

Realizace 3D tisku prostřednictvím průmyslového robotu

Marek Leopold

Bakalářská práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Marek Leopold**
Osobní číslo: **A15096**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Realizace 3D tisku prostřednictvím průmyslového robotu**
Téma práce anglicky: **Realising 3D Printing Using an Industrial Robot**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte literární rešerši na zadané téma.
2. Navrhnete a vytvořte vhodný prototyp tiskové hlavy spolu s vhodným doplňujícím hardware za účelem propojení s řídicí jednotkou průmyslového robota.
3. Vyberte a popište vhodné programové vybavení pro vytváření 3D modelů a export řezů do G-kódu.
4. Vytvořte programové vybavení ve vybraném programovém prostředí pro zpracování G-kódu za účelem řízení pohybu robotu po zadané dráze a ovládání tiskové hlavy.
5. Vysledné řešení demonstřujete na vhodně zvoleném příkladu.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. BUDMEN, Isaac a Anthony ROTOLO. *The book on 3D printing*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. ISBN 978-1489529442.
2. MAGAZINE, Make. *MAKE: ultimate guide to 3D printing*. MAKE special issue. Sebastopol: CALIF: O'Reilly Media, 2013. ISBN 978-144-9357-375.
3. HORVATH, Joan C. *Mastering 3D printing*. Berkeley, California: Apress, [2014]. Technology in action series. ISBN 978-1-4842-0025-4.
4. PRŮŠA, Josef. *Základy 3D tisku* [online]. 2014 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
5. ZUKAS, Victoria a Jonas A ZUKAS. *An Introduction to 3D Printing*. Sarasota: First Edition Design Publishing, 2015. ISBN 978-1622-878-970.
6. WARREN, John-David, Josh ADAMS a Harald MOLLE. *Arduino robotics*. New York, NY: Apress, c2011. Technology in action series. ISBN 978-1-4302-3184-4.
7. MARGOLIS, Michael. *Arduino cookbook*. Second edition. Sebastopol: O'Reilly, 2011, xx, 699 s. ISBN 9781449313876.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Navrátil, Ph.D.
Ústav řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: 20. prosince 2019
Termín odevzdání bakalářské práce: 15. května 2020



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 20. prosince 2019

Jméno, příjmení: Marek Leopold

Název bakalářské práce: Realizace 3D tisku prostřednictvím průmyslového robotu

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 03.08.2020

.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Cílem práce je návrh a výroba 3D tiskárny s využitím průmyslového robotu. Teoretická část práce se zabývá technologiemi tisku FDM, SLA a SLS/DMLS. Je rozebrán postup tvorby modelu, přes generování G-kódu až po samotný tisk. Dále je popsán jednodeskový počítač a průmyslový robot využitý v praktické části. V praktické části je popsáno kompletní řešení daného tématu, kdy byla navržena, vyrobena a sestavena sestava hlavy pro 3D tisk. Dále byla navržena a sestavena řídicí jednotka, která obsahuje ovládací prvky 3D tiskárny a ukrývá elektroniku potřebnou k tomuto řízení. V poslední fázi byla provedena implementace programu do mikrokontroléru, pomocí kterého je dosaženo řízení kompletní sestavy tiskárny.

Klíčová slova: 3D tisk, mikropočítač Arduino Due, 4osý robot Stäubli RS40B, sériová komunikace RS232

ABSTRACT

The purpose of this work is design and production of 3D printer as a periphery to an industrial robot. The theoretical part of this work deals with print technologies like FDM, SLA and SLS/DMSL. You can find there process from model production through the generation G-code to printing. Next there is described single-board computer and industrial robot used in practical part. In practical part is complete solution of this topic, when the printer head for 3D print was designed produced and assembled. Next a control unit was produced which contains of the control elements of the 3D printer and hides electronics necessary for this control. In the last phase the program was implemented in microcontroller, which is used for complete control of the printer assembly.

Keywords: 3D print, microcomputer Arduino due, 4-axis robot Stäubli RS40B, serial communication RS232

Za odborné vedení mé bakalářské práce s velkou mírou trpělivosti, ochoty a lidským přístupem a také za velmi cenné rady při zpracování práce děkuji panu Ing. Petru Navrátilovi, PhD.

Rád bych zde poděkoval panu Davidu Obalovi za odbornou pomoc a poskytnuté prostředky pro zpracovávání mechanické a elektronické části této práce.

Poděkování patří i panu Ing. Tomáši Hanákovi za odborné rady a korekturu práce.

Děkuji také svým nejbližším za podporu při mém studiu.

„Jednou z oblastí, která je pro nás typická, je neúspěch. Myslím, že jsme nejlepším místem na světě pro selhání. Máme v tom bohatou praxi. Selhání a vynález jsou neoddělitelná dvojčata. K vymýšlení nových věcí musíte experimentovat, a pokud předem víte, že to bude fungovat, není to experiment.“

- Jeff Bezos

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| OBSAH | 7 |
| TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1 HISTORIE | 11 |
| 1.1 HISTORIE 3D TISKU | 11 |
| 1.2 HISTORIE ROBOTIKY | 11 |
| 2 TECHNOLOGIE 3D TISKU | 12 |
| 2.1 TECHNOLOGIE FFF/FDM | 12 |
| 2.1.1 KONSTRUKCE TISKÁRNY..... | 12 |
| 2.1.2 KOMPONENTY TISKÁRNY..... | 15 |
| 2.1.3 TISKOVÝ MATERIÁL | 19 |
| 2.2 TECHNOLOGIE SLA | 31 |
| 2.2.1 KONSTRUKCE TISKÁRNY..... | 31 |
| 2.2.2 KATEGORIE SLA PROCESU | 32 |
| 2.2.3 TISKOVÝ MATERIÁL | 35 |
| 2.3 TECHNOLOGIE SLS/DMLS | 43 |
| 2.3.1 KONSTRUKCE TISKÁRNY..... | 43 |
| 2.3.2 TISKOVÝ MATERIÁL PRO TECHNOLOGII SLS | 45 |
| 2.3.3 TISKOVÝ MATERIÁL PRO TECHNOLOGII DMLS | 48 |
| 3 PŘÍPRAVA DAT PRO 3D TISKÁRNU | 51 |
| 3.1 MODELÁŘ | 51 |
| 3.1.1 AUTODESK INVENTOR® | 51 |
| 3.1.2 CATIA | 52 |
| 3.1.3 SKETCHUP..... | 53 |
| 3.2 SLICER | 54 |
| 3.2.1 SLIC3R..... | 54 |
| 3.2.2 PRUSASLICER (DŘÍVE SLIC3R PRUSA EDITION)..... | 55 |
| 3.2.3 ULTIMAKER CURA..... | 56 |
| 4 JEDNODESKOVÝ POČÍTAČ ARDUINO DUE | 57 |
| 4.1 POPIS MIKROPOČÍTAČE | 58 |
| 4.2 PROGRAMOVÁNÍ ARDUINA | 59 |
| 4.3 DOSTUPNÉ DATOVÉ TYPY | 59 |
| 4.4 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ | 60 |
| 4.4.1 ALTERNATIVA K VÝVOJOVÉMU PROSTŘEDÍ | 61 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5 | PRŮMYSLOVÝ ROBOT STÄUBLI RS40B..... | 62 |
| 5.1 | ROBOTICKÉ RAMENO STÄUBLI RS40B | 62 |
| 5.1.1 | PARAMETRY RAMENE A PRACOVNÍ PROSTOR | 63 |
| 5.2 | ŘÍDÍCÍ SYSTÉM CS8C | 65 |
| 5.3 | PROGRAMOVACÍ PANEL MCP | 67 |
| | PRAKTICKÁ ČÁST | 70 |
| 6 | POPIS HARDWARU..... | 71 |
| 6.1 | SESTAVA TISKOVÉ HLAVY..... | 71 |
| 6.1.1 | HROT..... | 72 |
| 6.1.2 | KROKOVÝ MOTOR | 73 |
| 6.1.3 | MECHANICKÁ ČÁST..... | 74 |
| 6.2 | ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA | 76 |
| 6.3 | NAPÁJECÍ JEDNOTKA..... | 78 |
| 6.4 | VYHŘÍVANÁ PODLOŽKA..... | 79 |
| 6.5 | ELEKTROSCHÉMA ZAPOJENÍ | 80 |
| 7 | ČINNOST KOMPLETNÍHO ZAŘÍZENÍ..... | 81 |
| 7.1 | ČINNOST MIKROPOČÍTAČE ARDUINO DUE..... | 82 |
| 7.1.1 | ČTENÍ SD KARTY | 82 |
| 7.1.2 | OBSLUHA DISPLEJE A OVLÁDACÍCH PRVKŮ..... | 82 |
| 7.1.3 | VYHŘÍVÁNÍ TISKOVÉ PODLOŽKY | 82 |
| 7.1.4 | VYHŘÍVÁNÍ TISKOVÉ HLAVY..... | 82 |
| 7.1.5 | POSUN FILAMENTU | 82 |
| 7.1.6 | ŘÍZENÍ ROBOTU PO SÉRIOVÉ LINCE RS-232 | 82 |
| 7.2 | ČINNOST ROBOTU STÄUBLI RS40B | 83 |
| 7.3 | SYNCHRONIZACE ROBOTU A MIKROPOČÍTAČE..... | 83 |
| | PŘÍLOHA P I: ZDROJOVÝ KÓD MIKROPOČÍTAČE | 97 |
| | PŘÍLOHA P II: ZDROJOVÝ KÓD ROBOTU | 110 |

ÚVOD

V dnešní době se stále více setkáváme s robotizací firem, je to takzvaný Průmysl 4.0, kdy je lidská práce nahrazována roboty. Jsou tedy více dostupní než kdykoliv dříve a dokážou u opakovaných činností plně nahradit a předčit člověka. Robot nepotřebuje odpočinek, dokáže pracovat nepřetržitě a bezchybně. Jsou roboty, kteří svařují, sestavují, manipulují se součástkami, a podobně. Proč tedy nezkusit využít robotický manipulátor k 3D tisku?

3D tisk již není žádnou novinkou, stále více se rozšiřuje mezi veřejnost. Jeho obliba roste s množstvím uživatelů, protože je velmi jednoduché sdílet vyráběnou součást s kýmkoliv, čím více uživatelů tedy je, tím více součástí můžeme dostat bez námahy na tvorbu modelu. Součásti lze tisknout z mnoha materiálů, záleží na zvolené technologii tisku. Pokud pomineme detailní rozdělení 3D tiskáren, tak lze tisknout z plastu, kovu, betonu či z kmenových buněk.

Díky tomuto se tiskárny začínají využívat ve stavebnictví pro tisk domů, ve zdravotnictví pro tisk orgánů, ve strojírenství, pro tisk velmi lehkých dílů, a podobně.

Plánované řešení bakalářské práce je takové, že na robota se připevní 3D tisková hlava vytvoří se řídicí systém, který bude s robotem komunikovat po sériové lince a zároveň ovládat tiskovou hlavu. Toto řešení bude nutné navrhnout od základu, protože najít reálné funkční řešení tohoto problému je takřikajíc nemožné. Proto se bakalářská práce dělí na teoretickou a praktickou část. V teoretické části lze nalézt stručnou historii, podrobný popis 3D tiskových možností z plastových materiálů, postup přípravy dat pro tisk a informace o zvoleném jednodeskovém počítači a robotu.

V praktické části je uveden popis použitého hardware pro sestavené zařízení a popis činnosti jednotlivých prvků výsledného řešení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE

1.1 Historie 3D tisku

První patent se zmínkou o období 3D tisku je z roku 1892, kdy vynálezce Joseph E. Blather vytvářel 3D typografické mapy pomocí vrstvení (obdobně jako současné 3D tiskárny) [1].

Moderní způsob 3D tisku s technologií Rapid prototypingu, čili s pomocí postupného skládání výrobku z vrstev na které je výrobek rozřezán, si chtěl patentovat vědec dr. Kodama, bohužel pro nedostatečné financování nedokončil specifikaci patentu do jednoho roku od jeho podání a patent nebyl vydán [2].

Otcem 3D tisku bývá označován Charles W. Hull se svou tiskárnou z roku 1984. Využívá stereolitografii, což je vytvrzování pryskyřice UV paprskem, který velkou rychlostí vykresluje jednotlivé vrstvy výrobku. Patent na stereolitografii mu byl vydán v roce 1986. V roce 1989 byla tato tiskárna uvedena na trh společností 3D Systems založenou Charlesem W. Hullem [3].

1.2 Historie robotiky

Snem společnosti bylo si vždy usnadňovat práci, ale až robotika, dříve jen mechanická jim v tom pomohla. První mechanická napodobenina člověka je z 18. století, jedná se o mechanického písáře, jenž byl schopen psát perem několik vět a velmi dobře v tom napodoboval člověka. Tento mechanický robot byl dílem švýcarských mistrů Piera a Henry Drozů.

Zásadním mezníkem v robotice je rok 1920, kdy se slovo robot objevilo v díle Karla Čapka R.U.R. a v tomto století se začínají objevovat první praktické aplikace robotů. Do této doby sloužili pouze pro přilákání pozornosti.

V roce 1949 byl zahájen výzkum numericky řízených strojů, v roce 1961 byl pak vyvinut první robotický manipulátor firmou General Motors. V roce 1964 byly otevřeny laboratoře umělé inteligence na Massachusetts Institute of Technology a Stanford Research Institute.

V roce 1968 je postaven na Stanford Research Institute mobilní robot s viděním.

První manipulátory s konstrukcí SCARA jsou z roku 1979.

Od roku 1980 začínají být robotické systémy vybavovány množstvím počítačových čidel, které doposud spadaly pouze do výzkumu UI [47].

2 TECHNOLOGIE 3D TISKU

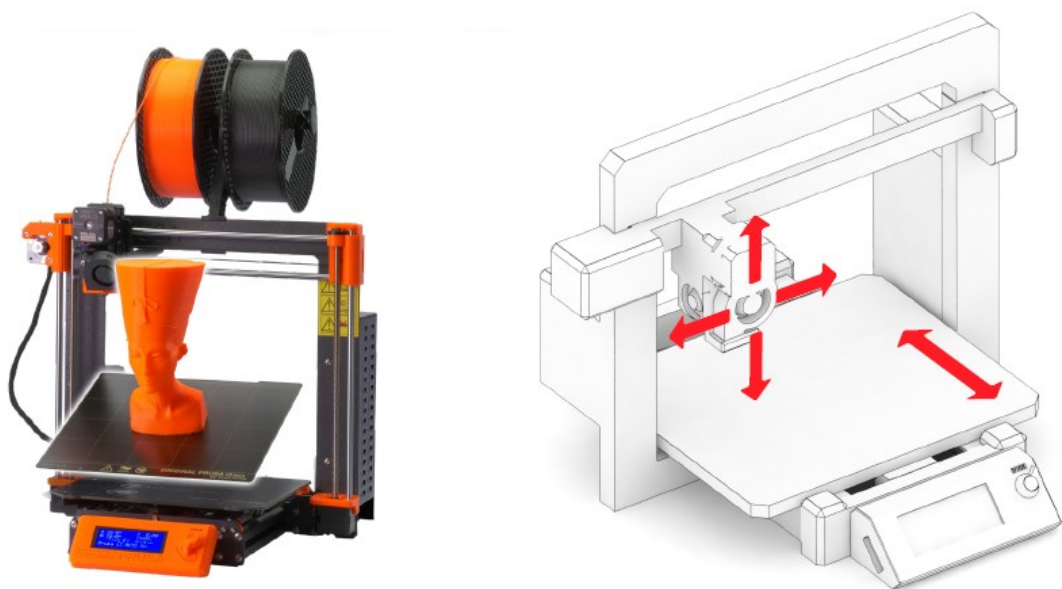
2.1 Technologie FFF/FDM

Jedná se o technologii, jenž je nejdostupnější pro širokou veřejnost. Tisknou se s ní převážně plastové modely a prototypy pomocí roztavené tiskové struny – filamentu. V dnešní době se filament nejčastěji vyskytuje v průměru 1,75mm, což je vhodnější pro přesnost dávkování, nežli dřívější průměr 3mm. Práce s filamentem je bezpečnější a jednodušší nežli s pryskyřicí či práškem využívaných v ostatních technologiích tisku. Na hotové součásti lze rozeznat jednotlivé vrstvy, které se v případě trysky o průměru 0,4mm pohybují v rozmezí 0,05mm až 0,3mm [13].

2.1.1 Konstrukce tiskárny

2.1.1.1 Kartézská

Pohyby tiskárny jsou rovnoběžné s kartézskými osami a to většinou tak, že tisková hlava zajišťuje pohyb ve dvou osách – X a Z a podložka, nejčastěji vyhřívaná se pohybuje po ose Y. Ve většině případů má podložka pravoúhlý tvar [13].

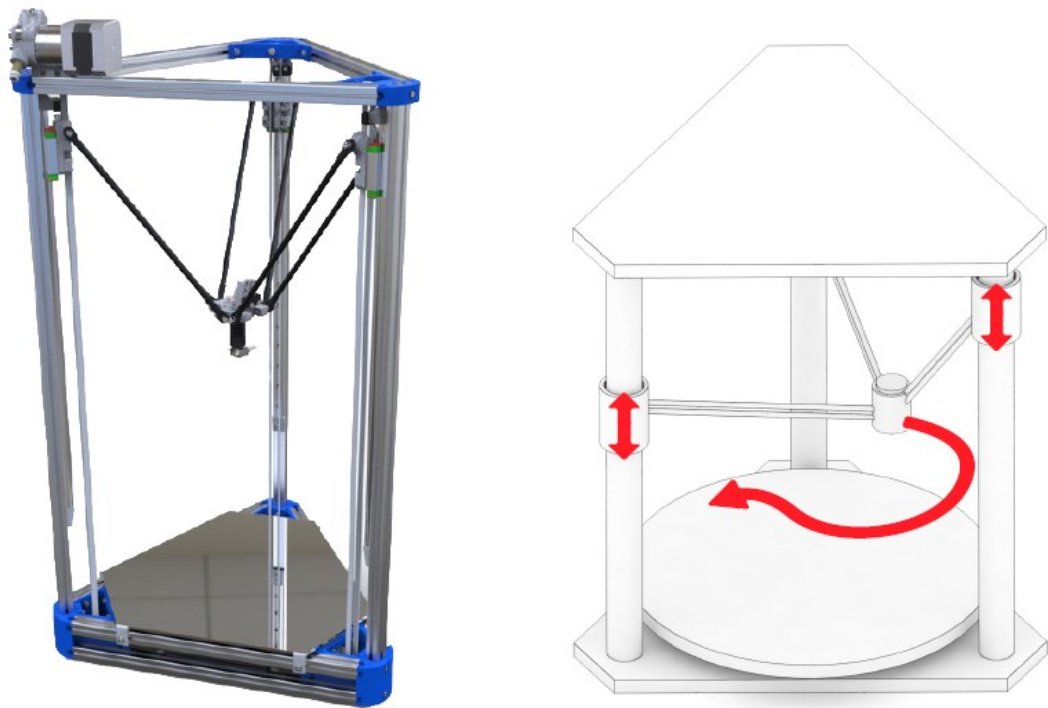


Obrázek 1: Original Prusa i3 MK3S [13]

2.1.1.2 Delta

Tiskárna se pohybuje taky v kartézském systému souřadnic, ovšem extruder je zde zavěšen na třech ramenech. Hlavní výhodou tohoto řešení je vysoká rychlost pohybů tiskové hlavy a velký prostor, především ve vertikální ose.

Tiskárna vyžaduje vysokou přesnost konstrukce a kalibrace. Pro pohyb hlavy jsou potřebné složité přepočty souřadnic [13].



Obrázek 2: Delta tiskárna [13]

2.1.1.3 Polární

Tato tiskárna používá velmi jednoduchou konstrukci, kdy se tisková hlava pohybuje lineárně po dvou osách a třetí osa je rotační.

Polární konstrukce není velmi rozšířená pro složitost přípravy a převedení modelu na tiskové instrukce [13].

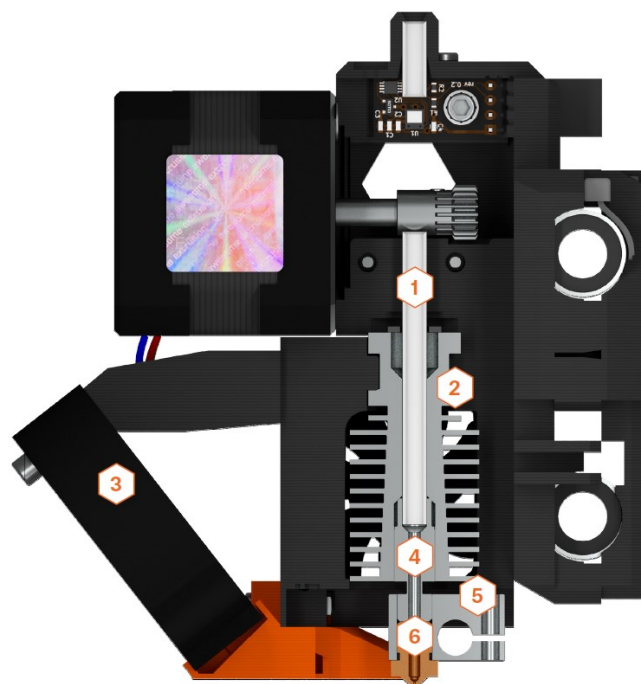


Obrázek 3: Polární tiskárna [13]

2.1.2 Komponenty tiskárny

2.1.2.1 Extruder

Tisková hlava neboli extruder slouží k roztavení a nanášení filamentu. Filament se do extruderu dostává přes teflonovou trubičku, v této chvíli má ještě pokojovou teplotu. Dále filament prochází přes chladič, neboli heat sink. Chladič slouží k odvedení tepla od nahřívané části s tryskou (tj. heat block) a má co nejvíce zúžit oblast mezi pevným a roztaveným filamentem. Tryska je pro uživatele jediná součást, kterou lze měnit, protože různými průměry trysky lze ovlivnit kvalitu výtisku [13].



Obrázek 4: Extruder [13]

- 1: Teflonová (PTFE) trubička
- 2: Heatsink (chladič)
- 3: Tiskový ventilátor
- 4: Heat break (izolátor)
- 5: Heater Block
- 6: Tryska

2.1.2.2 Vyhřívaná podložka

Vyhřívaná podložka je součástí většiny moderních 3D tiskáren. Zvyšuje kvalitu tisku tím, že snižuje rychlost chladnutí vytisknutého modelu, čímž zabraňuje jeho deformacím [13].



Obrázek 5: Vyhřívaná podložka [14]

2.1.2.3 Rám

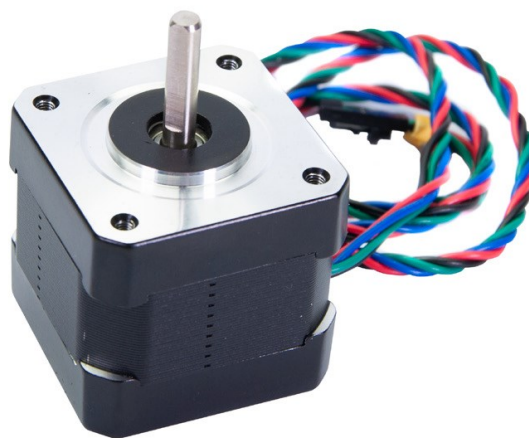
Rám je základním nosičem komponent 3D tiskárny, jeho tuhost a přesnost výrazně ovlivňuje kvalitu tisku. Dostatečně tuhý rám zabraňuje vibracím a umožňuje vyšší rychlost tisku při dodržení stejné kvality jako u pomalého tisku [13].



Obrázek 6: Rám [13]

2.1.2.4 Krokové motory

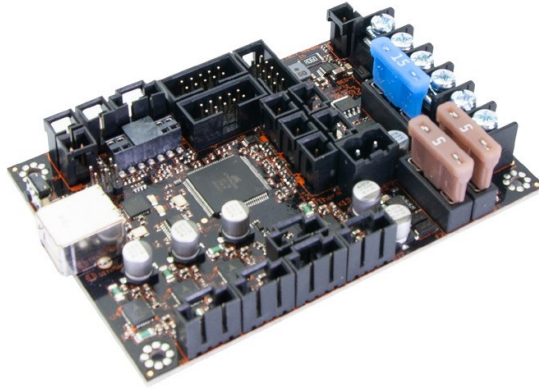
Krokové motory vytvářejí veškeré mechanické pohyby na 3D tiskárně, nalezneme zde minimálně čtyři – tři pro pohyb os a jeden pro podávání filamentu do extruderu [13].



Obrázek 7: Krokový motor [13]

2.1.2.5 Řídící jednotka

Řídící jednotka je mozkem 3D tiskárny. Zpracovává vstupní G-kód a převádí jej na pohyb krokových motorů a ovládá teploty v extruderu a na vyhřívané podložce [13].



Obrázek 8: Řídící jednotka [13]

2.1.3 Tiskový materiál

2.1.3.1 PLA - Polylactic acid

PLA se vyrábí z kukuřičného či bramborového škrobu, případně z cukrové třtiny, díky tomu je plně biologicky odbouratelný. Jeho vlastností je malá tepelná roztažnost a nulové deformace během tisku, jedná se tedy o ideální volbu při tisku velkého modelu. Používá se i při tisku menších produktů, zde se využívá jeho nízká teplota tání [15][17].



Obrázek 9: PLA [17]

Tabulka 1: PLA Vlastnosti [15][16]

| | Hodnota |
|----------------------------------|------------------------|
| Hustota | 1,25 g/cm ³ |
| Pevnost v tahu | 45,7 MPa |
| Modul pružnosti v tahu | 2 355 MPa |
| Prodloužení při přetržení | 3% |

2.1.3.2 PETG – Polyethylentereftalát s modifikovaným glykolem

PETG patří k nejpoužívanějším materiálům pro 3D tisk, je velmi vhodný pro mechanicky namáhané části. V porovnání s PLA je pružnější, méně křehký a více tepelně odolný. Přílnavost mezi jednotlivými vrstvami je vynikající, riziko výrazného smrštění či zkroucení nebo je minimální. Tento materiál lze recyklovat [18][19].



Obrázek 10: PETG [18]

Tabulka 2: PETG Vlastnosti [19]

| | Hodnota |
|-------------------------------|-----------------------|
| Hustota | 1,08g/cm ³ |
| Pevnost v tahu | 53 MPa |
| Modul pružnosti v tahu | 1 900 MPa |
| Pevnost v ohybu | 64 MPa |
| Modul pevnosti v ohybu | 1 900 MPa |

2.1.3.3 ABS – Akrylonitrilbutadienstyren

Jedná se o vysoce odolný konstrukční termoplast, který umožňuje výrobu velmi detailních součástí. Pevnost tohoto materiálu dosahuje až 80% vstřikovaného ABS, je tedy velmi vhodný pro funkční aplikace. Materiál není průhledný, ale je dostupný v několika barevných variantách. Využívá se například u upínacích přípravků či u koncepčních modelů pro zkoušky tvarů, sestavení a funkčnosti [6].

Tabulka 3: ABS Vlastnosti [4]

| | Hodnota | Norma |
|----------------------------------|-----------------------|--------------|
| Hustota | 1,05g/cm ³ | |
| Pevnost v tahu | 22 MPa | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 1 627 MPa | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 41 MPa | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 1 834 MPa | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 6% | |

2.1.3.4 ABSi - Biokompatibilní akrylonitrilbutadienstyren

Tento termoplast je typu ABS s vyšší rázovou pevností. ABSi pevnější a odolnější než ABS. Jeho další vlastností je průsvitnost, díky tomu jej lze využít v aplikacích vyžadujících přenos světla či sledování průtoku. Nejčastěji se využívá v automobilním a farmaceutickém průmyslu.

ABSi splňuje normu USP třídy IV, což je norma pro farmaceutický a biotechnický průmysl [6].



Obrázek 11: ABSi [6]

Tabulka 4: ABSi Vlastnosti [5]

| | Hodnota | Norma |
|----------------------------------|-----------------------|--------------|
| Hustota | 1,08g/cm ³ | |
| Pevnost v tahu | 37 MPa | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 1 915 MPa | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 62 MPa | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 1 917 MPa | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 4,4% | |

2.1.3.5 ABS-M30 – Akrylonitrilbutadienstyren

ABS-M30 je pevnější o 25% až 75% než ABS. Nabízí i vyšší odolnost je a optimální pro realistické testy funkčnosti součástí. Při tisku tohoto materiálu lze dosáhnout hladšího povrchu s jemnějšími detaily nežli u ABS. ABS-M30 je stejně jako ABS neprůhledný a dostupný v několika barevných variantách. Využívá se obdobně jako ABS u dílů, kde pevnosti standardního ABS již nedostačují [6].



Obrázek 12: ABS-M30 [6]

Tabulka 5: ABS-M30 Vlastnosti [7]

| | Hodnota | Norma |
|----------------------------------|-----------------------|--------------|
| Hustota | 1,04g/cm ³ | |
| Pevnost v tahu | 36 MPa | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 2 413 MPa | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 61 MPa | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 2 317 MPa | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 4% | |

2.1.3.6 ABS-M30i - Biokompatibilní akrylonitrilbutadienstyren

Materiál ABS-M30i je totožný s materiálem ABS-M30 s tou výhodou, že u tohoto materiálu je certifikovaná biokompatibilita. Lze jej tedy využívat v potravinářském a farmaceutickém průmyslu například pro tvorbu obalů, či lékařských přístrojů [6].



Obrázek 13: ABS-M30i [6]

Tabulka 6: ABS-M30i Vlastnosti [7]

| | Hodnota | Norma |
|----------------------------------|-----------------------|--------------|
| Hustota | 1,04g/cm ³ | |
| Pevnost v tahu | 36 MPa | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 2 413 MPa | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 61 MPa | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 2 317 MPa | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 4% | |

2.1.3.7 ASA - Akrylonitril-styren-akrylát

ASA lze považovat za nástupce ABS. Má vynikající odolnost vůči UV záření, smršťování při tisku je mnohem menší a při tavení tolik nezapáchá. Velmi vhodný je i pro tisk teplotně namáhaných dílů, teplotní odolnost má až do 93°C [20].



Obrázek 14: ASA [20]

Tabulka 7: ASA Vlastnosti [20]

| | Hodnota |
|-------------------------------|-----------------------|
| Hustota | 1,07g/cm ³ |
| Pevnost v tahu | 42 MPa |
| Modul pružnosti v tahu | 1 600 MPa |

2.1.3.8 PC – Polykarbonát

Polykarbonáty patří mezi nejčastější průmyslové termoplasty. Mají velmi vhodné mechanické vlastnosti pro technicky náročnější prostředí, případně pro aplikace vyžadující vysokou pevnost v tahu a ohybu [6].



Obrázek 15: PC [6]

Tabulka 8: PC Vlastnosti [8]

| | Hodnota | Norma |
|----------------------------------|----------------------|--------------|
| Hustota | 1,2g/cm ³ | |
| Pevnost v tahu | 68 MPa | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 2 280 MPa | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 104MPa | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 2 234 MPa | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 4,8% | |

2.1.3.9 ABS-ESD7 - Akrylonitrilbutadienstyren – rozptylující statickou elektřinu

ABS-ESD7 je jako ABS-M30 odolným materiálem se schopností rozptýlu statické elektřiny. Díky této schopnosti je vhodný materiálem například u elektronických výrobků s deskami plošných spojů, kde by tento náboj mohl mít negativní vliv na funkčnost. Dalším využití tohoto materiálu nalezneme například u upínáků pro sestavování elektronických komponent [6].



Obrázek 16: ABS-ESD7 [6]

Tabulka 9: ABS-ESD7 Vlastnosti [9][10]

| | Hodnota | Norma |
|----------------------------------|-----------------------|--------------|
| Hustota | 1,04g/cm ³ | |
| Pevnost v tahu | 36 MPa | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 2 400 MPa | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 61MPa | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 2 400 MPa | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 3% | |

2.1.3.10 PC-ABS - Polykarbonátový ABS

PC-ABS je směsí polykarbonátu a ABS. Jedná se o pevný, teplotně odolný a pružný plast. Vysoká pevnost v rázu a teplotní odolnost, jsou výhody tohoto materiálu pro použití v technicky náročném prostředí. Materiál je vhodný pro výrobu zamykacích mechanismů, upínacích přípravků, případně pro koncepční modely zkoušky tvaru, sestavení a funkčnosti [6].



Obrázek 17: PC-ABS [6]

Tabulka 10: PC-ABS Vlastnosti [11]

| | Hodnota | Norma |
|----------------------------------|----------------------|--------------|
| Hustota | 1,2g/cm ³ | |
| Pevnost v tahu | 41 MPa | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 1 917 MPa | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 68 MPa | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 1 931MPa | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 6% | |

2.1.3.11 PC-ISO - Polykarbonát ISO

Směsí PC-ISO je svými vlastnostmi totožná se směsí Polykarbonátu. Výhoda tohoto materiálu je ta, že v surovém stavu je biokompatibilní a splňuje normy USP třídy VI a ISO 10993-1 [6].



Obrázek 18: PC-ISO [6]

Tabulka 11: PC-ISO Vlastnosti [8]

| | Hodnota | Norma |
|----------------------------------|----------------------|--------------|
| Hustota | 1,2g/cm ³ | |
| Pevnost v tahu | 68 MPa | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 2 280 MPa | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 104MPa | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 2 234 MPa | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 4,8% | |

2.1.3.12 Ultem 9085

Ultem 9085 je nový, vylepšený termoplast. Mezi jeho přední vlastnosti patří hmotnost, nehořlavost (dle normy UL 94-V0) a pevnost v tahu a ohybu. Díky těmto vlastnostem je materiál velmi vhodný pro koncové výrobky převážně v leteckém a automobilovém průmyslu. Dále se využívá u funkčních prototypů a výrobních nástrojů [6].



Obrázek 19: Ultem 9085 [6]

Tabulka 12: Ultem 9085 Přírodní [12]

| | Hodnota v rovině vrstvy | Hodnota kolmo na vrstvu | Norma |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Hustota | 1,27 g/cm ³ | | |
| Pevnost v tahu | 70 MPa | -- | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 2 510 MPa | 2 410 MPa | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 100 MPa | -- | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 2 400 MPa | 2 150 MPa | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 5,4% | 1,9% | |

Tabulka 13: Ultem 9085 Černý [12]

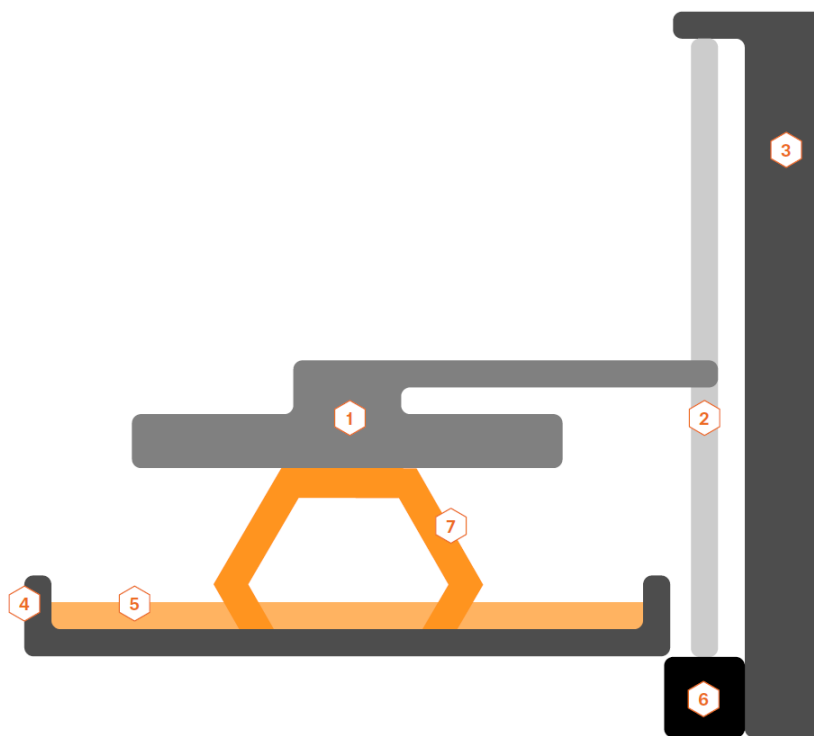
| | Hodnota v rovině vrstvy | Hodnota kolmo na vrstvu | Norma |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Hustota | 1,27 g/cm ³ | | |
| Pevnost v tahu | 70 MPa | -- | ASTM D638 |
| Modul pružnosti v tahu | 2 530 MPa | -- | ASTM D638 |
| Pevnost v ohybu | 105 MPa | -- | ASTM D790 |
| Modul pevnosti v ohybu | 2 470 MPa | -- | ASTM D790 |
| Prodloužení při přetržení | 5,4% | 1,9% | |

2.2 Technologie SLA

Při SLA technologii probíhá vytvrzování světlo citlivé pryskyřice za pomoci světelného zdroje. Podložka se po každé vrstvě posune směrem dolů a proběhne vytvrzování nové vrstvy. Oproti tisku FFF je tisk detailnější, ale pomalejší. Díky dosahování hladších povrchů oproti předchozí technologii, nejsou zde patrné vrstvy, si technologie SLA nalezne uplatnění hlavně v medicíně a šperkařství. Hlavní nevýhodou této technologie je toxicita pryskyřice, je nutné se vyvarovat kontaktu s pokožkou a dýchání výparů během tisku.

Model je vhodné po vytištění namáčet v izopropylalkoholu, aby se smyl zbytek pryskyřice. Dále je doporučeno model finálně vytvrdit UV světlem. Existují i přístroje, které tyto dva finální kroky udělají automaticky [13].

2.2.1 Konstrukce tiskárny



Obrázek 20: SLA tiskárna [13]

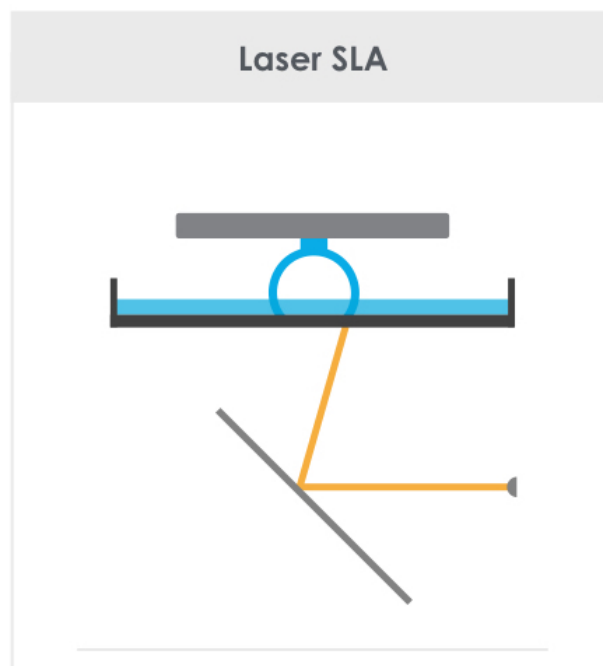
- 1: Tisková plocha
- 2: Trapézová tyč
- 3: Osa Z
- 4: Vanička
- 5: Fotopolymer
- 6: Krokový motor
- 7: Tištěný objekt

2.2.2 Kategorie SLA procesu

U tiskáren se odlišuje pouze způsob osvitů světla citlivé pryskyřice.

2.2.2.1 SLA Laser

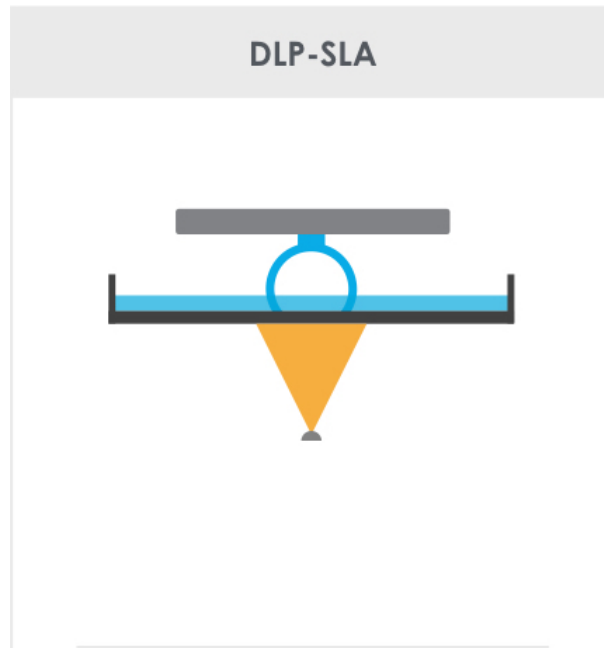
Vytvrzování vrstev probíhá UV laserovým paprskem, který je směřován soustavou dvou zrcadel a postupně vytvrzuje tiskovou vrstvu. Doba tisku je přímo závislá na ploše, která se ve vrstvách vytvrzuje [13].



Obrázek 21: SLA Laser [21]

2.2.2.2 DLP SLA

Vytvrzení celé tiskové vrstvy probíhá najednou pomocí digitálního projektoru. Výhodou technologie je vytvrzení celé vrstvy najednou, tedy tisk stejně vysokých výrobků bude trvat stejně dlouho, nezávisle na velikosti vytvrzované plochy [13].

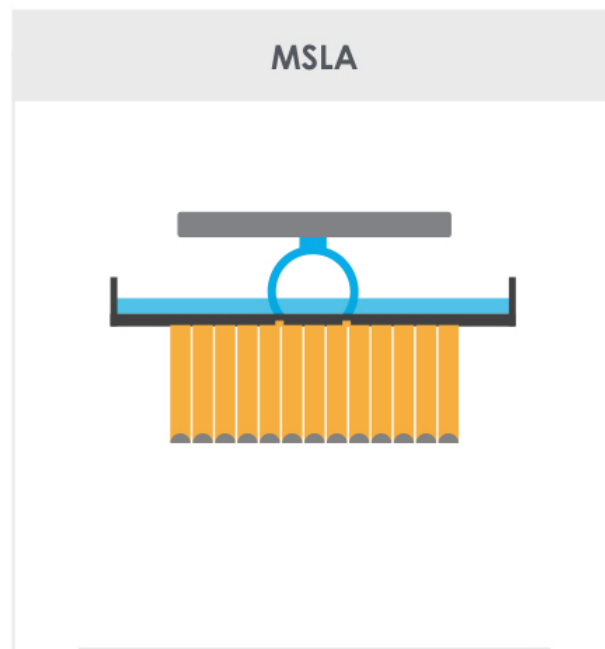


Obrázek 22: DLP SLA [21]

2.2.2.3 MSLA

Vytvrzování probíhá pomocí UV LED, oblasti, které mají a nemají být vytvrzeny určuje LCD display. Ten aktivuje pixely pouze v oblastech, jenž mají být vytvrzeny (svítí bíle). Pro hrany, jenž nejsou zarovnané s řádkem či sloupcem pixelů se využívá antialiasingu – rozmazání hrany, display poté rozsvítí pixely pouze částečně. Pokud by se tohoto nevyužívalo, hrany by nebyly rovné a byly by zde patrné schodky vzniklé právě umístěním pixelů.

Díky osvětlení celé tiskové vrstvy najednou, stejně jako u technologie DLP SLA, je tiskový čas závislý pouze na výšce tisknutého objektu. Ploše jednotlivých vrstev je čas nezávislý [13].



Obrázek 23: MSLA [21]

2.2.3 Tiskový materiál

2.2.3.1 Standardní pryskyřice

Standardní pryskyřice mají vysokou tuhost, dosahují vysoké úrovně detailů a lze dosáhnout podobné kvality povrchu jako vstřikováním. Pro nízkou cenu je vhodná pro prototypové aplikace.

Barva pryskyřice ovlivňuje vlastnosti, například šedá pryskyřice je vhodná pro díly s jemnými detaily, bílá pro díly, kde je vyžadován hladký povrch [22].



Obrázek 24: Standardní pryskyřice [22]

2.2.3.2 Čirá pryskyřice

Čirá pryskyřice má podobné vlastnosti jako standardní pryskyřice, ale může být opracována téměř až k optické průhlednosti [22].



Obrázek 25: Čirá pryskyřice [22]

2.2.3.3 Tvrdá pryskyřice

Tvrdá pryskyřice byla vyvinuta pro aplikace vyžadující vysoké napětí a namáhání. Díly vyrobené z tvrdé pryskyřice mají pevnost v tahu 55,7MPa a modul pružnosti 2 700Mpa, je tedy srovnatelná s ABS.

Součásti vyrobené z tohoto materiálu budou odolné proti rozbití. Jsou vhodné například pro kloubové spoje či jinak odolné prototypy [22].



Obrázek 26: Tvrdá pryskyřice [22]

2.2.3.4 *Odolná pryskyřice*

Jedná se o otěruvzdorný a flexibilní materiál s mechanickými vlastnostmi podobnými polypropylenu.

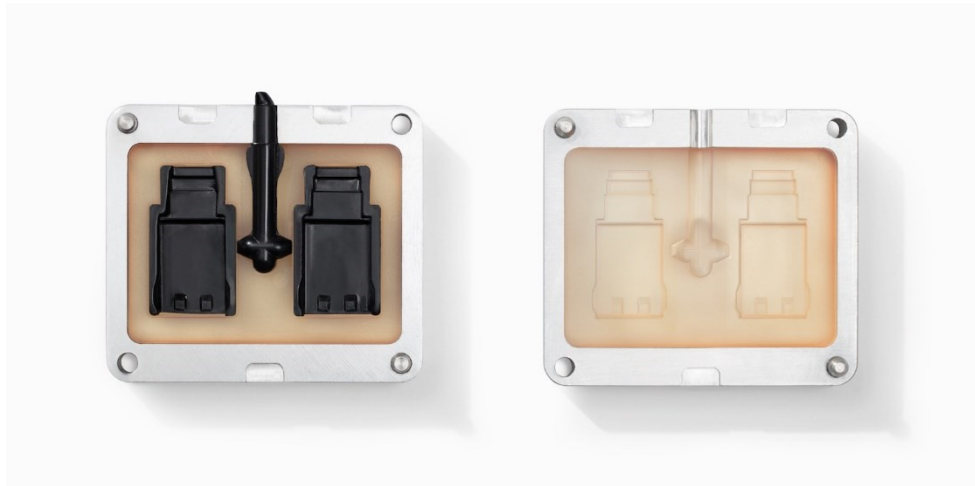
Odolná pryskyřice se používá pro díly vyžadující vysokou flexibilitu (tj. vysoké prodloužení při přetržení), nízké tření a hladký povrch. Odolná pryskyřice se hodí pro prototypování spotřebních výrobků, kulových kloubů a pohyblivých částí vyžadující nízké tření [22].



Obrázek 27: Odolná pryskyřice [22]

2.2.3.5 Žáruvzdorná pryskyřice

Jedná se o materiál vhodný pro aplikace vyžadující vysokou tvarovou stabilitu při vyšších teplotách. Tyto pryskyřice jsou tvarově stabilní i při teplotách mezi 200°C a 300°C. Jsou ideální do teplotně odolných přípravků, prototypů forem, zařízení pro proudění horkého vzduchu a tekutin a nástrojů pro lití a tvarování za tepla. Tato pryskyřice je křehká a není vhodná pro tenkostěnné díly [22].



Obrázek 28: Žáruvzdorná pryskyřice [22]

2.2.3.6 Pryžová pryskyřice

Pryžová pryskyřice umožňuje simulovat gumové díly, jenž jsou na dotek měkké. Tento materiál má velmi nízký tahový modul, a vysoké prodloužení při přetržení. Je tedy vhodný pro objekty, které budou ohnuty nebo stlačeny. Vlastnosti materiálu se časem zhoršují vlivem vystavení UV záření. Není vhodný pro tenkostěnné díly [22].



Obrázek 29: Pryžová pryskyřice [22]

2.2.3.7 Keramická pryskyřice

Keramické pryskyřice jsou vyztuženy sklem nebo jinými keramickými částicemi. Výsledkem jsou tuhé části s velmi hladkým povrchem. Mají vysoký modul pružnosti a nižší tečení (vyšší odolnost proti deformaci v čase) ve srovnání s ostatními pryskyřicemi, ale jsou křehčí než pryskyřice tvrdé a odolné.

Keramická pryskyřice je vhodná pro díly s tenkými stěnami a malými prvky, doporučuje se minimální tloušťka stěny 0,1mm.

Je vhodná pro použití na formy a nástroje, přípravky, rozdělovače, příslušenství a pouzdra pro elektrické a automobilové aplikace [22].



Obrázek 30: Keramická pryskyřice [22]

2.2.3.8 Pryskyřice pro lékařské prostředky (biokompatibilita 1. stupně)

Biokompatibilní pryskyřice I stupně lze použít k výrobě zdravotnických prostředků na zakázku, jako jsou chirurgické potřeby. Díly vytištěné z této pryskyřice mohou být sterilizovány parou pomocí autoklávu pro přímé využití na operačním sále [22].



Obrázek 31: Pryskyřice pro lékařské prostředky [22]

2.2.3.9 Zubní dlouhodobá biokompatibilní pryskyřice (biokompatibilita 2a. stupně)

Tyto pryskyřice jsou speciálně navrženy pro dlouhodobé ortodontické přístroje. Biokompatibilní pryskyřice 2a. stupně mohou být v kontaktu s lidským tělem až jeden rok. Jejich vysoká odolnost proti lomu a opotřebení je ideální pro výrobu tvrdých dlah a držáků na zakázku. Nevýhodou je vysoká cena [22].



Obrázek 32: Zubní dlouhodobá biokompatibilní pryskyřice [22]

2.2.3.10 Odlévatelná pryskyřice pro výrobu šperků

Tento materiál umožňuje dílů s vysokými detaily pro tvorbu forem na odlévání. Umožňuje vypálení bez zanechání popela nebo zbytků. Využívá se například při odlévání šperků [22].

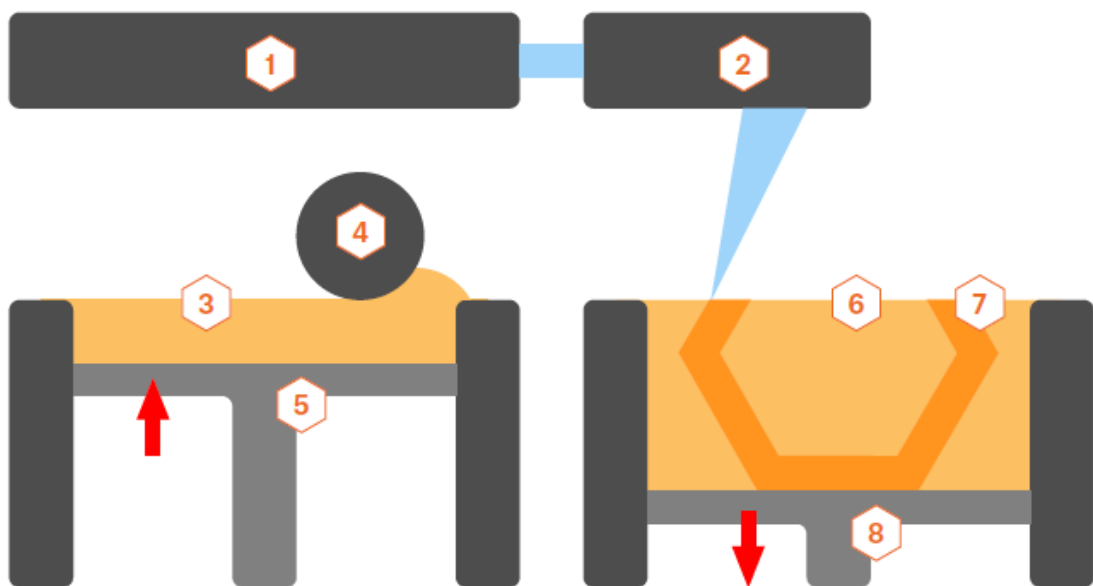


Obrázek 33: Odlévatelná pryskyřice pro výrobu šperků [22]

2.3 Technologie SLS/DMLS

Mezi další technologie 3D tisku patří SLS a DMLS. Tisk probíhá tak, že válec nanese vrstvu práškového materiálu a laser jej sintruje. Sintrování je spékání materiálu tak, že se materiál neroztaví do tekuté podoby. Výsledný výrobek je poté kompletně zasypán v tiskovém materiálu. Velkou výhodou tohoto tisku je ten, že tiskový materiál, který nebyl sintrován lze použít znovu [13].

2.3.1 Konstrukce tiskárny



Obrázek 34: Konstrukce SLS/DMLS tiskárny [13]

- 1: Laser
- 2: Systém skenování
- 3: Zásobník s práškem
- 4: Váleček
- 5: Systém pro podávání prášku
- 6: Práškové lůžko
- 7: Tištěný objekt
- 8: Pohyblivé dno



Obrázek 35: Princip SLA/DMLS tisku [13]

- 1: Laserový paprsek
- 2: Sintrované práškové částice
- 3: Sintrování laserem
- 4: Předem připravené práškové lůžko
- 5: Nesintrovaný materiál v předchozích vrstvách

2.3.2 Tiskový materiál pro technologii SLS

2.3.2.1 PA 12 - Polyamid

Mezi přední vlastnosti tohoto materiálu patří vysoká mechanická a teplotní odolnost. Díky tomu se využívá pro výrobu plně funkčních prototypů. Díly vyrobené z tohoto materiálu mají dlouhodobou stálost a jsou chemicky odolné proti většině látek. Impregnací lze zajistit jejich vodotěsnost [23].



Obrázek 36: PA 12 [23]

2.3.2.2 PA-AF - Hliníkem plněný polyamid

Jedná se o směs polyamidového a hliníkového prášku. Výtisky z tohoto materiálu jsou velmi dobře obrobitelné a odolné vůči vyšším teplotám – do 130°C. Vzhled materiálu je kovový, neporézní. Typickou aplikací tohoto materiálu jsou díly z automobilního průmyslu pro testování v aerodynamickém tunelu, malé výrobní série. Dalším využitím je výroba přípravků nebo vzdělávacích a ilustračních modelů, kde se využívá kovového vzhledu [23].



Obrázek 37: PA-AF [23]

2.3.2.3 PA-GF - Sklem plněný polyamid

Polyamidový prášek plněný skelnými částicemi (PA-GF) je mnohem více tepelně odolný nežli PA 12 – Polyamid, teplotní odolnost tohoto materiálu se udává až do 110°C. Dalšími kladnými vlastnostmi tohoto materiálu je vysoká tvrdost, hustota, pevnost v tahu a je odolný proti opotřebení. Díky tomu je PA-GF ideální pro náročné aplikace vyžadující tyto vlastnosti [23].



Obrázek 38: PA-GF [23]

2.3.2.4 PA 2241 FR (*Nehořlavý polyamid*)

Jedná se o materiál, svými vlastnostmi velmi podobný standardními polyamidu, avšak další jeho vlastností je nehořlavost. Díky této vlastnosti je vhodný pro využití v letectví a kosmonautice [23].



Obrázek 39: PA 2241 FR [23]

2.3.3 Tiskový materiál pro technologii DMLS

2.3.3.1 *AlSi10Mg - Hliníková slitina*

AlSi10Mg je typická slitina pro odlévání s dobrými licími vlastnostmi a používá se pro odlitky s tenkými stěnami a složitou geometrií. Legující prvky křemík a hořčík vedou k vysoké pevnosti a tvrdosti. Slitina má také dobré dynamické vlastnosti, a proto se používá pro součásti vystavené vysokému zatížení. Díly v EOS Aluminium AlSi10Mg jsou ideální pro aplikace, které vyžadují kombinaci dobrých tepelných vlastností a nízké hmotnosti [24].

2.3.3.2 *KobaltChrom MP1*

KobaltChrom MP1 vyrábí díly ve vysoce legované kobalt-chrom-molybden-bázi. Tato třída superslitiny se vyznačuje vynikajícími mechanickými vlastnostmi (pevnost, tvrdost atd.), Odolností proti korozi a teplotami. Takové slitiny se běžně používají v biomedicínských aplikacích, jako jsou zubní a lékařské, a také pro vysokoteplotní inženýrské aplikace, jako například v leteckých motorech [24].

2.3.3.3 *KobaltChrom SP2*

Jedná se o kovově-keramickou slitinu na bázi kobaltu, která je určena k výrobě zubních výplní z porcelánu taveného na kov, konkrétně korunek a můsteků [25].



Obrázek 40: KobaltChrom SP2 – zubní můstek [25]

2.3.3.4 Vysokopevnostní ocel MS1

Jedná se o martenziticky vytvrditelnou ocel 1.2709. Tento druh oceli se vyznačuje vynikající pevností v kombinaci s vysokou houževnatostí. Díly jsou po vytištění snadno obrobitelné a lze je dodatečně vytvrdit na více než 50 HRC. Oproti ostatním materiálům je možné tento materiál i snadno vyleštit [24].

2.3.3.5 Slitina niklu IN625

Jedná se o žáruvzdornou slitinu 2.4856. Vyznačuje se vysokou pevností v tahu, tečení a roztržení. Tento materiál je také vhodný pro tisk složitých dílů pro vysokoteplotní a vysokopevnostní aplikace. Tento proces dosahuje materiálových vlastností, které jsou srovnatelné s tvářenými kovy a zdaleka převyšují vlastnosti lití [24].

2.3.3.6 Slitina niklu IN718

Jedná se o nikl-chromovou slitinu 2.4668. Tento druh slitiny se vyznačuje dobrou pevností v tahu, únavě, tečení a roztržení při teplotách do 700 °C. Slitina má také vynikající odolnost proti korozi v různých korozivních prostředích. Tento materiál je ideální pro mnoho vysokoteplotních aplikací, jako jsou součásti plynových turbín, části přístrojů, části energetického a procesního průmyslu atd. Materiál má také vynikající kryogenní vlastnosti a potenciál pro kryogenní aplikace [24].

2.3.3.7 Nerezová ocel GPI

Tato slitina odpovídá normě 1.4542. Tento druh oceli se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, zejména vynikající tažností v laserem zpracovaném stavu, a je široce používán v různých inženýrských aplikacích. Tento materiál je ideální pro mnoho aplikací pro tisk dílců, jako jsou funkční kovové prototypy, výrobky malých sérií, individualizované výrobky nebo náhradní díly [24].

2.3.3.8 Nerezová ocel PHI

Jedná se o slitinu odpovídající normě 1.4540. Tento druh oceli se vyznačuje vynikajícími mechanickými vlastnostmi, zejména ve vytvrzeném stavu. Je široce používána v různých lékařských, leteckých a jiných inženýrských aplikacích vyžadujících vysokou tvrdost a pevnost. Tento materiál je ideální pro mnoho aplikací pro tisk dílů, jako jsou funkční kovové prototypy, výrobky malých sérií, individualizované výrobky nebo náhradní díly [24].

2.3.3.9 Titan Ti64

Tato dobře známá lehká slitina se vyznačuje tím, že má excelentní mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi v kombinaci s nízkou měrnou hmotností a biokompatibilitou [24].

3 PŘÍPRAVA DAT PRO 3D TISKÁRNU

V této kapitole je uveden postup přípravy výrobku od nápadu až po G-kód, který dokáže zpracovat tiskárna.

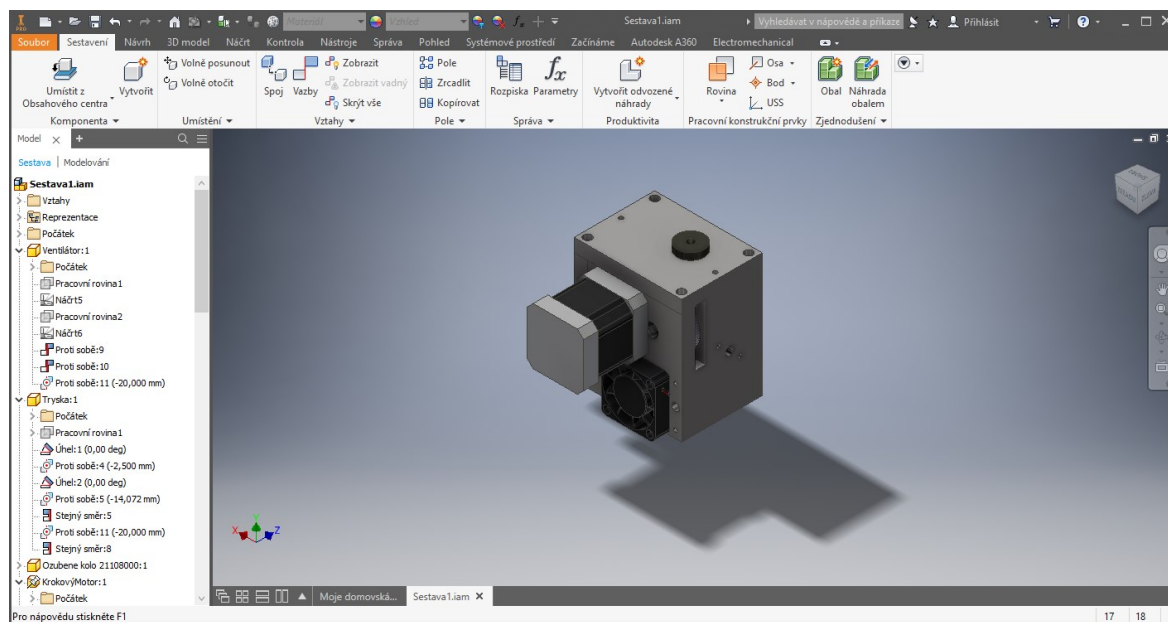
3.1 Modelář

Pro převod myšlenky na model dílce se využívá 3D modelovací program, tzv. CAD software. Pokud již máme dodaný model ve formátu stl, tak tyto modeláře nepotřebujeme.

3.1.1 Autodesk Inventor®

Jedná se o profesionální strojírenský nástroj pro tvorbu modelové i výkresové dokumentace. Velmi vhodný je i pro tvorbu jednodušších sestav díky podpoře knihoven normalizovaných dílců. Další kladnou vlastností tohoto modeláře je parametrizovatelnost modelu součástí. Velkou výhodou pro českého uživatele je kompletní překlad tohoto softwaru do češtiny a česká podpora.

Vhodný je pro objemové modelování, ovšem základy plošného modelování jsou zde taky implementovány [26].



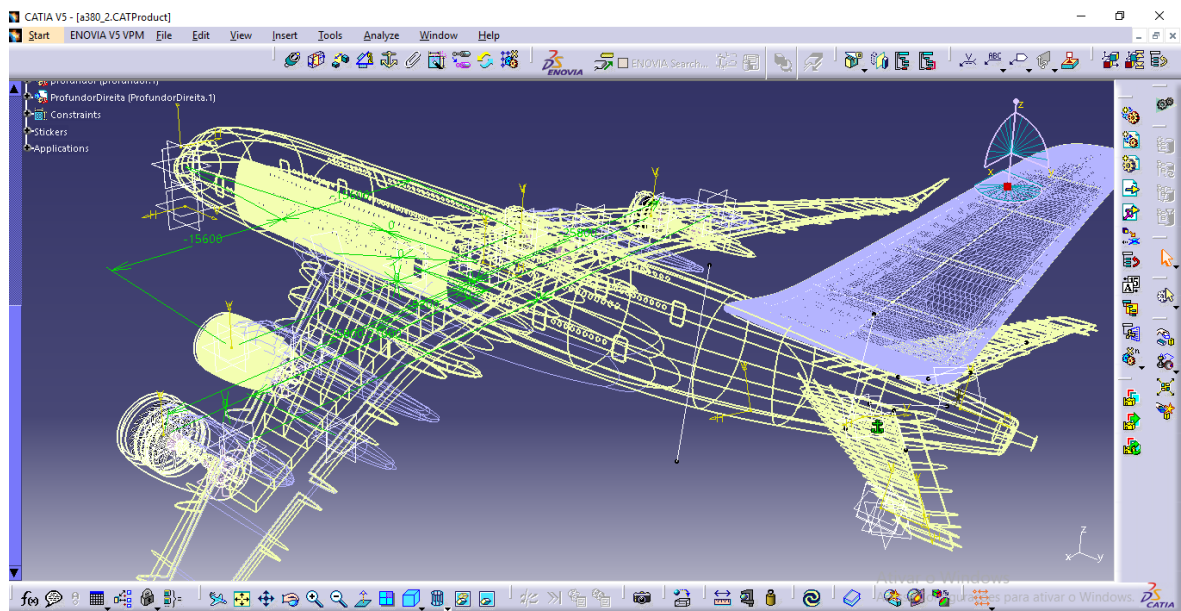
Obrázek 41: okno programu Autodesk Inventor® [zdroj: vlastní]

3.1.2 CATIA

Software CATIA je velmi obsáhlý nástroj, který je schopný plně tvořit model jak v plošném modelování, tak v objemovém.

Obsahuje nástroje pro reverzní inženýrství, tj. proces zpětného převodu tvarového dílu na model za pomoci 3D skeneru. Dále zde lze nalézt kompletní CAM. Jedná se tedy o komplexní řešení pro konstrukci a vývoj výrobků. Tento software využívají firmy jako například Aircraft Industries a.s., ŠKODA AUTO a.s., Boeing, atp. [27].

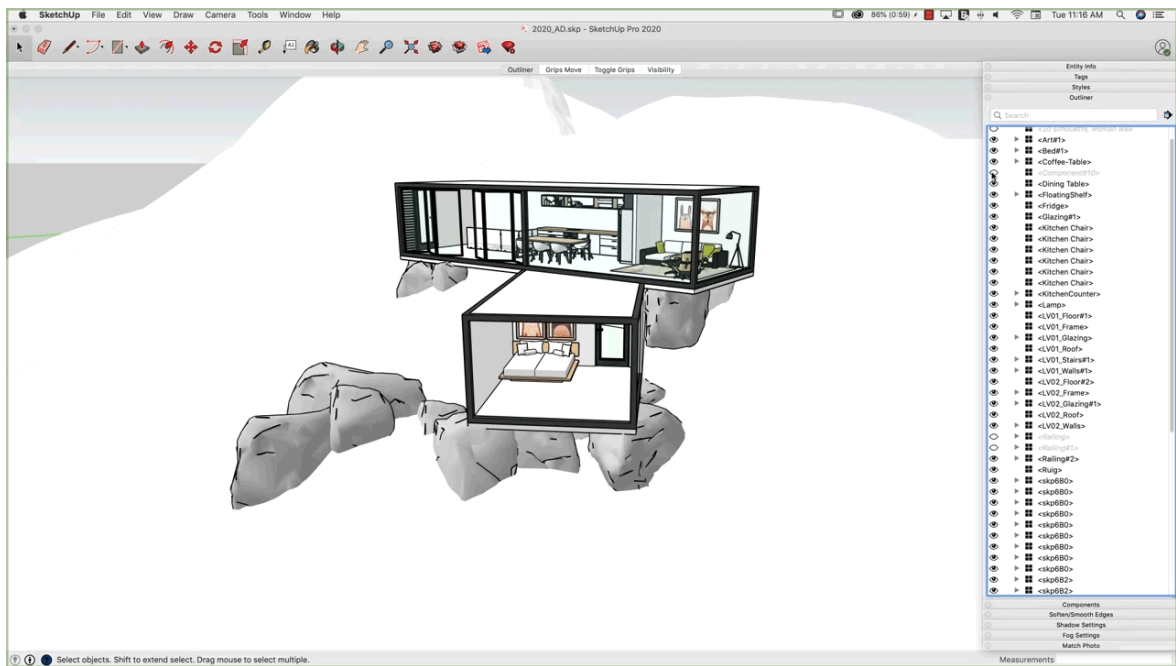
Jeho nevýhodou je vysoká pořizovací cena a cena podpory.



Obrázek 42: okno programu CATIA [28]

3.1.3 SketchUp

SketchUp oproti předchozím modelářům cílí i na nestrojírenské profese jako jakou filmoví tvůrci, vývojáři počítačových her, atp. Tvůrci uvádějí, že práce se softwarem SketchUp je snadná jako s tužkou a papírem [29].



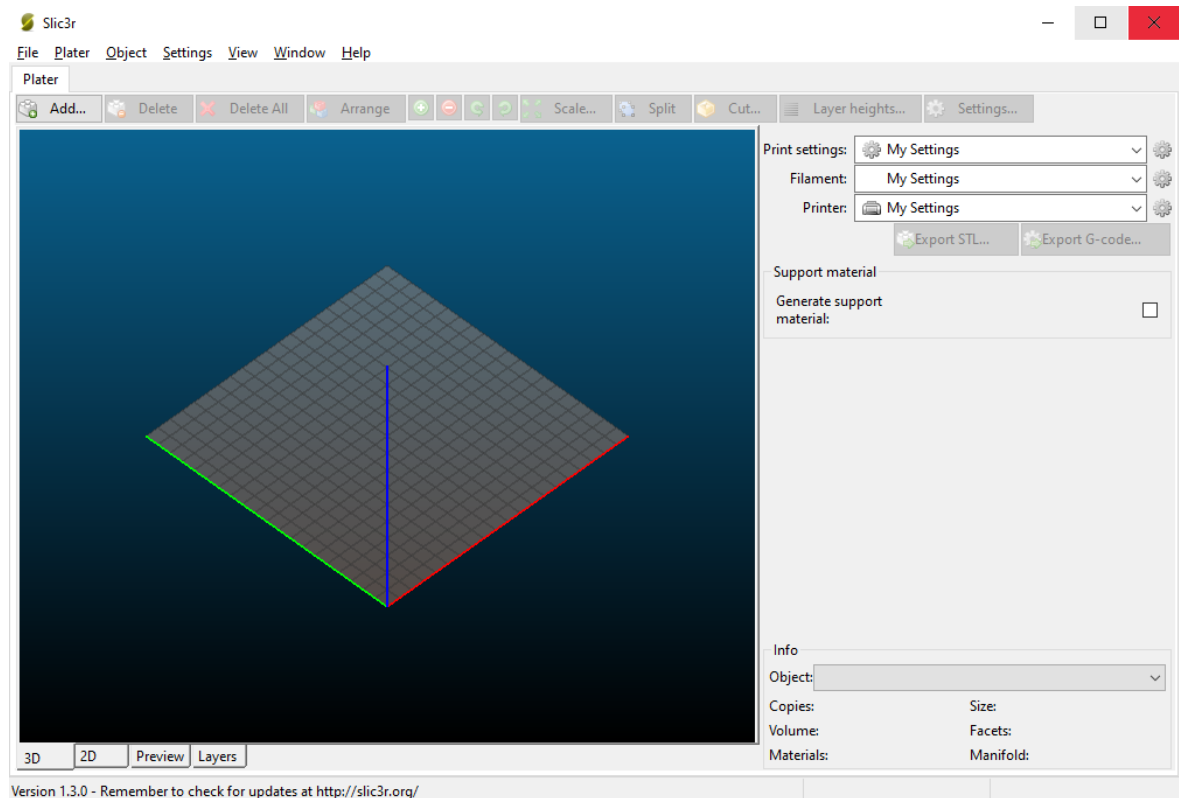
Obrázek 43: okno aplikace SketchUp [30]

3.2 Slicer

Slicer je software, který rozřeže model na jednotlivé tisknuté vrstvy, vypočítá dráhy a u každé dráhy vyčíslí množství potřebného materiálu. Veškeré tyto informace vnese do výstupního souboru, tzv. G-kódu.

3.2.1 Slic3r

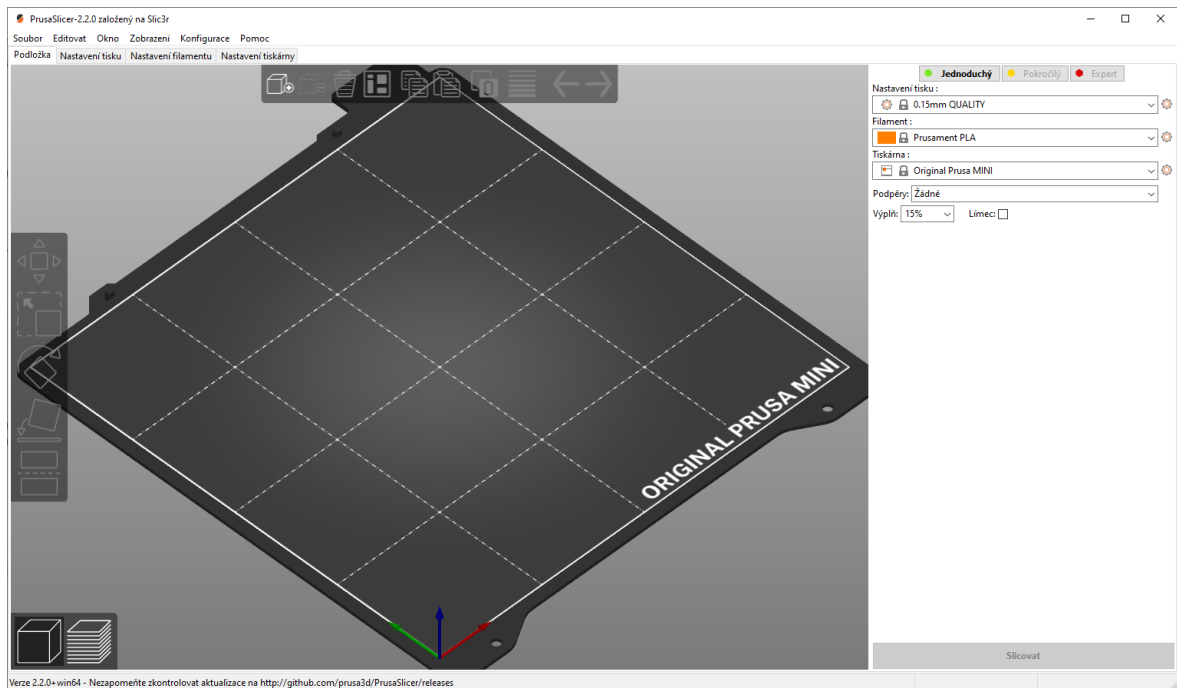
Jedná se o moderní, přehledné rozhraní vyvíjené jako open-source komunitou lidí na GitHubu. Nabízí velmi mnoho nastavení 3D tisku, aby vyhovoval veškerým typům 3D tiskáren [31].



Obrázek 44: okno aplikace Slic3r [zdroj: vlastní]

3.2.2 PrusaSlicer (dříve Slic3r Prusa Edition)

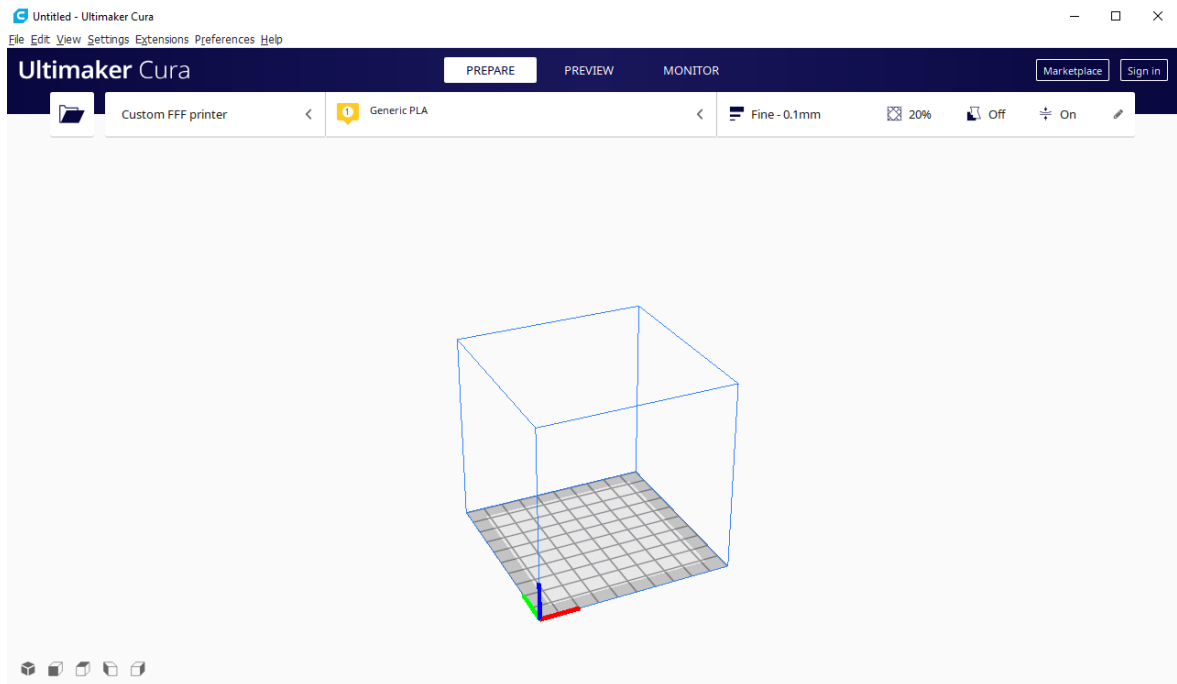
Jedná se o Slic3r, který je upravený a odladěný firmou Prusa Research a.s. pro použití na jejich tiskárnách [32].



Obrázek 45: okno aplikace PrusaSlicer [zdroj: vlastní]

3.2.3 Ultimaker Cura

Cura je vyvinuta a udržována společností Ultimaker a komunitou jejich uživatelů. Protože software Cura byl z počátku vyvíjen jako open source tak se společnost rozhodla jej tak dále vyvíjet. Cura je primárně určena pro tiskárny Ultimaker, ale je optimalizována i pro tiskárny ostatních značek [33].



Obrázek 46: okno aplikace Ultimaker Cura [zdroj: vlastní]

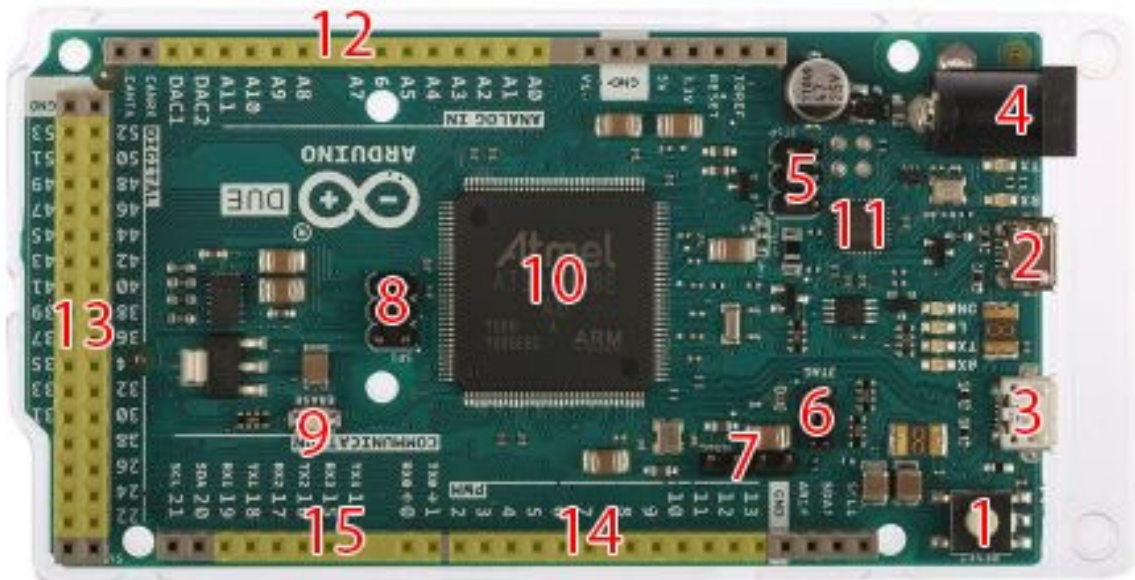
4 JEDNODESKOVÝ POČÍTAČ ARDUINO DUE

Arduino Due je jednodeskový počítač založený na procesoru Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Obsahuje 54 digitálních I/O pinů, z nichž 12 je možné použít pro PWM modulaci, 12 analogových vstupů a 4 hardwarové sériové porty, SPI rozhraní, JTAG čtečku, napájecí konektor a dva konektory určené pro programování.

Limitní napětí je 6-16V, ovšem doporučené je 7-12V. Při napětí menším nežli 7V dochází k nestabilnímu chování, při napětí vyšším než 12V dochází k přehřívání napěťového regulátoru [34].

4.1 Popis mikropočítače

Procesor Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 je taktován na 84 MHz, má k dispozici 96 kiB paměti SRAM a 512kiB flash paměti pro zdrojový kód programu [34].



Obrázek 47: Jednodeskový počítač Arduino Due [zdroj: vlastní]

Vysvětlivky k obr. 47 [34][35]:

- 1: Resetovací tlačítko
- 2: USB konektor pro programování
- 3: USB konektor periferní
- 4: Napájecí konektor 7-12V
- 5: ISCP rozhraní pro programování pomocí USB-serial převodníku
- 6: JTAG
- 7: DEBUG
- 8: SPI sběrnice
- 9: Tlačítko pro vymazání flash paměti
- 10: Procesor Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3
- 11: Převodník USB-serial
- 12: Analogové vstupy (lze je využít i jako digitální I/O piny)
- 13: Digitální I/O piny
- 14: Digitální I/O piny s podporou PWM
- 15: Sériové rozhraní (4x set RX-TX)

Všechny digitální i analogové piny pracují na maximálním napětí 3,3V a maximálního proudu 15mA [36]

4.2 Programování Arduina

Arduino se programuje v jazyce C nebo C++, ale je zde knihovna, která práci velmi usnadňuje a lze ji považovat za samostatný jazyk. Jmenuje se Wiring, původně vznikla pro podobnou desku jako je Arduino a vychází z open source projektu s názvem Progressing. Syntaxe přidané touto knihovnou jsou velmi podobné C jazyku [37].

Základní skladba programu vychází ze dvou funkcí a to **Setup ()**, ta proběhne po spuštění či restartu Arduina a slouží k inicializaci programu. Druhou funkcí je funkce **Loop()**, ta se opakuje v nekonečné smyčce.

4.3 Dostupné datové typy

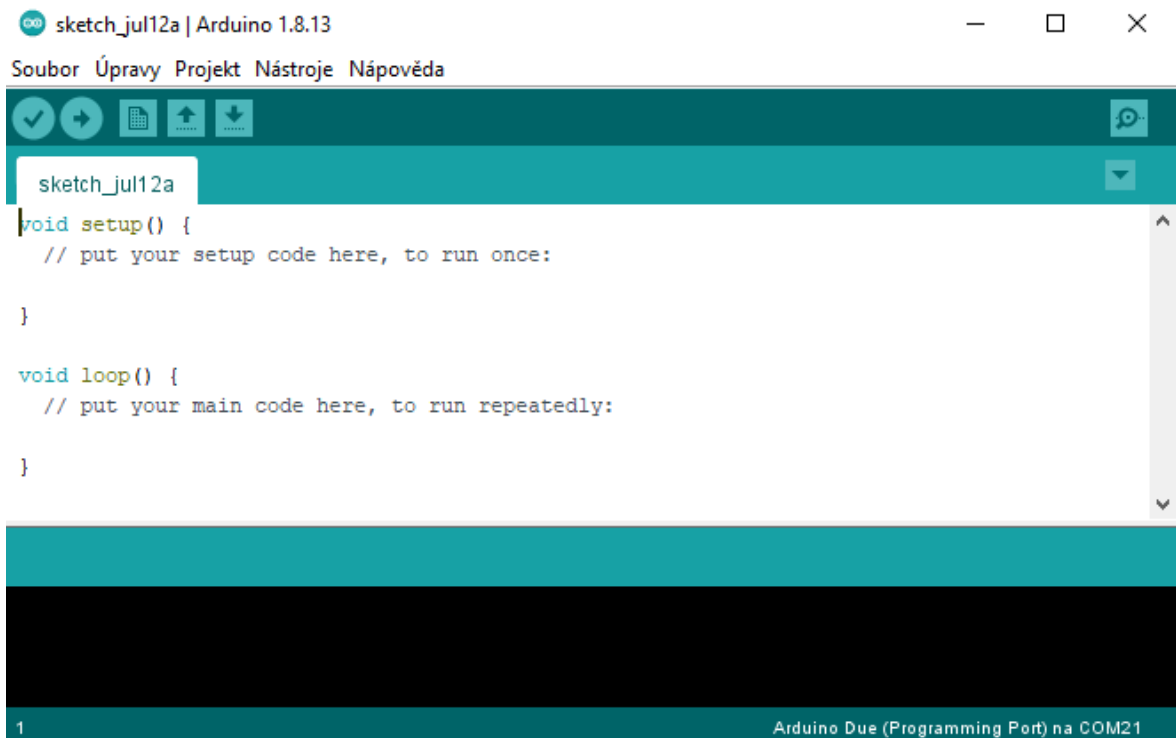
Vzhledem k tomu, že se Arduino programuje v jazyce C či C++ musí mít každá proměnná svůj datový typ.

Tabulka 14: Datové typy Arduino Due [38]

| Datový typ | Velikost [byte] | Rozsah hodnot |
|----------------------|-----------------|--------------------------------|
| bool | 1 | 0 – 1 |
| byte | 1 | 0 – 255 |
| char | 1 | -128 – 127 |
| unsigned char | 1 | 0 – 255 |
| double | 8 | |
| float | 4 | |
| int | 4 | -2 147 483 648 – 2 147 483 647 |
| unsigned int | 4 | 0 – 4 294 967 295 |
| long | 4 | -2 147 483 648 – 2 147 483 647 |
| unsigned long | 4 | 0 – 4 294 967 295 |
| short | 2 | -32,768 – 32,767 |
| String | variabilní | |

4.4 Vývojové prostředí

Oficiální vývojové prostředí se nazývá Arduino IDE. V porovnání s ostatními prostředími, jako například Visual Studio, je prostředí velmi jednoduché, připomíná spíše poznámkový blok s kontrolou syntaxe.

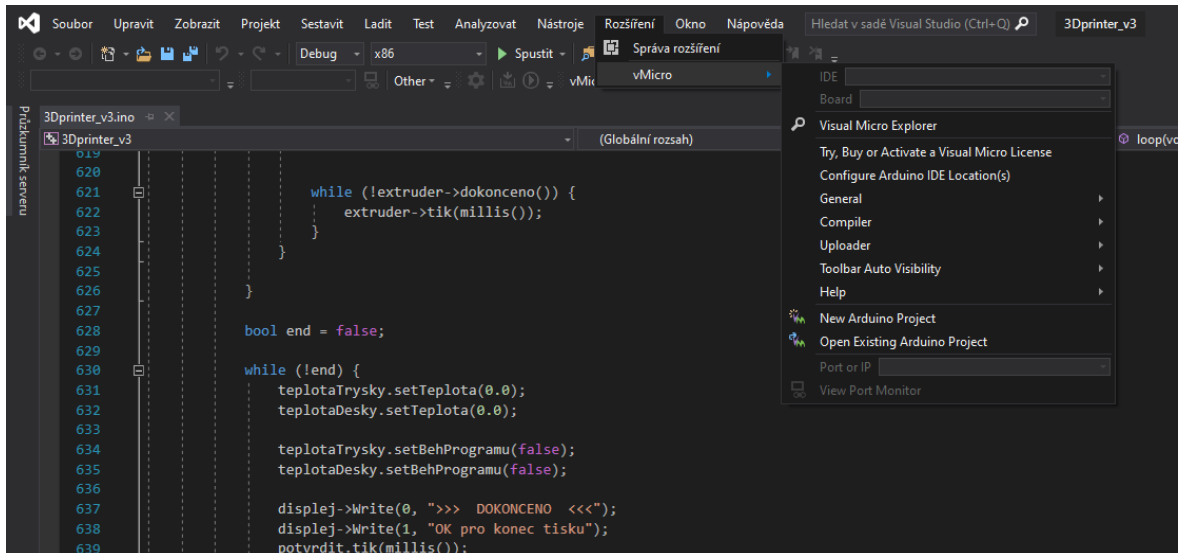


Obrázek 48: Programovací prostředí Arduino se základním sketchem [zdroj: vlastní]

Pro nahrání programu do mikrokontroléru je nutné připojit Arduino k počítači pomocí USB kabelu či programátoru v prostředí vybrat správný sériový port a model desky. Poté můžeme projekt nahrát příslušným tlačítkem.

4.4.1 Alternativa k vývojovému prostředí

Alternativou k vývojovému prostředí Arduino IDE je plugin pro Visual Studio s názvem vMikro, ale bohužel se jedná o placený plugin. Umožňuje implementaci knihovny Wiring do Visual studia spolu s možností nahrání sketche do Arduina.



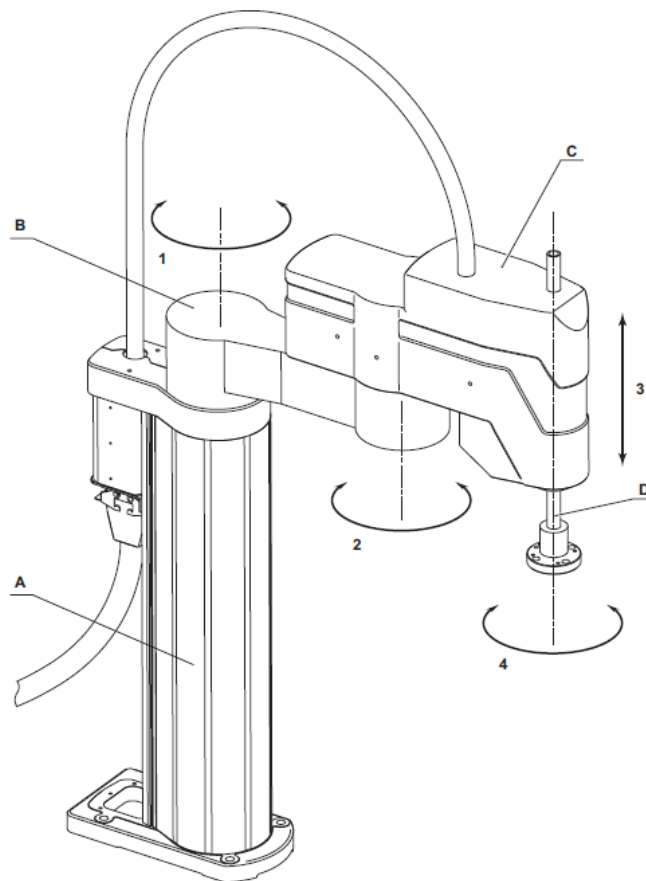
Obrázek 49: Plugin vMikro [zdroj: vlastní]

5 PRŮMYSLOVÝ ROBOT STÄUBLI RS40B

Prostředkem pro pohybování tiskovou hlavou bylo zvoleno robotické rameno STÄUBLI RS40B v uspořádání SCARA a řídicím systémem CS8C včetně možnosti sériové komunikace.

5.1 Robotické rameno STÄUBLI RS40B

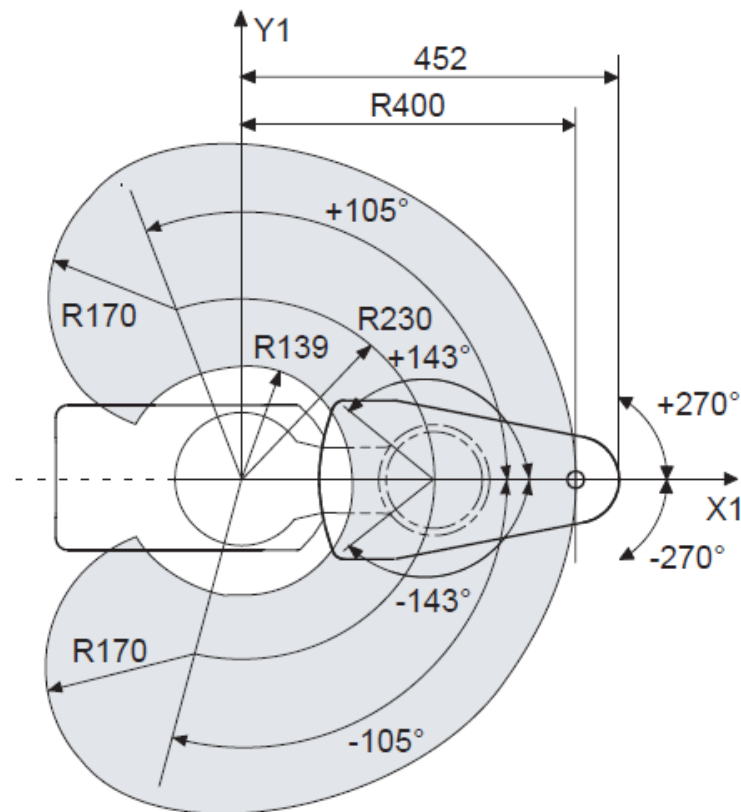
Pro mechanickou iteraci s okolím slouží robotické rameno Stäubli RS40B. Jedná se o manipulátor umožňující pohyb ve čtyřech stupních volnosti.



Obrázek 50: Robotické rameno Stäubli [39]

Jednotka se skládá ze základny (A), ramena (B), přední části ramene (C) a kulového šroubu pro vertikální pohyb (D). Klouby 1-4 se pohybují díky servomotorům, navíc pro osy 3 a 4 jsou motory vybaveny brzdou [39].

5.1.1 Parametry ramene a pracovní prostor



Obrázek 51: Pracovní prostor robota Stäubli RS40B [39]

Tabulka 15: Pojezdy robota Stäubli RS40B [39]

| Rozsah | Hodnota |
|---|-----------------|
| Rozsah | 400 mm |
| Minimální vnitřní rádius | 139 mm |
| Úhlový rozsah osy 1 | $\pm 105^\circ$ |
| Úhlový rozsah osy 2 | $\pm 143^\circ$ |
| Zdvih kuličkového šroubu | 200 mm |
| Úhlový rozsah osy 4 | $\pm 500^\circ$ |
| Úhlový rozsah osy 4 s vstupně výstupním kabelem | $\pm 360^\circ$ |

Tabulka 16: Rychlosti pojezdů robota Stäubli RS40B [39]

| Osa | Nominální hodnota | Maximální hodnota |
|---------|-------------------|-------------------|
| Osa 1 | 350°/s | 360°/s |
| Osa 2 | 480°/s | 659°/s |
| Osa 3 | 1 600 mm/s | 1923 mm/s |
| Osa 4 | 1200°/s | 2020°/s |
| Osa 1+2 | 3,87 m/s | 4,47m/s |

Maximální rychlost v kartézském prostoru je 1,8m/s

Nominální zatížení robotického ramene je 2kg, při omezení rychlostí pojezdů lze zatížení robotického ramene upravit až na 5kg [39].

Tabulka 17: Opakovatelnost polohování robota Stäubli RS40B [39]

| Opakovatelnost | Hodnota |
|-----------------------|---------------------|
| Osa 1 + 2 | $\pm 0,01\text{mm}$ |
| Osa 3 | $\pm 0,01\text{mm}$ |
| Osa 4 | $\pm 0,01^\circ$ |

5.2 Řídicí systém CS8C

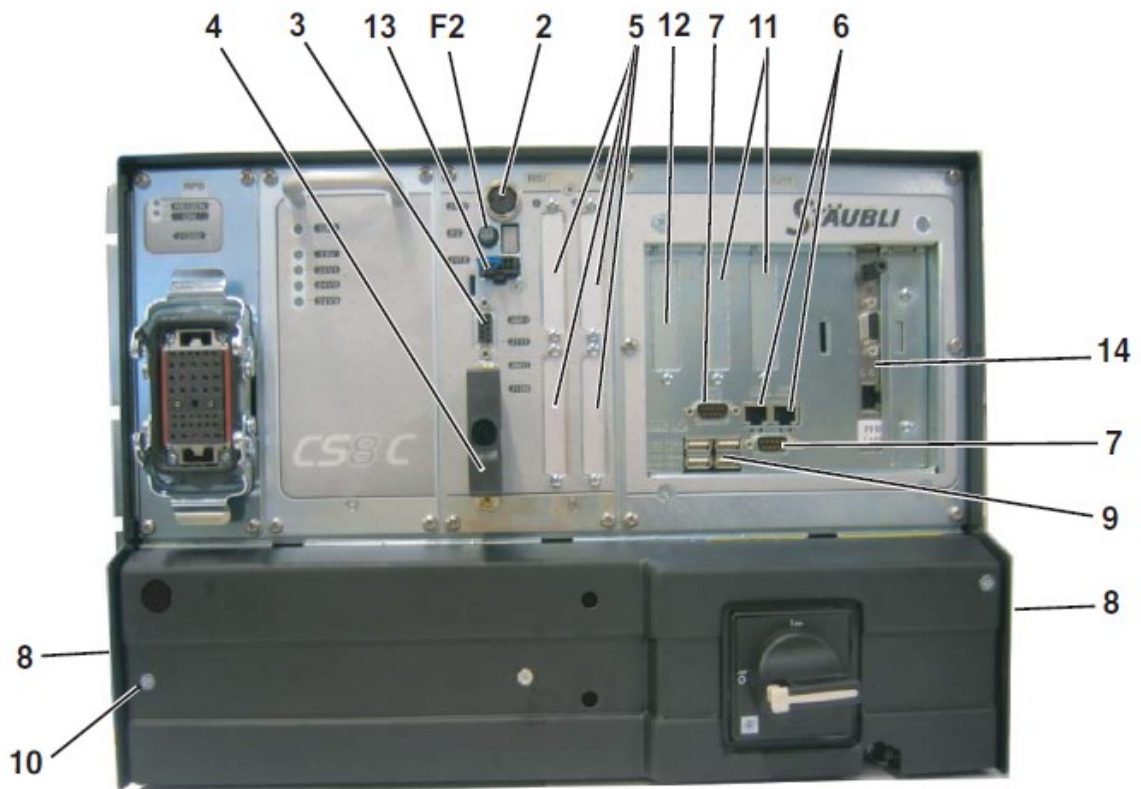
Jedná se o součást robotického ramene, bez níž není schopno své funkce. Svou činností ovládá pohyby robota a slouží k provádění veškerých výpočtových operací.



Obrázek 52: Řídicí systém CS8C [40]

Vysvětlivky k obrázku 52 [40]:

- 1: Digitální výkonové zesilovače
- 2: Napájení RPS
- 3: Napájení ARPS
- 4: Připojení nezbytných bezpečnostních prvků
- 5: Inteligentní část řídicího systému
- 6: Hlavní vypínač
- 7: Modul napájení PSM



Obrázek 53: Přední panel CS8C [40]

Vysvětlivky k obrázku 53 [40]:

- 2: Připojení ovladače
- 3: Rychlé Vstupy/výstupy
- 4: Připojení zámku (bezpečnostního tlačítka, dveří atp.)
- 5: Digitální vstupy/výstupy
- 6: Ethernetové porty
- 7: Sériové porty
- 9: USB porty
- 10: Port pro připojení antistatického náramku
- 11: Volitelný vstup enkodéru
- 12: CAN výstup pro roboty Scara
- 13: Konektor pro přední WMS panel
- 14: Volitelný vstup do sběrnice

5.3 Programovací panel MCP

Slouží jak k programování, nastavování parametrů automatického procesu a manuálnímu řízení robotického ramene.



Obrázek 54: programovací panel MCP [40]

Pracovní mód (1)

Pracovní mód vybraný na rozhraní WMS se zobrazí kolem tlačítka místěného naproti ikony pracovního režimu. Zvolený režim se také zobrazí na předním panelu WMS

Tlačítko zapnutí napájení ramene (2)

Toto osvětlené tlačítko umožňuje spuštění napájení k ramenu robota, nebo jej odpojit. Pokud svítí, je robotické rameno napájeno. Pokud nebyl ovládací panel umístěn v držáku, musí být stisknuto uvolňovací tlačítko na jeho zadní straně (11)

Nouzové zastavení (3)

Nouzové tlačítko se smí používat pouze v případě naprosté nutnosti, při nepředvídaném chování robotického ramene.

Klávesy pro pohyb (4)

Tyto klávesy umožňují manuální pohyb robotickou paží v závislosti na vybraném režimu pohybu.

Klávesy pro výběr režimu pohybu (5)

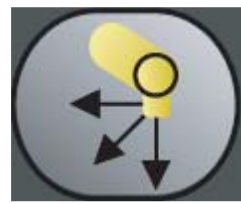
Když je napájení robotického ramene zapnuto, každé ze čtyřech tlačítek umožňuje volbu způsobu pohybu. Světelná dioda určuje aktivní způsob pohybu



Obrázek 55: Pohyb kloubem [40]



Obrázek 56: Pohyb ramenem [40]



Obrázek 57: Pohyb nástrojem [40]



Obrázek 58: Pohyb do bodu [40]

Tlačítko pro nastavení rychlosti (6)

Tlačítko umožňuje měnit rychlost v mezích pohybu. Programově jej lze deaktivovat. Stiskem se rychlosti mění o 1%

Funkční klávesy (7)

Jejich funkce se mění podle zobrazených voleb na spodní části displeje.

Alfanumerické klávesy (8)

Tyto klávesy se používají k zadávání dat pro Vaši aplikaci.

Navigační klávesy a klávesy rozhraní (9)

Klávesy pro ovládání aplikace (10)

Tyto klávesy se využívají pro spuštění, zastavení nebo pozastavení aplikace

Aktivační tlačítko (11)

Nalézá se na zadní straně ovladače. Pro aktivaci pohonů musí být stisknuto, pokud ovladač není ve stojanu.

Aktivační tlačítka digitálního výstupu (12)

V ručním režimu tato tlačítka mění stav digitálních výstupů, které jsou s nimi spojeny.

Ovládací tlačítka (13)

Tyto klávesy jsou aktivovány v ručním režimu a umožňují Vám pohybovat ramenem, na osu nebo na souřadnici, v závislosti na zvoleném režimu pohybu.

Jsou určeny k ovládní jednou rukou [40].

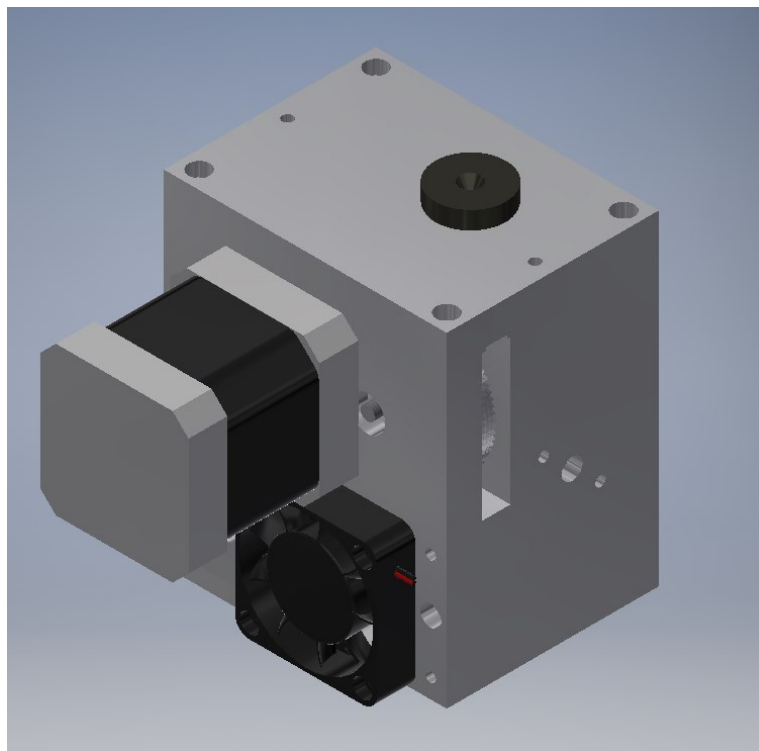
II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 POPIS HARDWARU

Výsledné řešení 3D tiskárny je sestaveno z několika součástí vzájemně propojených vhodně zvolenou kabeláží.

6.1 Sestava tiskové hlavy

Konstrukce tiskové hlavy byla navržena tak, aby byla dostatečně tuhá a při celkové hmotnosti nepřekračovala limity stroje. Umožňuje zpracovávat materiál o maximálním průměru 1,75mm.

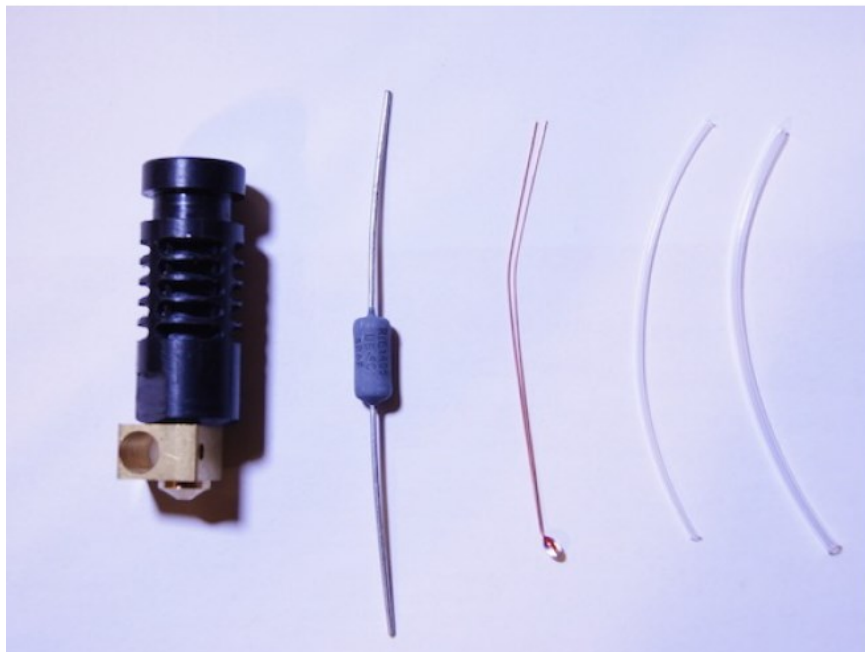


Obrázek 59: Sestava tiskové hlavy [zdroj: vlastní]

6.1.1 Hrot

Byl vybrán hrot J-Head MK V-B 0.35mm, jenž je schopen zpracovávat jak materiál PLA tak ABS.

Součástí tohoto hrotu je rezistor s odporem $5,6\Omega$, který slouží jako vytápěcí těleso a $100k\Omega$ NTC termistor pro měření teploty [41].



Obrázek 60: Sestava hrotu, zleva: Hrot, topné těleso, termistor
teflonová izolace pro termistor. [41]

6.1.2 Krokový motor

Byl zvolený hybridní dvoufázový krokový motor HANPOSE® 17HS3401S

Parametry tohoto motoru [42]:

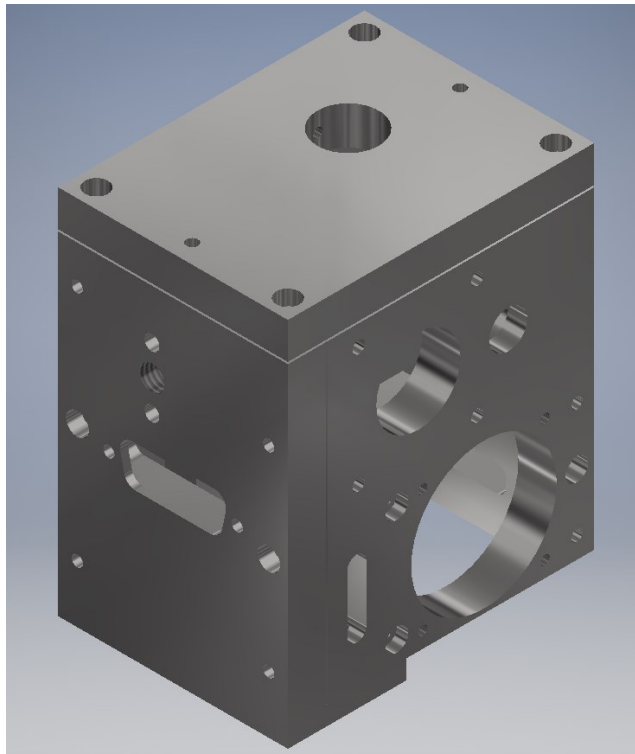
- Úhel kroku: $1,8^\circ$ (200 kroků na 1 otočení)
- Jmenovitý proud: 1,3 A/fáze
- Odpor: 2,4 Ω /fáze
- Indukčnost: 2,8 mH/fáze
- Počet vývodů: 4 pro bipolární / 6 pro unipolární řízení
- Hmotnost: 0,22kg



Obrázek 61: Krokový motor HANPOSE® 17HS3401S [zdroj: vlastní]

6.1.3 Mechanická část

Mechanická část hlavy se skládá z více prvků, a to ze schránky, tvořené z 8 dílů vyrobených z duralového materiálu, konkrétně z materiálu EN AW 6060 odpovídající chemickému označení AlMgSi1. Tento materiál byl volen z důvodu jeho nízké hmotnosti (v porovnání s ocelovými materiály) a odolnosti vůči korozi [43].

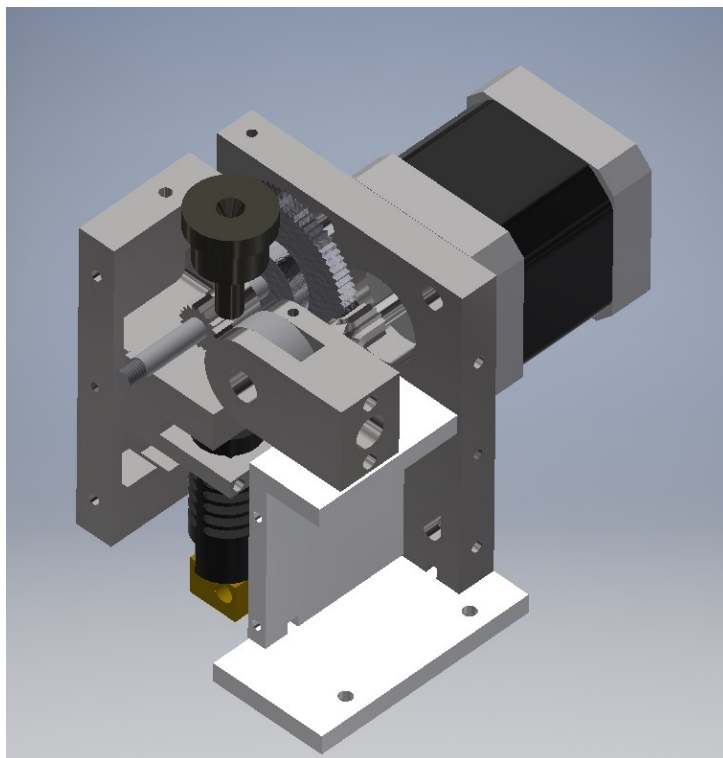


Obrázek 62: Schránka tiskové hlavy [zdroj: vlastní]

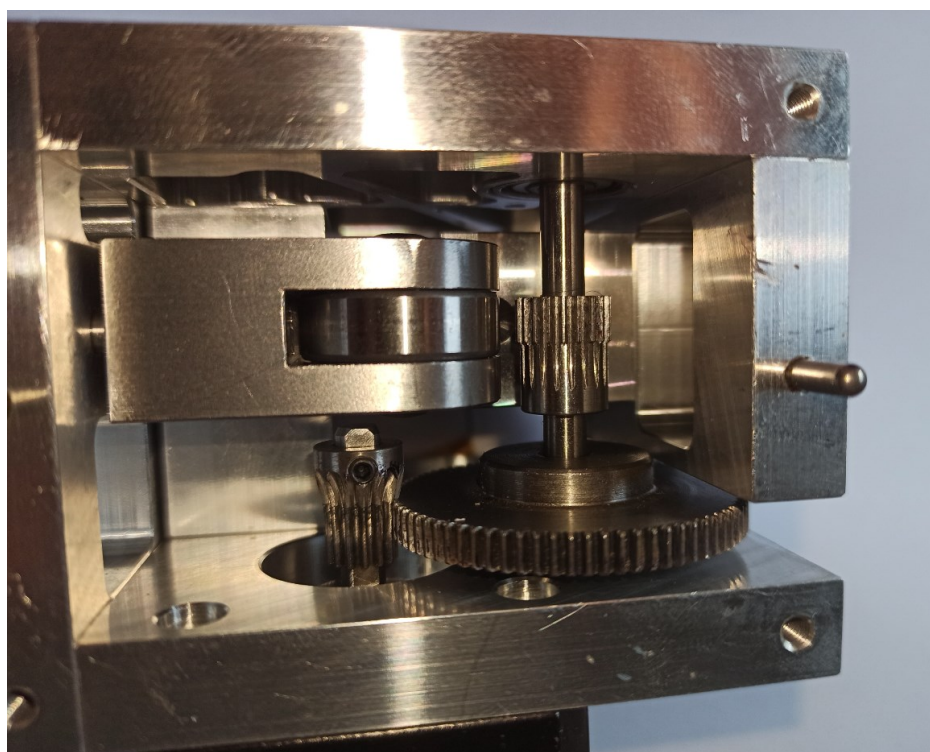
A dále z vnitřního mechanismu, kde nalezneme ozubený převod z výstupu krokového motoru na hřídel s ozubeným kolečkem pro posun filamentu. Převodový poměr je roven 0,175. Čili pro jednu otáčku hnané hřídele je potřeba přibližně 5,714 otáček motoru.

Filament je na ozubené kolo přitlačen pomocí kuličkového ložiska s označením SKF 608, uchyceným ve stavitelném dílci. Případné odchylky od rozměru filamentu jsou dilatovány pružinou.

Filament prochází sestavou hlavy až k trysce soustavou děr s průměrem 2mm.



Obrázek 63: Vnitřní mechanismus hlavy - návrh [zdroj: vlastní]



Obrázek 64: Vnitřní mechanismus tiskové hlavy – realizace [zdroj: vlastní]

6.2 Řídící jednotka

Řídící jednotka je mozkiem celého řešení. Pro uživatele tiskárny je zde k nalezení několik ovládacích prvků ve formě tlačítek, čtyřřádkový display HD44780, čtečka SD karet s hlavním čipem AMS1117 a dále následující konektory pro spojení se zbytkem hardwaru: CANON D-sub CAN 15 slouží pro připojení tiskové hlavy,



Obrázek 65: CANON D-sub CAN 15 [46]

CANON D-sub CAN 9 je zde k nalezení dvakrát, jeden pro připojení vyhřívané podložky, druhý k připojení sériové linky k robotickému ramenu Stäubli RS40B,



Obrázek 66: CANON D-sub CAN 9 [45]

NEURIK SPEAKON NL4MP pro připojení k napájení

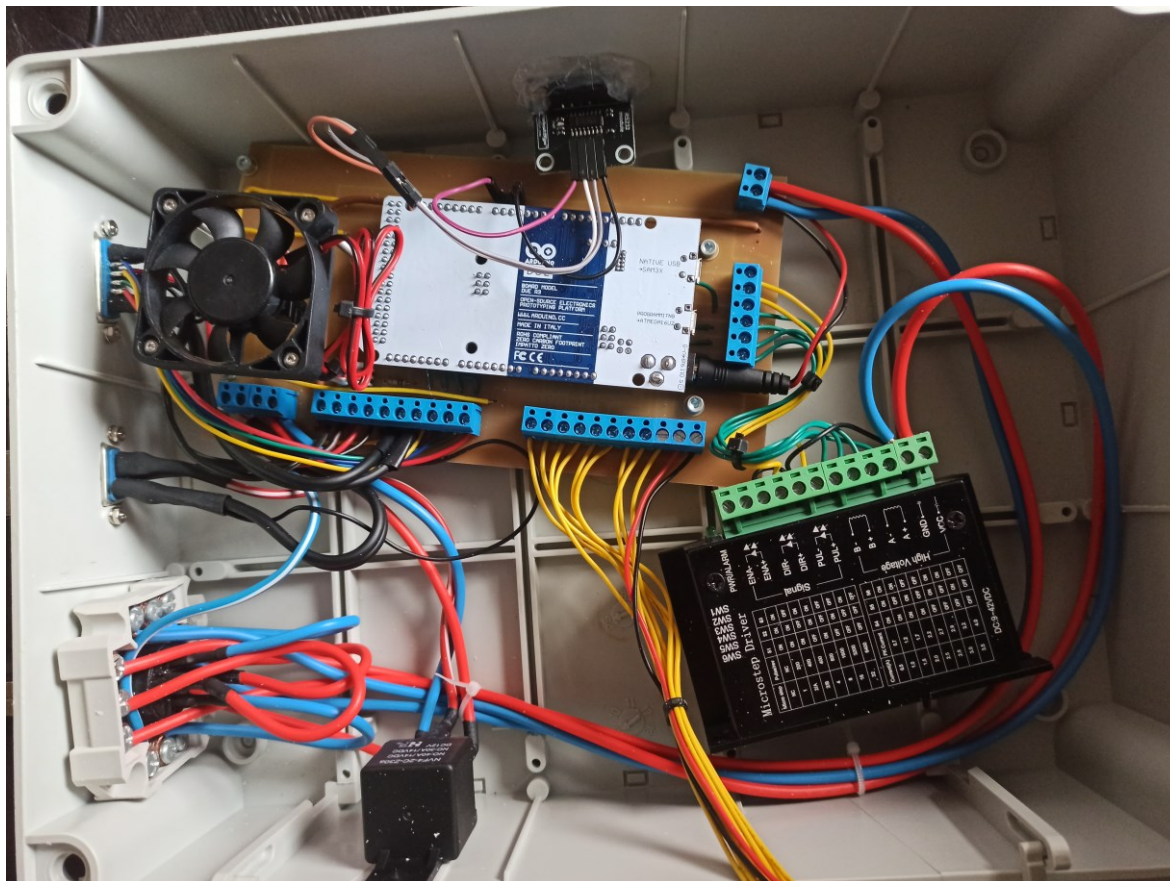


Obrázek 67: NEURIK SPEAKON NL4MP [44]

Uvnitř řídicí jednotky je Arduino Due s patřičným plošným spojem pro připojení konektorů a driver krokového motoru TB6600.



Obrázek 68: Řídicí jednotka [zdroj: vlastní]



Obrázek 69: Řídicí jednotka [zdroj: vlastní]

6.3 Napájecí jednotka

Napájení je řešeno pomocí dvou zdrojů CARSPA HS-350/12 umístěných ve zvláštní krabici, kvůli rušení.

6.4 Vyhřívání podložka

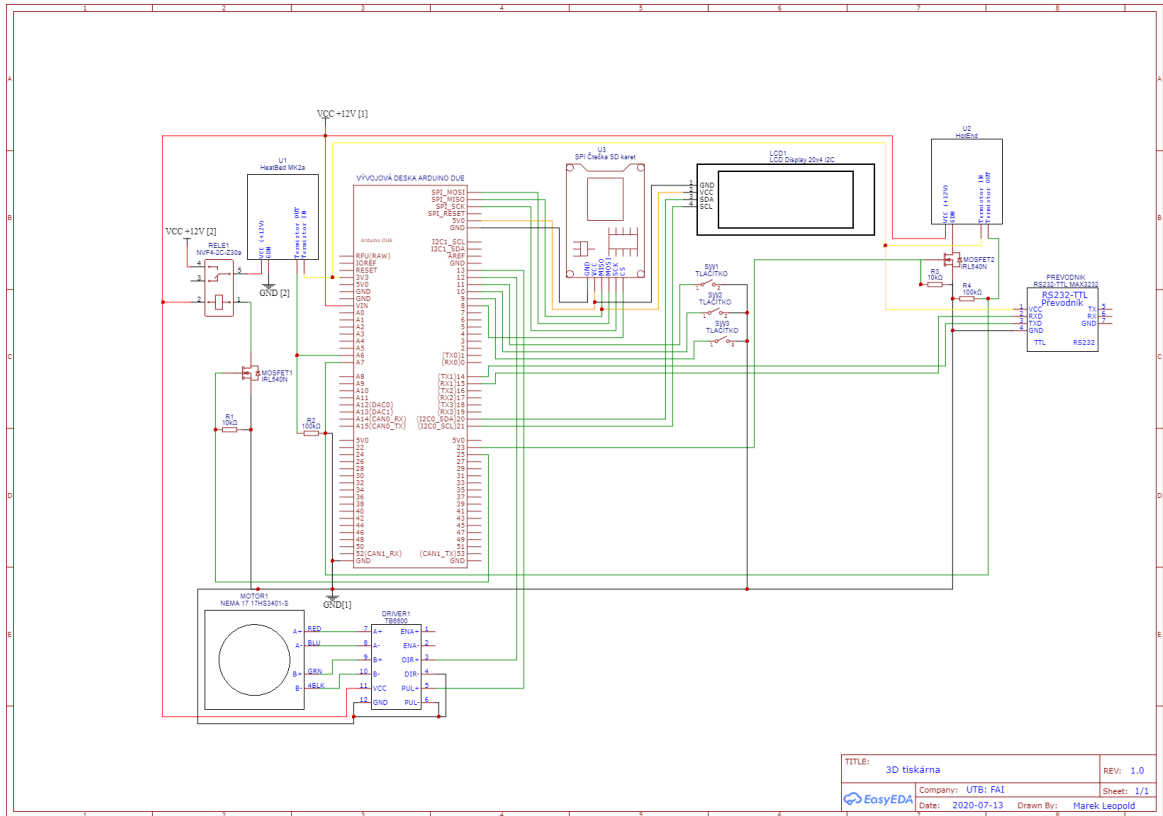
Standardní vyhřívání podložka MK2A s konektorem CANON D-sub CAN 9.



Obrázek 70: Vyhřívání podložka MK2A [zdroj: vlastní]

6.5 Elektroschéma zapojení

Znázorněné schéma znázorňuje zapojení všech součástí 3D tiskárny.



Obrázek 71: Schéma zapojení [zdroj: vlastní]

Tabulka 18: Seznam součástek

| Označení | Název součástky | Hodnota |
|----------------------------|-------------------------|--------------|
| R1, R3 | Rezistor | 10kΩ |
| R2, R4 | Rezistor | 100kΩ |
| MOSFET 1, MOSFET 2 | Unipolární tranzistor | IRL540N |
| SW1, SW2, SW3 | Tlačítko | |
| U1 | HeatBed | MK2A |
| U2 | HotEnd | |
| U3 | SPI Čtečka SD karet | |
| LCD1 | LCD displej I2C | 20x4 |
| RELE1 | Relé | NVF4-2C-Z30a |
| MOTOR1 | Krokový motor | 17HS3401-S |
| DRIVER1 | Driver krokového motoru | TB6600 |
| PREVODNIK | RS232<->TTL | MAX3232 |
| VÝVOJOVÁ DESKA ARDUINO DUE | | |

7 ČINNOST KOMPLETNÍHO ZAŘÍZENÍ

Na následujícím obrázku je vyfoceno funkční zapojení celého systému 3D tiskárny. Robot je k vyrobenému hardwaru připojen pomocí sériové linky RS232.



Obrázek 72: Celkové propojení jednotlivých součástí [zdroj: vlastní]

7.1 Činnost mikropočítače Arduino Due

Obstarává řízení celého zařízení od čtení programu z SD karty po zasílání pohybových instrukcí do robotu.

7.1.1 Čtení SD karty

Čtení SD karty probíhá za pomoci modulu čtečky SD karty a knihovny *SD.h*. Program je vyčítán řádek po řádku a postupně zpracováván.

7.1.2 Obsluha displeje a ovládacích prvků

Pro výběr programu pro tisk jsou zde ovládací prvky, tři tlačítka a informační čtyřřádkový displej. Zobrazování na displeji řeší knihovna *LiquidCrystal_I2C.h* a komunikaci s displejem po lince I2C knihovna *Wire.h*.

7.1.3 Vyhřívání tiskové podložky

Pomocí 100k Ω NTC termistoru zapojeného v napěťovém děliči probíhá výpočet teploty a v závislosti na ní se otevírá a uzavírá tranzistor napojený na relé, jenž řídí napájení tiskové podložky. Teplota, na kterou je podložka vyhřívána je čtena z instrukcí v G-kódu na SD kartě a je hlídána pětkrát za vteřinu.

7.1.4 Vyhřívání tiskové hlavy

Obdobně jako vyhřívání tiskové podložky je zde 100k Ω NTC termistor pro měření teploty zapojený v napěťovém děliči a probíhá výpočet teploty. Podle výsledku výpočtu se otevírá nebo uzavírá tranzistor řídící napájení topného tělesa, jedná se o dvoupólovou regulaci.

Teplota je vyčítána z instrukcí v G-kódu a hlídána v pravidelném intervalu 0,2s.

7.1.5 Posun filamentu

Algoritmus vypočítá čas dráhy robota ze dvou parametrů – posuvu a délky dráhy, jenž si načte z G-kódu. Dalším známým parametrem je délka materiálu potřebného pro vytisknutí dané dráhy. Díky tomuto parametru je možné zjistit počet potřebných kroků pro vytlačení určeného množství filamentu a časování jednotlivých kroků (čili rychlost otáčení motoru)

7.1.6 Řízení robotu po sériové lince RS-232

Komunikace probíhá pomocí převodníku RS232 <-> TTL SP3232EEN, který se stará o správné napěťové úrovně.

Pohybové instrukce jsou vytvářeny podle jednoduchého komunikačního protokolu, kdy je pevně daný počet znaků pohybové instrukce. První a poslední znak je kontrolní a jednotlivé souřadnice mají přesně danou pozici ve stanoveném komunikačním protokolu.

7.2 Činnost robotu Stäubli RS40B

Robot Stäubli RS40B pracuje v jednoduché smyčce, kdy se přepíná mezi dvěma stavy. První stav je **čekání na instrukci**, čímž jsou řešeny veškerá čekání programu – například při čekání na ohřev podložky a trysky. V tomto stavu pokud po sériové lince přijde instrukce pohybu, tak robot ověří, zda instrukce odpovídá komunikačnímu protokolu, z důvodů možné ztráty dat. V okamžiku kdy instrukce komunikačnímu protokolu plně odpovídá (tzn. má 32 znaků, 1. znak je C a poslední E), robot odpoví potvrzovacím znakem a přepíná se do stavu vykonávající pohyb.

Pokud robot rozpozná chybu v příkazu, například ztrátu znaku odesílá do mikropočítače znak pro znovu zaslání příkazu.

Druhým možným stavem je **stav pohybu**, ve kterém robot provede nastavení správného posuvu a pohyb na kartézské souřadnice dle přečtené instrukce. Poté se přepíná do prvního stavu. Je možné, že instrukce dorazí dříve, než se robot stihne přepnout do prvního stavu, ale tento problém je řešen pomocí bufferu na sériové lince. Není tedy nutné vyčítat sériovou linku okamžitě při příchodu instrukce.

7.3 Synchronizace robotu a mikropočítače

Celá synchronizace zařízení je realizována za pomoci časování – Algoritmus běžící v mikropočítači počítá čas dráhy robota, a proto je schopný synchronizovat dodávku filamentu do trysky s pohybem robota.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit 3D tiskárnu, spolupracující s robotem Stäubli RS40B, který nahradí rám tiskárny a bude vykonávat pohyb v jednotlivých osách. Jako nevhodnější technologie pro tisk na této sestavě byla vyhodnocena technologie FDM, tj. stavba součástí z vrstev s pomocí roztavené tiskové struny. Možný materiál, jenž výsledné zařízení dokáže zpracovat je PLA a ABS.

Pro využití robota k této technologii tisku bylo nutné vyrobit tiskovou hlavu, obsahující nezbytné součásti a dále řídicí elektroniku s ovládáním.

Řízení celého zařízení, mimo výpočty natočení ramen robota architektury SCARA, je prováděno na mikropočítačové platformě Arduino Due. Komunikace s robotem probíhá pomocí sériové linky RS232, po které se zasílají pouze pohybové příkazy za pomoci komunikačního protokolu. Tento protokol byl vytvořen z důvodů možné ztráty části zprávy.

Při reálném testování na robotu Stäubli RS40B bylo stanoveno rychlostní omezení pro pohyby na 15mm/s. Při vyšších rychlostech pohybu dochází k rozkmitání ramene a tím k výraznému snížení kvality finálního výtisku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Manufacture of contour relief-maps. Google Patents [online] [Cit. 2020-05-26]. Dostupné z <https://patents.google.com/patent/US473901>
- [2] The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication. Sculpteo [online]. San Francisco [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- [3] ROTOLO, By Isaac Budmen and Anthony. The book on 3D printing. 2013. ISBN 978-1489529442.
- [4] ABS | Fused Deposition Modeling (FDM) at Materialise. Materialise [online]. Belgie: Materialise HQ, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/abs#datasheet>
- [5] ABSi | Fused Deposition Modeling (FDM) at Materialise. Materialise [online]. Belgie: Materialise HQ, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/absi>
- [6] Fused Deposition Modeling (FDM). Materialise [online]. Belgie: Materialise HQ, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>
- [7] ABS-M30 | Fused Deposition Modeling (FDM) at Materialise. Materialise [online]. Belgie: Materialise HQ, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/abs-m30>
- [8] PC | Fused Deposition Modeling (FDM) at Materialise. Materialise [online]. Belgie: Materialise HQ, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/polycarbonate>
- [9] ABS-ESD7 | Fused Deposition Modeling (FDM) at Materialise. Materialise [online]. Belgie: Materialise HQ, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/abs-esd7>
- [10] ABS-ESD7. Zare [online]. Boretto: Zare, c2014 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.zare.it/en/materials/abs-esd7>

- [11] PC-ABS | Fused Deposition Modeling (FDM) at Materialise. Materialise [online]. Belgie: Materialise HQ, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/pc-abs>
- [12] Ultem 9085 | Fused Deposition Modeling (FDM) at Materialise. Materialise [online]. Belgie: Materialise HQ, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/ultem-9085>
- [13] STRŽÍTELSKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. Základy 3D tisku s Josefem Průšou [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [14] PCB Heat Bed 12V, PCB Heat Bed MK2B 12V/24V For 3D Printer. Delta Electronic Parts [online]. Ahmadábád, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.deltakit.net/product/pcb-heat-bed-mk2b-12v-24v-3d-printer/>
- [15] PLA filamenty FDM tisk materialpro3d.cz. Materialpro3d.cz [online]. Brno, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
- [16] Mechanické vlastnosti materiálů pro 3d tisk | LKE, Brno. L.K. Engineering [online]. Brno [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.lke.cz/cz/mechanicke-vlastnosti-materialu-pro-3d-tisk/>
- [17] Prusament PLA | Prusament. Prusament [online]. Praha, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-pla/>
- [18] Prusament PETG | Prusament. Prusament [online]. Praha, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- [19] Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG. Materialpro3d.cz [online]. Brno, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [20] Prusament ASA | Prusament. Prusament [online]. Praha, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-asa/>
- [21] Laser SLA vs DLP vs Masked SLA 3D Printing Technology - The Ortho Cosmos. The Ortho Cosmos [online]. [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>

- [22] SLA 3D printing materials compared | 3D Hubs. 3D Hubs [online]. Amsterdam: HUBS, c2020 [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared/>
- [23] Laser Sintering SLS | 3D Printing Technologies & Materials. Materialise [online]. Belgie: Materialise HQ, c2020 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/laserove-sintrovani>
- [24] DMLS Materials. DMLS Technology [online]. DMLS Technology, c2019 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://dmlstechnology.com/dmls-materials>
- [25] Industrial 3D printing solutions by EOS. EOS [online]. EOS, c2020 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/dmls-metal-materials/cobalt-chrome>
- [26] Inventor | Software pro strojírenské návrhy a 3D CAD | Autodesk. Autodesk [online]. San Rafael: Autodesk, c2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/inventor/overview?plc=INVPROSA&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
- [27] CATIA | Technodat.cz [online]. Zlín: Technodat, c2019 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.technodat.cz/reseni-a-sluzby/3d-plm/catia>
- [28] Airbus A380 | 3DS Academy. Dassault Systemes: 3D Academy [online]. Waltham: Dassault Systemes [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://academy.3ds.com/en/projects/airbus-a380>
- [29] SketchUp Pro | 3D modelování pro každého | sketchup.cz. SketchUp [online]. 3E Praha Engineering [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://sketchup.cz/>
- [30] CADsys s.r.o. - školení, podpora a prodej systémů SketchUp, V-Ray, Render[in], Artlantis, ArCon, DataCAD. CADsys s.r.o. [online]. Brno: CADsys, c2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: https://sketchup.cadsys.cz/sketchup_novinky2020.php
- [31] Slic3r - About: Open source 3D printing toolbox. Slic3r [online]. [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://slic3r.org/about/>
- [32] PrusaSlicer - Prusa Research a.s.. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši. Prusa Research [online]. Praha: Prusa Research, c2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/prusaslicer/>

- [33] Ultimaker Cura: Powerful, easy-to-use 3D printing software. Ultimaker [online]. Utrecht: Ultimaker, c2011-2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>Začátek formuláře
- [34] Arduino DUE - HW Kitchen. HW Kitchen [online]. Šenov: HW Kitchen, c2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.hwkitchen.cz/arduino-due/>
- [35] Arduino - ArduinoDue. Arduino [online]. Arduino, c2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue>
- [36] Arduino Due | Arduino Official Store. Arduino [online]. Arduino, c2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-due>
- [37] BANZI, Massimo. Getting started with Arduino. 1st ed. Make:Books/O'Reilly, 2009. ISBN 978-059-6155-513.
- [38] Arduino Reference. Arduino [online]. Arduino, c2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/reference/en/>
- [39] Arm - RS series 40B/60/80 family: Instruction manual. Stäubli, 2009.
- [40] CS8C Controller: Instruction manual. Stäubli Faverges, 2008
- [41] ŠKAMRLA, Adam. Implementace 3D tisku prostřednictvím průmyslového robotu Stäubli RS40B. Zlín, 2015. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Petr Navrátil, Ph.D.
- [42] MOTIONKING. 2 Phase Hybrid Stepper Motor 17HS series-Size 42mm(1.8 degree). Dostupné také z: <https://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/MotionKing/17HS4401/pdf.php?id=928661>
- [43] EN AW-6082 T6 (AlMgSi1 F28/F31/F32). *Alunet: hliníkové profily na míru* [online]. Pardubice: ALUCAD Bohemia, c2020 [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-6082>
- [44] SPEAKON konektor NL4MP | GM electronic, spol. s.r.o. GM electronic, spol. s.r.o. [online]. Ostrava: GM electronic, c1990-2020 [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/neutrik-nl4mp>
- [45] D-Sub konektor CAN 9 Z | GM electronic, spol. s.r.o. *GM electronic, spol. s.r.o.* [online]. Ostrava: GM electronic, c1990-2020 [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/konektor-can-9-z>

- [46] D-Sub konektor CAN 15 Z G | GM electronic, spol. s.r.o. *GM electronic, spol. s.r.o.* [online]. Ostrava: GM electronic, c1990-2020 [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/konektor-can-15-z-g-con>
- [47] Robotika od historie po současnost - ElektroPrůmysl.cz. ElektroPrůmysl.cz [online]. Hajany: ElektroPrůmysl.cz, 2012 [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/robotika-od-historie-po-soucasnost>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|------------|--|
| FDM | Fused Deposition Modeling (Modelování fúzovaných depozic) |
| FFF | Fused Filament Fabrication (Výroba z fúzovaných vláken) |
| SLA | Stereolithography (Steleografie) |
| SLS | Selective Laser Sintering (Selektivní laserové sintrování) |
| DMLS | Direct Metal Laser Sintering (Přímé kovové laserové sintrování) |
| 3D | třírozměrný v kartézském systému souřadnic |
| UV | ultrafialové záření |
| SCARA | Selective Compliant Articulated Robot Arm (elektivní kompatibilní kloubové robotické rameno) |
| UI | Umělá inteligence |
| PLA | Polylactic acid (polymléčná kyselina) |
| PETG | Polyethylentereftalát s modifikovaným glykolem |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| ABSi | Biokompatibilní akrylonitrilbutadienstyren |
| ABS-M30 | Akrylonitrilbutadienstyren |
| ABS-M30i | Biokompatibilní akrylonitrilbutadienstyren |
| ASA | Akrylonitril-styren-akrylát |
| ABS-ESD7 | Akrylonitrilbutadienstyren – rozptylující statickou elektřinu |
| PC-ABS | Polykarbonátový ABS |
| PC-ISO | Polykarbonát ISO |
| PA 12 | Polyamid |
| PA-AF | Hliníkem plněný polyamid |
| PA-GF | Sklem plněný polyamid |
| PA 2241 FR | Nehořlavý polyamid |
| DLP | Digital light processing (Digitální zpracování světla) |

| | |
|----------|--|
| MSLA | Mask Stereolithography (Masková stereolitografie) |
| LCD | Liquid Crystal Display (Displej z tekutých krystalů) |
| LED | Light-Emitting Diode (Elektroluminiscenční dioda) |
| CAD | Computer aided design (Počítačem podporované projektování) |
| CAM | Computer aided manufacturing (Počítačová podpora obrábění) |
| I/O | Input / Output (Vstup / Výstup) |
| g | gram |
| kg | kilogram |
| mm | milimetr |
| MPa | Megapascal |
| °C | stupeň celsia |
| V | Volt |
| A | Ampér |
| MHz | Megahertz |
| kiB | kibibyte |
| mA | miliampér |
| Ω | ohm |
| s | sekunda |
| mH | milihenry |
| USB | Universal Serial Bus (Univerzální sériové rozhraní) |
| IDE | Integrated Development Environment (Vývojové prostředí) |
| SD | Secure Digital (paměťová karta) |
| TTL | Time to live |
| I2C | Sériová sběrnice |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Original Prusa i3 MK3S [13] | 12 |
| Obrázek 2: Delta tiskárna [13] | 13 |
| Obrázek 3: Polární tiskárna [13] | 14 |
| Obrázek 4: Extruder [13] | 15 |
| Obrázek 5: Vyhřívaná podložka [14] | 16 |
| Obrázek 6: Rám [13] | 17 |
| Obrázek 7: Krokový motor [13] | 17 |
| Obrázek 8: Řídící jednotka [13] | 18 |
| Obrázek 9: PLA [17] | 19 |
| Obrázek 10: PETG [18] | 20 |
| Obrázek 11: ABSi [6] | 22 |
| Obrázek 12: ABS-M30 [6] | 23 |
| Obrázek 13: ABS-M30i [6] | 24 |
| Obrázek 14: ASA [20] | 25 |
| Obrázek 15: PC [6] | 26 |
| Obrázek 16: ABS-ESD7 [6] | 27 |
| Obrázek 17: PC-ABS [6] | 28 |
| Obrázek 18: PC-ISO [6] | 29 |
| Obrázek 19: Ultem 9085 [6] | 30 |
| Obrázek 20: SLA tiskárna [13] | 31 |
| Obrázek 21: SLA Laser [21] | 32 |
| Obrázek 22: DLP SLA [21] | 33 |
| Obrázek 23: MSLA [21] | 34 |
| Obrázek 24: Standardní pryskyřice [22] | 35 |
| Obrázek 25: Čirá pryskyřice [22] | 36 |
| Obrázek 26: Tvrdá pryskyřice [22] | 36 |
| Obrázek 27: Odolná pryskyřice [22] | 37 |
| Obrázek 28: Žáruvzdorná pryskyřice [22] | 38 |
| Obrázek 29: Pryžová pryskyřice [22] | 39 |
| Obrázek 30: Keramická pryskyřice [22] | 40 |
| Obrázek 31: Pryskyřice pro lékařské prostředky [22] | 41 |
| Obrázek 32: Zubní dlouhodobá biokompatibilní pryskyřice [22] | 41 |
| Obrázek 33: Odlévatelná pryskyřice pro výrobu šperků [22] | 42 |
| Obrázek 34: Konstrukce SLS/DMLS tiskárny [13] | 43 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 35: Princip SLA/DMLS tisku [13] | 44 |
| Obrázek 36: PA 12 [23]..... | 45 |
| Obrázek 37: PA-AF [23] | 46 |
| Obrázek 38: PA-GF [23] | 46 |
| Obrázek 39: PA 2241 FR [23] | 47 |
| Obrázek 40: KobaltChrom SP2 – zubní můstek [25]..... | 48 |
| Obrázek 41: okno programu Autodesk Inventor® [zdroj: vlastní] | 51 |
| Obrázek 42: okno programu CATIA [28] | 52 |
| Obrázek 43: okno aplikace SketchUp [30]..... | 53 |
| Obrázek 44: okno aplikace Slic3r [zdroj: vlastní]..... | 54 |
| Obrázek 45: okno aplikace PrusaSlicer [zdroj: vlastní] | 55 |
| Obrázek 46: okno aplikace Ultimaker Cura [zdroj: vlastní]..... | 56 |
| Obrázek 47: Jednodeskový počítač Arduino Due [zdroj: vlastní] | 58 |
| Obrázek 48: Programovací prostředí Arduino se základním sketchem [zdroj: vlastní]..... | 60 |
| Obrázek 49: Plugin vMikro [zdroj: vlastní]..... | 61 |
| Obrázek 50: Robotické rameno Stäubli [39] | 62 |
| Obrázek 51: Pracovní prostor robota Stäubli RS40B [39] | 63 |
| Obrázek 52: Řídicí systém CS8C [40] | 65 |
| Obrázek 53: Přední panel CS8C [40] | 66 |
| Obrázek 54: programovací panel MCP [40]..... | 67 |
| Obrázek 55: Pohyb kloubem [40] | 68 |
| Obrázek 56: Pohyb ramenem [40] | 68 |
| Obrázek 57: Pohyb nástrojem [40]..... | 68 |
| Obrázek 58: Pohyb do bodu [40] | 68 |
| Obrázek 59: Sestava tiskové hlavy [zdroj: vlastní]..... | 71 |
| Obrázek 60: Sestava hrotu, zleva: Hrot, topné těleso, termistor teflonová izolace pro termistor. [41] | 72 |
| Obrázek 61: Krokový motor HANPOSE® 17HS3401S [zdroj: vlastní] | 73 |
| Obrázek 62: Schránka tiskové hlavy [zdroj: vlastní] | 74 |
| Obrázek 63: Vnitřní mechanismus hlavy - návrh [zdroj: vlastní]..... | 75 |
| Obrázek 64: Vnitřní mechanismus tiskové hlavy – realizace [zdroj: vlastní] | 75 |
| Obrázek 65: CANON D-sub CAN 15 [46]..... | 76 |
| Obrázek 66: CANON D-sub CAN 9 [45] | 76 |
| Obrázek 67: NEURIK SPEAKON NL4MP [44]..... | 77 |
| Obrázek 68: Řídicí jednotka [zdroj: vlastní]..... | 77 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 69: Řídící jednotka [zdroj: vlastní]..... | 78 |
| Obrázek 70: Vyhřívaná podložka MK2A [zdroj: vlastní] | 79 |
| Obrázek 71: Schéma zapojení [zdroj: vlastní] | 80 |
| Obrázek 72: Celkové propojení jednotlivých součástí [zdroj: vlastní] | 81 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: PLA Vlastnosti [15][16]..... | 19 |
| Tabulka 2: PETG Vlastnosti [19]..... | 20 |
| Tabulka 3: ABS Vlastnosti [4]..... | 21 |
| Tabulka 4: ABSi Vlastnosti [5]..... | 22 |
| Tabulka 5: ABS-M30 Vlastnosti [7] | 23 |
| Tabulka 6: ABS-M30i Vlastnosti [7] | 24 |
| Tabulka 7: ASA Vlastnosti [20]..... | 25 |
| Tabulka 8: PC Vlastnosti [8] | 26 |
| Tabulka 9: ABS-ESD7 Vlastnosti [9][10]..... | 27 |
| Tabulka 10: PC-ABS Vlastnosti [11]..... | 28 |
| Tabulka 11: PC-ISO Vlastnosti [8] | 29 |
| Tabulka 12: Ultem 9085 Přírodní [12] | 30 |
| Tabulka 13: Ultem 9085 Černý [12] | 30 |
| Tabulka 14: Datové typy Arduino Due [38]..... | 59 |
| Tabulka 15: Pojezdy robota Stäubli RS40B [39]..... | 63 |
| Tabulka 16: Rychlosti pojezdů robota Stäubli RS40B [39] | 63 |
| Tabulka 17: Opakovatelnost polohování robota Stäubli RS40B [39]..... | 64 |
| Tabulka 18: Seznam součástek | 80 |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Zdrojový kód mikropočítače

Příloha P II: Zdrojový kód robotu

PŘÍLOHA P I: ZDROJOVÝ KÓD MIKROPOČÍTAČE

```
// DEFINICE

// zapojeni
#define pinTermistoruTrysky A7
#define pinTermistoruDesky A6
#define pinCSCteckyKarty 8
#define pinTlacitkaDolu 11
#define pinTlacitkaNahoru 9
#define pinTlacitkaPotvrdit 10
#define pinOhrevuTrysky 23
#define pinOhrevuDesky 25
#define pinDir 12
#define pinPul 13

// konstanty
#define prodlevaTestovaniTlacitka 10 // prodleva u tlacitek k potlacení záchvěv
u -> namísto smittova klopneho obvodu
#define krokuNaMm 350 // puvodne 266
#define hysterezeOhrevu 1.0 // hystereze teploty
#define velikostPameti 10 // pocet prvků teplot, ze kterých se počítá průměr (k
vůli rušení)

// KNIHOVNY
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <vector>
#include <Arduino.h>

// STRUKTURY
struct Bod
{
    double X;
    double Y;
    double Z;
};

// OBJEKTY

class Display {
    /* ošetřuje si blikání displye kvůli neustálému přepisování */
private:
    String line[4];
    bool lineChanged[4];
public:
    Display() {
        line[0] = "";
        lineChanged[0] = false;
        line[1] = "";
        lineChanged[1] = false;
        line[2] = "";
    }
};
```

```

        lineChanged[2] = false;
        line[3] = "";
        lineChanged[3] = false;
    }

    void Write(int noLine, String text) {
        if (line[noLine] != text) {
            if (text.length() < 20) {
                for (int i = text.length(); i < 20; i++) {
                    text += " ";
                }
            }
            line[noLine] = text;
            lineChanged[noLine] = true;
        }
    }

    bool Change(int noLine) {
        if (lineChanged[noLine]) {
            this->lineChanged[noLine] = false;
            return true;
        }
        else return false;
    }

    String getLine(int noLine) {
        return line[noLine];
    }

    void Clear() {
        for (int i = 0; i < 4; i++) {
            line[i] = " ";
            lineChanged[i] = true;
        }
    }
};

class Button {
private:
    int pin;
    unsigned long casPoslednihoStisku;
    bool posledniStav;
    bool aktualniStav;

public:

    Button(int pin) {
        this->pin = pin;
        posledniStav = false;
        aktualniStav = false;
        casPoslednihoStisku = 0;
    }

    void tik(unsigned long casStisku) {
        if ((casStisku - prodlevaTestovaniTlacitka) >= casPoslednihoStisku) {
            posledniStav = aktualniStav;

```

```

        if (digitalRead(pin) == LOW) {
            aktualniStav = true;
        }
        else {
            aktualniStav = false;
        }
    }
}

void registerSelf() {
    pinMode(pin, INPUT_PULLUP);
}

bool pullUp() {
    if (aktualniStav == false && posledniStav == true) {
        aktualniStav = false;
        posledniStav = false;
        return true;
    }
    return false;
}

void resetButton() {
    aktualniStav = false;
    posledniStav = false;
}
};

class Motor {
private:
    unsigned long zbyvaKroku;
    unsigned long pristiKrok;
    double prodleva; // v mikrosekundach
    bool stavPulu;

public:
    Motor() {
        zbyvaKroku = 0;
        stavPulu = 0;
    }

    void nastav(double hodnota, double cas) {
        double zbytek = hodnota * krokuNaMm;
        if (zbytek >= 0) {
            zbyvaKroku = zbytek;
            digitalWrite(pinDir, LOW);
        }
        else {
            zbyvaKroku = zbytek * (-1.0);
            digitalWrite(pinDir, HIGH);
        }
        prodleva = (cas * 1000.0 / (double)zbyvaKroku);

        /*rychlostni omezeni motoru*/
        if (prodleva < 3) {
            prodleva = 3;
        }
    }
}

```

```

    pristiKrok = 0;
}

void registerSelf() {
    pinMode(pinDir, OUTPUT);
    pinMode(pinPul, OUTPUT);
}

void tik(unsigned long milliseconds) {
    if (milliseconds >= pristiKrok) {
        if (zbyvaKroku > 0) {
            pristiKrok = milliseconds + prodleva;
            if (stavPulu) {
                digitalWrite(pinPul, LOW);
                stavPulu = false;
            }
            else {
                digitalWrite(pinPul, HIGH);
                stavPulu = true;
            }
            zbyvaKroku--;
        }
    }
}

bool dokonceno() {
    if (zbyvaKroku == 0) { return true; }
    return false;
}
};

class Teplota {
    /* vychazi z https://navody.arduino-shop.cz/arduino-projekty/mereni-teploty-s-termistorem.html */
private:
    int pinTermistoru; // pin, na kterem je zapojeny termistor
    int pinSpinacihoTranzistoru;
    // oba termistory jsou stejne, není důvod nabírat tyto proměnné přes konstruktor
    int termNom = 100000; // Referenční odpor termistoru
    int refTep = 25; // Teplota pro referenční odpor
    int beta = 4036; // Beta faktor
    int rezistor = 100000; // hodnota odporu v sérii
    float hodnoty[velikostPameti];
    float pozadovanaTeplota;
    float aktualniTeplota;
    int intenzita; // kvůli velkému odběru

    float posledniTeplota; // poslední průměrná teplota, pokus o odstranění šummu
    bool behProgramu; // nastaví se na true až po ubehnutí funkce

    float teplota() {
        float napeti;
        //změření napětí na termistoru
        analogReadResolution(10);
        napeti = analogRead(pinTermistoru);
        float result;
    }
}

```

```

float resultTeplota;
result = ((1023 / napeti - 1) * rezistor) / termNom;           // (R/Ro)
result = log(result);                                       // ln(R/Ro)
result /= beta;                                           // 1/B * ln(R/Ro)
result += 1.0 / (refTep + 273.15); // + (1/To)
result = 1.0 / result;                                     // Převrácená hodnota
result -= 273.15;                                         // Převod z Kelvinů na stupně Celsia

if (!behProgramu || (behProgramu == true && (result + 15.0) > posledniTeplota
&& (result - 15.0) < posledniTeplota)) {

    resultTeplota = result;
    for (int i = 1; i < velikostPameti; i++) {
        hodnoty[i - 1] = hodnoty[i];
        resultTeplota += hodnoty[i];
    }

    resultTeplota = resultTeplota / velikostPameti;

    hodnoty[velikostPameti - 1] = result;

    posledniTeplota = resultTeplota;
}
else {
    resultTeplota = posledniTeplota;
}

return resultTeplota;

}

public:
Teplota(int pinTermistoru, int pinSpinacihoTranzistoru, int intenzita) {
    this->pinTermistoru = pinTermistoru;
    this->pinSpinacihoTranzistoru = pinSpinacihoTranzistoru;
    this->intenzita = intenzita;
    pozadovanaTeplota = 0.0;
    posledniTeplota = 0.0;
    behProgramu = false;
}

void registerSelf() {
    pinMode(pinSpinacihoTranzistoru, OUTPUT);
}

bool test() {
    aktualniTeplota = this->teplota();
    if ((aktualniTeplota - (hysterezeOhrevu / 2.0)) < pozadovanaTeplota) {
        analogWrite(pinSpinacihoTranzistoru, intenzita);
        //digitalWrite(pinSpinacihoTranzistoru, HIGH);
    }

    else if ((aktualniTeplota + (hysterezeOhrevu / 2.0)) > pozadovanaTeplota) {

```

```

        analogWrite(pinSpinacihoTranzistoru, 0);
        //digitalWrite(pinSpinacihoTranzistoru, LOW);
    }
}

void setBehProgramu(bool value) {
    behProgramu = value;
}

void setTeplota(float hodnota) {
    pozadovanaTeplota = hodnota;
}

int getTeplota() {
    return int(aktualniTeplota);
}

bool teplotaDosazena() {
    if (aktualniTeplota >= (pozadovanaTeplota - (hysterezeOhrevu / 2.0))) {
        return true;
    }
    return false;
}

int getPozadovanaTeplota() {
    return pozadovanaTeplota;
}
};

// PROMENNE
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
Teplota teplotaTrysky(pinTermistoruTrysky, pinOhrevuTrysky, 255);
Teplota teplotaDesky(pinTermistoruDesky, pinOhrevuDesky, 255);
Display* displej;
Motor* extruder;
String souborKTisku;
std::vector <String> souboryNaSD;
Button nahoru(pinTlacitkaNahoru);
Button dolu(pinTlacitkaDolu);
Button potvrdit(pinTlacitkaPotvrdit);

int vyber;

double rychlost;
Bod posledniPozice;
Bod novaPozice;

bool tisk = false;

void sendToRobot(double X, double Y, double Z, double F) {
    // CX123.45Y123.45Z123.45F12345.67E
    char result[32];
    result[0] = 'C';
    String pomocna = String(X, 2);
    while (pomocna.length() < 6) {
        pomocna = "0" + pomocna;
    }
}

```

```

result[1] = 'X';
result[2] = pomocna[0];
result[3] = pomocna[1];
result[4] = pomocna[2];
result[5] = pomocna[3];
result[6] = pomocna[4];
result[7] = pomocna[5];
pomocna = String(Y, 2);
while (pomocna.length() < 6) {
    pomocna = "0" + pomocna;
}
result[8] = 'Y';
result[9] = pomocna[0];
result[10] = pomocna[1];
result[11] = pomocna[2];
result[12] = pomocna[3];
result[13] = pomocna[4];
result[14] = pomocna[5];
pomocna = String(Z, 2);
while (pomocna.length() < 6) {
    pomocna = "0" + pomocna;
}
result[15] = 'Z';
result[16] = pomocna[0];
result[17] = pomocna[1];
result[18] = pomocna[2];
result[19] = pomocna[3];
result[20] = pomocna[4];
result[21] = pomocna[5];
pomocna = String(F, 2);
while (pomocna.length() < 8) {
    pomocna = "0" + pomocna;
}
result[22] = 'F';
result[23] = pomocna[0];
result[24] = pomocna[1];
result[25] = pomocna[2];
result[26] = pomocna[3];
result[27] = pomocna[4];
result[28] = pomocna[5];
result[29] = pomocna[6];
result[30] = pomocna[7];
result[31] = 'E';

bool accepted = false;

for (int i = 0; i < 32; i++) {
    Serial1.write(result[i]);
}

unsigned long cas = millis();

char receive;

while (!accepted) {
    if (Serial1.available()) {
        receive = Serial1.read();
        if (receive == 'A') {
            accepted = true;
        }
    }
}

```

```

        break;
    }
    else if (receive == 'D') {
        for (int i = 0; i < 32; i++) {
            Serial1.write(result[i]);
        }
        cas = millis();
    }
}

if (millis() - cas > 200) { // znovuposlani po 0,2s
    for (int i = 0; i < 32; i++) {
        Serial1.write(result[i]);
    }
    cas = millis();
}
}
}

void setup(void) {
    Serial1.begin(9600);
    displej = new Display();
    extruder = new Motor();
    extruder->registerSelf();
    lcd.begin();
    souborKTisku = "";
    vyber = 0;

    nahoru.registerSelf();
    dolu.registerSelf();
    potvrdit.registerSelf();

    teplotaTrysky.registerSelf();
    teplotaDesky.registerSelf();

    /* NĚJAKE ROZUMNE SPUSTENI */
    displej->Write(0, "    Tomas Bata    ");
    displej->Write(1, " Univerzity in Zlin ");
    displej->Write(2, " Faculty of Applied ");
    displej->Write(3, "    Informatics    ");

    /* zapnutí časovače a přerušení */
    pmc_set_writeprotect(false);
    pmc_enable_periph_clk(ID_TC7);
    TC_Configure(TC2, 1, TC_CMR_WAVE | TC_CMR_WAVSEL_UP_RC | TC_CMR_TCCLKS_TIMER_
CLOCK4);
    TC_SetRC(TC2, 1, 131200);
    TC_Start(TC2, 1);
    TC2->TC_CHANNEL[1].TC_IER = TC_IER_CPCS;
    TC2->TC_CHANNEL[1].TC_IDR = ~TC_IER_CPCS;
    NVIC_EnableIRQ(TC7_IRQn);

    souboryNaSD.clear();
    souborKTisku = "";
    vyber = 0;
}

void TC7_Handler() /* opakovani 0,2s */
{

```



```

TC_GetStatus(TC2, 1);
teplotaTrysky.test();
teplotaDesky.test();

if (tisk) {
    displej-
>Write(2, "Tryska: " + String(teplotaTrysky.getTeplota()) + " / " + String(tepl
otaTrysky.getPozadovanaTeplota()));
    displej-
>Write(3, "Deska: " + String(teplotaDesky.getTeplota()) + " / " + String(teplo
taDesky.getPozadovanaTeplota()));
}

if (displej->Change(0)) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(displej->getLine(0));
}
if (displej->Change(1)) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(displej->getLine(1));
}
if (displej->Change(2)) {
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print(displej->getLine(2));
}
if (displej->Change(3)) {
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(displej->getLine(3));
}
}

void loop(void) {
    unsigned long casOdSpusteni = millis();

    if (!SD.begin(pinCSCteckyKarty)) {
        tisk = false;
        displej->Write(0, "");
        displej->Write(1, "      SD KARTA  ");
        displej->Write(2, "  NENI PRIPRAVENA");
        displej->Write(3, "");

        // reset nastaveni vctne programu
        souboryNaSD.clear();
        souborKTisku = "";
        vyber = 0;
    }
    else {

        /* NACITANI SOUBORU NA SD KARTE
        * predpoklad alespon 1 souboru
        */
        if (souboryNaSD.size() == 0) {
            displej->Write(0, "");
            displej->Write(1, "  PROBIHA NACITANI");
            displej->Write(2, "      SD KARTY");
            displej->Write(3, "");

            File dir = SD.open("/");

```

```

while (true) {

    File entry = dir.openNextFile();
    if (!entry) {
        // no more files
        break;
    }

    if (!entry.isDirectory()) {
        souboryNaSD.push_back(entry.name());
    }
    entry.close();
}

/* VYBER SOUBORU Z KARTY */
else if (souboryNaSD.size() > 0 && souborKTisku == "") {
    nahoru.tik(casOdSpusteni);
    dolu.tik(casOdSpusteni);
    potvrdit.tik(casOdSpusteni);

    if (nahoru.pullUp()) {
        if (vyber > 0) {
            vyber--;
        }
    }

    if (dolu.pullUp()) {
        if (vyber < (souboryNaSD.size() - 1)) {
            vyber++;
        }
    }

    if (potvrdit.pullUp()) {
        souborKTisku = souboryNaSD[vyber];
    }

    displej->Write(0, "Vyber soubor k tisku");
    if (vyber >= 1) {
        displej->Write(1, " " + souboryNaSD[vyber - 1]);
    }
    else {
        displej->Write(1, "");
    }

    displej->Write(2, "*" + souboryNaSD[vyber]);

    if (vyber + 1 < souboryNaSD.size()) {
        displej->Write(3, " " + souboryNaSD[vyber + 1]);
    }
    else {
        displej->Write(3, "");
    }
}

/* TISK SOUBORU */
else if (souboryNaSD.size() > 0 && souborKTisku != "") {

```

```

File printFile;
String buffer;
tisk = true;

for (int i = 0; i < velikostPameti; i++) {
    teplotaTrysky.test();
    teplotaDesky.test();
    delay(5);
}

teplotaTrysky.setBehProgramu(true);
teplotaDesky.setBehProgramu(true);

printFile = SD.open(souborKTisku);

while (printFile.available()) {

    displej->Write(0, ">>> PROBIHA TISK <<<");
    displej->Write(1, souborKTisku);

    buffer = printFile.readStringUntil('\n');
    if (buffer[0] == ';') {
        buffer = "";
    }

    String funkce = buffer.substring(0, buffer.indexOf(' '));

    if (funkce == "M73") { /* pouze pro report procesu .. nepotrebne */ }
    else if (funkce == "M201") { /* nastaveni maximalnich zrychleni */ }
    else if (funkce == "M203") { /* nastaveni maximalnich zrychleni */ }

    else if (funkce == "M203") { /* nastaveni maximalnich rychlosti .. omezi i G
kod, neni potreba */ }

    else if (funkce == "M204") { /* nastaveni maximalnich rychlosti .. omezi i G
kod, neni potreba */ }
    else if (funkce == "M205") { /* pokročilá nastavení */ }

    else if (funkce == "M107") { /* vypnutí ofuku dílce .. ofuk nemáme */ }
    else if (funkce == "G90") { /* absolutní souřadnice -
> základní nastavení*/ }
    else if (funkce == "M83") { /* nastavení extruderu na relativní -
> základní nastavení */ }

    else if (funkce == "M92") { /* nastavení 3D tiskárny .. není potřeba*/ }
    else if (funkce == "M104") {
        /* ohřev tiskové hlavy */
        String teplota = buffer.substring(buffer.indexOf(' ') + 1);
        teplota = teplota.substring(1, teplota.indexOf(' '));
        teplotaTrysky.setTeplota(teplota.toFloat());
    }
    else if (funkce == "M140") {
        /* ohřev podložky */
        String teplota = buffer.substring(buffer.indexOf(' ') + 1);
        teplota = teplota.substring(1, teplota.indexOf(' '));
        teplotaDesky.setTeplota(teplota.toFloat());
    }
}

```

```

}
else if (funkce == "M109") {
    displej->Write(0, "PROBIHA OHREV TRYSKY");
    displej->Write(1, souborKTisku);
    while (!teplotaTrysky.teplotaDosazena()) {
        /* cekaci smycka, test v preruseni po 0,2s*/
        delay(1);
    }
}
else if (funkce == "M190") {
    displej->Write(0, "PROBIHA OHREV DESKY");
    displej->Write(1, souborKTisku);
    while (!teplotaDesky.teplotaDosazena()) {
        /* cekaci smycka, test v preruseni po 0,2s*/
        delay(1);
    }
}
else if (funkce == "G28") {
    sendToRobot(0, 0, 50, 50);
    novaPozice.X = 0;
    novaPozice.Y = 0;
    novaPozice.Z = 50;
}

else if (funkce == "G29") { /* lze ignorovat, dotykovou sondu pro kontrolu po
dlozky nepouzivam*/ }

else if (funkce == "G92") { /* urcuje nulovy bod .. u me v programu je vtedy 0
na vsem*/ }
else if (funkce == "G1") {
    /* pohyb */
    /* muze obsahovat X, Y, Z, E, F, S*/
    String zpracovani = buffer.substring(buffer.indexOf(' '));
    String next = "";
    double E = 0.0;
    while (zpracovani.length() > 1) {
        next = zpracovani.substring(zpracovani.lastIndexOf(' ') + 1);

zpracovani = zpracovani.substring(0, zpracovani.lastIndexOf(' '));

        posledniPozice = novaPozice;

        switch (next[0])
        {
        case 'X':
        case 'x':
            novaPozice.X = next.substring(1).toDouble();
            break;
        case 'Y':
        case 'y':
            novaPozice.Y = next.substring(1).toDouble();
            break;
        case 'Z':
        case 'z':
            novaPozice.Z = next.substring(1).toDouble();
            break;
        case 'F':
        case 'f':
            rychlost = next.substring(1).toDouble() / 60.0;

```


PŘÍLOHA P II: ZDROJOVÝ KÓD ROBOTU

```
begin
  // nastavíme komunikaci - nezapomeň přilinkovat COM port
  Call comm_init()

While True
  //CX123.45Y123.45Z123.45F12345.67E

  // nacteni stringu do pole
  n_rb = 0
pocitadlo = 0
l_pocetCyklu = 0

Do
For i = 0 To 31
  nResponse[i] = 0
endFor

n_rb = sioGet(sSCom, nResponse)

For i = pocitadlo To (n_rb + pocitadlo)
If i & lt; 32
  nResponseData[i] = nResponse[i-pocitadlo]
  End If
endFor
pocitadlo = n_rb + pocitadlo
l_pocetCyklu = l_pocetCyklu + 1
until(pocitadlo & gt;= 31) Or (l_pocetCyklu & gt;= 100)

  If (nResponseData[0] == 67) And (nResponseData[31] == 69)
    pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[2]), 0)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[3]), 1)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[4]), 2)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[5]), 3)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[6]), 4)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[7]), 5)
toNum(pomocny, nsX, b0k)
pomocny = ""

pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[9]), 0)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[10]), 1)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[11]), 2)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[12]), 3)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[13]), 4)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[14]), 5)
toNum(pomocny, nsY, b0k)
pomocny = ""

pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[16]), 0)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[17]), 1)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[18]), 2)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[19]), 3)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[20]), 4)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[21]), 5)
```

```

toNum(pomocny, nsZ, b0k)
pomocny = ""

pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[23]), 0)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[24]), 1)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[25]), 2)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[26]), 3)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[27]), 4)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[28]), 5)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[29]), 6)
pomocny = insert(pomocny, chr(nResponseData[30]), 7)
toNum(pomocny, nsF, b0k)
pomocny = ""

s_message[35]="Bude proveden pohyb na souradnice: "
putln("-----")
put(s_message[35])
putln("")
put("X: ")
put(toString("3.2", nsX))
putln(" mm")
put("Y: ")
put(toString("3.2", nsY))
putln(" mm")
put("Z: ")
put(toString("3.2", nsZ))
putln(" mm")
put("posuv: ")
put(toString("3.2", nsF))
putln(" mm/s")
putln("-----")
putln("")
putln("")
putln("")
putln("")
putln("")
putln("")
putln("")
putln("")
putln("")

sioSet(sSCom, 65)
l_pohyb = compose(pocsour, sours, {nsX, nsY, nsZ, 0, 0, 180})
mNomSpeed.tvel = (nsF)
move1(appro(l_pohyb, {0, 0, 84.5, 0, 0, -90}), flange, mNomSpeed)
Else
sioSet(sSCom, 69)
End If

waitEndMove()

endWhile
End

```