného objektu. Je výhodné vytvořit si nový souřadnicový systém, protože při případné změně uspořádání pracoviště jsou body vždy vázány k tiskovému místu.

Navíc nad tiskovým místem byl přidán bod pomocí *Teach Target*, do kterého robot najede před zahájením tisku. Tento bod slouží jako prevence proti situacím, kdy se robot může dostat do polohy nekompatibilní s konfigurací os.

4.2 Příprava testovacího modelu

S využitím software SolidWorks byl pro dané pracoviště vymodelovaný ukázkový model – váza. Při tvorbě modelu je nutné respektovat minimální rozměry vzhledem k trysce extruderu. Tloušťka stěny byla určena průměrem trysky 10 mm. Při výměně hotendu na extruderu je taky nezbytně doupravit tloušťku na vhodný rozměr. Pro další zpracování je nutné ukládat modely vždy do formátu STL.



Obr. 34) Ukázková model vázy

Tvorba testovacího modelu nebyla určena náhodně, pomocí horní nakloпенé části se může praktický poznat mezní kritický uhel, dle kterého se nastavuje krajní možnosti výrobních modelů. Spodní část modelu praktický znázornit možnosti plynulého tisku.

4.3 Vygenerování drah G-code

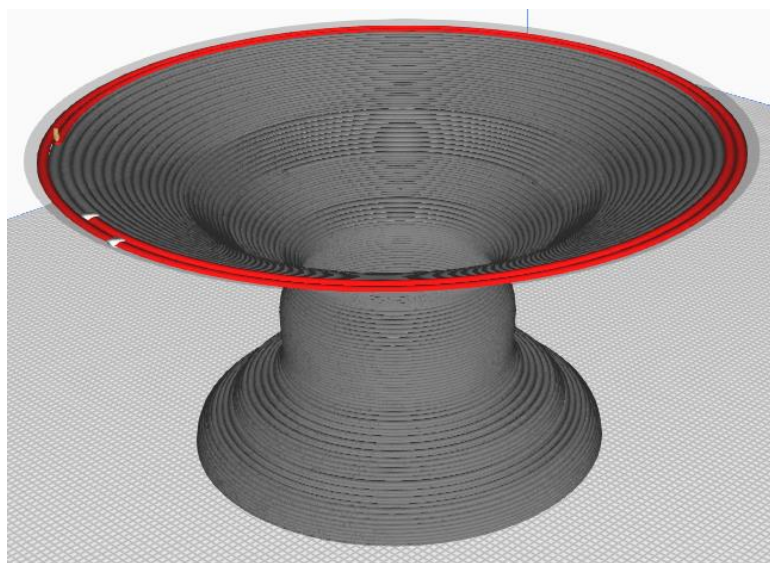
Pro přípravu modelu do tisku je nezbytné rozdělit model na vrstvy a převést jich do pohybových instrukcí pro tisk. K tomuto účelu se používají nástroje nazývané slicery, které transformují model do podoby pohybových instrukcí, jež jsou vyjádřeny ve formátu G-kódu. Každý řádek G-kódu udává pozici tiskové hlavy v kartézské soustavě souřadnic. Kromě pohybových

instrukcí obsahuje G-kód také informace o množství (délce) vytlačeného materiálu, rychlosti pohybu a dalších nastaveních procesu.

G1	X174	Y1784	Z10	F200
Lineární pohyb	Pozice na ose X	Pozice na ose Y	Pozice na ose Z	Rychlost 200 mm/s

Obr. 35) Příklad pohybové instrukce v G-code

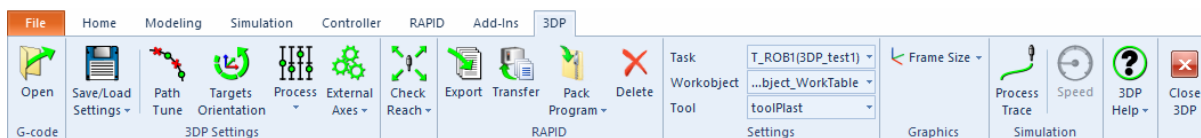
V komunitě 3D tisku je velmi populární bezplatný software s otevřeným kódem. Pro daný model byl použit jeden z nich – UltiMaker Cura. Tento nástroj je jedním z nejpulárnějších a nejlépe hodnocených slicerů pro 3D tiskárny. Slicer je nezbytným vybavením každého majitele 3D tiskárny, díky svým rozsáhlým možnostem úprav, detailnímu nastavení, velké komunitě uživatelů a podrobné dokumentaci. Standartně každý slicer obsahuje profily všech základních tiskáren. Ale pro potřeby práce je nutné definovat vlastní nastavení tiskárny a tiskové plochy. Což bylo nastavené podle specifiky pracoviště a extruderu. Výsledné nařezané vrstvy a jich G-code byl dále importovaný do ABB RoborStudio.



Obr. 36) Jednotlivý G-code, simulovaný v sliceru UltiMaker Cura

4.4 Simulace v 3D Printing PowerPac

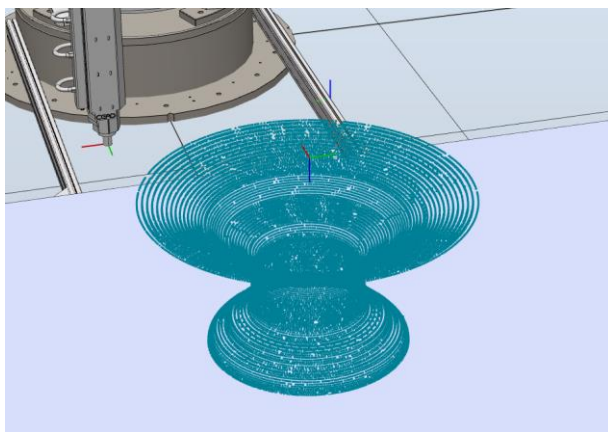
S připravenými G-code soubory již dokáže pracovat 3D Printing PowerPac. Ten se po jeho instalaci nachází v záložce *Add-Ins* pod volbou *3D Printing*. Tlačítkem *Open* vlevo se provádí výběr souboru pro následný import. Potvrzením tlačítkem *Import* je model nahrán do prostředí PowerPacu.



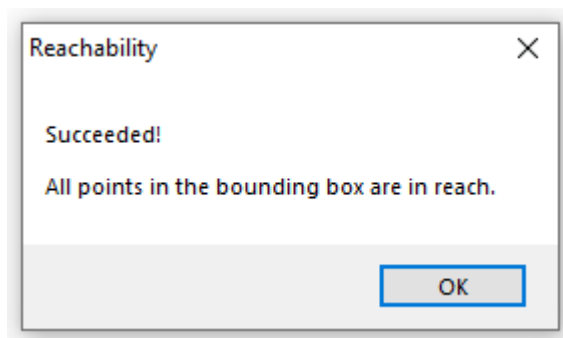
Obr. 37) Nástrojová lišta 3D Printing PowerPac

V nástrojové liště jsou poté k dispozici tyto možnosti:

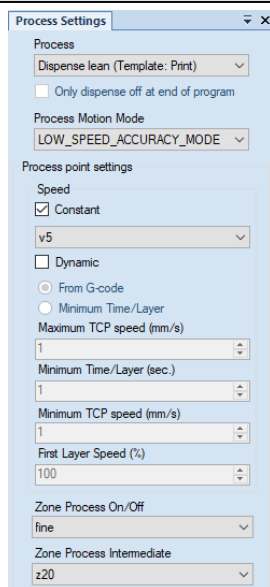
- *Path Tune* – pro optimalizaci složitých modelů, jejichž tisk lze zrychlit odstraněním přebytečných bodů; v práci nebylo využito.
- *Orientation* – určení, zda bude TCP tiskové hlavy v konstantním natočení, nebo se přizpůsobuje dráze tisku; v práci bylo využito *Constant Orientation*.
- *External Axes* – v komplexnějších pracovištích je možné pro tisk využít externí osu, nástroj je připraven na práci s pojezdem, aktivní tiskovou hlavu s Archimédovým šroubem a tiskovou hlavu natáčející se vždy do směru tisku; v práci nebylo využito.
- *Check Reach* – pro ověření, že je tisková hlava schopna dosáhnout všech bodů jednotlivých vrstev a určení ideální konfigurace os robotu; v práci byl klíčovým nástrojem ověření funkčnosti konfiguraci os.
- *Settings* – volba pracovního workobjectu a tiskového nástroje; v práci byl zvolena testová konfigurace.
- *Process* – nejdůležitější volba pro nastavení tisku, umožňuje ovlivnit hodnoty pro rychlost (může být konstantní/proměnná) a zón pro jednotlivé stavy; nastavení se vyžaduje fyzického otestování.



Obr. 38) Připravený G-code pro tisk



Obr. 39) Úspěšné ověření *Check Reach*



Obr. 40) Testová konfigurace *Settings*

Po nastavení požadovaných hodnot je proces přípravy ukončen volbou *Export Program*, která vygeneruje tiskový program v jazyku RAPID, tedy nativním jazyku ABB pro programování robotů. Tento program je pak dostupný v seznamu *3DP_EXPORT* pro tisk.

Práce s 3D Printing PowerPac končí exportem programu. V tomto případě nebyl využit export do RAPID programu, ale body modelu byly jako jednotlivé robtargety definovány přímo v simulaci. Tento přístup umožňuje snadnou úpravu tiskových vrstev, kdy je možné přidat, upravit nebo odstranit jednotlivé instrukce.

4.5 Nastavení propojení extruderu a robotu

Další věcí, kterou je potřeba při robotickém 3D tisku zajistit, je způsob řízení tiskové hlavy. Pro ovládání motoru od šneka, podávajícího roztavený materiál na určitou teplotu od heat blocku je většinou používáno externí zařízení například na bázi desky Arduino.

Jednou z další možností je přímá komunikace řídicího systému robota a extruderu. Cílem je umožnit spuštění, zastavení a také regulace rychlosti podávání materiálu podle rychlosti pohybu TCP. Realizace této možnosti je podstatně složitá a vyžaduje značných umění v propojování systémů, založených na různých komunikačních jazycích.

V tabulkách níže jsou popsány signály, pořízené 3D Printing PowerPac z instrukčního manuálu. Ti mohou posloužit podstatou pro proložení komunikaci mezi řídicím systémem a extruderem.

Tab 1) Production Management I/O signals

Signal	Description
giOrder_PLC	Group Input. Signal from PLC with order(print) number.
diOrderNew_3DP	Digital Input. Signal from PLC that a new order(print) number is ready to be read from giOrder_PLC .
goOrder_PLC	Group output. Signal from robot, used for handshake with PLC. Will be set to the same value as giOrder_PLC .
diOrderStart_3DP	Digital Input. Signal from PLC indicates that the print is ready to execute.
doOrderActive_3DP	Digital Output. Signal from robot. Is high during the print execution.

Tab 2) 3D Printing dispense lean I/O signals

Signal	Description
aoTCP_3DP	The <i>Tool Centre Point (TCP)</i> speed system signal output. Should be connected to the external process equipment. For more information see Technical reference manual - System parameters.
goEvalue_3DP	Relative extrusion distance (E-value) from previous point. Can be used to control the material flow with external process equipment.
doProcess_3DP	Internal signal for process <i>ON</i> . This is cross connected to the signal <i>doEquActive_3DP</i> with the condition that the task is executing.
doEquActive_3DP	Signal for process <i>ON</i> . This signal must be connected to the external process equipment.

5 ZÁVĚR

Prvním úkolem této bakalářské práce byla rešerše. V rešerši dané problematiky se pojednávalo o průmyslových robotech, jejich rozdělení. V jakých pracovních prostorech a souřadných systémech pracují. Rozebíraly se zde i způsoby programování průmyslových robotů, souřadné systémy a druhy pohybů robotů, používané při jejich programování. Bylo vysvětleno, co to vlastně je to digitální zprovoznění, pojednávalo se o simulačních softwarech používaných na digitální zprovoznění, jejich možnostech, výhodách a nevýhodách. A nakonec se jednalo o aditivních technologií. Dopodrobna byly rozebrány realizované metody na různých základkách a vycházející z nich technologií. Podstatnou pro danou práci FDM technologie byla popsána a také tiskárny různých typů s její využitím. A nakonec se jednalo o robotizovaném 3D tisku.

Druhým úkolem byla tvorba modelové úlohy. Zde byla představena problematika, na které se následně pracovalo. Jednalo se o modelové úloze, která se zabývala o výrobním robotizovaném systému s využitím technologie 3D tisku. Pomocí pořízeného softwaru od výrobce průmyslového robotu modelová úloha byla sestavená.

Posledním úkolem bylo samotné digitální zprovoznění. Zde bylo vytvořeno testovací model výrobku, pomocí kterého by se hodnotilo tisk výrobního systému. Další simulace byla zaměřená na posouzení o vhodnosti a přípravě takového systému k fyzické realizaci.

V zadání této bakalářské práce byly tři cíle a sice: rešerše dané problematiky, tvorba modelové úlohy a digitální zprovoznění. Všechny tyto části byly v rámci této práce uspokojivě splněny. Cíle byly plněny v uvedeném pořadí, jelikož na sebe navazovaly. Nejprve byla potřeba danou problematiku nastudovat, poté sestavit modelovou úlohu, a nakonec to celé zprovoznit.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BRAŽINA, Jakub. Virtuální zprovoznění výrobního systému [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116785>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Vetiška.
- [2] *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Děčín: Automa - časopis pro automatizační techniku, s.r.o., 2016, 22(5) [cit. 2019-03-10]. ISSN 1210-9592. Dostupné z:
- [3] HAMPL, Lukáš. *Návrh a realizace robotických operací v systému Tecnomatix Process Simulate*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Václav Kaczmarczyk.
- [4] *Automatizační a robotická technika* [online]. Košice, 2011 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka_sk_final.pdf
- [5] *Digitální zprovoznění robotizovaného svařovacího pracoviště* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=224301. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Vetiška, Ph.D.
- [6] *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-a-teach-pendant-The-ABB-IRC5-FlexPendant_fig7_228382498
- [7] *BALLARD INTERNATIONAL* [online]. [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: <https://ballardintl.com/product/kuka-00-216-801-kcp4-smartpad-teach-pendant/>
- [8] *RoboDK: What's the Difference Between Offline Programming and Simulation?* [online]. 2019 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://robodk.com/blog/difference-simulation-offline-programming>
- [9] *CAD.cz: Off-line programování robotů pomocí simulačního programu RobotStudio* [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2998-off-line-programovani-robotupomoci-simulacniho-programu-robotstudio.html>
- [10] KOLÍBAL, Z. a kol. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. První vydání. VUTIUM Brno, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [11] *Coordinates of a robot system* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://learnchannel-tv.com/robot/robot-coordinate-systems/>

- [12] Automatizace a robotizace I. [online]. Učební text SPŠ a JŠ Kolín, [2011], 74 s. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.spsko.cz/documents/ARO_prorok/Pr%C5%AFmyslov%C3%A9%20roboty.pdf
- [13] ČOP, Vladimír, Ján BUDA a Jurij Georgijevič KOZYREV. Automatizácia technologických procesov priemyselnými robotami a manipulátormi. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia strojárkej literatúry. 241 s. ISBN 80-05-22474-6.
- [14] RADEK, Knoflíček. ROBOTY A PRUŽNÉ VÝROBNÍ SYSTÉMY: Studijní opora. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, 2004.
- [15] Describe cylindrical robot [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://jf505industrialrobotics.blogspot.cz/2013/12/222-describe-cylindrical-robot.html>
- [16] How do you control a KUKA robot with a SIMATIC controller? [online]. 2015 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109475194/how-do-you-control-akuka-robot-with-a-simatic-controller-?dti=0&lc=en-WW>
- [17] KUKA: KUKA.Sim [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/software/pl%C3%A1nov%C3%A1n%C3%AD-projektov%C3%A1n%C3%AD-servis-bezpe%C4%8Dnost/kuka,-d-,sim>
- [18] AXIOM TECH s.r.o.: DIGITÁLNÍ TOVÁRNA TECNOMATIX [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/24751-digitalni-tovarnatecnomatix>
- [19] WANG, Wego. Reverse Engineering [online]. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2010 [cit. 2020-02-17]. DOI: 10.1201/EBK1439806302. ISBN 9780429135767. Dostupné z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1201/EBK1439806302>
- [20] FRÁTRIK, M. Výroba modelu ozubeného soukolí metodou FDM tisku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
- [21] Encyklopedie 3D tisku: Aditivní výroba a rapid prototyping. In: 3D tisk [online]. Brno: Vydavatelství Nová média, 2014 [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <https://www.3dtisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>
- [22] RobotStudio 3D Printing PowerPac: Additive Manufacturing of large scale objects [online]. In: . s. 2-24 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z:

[https://searchext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A2114
&Language Code=en&DocumentPartId=&Action=Launch](https://searchext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A2114&Language Code=en&DocumentPartId=&Action=Launch)

- [23] LIPSON, Hod a Melba KURMAN. Fabricated: the new world of 3D printing. Indianapolis, Indiana: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-1-118-35063-8
- [24] HODEK, Josef. Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s. [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3dtisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>
- [25] BOURELL, David, Jean KRUTH, Ming LEU, Gideon LEVY, David ROSEN, Allison BEESE a Adam CLARE. Materials for additive manufacturing. CIRP Annals. 2017, 66(2), 659–681. ISSN 00078506.
- [26] LEE, Jian-Yuan, Jia AN a Chee Kai CHUA. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. Applied Materials Today. 2017, 7, 120–133. ISSN 23529407
- [27] 3D printing technology. In: 3D Printing Industry [online]. © Copyright 2017 3D Printing Industry, [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printingbasics-free-beginners-guide#04-processes>
- [28] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. Vydání první. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
- [29] BUSWELL, R.A., R.C. SOAR, A.G.F. GIBB a A. THORPE. Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. Automation in Construction. 2007, 16(2), 224– 231. ISSN 09265805.
- [30] STRAUS, Holger. An envelope: the potential of additive manufacturing for facade construction. S.I.: Createspace, 2012. ISBN 978-148-1214-339
- [31] Design Considerations for FDM Additive Manufacturing Tooling. 2018. Dostupné z: http://www.stratasys.com/-/media/files/designguides/dg_fdm_designconsiderationsfdmtooling_0618a.pdf
- [32] ZEIN, Iwan, Dietmar HUTMACHER, Kim TAN a Swee TEOH. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. Biomaterials [online]. 2002, 23(4), 1169-1185 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/S0142-9612(01)00232-0. ISSN 01429612. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961201002320>
- [33] FRÁTRIK, M. Výroba modelu ozubeného soukolí metodou FDM tisku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

- [34] MATERIALISE. Fused Deposition Modeling (FDM) [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>
- [35] EVEKTOR. Rapid prototyping [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.evektor.cz/cz/rapid-prototyping>
- [36] TECNOTRADE OBRÁBĚCÍ STROJE S.R.O. Srovnání materiálů_FDM [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: http://www.objet.cz/uploads/files/Srovn%C3%A1n%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF_FDM.pdf
- [37] SVĚTLÍK, David. Povrchová úprava ABS součástí po 3D FDM tisku. Brno 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 68 s. 6 příloh. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
- [38] MATERIALPRO 3D. TISKOVÉ STRUNY - FILAMENTY [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/tiskove-struny-filamenty/>
- [39] CYBERSOFT S.R.O. 3D tiskové struny [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: https://www.nc.cz/3d-tiskarny-tiskove-struny_c1445311.html
- [40] PRŮŠA, Josef a Martin BACH. Základy 3D tisku s Josefem Průšou [online]. Praha, ČR, 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wpcontent/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [41] Product specification IRB 120. b.r. Dostupné také z: <https://searchext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC035960-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [42] MAKERS LAB: Typy 3D tiskáren [online]. Praha, ČR, 2016 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>
- [43] SVĚT HARDWARE: 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? [online]. Brno, ČR, 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tiskjak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [44] Boyle, B.M., Xiong, P.T., Mensch, T.E., Werder, T.J. and Miyake, G.M. (2019) 3D Printing Using Powder Melt Extrusion. 9. Dostupné z: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=3042798>
- [45] Jennings, A. (2021) 3D Printing Troubleshooting All Common Problems. All3DP. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues>
- [46] Open Access Library Journal: A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes [online]. Dostupné z: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=110955>

- [47] DING, Yaoyu, Rajeev DWIVEDI a Radovan KOVACEVIC. Process planning for 8- axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing [online]. 2017, 44, 67-76 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.08.008. ISSN 07365845. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584515300326>
- [48] FDM: One of the Keys for Stratasys Success in 3D Printing. Ennomotive [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.ennomotive.com/fdm-stratasys-3d-printingplastics/>
- [49] AHLERS, Daniel, Florens WASSERFALL, Norman HENDRICH a Jianwei ZHANG. 3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation. In: 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) [online]. IEEE, 2019, s. 1737-1743 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1109/COASE.2019.8843116. ISBN 978-1-7281-0356-3. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8843116/>

7 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

7.1 Seznam tabulek

Tab 1) Production Management I/O signals

Tab 2) Printing dispense lean I/O signals

7.2 Seznam obrázků

- Obr. 1) Možné uspořádání kinematických řetězců v prostoru [14]
- Obr. 2) Perokresba kinematiky PPP [14]
- Obr. 3) Model robotu typu RPP [15]
- Obr. 4) Model robotu typu RPP [16]
- Obr. 5) Model robotu typu RPP [14]
- Obr. 6) Souřadné systémy robota [11]
- Obr. 7) Hlavní typy pohybů robotů [16]
- Obr. 8) Teach-pendant ABB [6]
- Obr. 9) Teach-pendant KUKA [7]
- Obr. 10) Programování metodou Teach-in
- Obr. 11) Porovnání simulovaného a skutečného robota [8]
- Obr. 12) Schéma digitálního zprovoznění [1]
- Obr. 13) Schéma digitálního zprovoznění [1]
- Obr. 14) Obecný postup výroby aditivními technologiemi [20]
- Obr. 15) Použití aditivní výroby v jednotlivých oborech [24]
- Obr. 16) Použití aditivní výroby v jednotlivých oborech [27]
- Obr. 17) Stereolitografie [27]
- Obr. 18) Metoda založena na tryskání pojiva [27]
- Obr. 19) Metody založené na spékání prášku [27]
- Obr. 20) Laminace plátů materiálu [27]

- Obr. 21) Metody založené na extruzi (FDM, FFF) [27]
- Obr. 22) Schéma tiskové technologie FDM s dvěma tryskami [31]
- Obr. 23) Schématické znázornění kartézské tiskárny Prusa i3 MK3S [40]
- Obr. 24) Schématické znázornění Delta tiskárny [40].
- Obr. 25) 3D tiskárny R-360 konstrukčního typu Polar [42]
- Obr. 26) Konstrukce hotendu výrobce E3D [43]
- Obr. 27) Konstrukce Pellet Extruderu [46]
- Obr. 28) Teplotní zóny Pellet Extruderu [46]
- Obr. 29) Rozbor silového působení na vlákno při tisku převisu [26]
- Obr. 30) Přidání instrukce PrintL
- Obr. 31) Výsledný model pracoviště
- Obr. 32) Původní model Extruderu E25 CEAB
- Obr. 33) Extruder E25 CEAB na robotu s nastaveným TCP (Pohled zdola)
- Obr. 34) Ukázková model vázy
- Obr. 35) Příklad pohybové instrukce v G-code
- Obr. 36) Jednotlivý G-code, simulovaný v sliceru UltiMaker Cura
- Obr. 37) Nástrojová lišta 3D Printing PowerPac
- Obr. 38) Připravený G-code pro tisk
- Obr. 39) Úspěšné ověření Check Reach
- Obr. 40) Testová konfigurace Settings