



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## REVITALIZACE 3D TISKÁRNY

3D PRINTER REMAKE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Čtvrtníček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Arm, Ph.D.

BRNO 2023

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Jan Čtvrtníček

**ID:** 228562

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## Revitalizace 3D tiskárny

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem je revitalizovat 3D tiskárnu s automatickým výložníkem. K tomu je potřeba upravit hardware s využitím standardních a hliníkových dílů, přičemž je možné využít proces rapid prototyping. Po výběru komponent a elektrifikaci, je nutné implementovat obslužný software (např. Klipper).

1. Proveďte rešerši v oblasti 3D tiskových mechanismů.
2. Vytvořte virtuální model revitalizované 3D tiskárny.
3. Proveďte výpočty elektrických komponent s následným výběrem konkrétních prvků.
4. Implementujte obslužný software (Klipper) a vyzkoušejte.
5. Srovnajte reálné vyhotovení s navrhnutým modelem.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

KLOSKI, L. W., KLOSKI, N. Začínáme s 3D tiskem. Computer Press, 2017. 216 s. ISBN: 9788025148853

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 22.5.2023

**Vedoucí práce:** Ing. Jakub Arm, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je revitalizovat již existující 3D tiskárnu. Stručně shrnuje možné technologie 3D tiskáren se zaměřením na technologii FDM a více do hloubky zpracovává možnosti pohybu os X a Y. Především se věnuje návrhu modelu 3D tiskárny podle vybraných technologií tak, aby splňovala požadované parametry. Následná realizace je založena na přesném výběru mechanických a elektrických komponent. Dále se zabývá implementací obslužného softwaru Klipper na rozhraní OctoPrint. Celá tiskárna je navržena jako uzavíratelná buňka s automatickým vykládáním výtisku.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

3D tiskárna, 3D tisk, CoreXY, výložník, virtuální model, Klipper, Raspberry Pi, OctoPrint

## **ABSTRACT**

Purpose of this thesis is revitalize an existing 3D printer. It briefly summarizes the possible technologies of 3D printers with a focus on FDM technology and elaborates in more depth the possibilities of X and Y axis movement. Above all, this thesis is dedicated to the design of a 3D printer model according to selected technologies so that it meets the required parameters. Subsequent implementation is based on the precise selection of mechanical and electrical components. It also deals with the implementation of the Klipper utility software on the OctoPrint interface. The entire printer is designed as an enclosable cell with automatic print unloading.

## **KEYWORDS**

3D printer, 3D printing, CoreXY, unloader, virtual model, Klipper, Raspberry Pi, OctoPrint

ČTVRTNÍČEK, Jan. *Revitalizace 3D tiskárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023, 60 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jakub Arm, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Jan Čtvrtníček  
**VUT ID autora:** 228562  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2022/23  
**Téma závěrečné práce:** Revitalizace 3D tiskárny

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jakubu Armovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Teoretická část bakalářské práce</b>	<b>12</b>
1.1 Technologie 3D tiskáren	12
1.1.1 FDM – Fused Depositing Modeling	12
1.1.2 SLA – Stereolithography	14
1.1.3 Další technologie tisku	15
1.2 Technologie pohybu FDM tiskáren	15
1.2.1 Kartézská kinematika	15
1.2.2 H-Bot	17
1.2.3 CoreXY	18
1.2.4 Další technologie pohybu	20
1.3 Analýza dynamických modelů kinematických systémů	20
1.3.1 H-Bot	20
1.3.2 CoreXY	21
1.3.3 Shrnutí	24
<b>2 Vlastní návrh modelu 3D tiskárny</b>	<b>25</b>
2.1 Výběr vhodných technologií	25
2.1.1 Výběr kinematiky os X a Y	25
2.1.2 Výběr podávání materiálu	26
2.1.3 Shrnutí	26
2.2 Návrh	26
2.2.1 Rám	27
2.2.2 Tisková plocha	28
2.2.3 Nosník tiskové hlavy	29
<b>3 Výběr komponent</b>	<b>31</b>
3.1 Mechanické komponenty	31
3.1.1 Poměry řemenic	31
3.1.2 Výpočet délky řemenů	33
3.2 Elektrické komponenty	36
3.2.1 Řídící deska	36
3.2.2 Krokové motory	37
3.2.3 Kapacitní snímač	39
3.2.4 Koncové snímače	39

3.2.5	Další komponenty . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Obslužný software</b>	<b>41</b>
4.1	Klipper . . . . .	41
4.1.1	Hlavní funkce . . . . .	41
4.2	Implementace Klipperu . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Reálné vyhotovení</b>	<b>44</b>
5.1	Sestavení . . . . .	44
5.1.1	Nosník tiskové hlavy . . . . .	44
5.1.2	Tisková plocha . . . . .	47
5.1.3	Výložník . . . . .	48
5.2	Porovnání modelu a reálného vyhotovení . . . . .	50
5.3	Možné vylepšení . . . . .	50
5.3.1	Automatické doplnění filamentu . . . . .	50
5.3.2	Kapalinou chlazený hotend . . . . .	51
	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Literatura</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>57</b>
	<b>A Obsah přiložené SD karty</b>	<b>58</b>
	<b>B Blokový diagram zapojení tiskárny</b>	<b>59</b>
	<b>C Tabulka filamentů</b>	<b>60</b>

# Seznam obrázků

1.1	Princip FDM tiskárny [3]	12
1.2	Tabulka filamentů [8]	13
1.3	Princip SLA tiskárny [11]	14
1.4	Princip kartézské kinematiky [13]	16
1.5	Princip kartézské kinematiky tiskárny Ultimaker [13]	17
1.6	Princip H-Bot kinematiky [13]	18
1.7	Princip CoreXY kinematiky [13]	19
1.8	Výsledky kruhového testu pro prototyp H-Bot kinematiky [15]	21
1.9	Výsledky kompenzovaného kruhového testu pro prototyp H-Bot kinematiky [15]	21
1.10	Výsledky polohování ve směru osy X podle normy ISO 230-2 [15]	22
1.11	Výsledky polohování ve směru osy Y podle normy ISO 230-2 [15]	22
1.12	Porovnání trajektorie v porovnání experimentu a simulace [14]	23
1.13	Velikost chyby trajektorie oproti požadované trajektorii v závislosti na rychlosti při pravoúhlém zatáčení, z X do Y [14]	23
1.14	Velikost chyby trajektorie oproti požadované trajektorii v závislosti na rychlosti při pravoúhlém zatáčení, z Y do X [14]	24
2.1	Původní návrh tiskárny	27
2.2	Tisková plocha s automatickým výložníkem	28
2.3	Nosník tiskové hlavy	29
2.4	Vlastní návrh CoreXY tiskárny	30
3.1	Diagram řídicí desky [23]	37
3.2	Momentová charakteristika motoru SX17-1005LQCEF [22]	38
3.3	Kapacitní snímač CM18-3005 [24]	39
3.4	Koncový snímač s RC filtrem [25]	40
5.1	Uchycení tiskové hlavy	45
5.2	Uchycení podávání filamentu	45
5.3	Rozložení pinů konektoru hotendu [22]	46
5.4	Uchycení rámu tiskové plochy ke šroubům	47
5.5	Výložník tiskové plochy	48
5.6	Vyhotovená 3D tiskárna	49

## Seznam tabulek

4.1	Tabulka parametrů pro nastavení motoru . . . . .	43
4.2	Tabulka parametrů nastavení tiskárny . . . . .	43
5.1	Tabulka zapojení pinů konektoru k hotendu . . . . .	46

# Úvod

Tato bakalářská práce se věnuje oblasti návrhu 3D tiskárny. 3D tisk je v dnešní době velice rozšířenou technologií, která se využívá nejen v technické praxi, ale používá se také ve všeobecné veřejnosti. 3D tiskárny pracují na principu postupného přidávání plastu, dokud nevznikne požadovaný objekt. Existuje mnoho technologií tohoto principu, avšak nejrozšířenější je princip FDM (Fused Depositing Modeling).

Ve své práci navazuji na předchozí bakalářskou práci, ve které byla zhotovena funkční tiskárna, která však nedisponovala požadovanými parametry. Podle požadavků vedoucího musí tiskárna být kompletně uzavíratelná, musí tisknout dostatečně kvalitně a rychle, jednotlivé součásti by měly být standardizované, nebo velice jednoduché, aby se daly vyrobit z hliníku.

Cílem mé práce je provést rešerši v oblasti technologií pohybu 3D tiskáren a vybrat nejvhodnější možnost pro návrh tiskárny. Tiskárna musí být navržena jako uzavřená buňka, takže musí mít možnost uzavření a veškeré součásti tiskárny nesmí zasahovat do oblasti rámu. Při navržení tiskárny tímto stylem bude možné vytvořit tiskovou farmu. Výsledná tiskárna bude díky uzavření schopna pracovat také s materiály vyžadující vysokou teplotu při tisku.

Díky implementaci obslužného softwaru Klipper na rozhraní OctoPrint bude možné tiskárnu monitorovat a ovládat pomocí webového rozhraní.

# 1 Teoretická část bakalářské práce

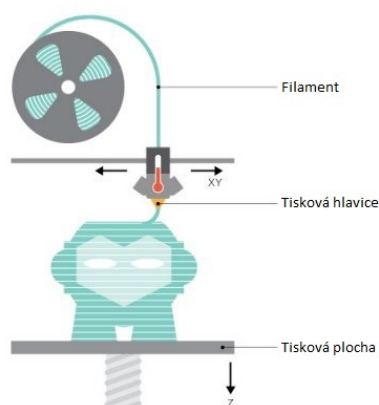
Tato kapitola se zabývá řešší v oblasti technologií 3D tiskáren a technologiemi jejich kinematických systémů. Hlavním cílem této kapitoly je detailní průzkum kinematických systémů, aby bylo možné vyhodnotit nejvýhodnější systém pro dané zadání.

## 1.1 Technologie 3D tiskáren

Tato část slouží k rychlému shrnutí tiskových technologií a v oblasti FDM tisku se částečně zabírám popisem nejpoužívanějších plastů včetně jejich kompatibility s vysokými teplotami uzavřené tiskárny.

### 1.1.1 FDM – Fused Depositing Modeling

FDM, jinak také FFF (Fused Filament Fabrication), je styl aditivní výroby [1]. Jedná se o proces výroby fyzických objektů postupným vrstvením materiálu. Termoplast je protlačován přes extruder a umisťován v každé vrstvě tak, aby vytvořil požadovaný objekt. Ve výsledku se jedná o jednoduchou a relativně rychlou metodu výroby. Tento styl výroby umožňuje vytvářet také komplexní tvary, které by pomocí jiných technologií byly komplikované nebo nemožné. [2]



Obr. 1.1: Princip FDM tiskárny [3]

### Materiály pro FDM tisk

**PLA (Polyaktid)** nebo také polyaktická kyselina je termoplastický polyester. Jedná se o populární materiál díky ekonomičnosti výroby z obnovitelných zdrojů. PLA je nejrozšířenější materiál v 3D tisku. Mezi hlavní vlastnosti patří nízká

teplota tání, vysoká pevnost, malá teplotní roztažnost a dobrá přilnavost vrstev. Hlavní nevýhodou je malá teplotní odolnost, kvůli čemuž se špatně opracovává broušením. [4]

**PET-G (Polyetylén tereftalát-glakol)** PET (Polyetylén tereftalát) je nejběžnější plast na světě - láhve, nádoby, obaly a podobné. PET-G je modifikovanou verzí PET, která je jasnější, méně křehká a snadněji použitelná než základní forma. Vyznačuje se vyšší pevností, teplotní odolností a snadným tiskem s výbornou adhezí vrstev. [5]

**ABS (Akrylonitril-butadien-styren)** je běžný materiál využívaný ve 3D tisku. Jeho přednostmi jsou vysoká pevnost, teplotní odolnost a možnost opracování různými metodami (broušení, leptání acetonem, ...). Hlavní nevýhodou je zkroucení, které vzniká zmenšením při chlazení během tisku. Zmenšení lze předejít tiskem v uzavřené tiskárně s vyhřívanou tiskovou plochou. [6]

**Další materiály:** TPU (Termoplastický polyuretan), Nylon, PVA (Polyvinyl alkohol), ASA (Akrylonitril-syten-akrylát), PC (Polykarbonát), kompozitní filamenty (s příměsí karbonu, dřeva, kovu, ...) [7].

Material ②	Printable on powder coated sheet ②	Printable on smooth PEI sheet ②	Printing with enclosure ②	Nozzle temperature (+10 °C) ②	Bed temperature (+10 °C) ②	Hardened nozzle required ②	Heat deflection temperature (avg. °C) ②
> PLA ① (13)	✓	✓	✗	210 - 215 °C	60 °C	✗	
> Wood / metal filled ① (7)	✓	✓	✗	190 - 220 °C	60 °C	-	
> PETG ① (9)	✓	✓ with window cleaner	✗	240 - 270 °C	90 - 110 °C	✗	
> ASA ① (2)	✗ not recommended	✓	✓ recommended	260 - 265 °C	95 - 110 °C	✗	
> ABS ① (6)	✗ not recommended	✓	✓ recommended	240 - 255 °C	110 °C	✗	
> PC (Polycarbonate) ① (2)	✓ with glue stick	✗ not recommended	✓ recommended	270 - 275 °C	115 °C	✗	
> CPE (1)	✓	✓ with window cleaner	✗	275 °C	90 °C	✗	
> PVA / BVOH (2)	✓	✓	✗	195 - 215 °C	60 °C	✗	

Obr. 1.2: Tabulka filamentů [8]

Z tabulky je možné vyčíst parametry jednotlivých materiálů a určit vhodné tiskové materiály pro navrhovanou tiskárnu. Rozšířená verze tabulky se nachází v příloze C.

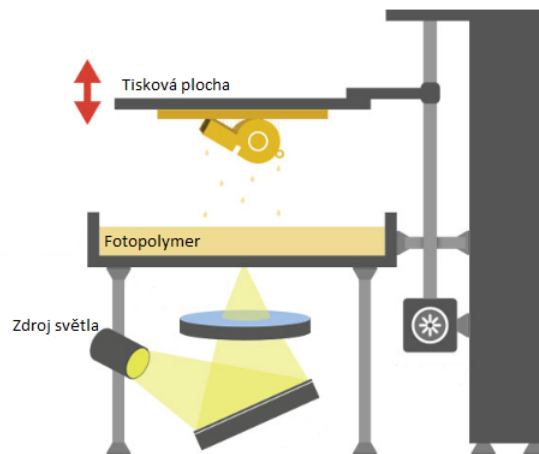
### Podávání materiálu pro FDM tisk

**Přímý systém extruze** - extruder tlačí filament přímo do trysky, tento styl je velmi spolehlivý, má jednodušší retrakci, avšak motor na tlačení filamentu je umístěn přímo na tiskové hlavici, kvůli čemuž dochází k omezení rychlosti a více vibracím [9].

**Bowden systém extruze** - na rozdíl od přímého systému extruze je extruder umístěn na rámu tiskárny a filament je tlačěn přes trubici (Bowdenova trubice). Díky tomu je tisková hlavička lehčí, což umožňuje vyšší rychlost pohybu a méně vibrací (vyšší kvalita tisku). Hlavními nevýhodami tohoto systému jsou potřeba silnějšího motoru extruderu, pomalejší doba odezvy a nekompatibilita s některými materiály (flexibilní filamenty se mohou zaseknout v trubici). [9]

### 1.1.2 SLA – Stereolithography

Jedná se o první technologii 3D tisku na světě. Ve svém principu využívá zrcadel, které směřují laser skrze nádrž resinu, čímž výběrově vytvrzují resin vytvářející objekt po vrstvách. [10]



Obr. 1.3: Princip SLA tiskárny [11]

### DLP – Digital Light Processing

Jedná se o metodu odvozenou od SLA tiskáren, avšak místo laseru využívá digitální projektor světla na ozáření obrazu celé vrstvy, což urychluje proces tisku. Protože projektorem světla je digitální display, je výsledná kvalita tisku ovlivněna jeho rozlišením. [10]

### 1.1.3 Další technologie tisku

**SLM (Selective Laser Melting)** - pomocí laseru je kovový prášek spojován na molekulární úrovni, dokud není model kompletní [10]

**MJ (Material Jetting)** - jedná se o proces, při kterém je fotosenzitivní resin postupně nanášen na tiskovou plochu (jedná se o spojení resinových a FDM tiskáren) [10]

**MJF (Multi Jet Fusion)** - při tisku je na tiskovou plochu nanášen prášek, na který je v selektovaných oblastech přidán spojovací materiál a zahřátím dojde ke spojení [10]

**LOM (Laminated Object Manufacturing)** - vrstvy materiálu jsou spojovány například zahříváním, materiály jsou v rozsahu od plastů po kovy [10]

## 1.2 Technologie pohybu FDM tiskáren

Různé kinematické systémy se vyznačují svými specifickými vlastnostmi a styly zapojení. Pro účely návrhu požadované tiskárny se omezíme na styl zapojení, kdy pohyb os X a Y zajišťuje pohyb tiskové hlavice a nebudeme započítávat převody při nepřímém zapojení motorů do systému.

### 1.2.1 Kartézská kinematika

Jedná se o tiskárny s přímočarým stylem pohybu. Komponenty tiskárny se lineárně pohybují po X, Y a Z osách a pohybují tiskovou hlavicí. [12] Existuje mnoho stylů, jakými lze zapojit uspořádání kartézské kinematiky (XY - hotend, Z - tisková plocha; XZ - hotend, Y - tisková plocha; ...) [13].

Při tomto kinematickém systému vždy dochází k tomu, že jeden motor není stacionární (pohybuje se podle tisku). Toto vede ke zvýšení náročnosti pohybu pro motor/y, které musejí kromě tiskové plochy/hlavice hýbat navíc dalším motorem. Jeden motor způsobuje pohyb pouze v jednom směru. [12]

Matice transformace polohy:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

kde  $x$  a  $y$  - koncové pozice,  $r$  - poloměr řemenice,  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  = úhly natočení motorů.

Matice transformace rychlosti:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

kde  $v_x$  a  $v_y$  - rychlost lineárního pohybu,  $\omega_1$  a  $\omega_2$  - rychlost otáčení motorů.

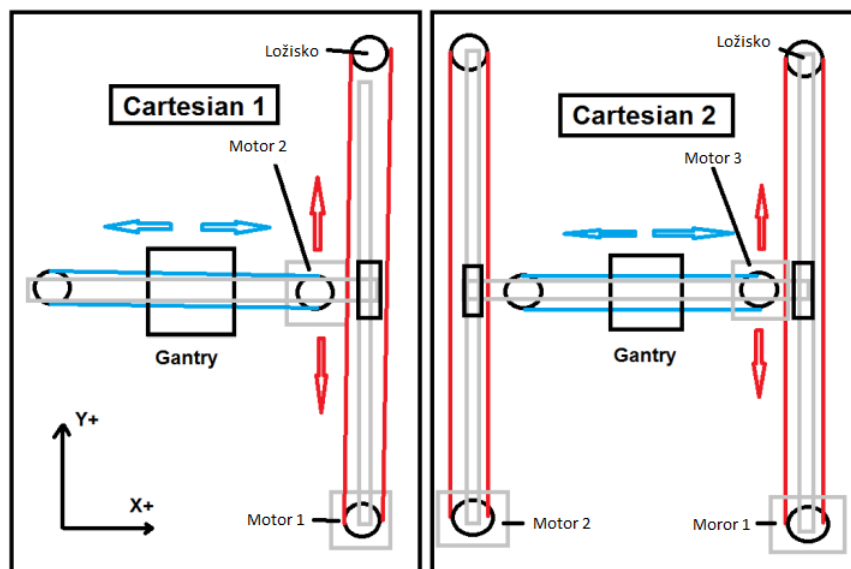
Maximální rychlost:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} \omega_{max} \\ \omega_{max} \end{bmatrix} = v_{max} \quad (1.3)$$

$$v_{max} = \frac{r}{2} \sqrt{\omega_{max}^2 + \omega_{max}^2} = \frac{r}{2} \sqrt{2} \omega_{max} \quad (1.4)$$

kde  $\omega_{max}$  - maximální rychlost otáčení motorů,  $v_{max}$  - maximální rychlost lineárního pohybu. [14]

Z těchto výpočtů vidíme, že tiskárna dosahuje maximální rychlosti při pohybu obou motorů zároveň - diagonální pohyb.



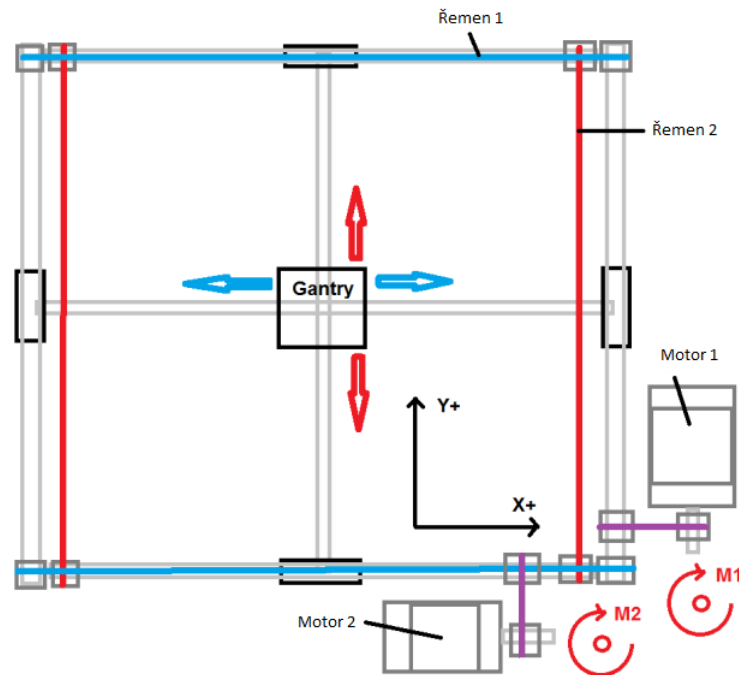
Obr. 1.4: Princip kartézské kinematiky [13]

Na obrázku č. 1.4 vidíme dvě z možných zapojení kartézské kinematiky. U zapojení č. 1 je zřejmé, že při pohybu v ose Y dochází k zaostávání vzdáleného bodu nosníku, a to může mít za následek zhoršení kvality tisku. Tento problém je vyřešen zapojením č. 2, kdy přidáme do osy Y další motor (nebo pomocí lineární osy přenášíme pohyb z motoru i na druhou stranu, ale toto zapojení neřeší problém úplně).

### Ultimaker kinematický systém

Ultimaker je společnost vyrábějící 3D tiskárny, která využívá modifikované kartézské kinematiky. Při tomto stylu jsou všechny motory stacionární, zatímco stále platí princip, že jeden motor pohybuje jedním směrem. Tento systém je vcelku komplikovaný a využívá kolmých lineárních hřídelí k pohybu os. Tento systém je ověřený

v praxi, avšak jeho největší nevýhodou je, že některé z ložisek musejí zároveň zvládnout rotační a lineární pohyb. [13]



Obr. 1.5: Princip kartézské kinematiky tiskárny Ultimaker [13]

## 1.2.2 H-Bot

H-Bot tiskárna využívá jednoho řemene k pohybu tiskové hlavy v osách X a Y [12]. Oba motory zajišťující pohyb jsou propojeny tímto řemenem ve tvaru písmene H. Při tomto zapojení nedochází k pohybu žádného motoru, což umožňuje dosáhnout vcelku vysokých rychlostí pohybu. [15] Největší nevýhodou tohoto systému je tzv. *racking*, který vzniká protichůdným působením sil motorů.

Matice transformace polohy:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

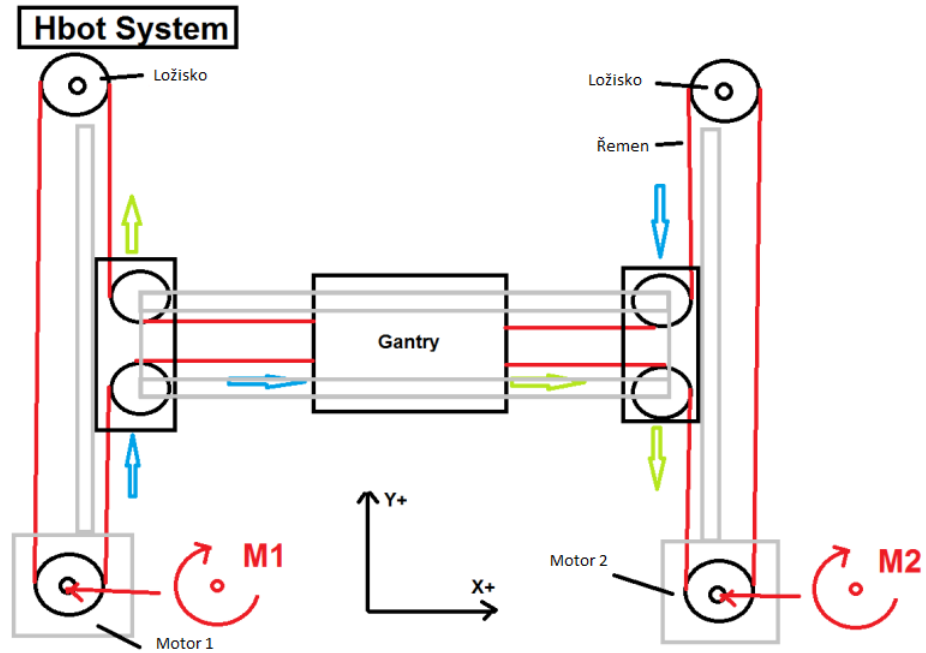
Matice transformace rychlosti:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Maximální rychlost:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ -2\omega_{max} \end{bmatrix} = v_{max} \quad (1.7)$$

$$v_{\max} = \frac{r}{2} \sqrt{4\omega_{\max}^2} = r\omega_{\max} \quad (1.8)$$



Obr. 1.6: Princip H-Bot kinematiky [13]

Pohyb pomocí systému H-Bot je komplikovanější než u běžné kartézské kinematiky, protože dochází ke spolupráci dvou motorů. Při pohybu v ose X se oba motory pohybují stejně, v ose Y opačně a při diagonálním pohybu jeden z motorů stojí. Z vypočítaných hodnot vidíme, že systém dosahuje maximální rychlosti při pohybu v ose X nebo Y. Již zmíněná nevýhoda rackingu se nejvíce projevuje právě při vysokých rychlostech, což značně škodí jedné z největších výhod tohoto systému oproti kartézskému. [16]

Jak je možno vidět na obrázku č. 1.6, řemen je k tiskové hlavici přichycen na čtyřech bodech. Co způsobuje efekt rackingu je to, že síly na jednotlivých stranách působí opačnými směry.

### 1.2.3 CoreXY

CoreXY je kinematický systém založený na H-Bot systému. Při vyvíjení byly hlavními principy tohoto systému rychlost, jednoduchost a flexibilita. [17] Oproti H-Botu CoreXY využívá k pohybu tiskové hlavy dva řemeny namísto jednoho, což umožňuje využití nižšího točivého momentu a snížení vibrací. Dále tímto uspořádáním řemenů dochází k vyřešení racking problému. [12]

Matice transformace polohy:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

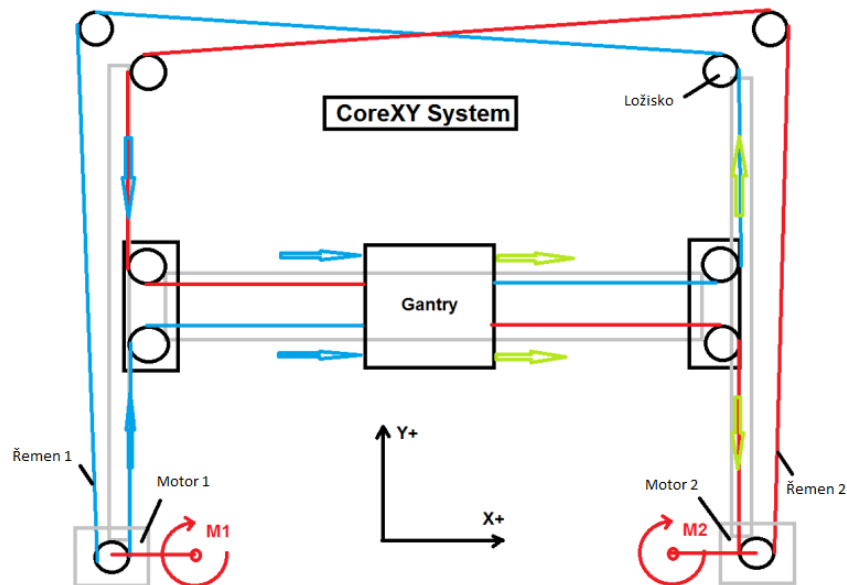
Matice transformace rychlosti:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Maximální rychlost:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 2\omega_{max} \\ 0 \end{bmatrix} = v_{max} \quad (1.11)$$

$$v_{max} = \frac{r}{2} \sqrt{4\omega_{max}^2} = r\omega_{max} \quad (1.12)$$



Obr. 1.7: Princip CoreXY kinematiky [13]

U CoreXY docílíme pohybu v jednotlivých osách stejným způsobem jako u H-Botu (motory se otáčejí stejně pro pohyb v ose X, ...), proto také docílíme maximální rychlosti při pohybu v ose X nebo Y. Oproti H-Botu je již však vyřešen racking problém (možno vidět na obrázku č. 1.7), což nám umožňuje využít těchto vysokých rychlostí bez ztráty kvality tisku. [14]

### 1.2.4 Další technologie pohybu

**Delta** - tři (a více) ramen je připojeno k vertikálním kolejnicím, společně nastavují pozici tiskové hlavy v osách X, Y a Z [12]

**SCARA** - pracuje v kartézském souřadnicovém systému, tisková hlava je připojena k ramenu, které je ovládané dvěma motory a je s ním pohybováno v osách X a Y [12]

**Pásová tiskárna** - jedná se o kartézskou tiskárnu, která má tiskovou hlavu nakloněnou pod úhlem  $45^\circ$  v závislosti na tiskovou plochu, která je tvořena pohyblivým pásem, který při tisku ujíždí a posouvá výtisk [12]

**Polární tiskárna** - tiskne stejným způsobem jako FDM tiskárny, ale pracuje v polárních souřadnicových systémech, které oproti kartézskému systému používají úhel a vzdálenost vůči počátku [12]

## 1.3 Analýza dynamických modelů kinematických systémů

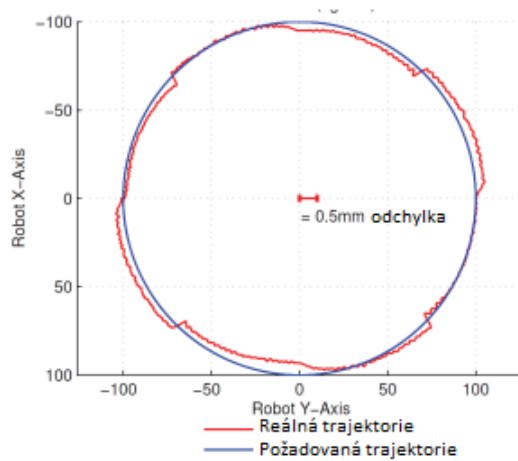
Tato kapitola využívá studií, které se zabývají dynamickými modely kinematických systémů H-Bot a CoreXY. Cílem je prozkoumat chyby vznikající při systémech H-Bot a CoreXY a provést jejich porovnání pro následný výběr na implementaci.

### 1.3.1 H-Bot

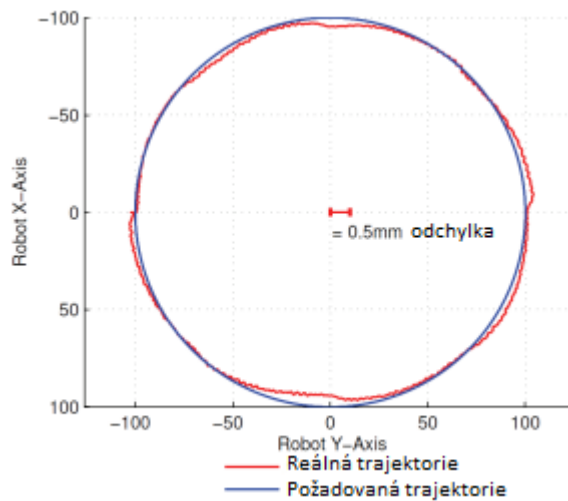
Studie při měření prototypu systému H-Bot pomocí kruhového testu získala výsledky zobrazené v obrázku č. 1.8. Z tohoto obrázku je zřejmé, že k největším chybám nastává při změně směru otáčení krokového motoru, kdy vlivem náhlého zastavení a změny směru otáčení vznikne zpětný ráz řemene. [15]

Těmto chybám lze předejít dopředným výpočtem momentu otáčení a tím silně omezit také efekt tření a setrvačnosti. Výsledek těchto úprav lze pozorovat na obrázku č. 1.9. [15]

V obrázcích č. 1.10 a č. 1.11 vidíme výsledek testu opakovatelnosti podle normy ISO 230-2. Z obrázků je patrné, že pomocí tohoto systému jsme schopni docílit dobré opakovatelnosti. [15]



Obr. 1.8: Výsledky kruhového testu pro prototyp H-Bot kinematiky [15]

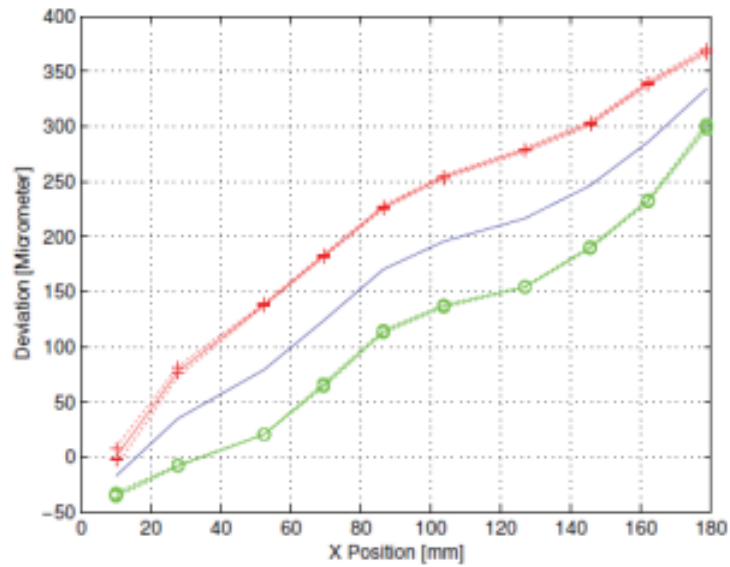


Obr. 1.9: Výsledky kompenzovaného kruhového testu pro prototyp H-Bot kinematiky [15]

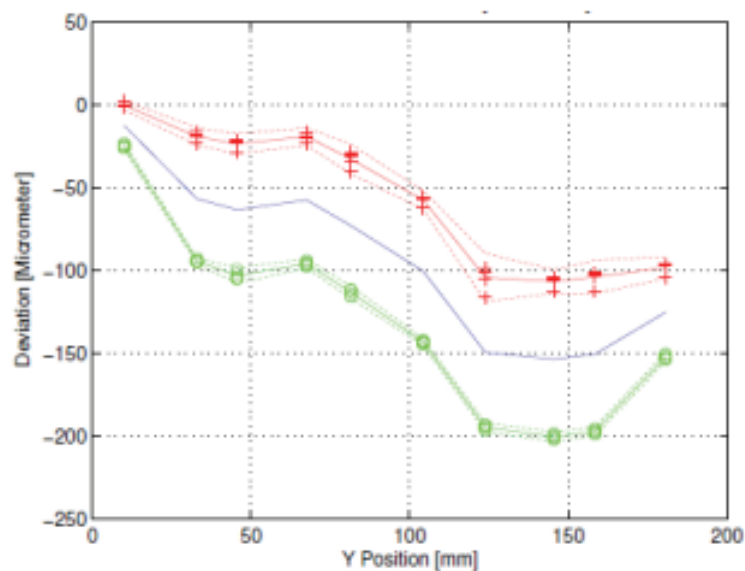
Na těchto obrázcích studie zpracovala výsledky několika opakovaných měření. Jednotlivé měření nejsou přesnou kopií požadované trajektorie (modrá křivka), avšak při stejném nastavení (rozdělení na červenou a zelenou křivku) dosahují velice podobných výsledků. [15]

### 1.3.2 CoreXY

Studie prováděla experimentální měření na provizorním provedení systému a výsledky sloužily pouze jako základ pro porovnání se simulovaným měřením. V simulovaných i experimentálních výsledcích, kdy koncový bod kopíroval hladkou křivku

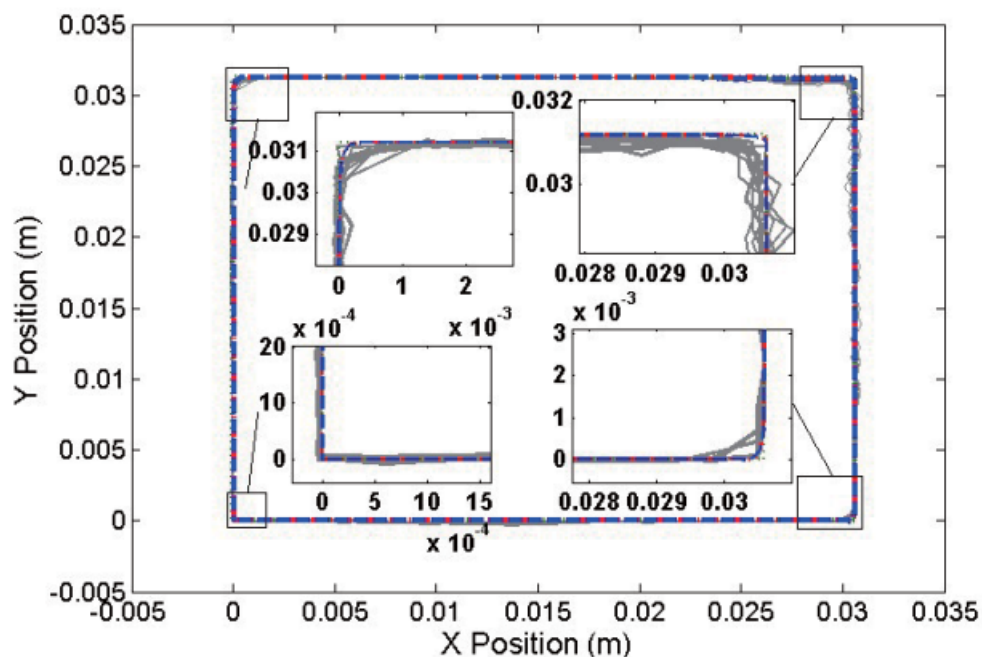


Obr. 1.10: Výsledky polohování ve směru osy X podle normy ISO 230-2 [15]



Obr. 1.11: Výsledky polohování ve směru osy Y podle normy ISO 230-2 [15]

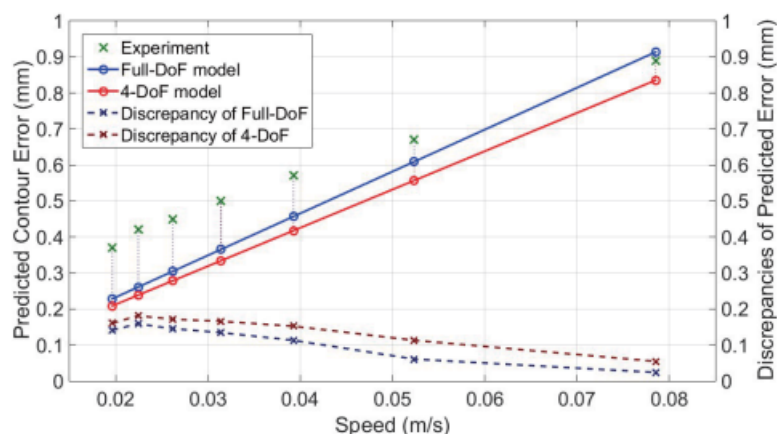
(např. rovná čára nebo kruh), studie nevyozorovala žádnou pozorovatelnou odchylku. Při ostrých zatáčkách koncový bod není vždy schopen přesně kopírovat požadovanou trajektorii (můžeme pozorovat na obrázku č. 1.12). Ve výsledku budou rohy reálné trajektorie lehce zakulaceny. [14]



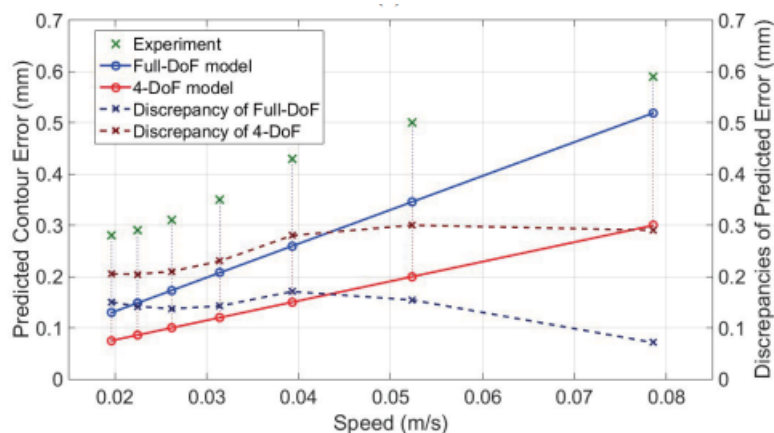
Obr. 1.12: Porovnání trajektorie v porovnání experimentu a simulace [14]

V tomto obrázku odpovídá šedá trajektorie reálnému experimentu, zelená trajektorie ideálnímu případu a červená a modrá trajektorie odpovídají simulacím se všemi stupni volnosti. [14]

Velikost chyby trajektorie v závislosti na různých rychlostech je zpracována v obrázcích č. 1.13 a č. 1.14. Z těchto obrázků je zřejmé, že velikost chyby trajektorie lineárně koreluje s rychlostí. [14]



Obr. 1.13: Velikost chyby trajektorie oproti požadované trajektorii v závislosti na rychlosti při pravoúhlém zatačení, z X do Y [14]



Obr. 1.14: Velikost chyby trajektorie oproti požadované trajektorii v závislosti na rychlosti při pravoúhlém zatačení, z Y do X [14]

V těchto obrázcích odpovídají zelené body chybě reálného experimentu, plná čára červená a modrá chybě simulace a čárkovaná čára červená a modrá rozporu simulace a reálného experimentu. [14]

### 1.3.3 Shrnutí

Obě studie se zabývaly problematikou chyby trajektorie vznikající oproti požadované trajektorii. Přestože každá ze studií se částečně zaměřila na jiný aspekt odklonění od trajektorie, jsme schopni relativně dobře pozorovat vzniklé chyby.

I když první studie zabývající se kinematikou H-Botu nezapočítávala vlivy rychlosti pohybu na chybu trajektorie, jsme pomocí výsledků kinematiky CoreXY schopni odvodit, že vlivy rychlostí by byly s největší pravděpodobností větší kvůli racking efektu. Práce sama navrhuje jisté optimalizace, jak získat přesnější trajektorii.

Ve druhé studii analyzující kinematiku CoreXY vidíme, že rychlost pohybu má jistý vliv na chybu trajektorie při vykonávání pravoúhlého zatočení, zatímco na pohyb po přímce nemá rychlost žádný vliv.

## 2 Vlastní návrh modelu 3D tiskárny

V této kapitole práce se zabývám návrhem 3D tiskárny. Protože pracuji již s existující tiskárnou, tak беру v potaz implementované prvky a upravuji je podle požadavků vedoucího práce.

Tiskárna by ideálně měla být rychlá a schopná produkovat kvalitní výtisky. Použité součástky by měly být co nejvíce standardizované a součástky, pro které bude nutno využít vlastního návrhu, by měly být jednoduché, aby bylo možno je vyrobit z hliníku. V neposlední řadě musí být tiskárna uzavíratelná.

Pro splnění těchto požadavků jsem se po konzultaci s vedoucím rozhodl provést kompletní návrh tiskárny s ponecháním rámu, protože dosavadní návrh zasahoval do rámu tiskárny, a to by zapříčinilo nemožnost uzavření.

### 2.1 Výběr vhodných technologií

V této části práce využívám své rešerše k výběru vhodných technologií pro následný návrh 3D tiskárny. Hlavní zaměření je na kinematické systémy os X a Y.

#### 2.1.1 Výběr kinematiky os X a Y

Jak bylo již zmíněno, tiskárna má být rychlá a měla by kvalitně tisknout.

U tradiční kartézské kinematiky je jeden motor v pohybu, což zapříčiňuje vyšší hmotnost nosníku, a proto nemůže dosahovat vysokých rychlostí pohybu. Dále při nevhodné implementaci dochází k racking efektu, a to zaviňuje horší kvalitu tisku. Implementace společnosti Ultimaker by eliminovala problém s hmotností, avšak stále bychom nedosahovali rychlostí jako u ostatních systémů.

H-Bot dosahuje vysokých rychlostí, avšak velice trpí racking efektem, kterého by se šlo zbavit pouze dokonale pevnou konstrukcí rámu a nosníku, proto není využívání vysokých rychlostí možné zároveň s uchováním kvality výtisku.

CoreXY dosahuje stejných rychlostí jako H-Bot, ale bez vlivu racking efektu, proto je pro naši aplikaci nejvhodnějším kinematickým systémem.

#### Modifikace CoreXY

Protože vývoj 3D tiskáren je převážně *open-source*, tak vznikají různé modifikace již existujících systémů. V principu CoreXY dochází ke křížení obou pásů, což je jedním z hlavních bodů různých modifikací. Komunita RepRap (hlavní komunita vývoje open-source 3D tiskáren) rozděluje také modifikace podle stylu pohybu v ose Z, proto vzniklé modifikace mohou využívat stejný systém pohybu v osách X a Y a mít různé názvy, avšak pro toto rozdělení nebudeme brát pohyb osy Z v potaz.

**C-Bot, D-Bot** využívají totožné modifikace, kdy nedochází ke křížení řemenů, liší se pouze umístěním vedoucích hřídelí [18] [19].

**Voron** je open-source projekt, který se snaží docílit bezkompromisně nejlepší tiskárny. V této modifikaci řeší křížení pásů a mění pozici motorů, které zajišťují lehce jiné vedení řemenů oproti jiným tiskárnám. U jednotlivých verzí této tiskárny vznikají různé deviace, ale principiálně jsou totožné. Tento styl tiskárny sloužil jako hlavní zdroj inspirace při vlastním návrhu. [20]

**Jubilee tiskárna** je velmi podobná již předešlým tiskárnám, sloužila hlavně jako inspirace při řešení umístění kolejnič [21].

### 2.1.2 Výběr podávání materiálu

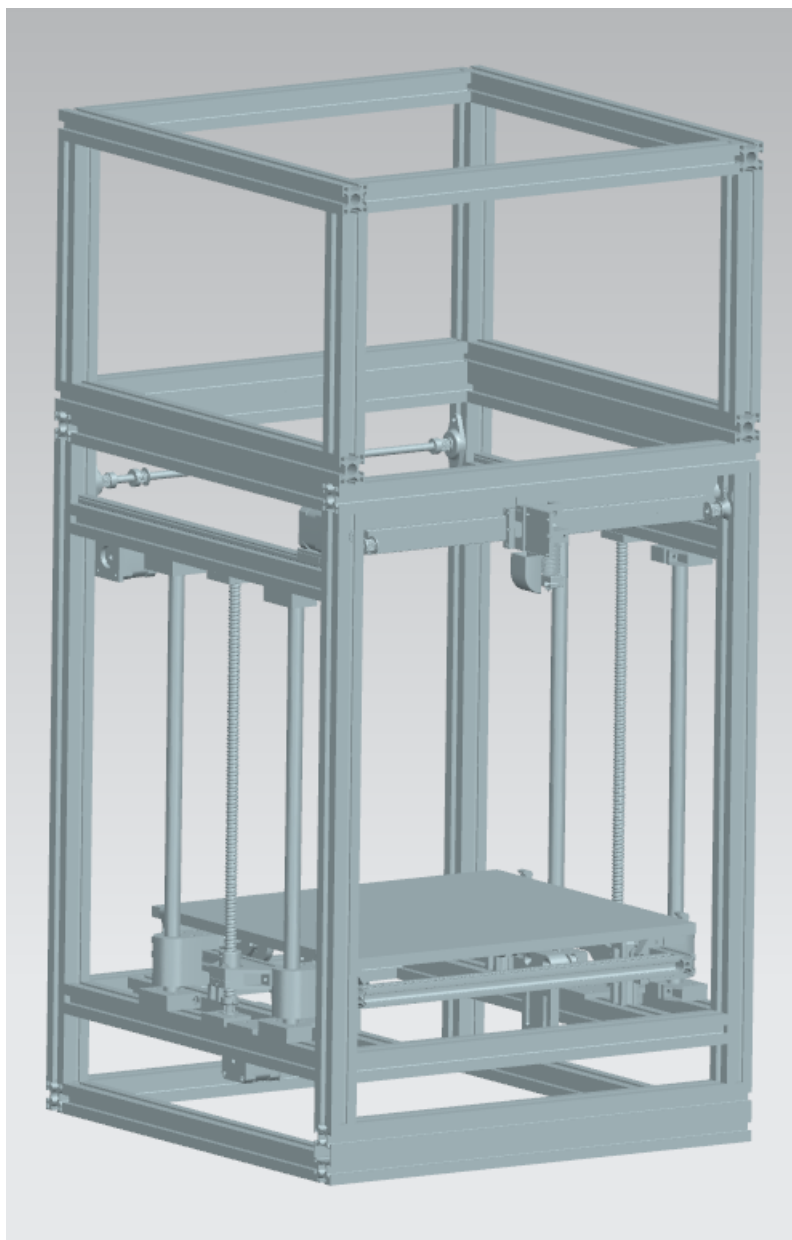
Při výběru podavače filamentu byl hlavní cíl uchování požadavků na tiskárnu. Protože přímý systém výrazně zvyšuje hmotnost tiskové hlavičky, je vcelku nevhodný pro tuto aplikaci. Zvolením bowden systému lze docílit nízké hmotnosti tiskové hlavičky, což je velmi vhodné pro vybraný kinematický systém, protože CoreXY z tohoto benefituje. Jedinou nevýhodou je pomalejší odezva a nemožnost využití určitých materiálů, ale to by nemělo způsobovat komplikace.

### 2.1.3 Shrnutí

Oproti již postavené tiskárně se při svém návrhu hlavně liším změnou kinematického systému, protože na původní tiskárně je implementován kartézský systém, který nahradím systémem CoreXY. Systém podávání materiálu ponechávám bowden, avšak při cílení na kompletní uzavření tiskárny budu muset změnit umístění. Uzavření tiskárny zapříčiní ustálení teploty během tisku (také nedochází ke konstantnímu úniku výparů z plastů), ale celková teplota v uzavřené oblasti bude zvýšená, což není vhodné pro některé materiály. Nejvhodnější materiály pro tisk s touto tiskárnou budou ABS (nebo jeho varianty), ASA, PC a Nylon (viz obrázek 1.2).

## 2.2 Návrh

Návrh 3D tiskárny jsem prováděl podle vybraných technologií po dohodě s vedoucím v programu Siemens NX. Protože předchozí modely byly dělány v jiných programech, mohly být pouze přemístovány, ale nemohl jsem upravovat jejich parametry. Proto jsem při návrhu postupně přemodeloval veškeré části do systému NX. Při hledání standardních komponent jsem využíval různých prodejců a v některých případech modely přesně neodpovídají vybraným komponentům, proto jsme použil jejich nejbližší náhradu.



Obr. 2.1: Původní návrh tiskárny

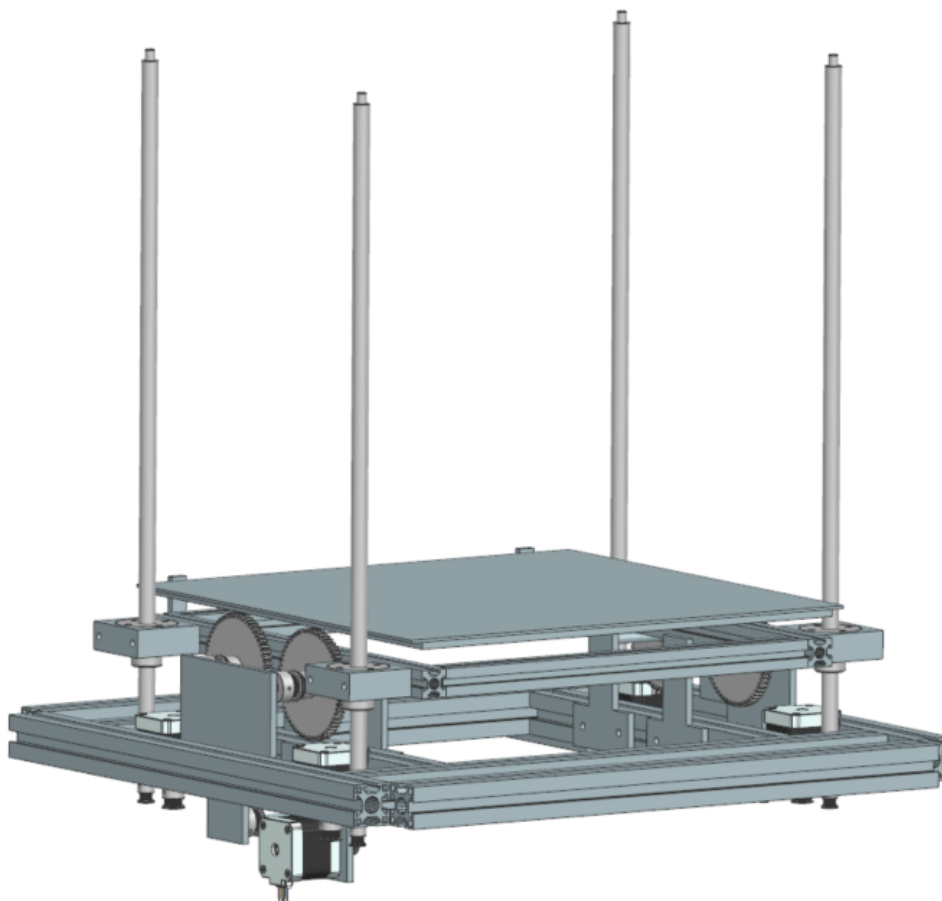
### 2.2.1 Rám

Rám 3D tiskárny musel zůstat 500x500x1000 mm podle předchozího návrhu. Při modelování rámu jsem se co nejvíce držel původního návrhu, aby při realizaci nevznikly komplikace s připojením dalších tiskáren. Vlastní úpravy rámu souvisely s uchycením tiskové plochy a nosníku tiskové hlavičky.

## 2.2.2 Tisková plocha

Při návrhu tiskové plochy jsem byl schopen zachovat jisté aspekty původní tiskárny - rozměry profilů rámu uchycujících tiskovou plochu zůstaly převážně stejné.

Oproti původnímu návrhu jsem musel výrazně zmenšit rozměry tiskové plochy, abych splnil požadavek na úplné uzavření tiskárny. Dále jsem se po dohodě s vedoucím rozhodl změnit styl pohybu v ose Z, kdy místo dvou krokových motorů použiji čtyři (možnost automatického vyrovnání tiskové plochy). K pohybu využívám trapézových šroubů, které jsou výrazně levnější než kuličkové šrouby (původní tiskárna využívala dvou kuličkových šroubů), ale měly by pro využití v tiskárně být dostačující.



Obr. 2.2: Tisková plocha s automatickým výložníkem

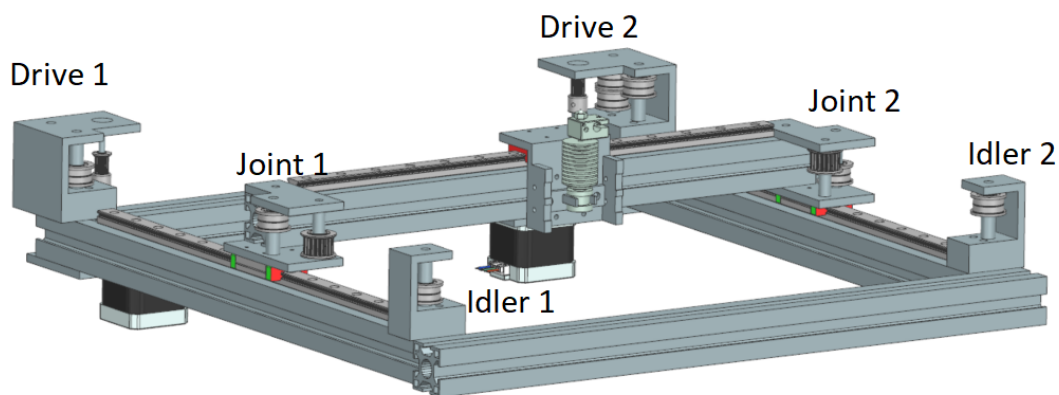
## Automatický výložník

Dalším požadavkem vedoucího práce byla úprava automatického výložníku. Původní návrh využíval velké množství tištěných součástí - nerobustní uchycení a nebyl schopen výrazně nadzvednout tiskovou plochu. Při svém návrhu jsem použil uchycení osy mezi dvě ložiska, což zajistí vysokou robustnost a malé řemenice (sloužící k nadzvednutí tiskové plochy) jsem nahradil výrazně většími řemenicemi, díky čemuž je možné nadzvednout tiskovou plochu značně výše.

### 2.2.3 Nosník tiskové hlavy

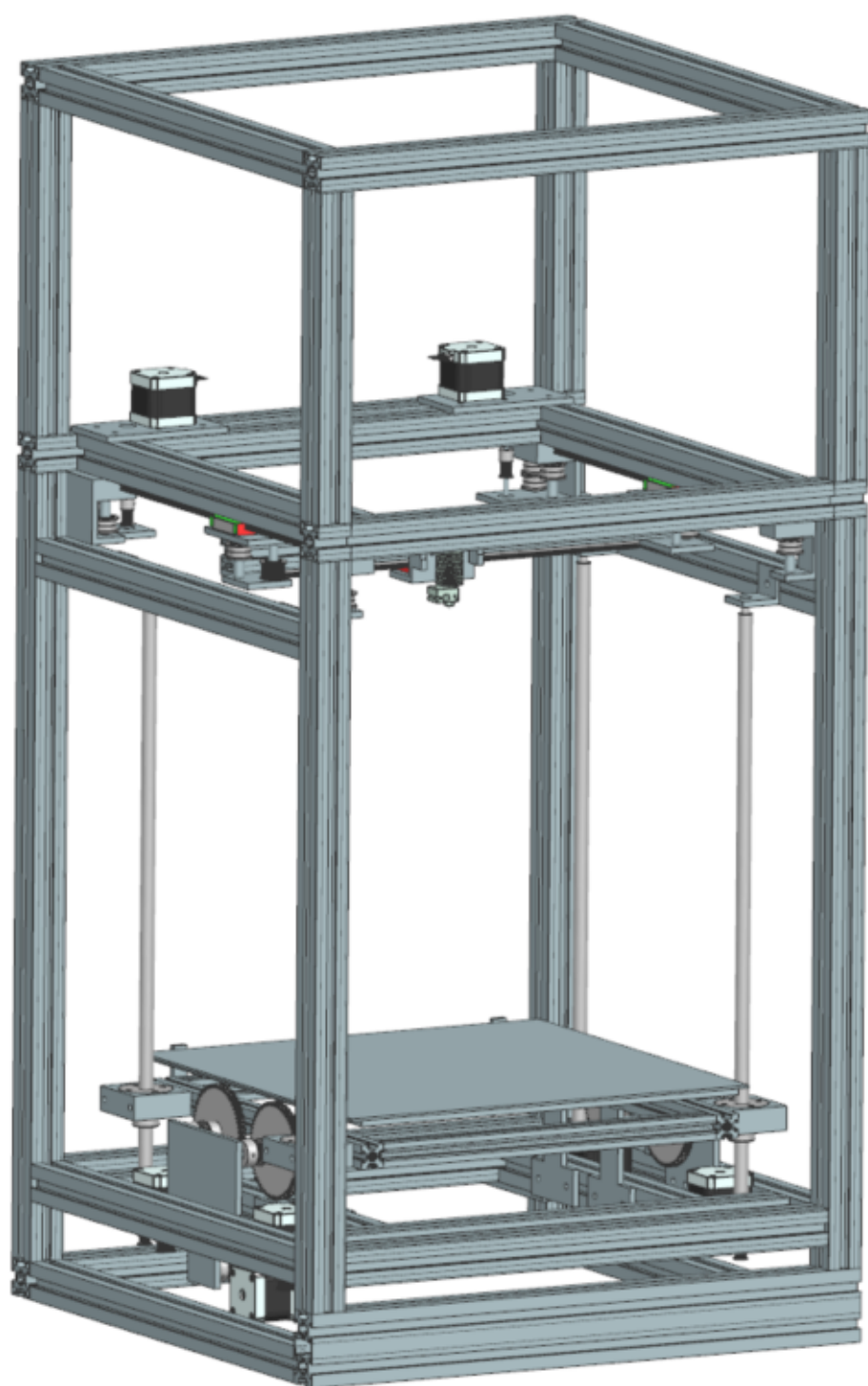
Protože původní tiskárna využívala kartézskou kinematiku na pohyb v osách X a Y, musel jsem při implementaci CoreXY kinematiky provést kompletně nový návrh.

Podobně jako u tiskové plochy došlo ke zmenšení rozměrů. Při implementaci CoreXY kinematiky jsem se inspiroval uspořádáním tiskárny Voron a Jubilee. Základ této kinematiky tvoří tzv. *drive* - kontrolní jednotka s krokovým motorem, *joint* - usměrňuje pohyb nosníku a mění směr řemenů a *idler* - slouží ke změně směru řemenů (jednotlivé části je možné vidět na obrázku č. 2.3). Lineární kolejnice jsou umístěny ze spodní strany profilů, aby v uzavřené tiskárně nedocházelo k jejich zanášení nečistotami.



Obr. 2.3: Nosník tiskové hlavy

Dále k uchycení hotendu využíváme univerzálního nástavce, který slouží k uchycení řemenů a kapacitního snímače. Díky tomu lze jednoduše vyměnit extruder se zachováním napnutí řemenů a výškovou kalibrací snímače. Při návrhu pracuji s hotendem E3D V6, ale uchycení je možné poupravit na jakýkoliv jiný typ.



Obr. 2.4: Vlastní návrh CoreXY tiskárny

## 3 Výběr komponent

V této kapitole se zabývám výběrem vhodných mechanických a elektrických komponent pro tiskárnu. Dále zde popisuji zachované části a vyměněné části oproti původnímu návrhu z bakalářské práce [22].

### 3.1 Mechanické komponenty

Protože původní tiskárna ve svém uchycení zasahovala do svého rámu, musel jsem navrhnout jiný způsob uchycení, proto se můj návrh skládá z více hliníkových profilů, které bylo nutné pořídit.

Aby nebyl nový návrh příliš cenově náročný, tak jsme se s vedoucím práce dohodli na úpravě některých stávajících komponent. Lineární kolejnice pro pohyb v ose X a Y bylo nutné zkrátit a deska mezi tiskovou plochou a vyhřívací podložkou byla zmenšena.

Pro pohyb v ose XY jsem vybíral ložiska a řemenice pro řemen velikosti 10 mm, zatímco u ostatních částí (výložník, pohyb Z osy, ...) jsem vybíral pro velikost řemene 6 mm.

Přestože jsou díly navrženy tak, aby byly vyrobitelné z hliníku, bylo výrazně jednodušší a levnější vytisknout všechny části z plastu, abych mohl ověřit funkčnost návrhu a popřípadě navrhnout potřebnou úpravu. Veškeré díly jsem vytiskl z PETG, protože má vyšší pevnost a teplotní odolnost oproti PLA a tiskne se s ní lépe než s ABS.

#### 3.1.1 Poměry řemenic

Jednou z částí mého návrhu bylo využití převodů mezi motory a prvky, které řídí. Toto řešení jsem zvolil z několika důvodů, mezi něž patří menší nápor na motor (hlavně při řízení os X a Y, kdy jsou řemeny značně napnuté a působily by na motor velkou silou), změna poměru mezi řemenicemi (změna rychlosti a momentu síly) a jednodušší ovládání.

##### **V ose X a Y**

K prvnímu převodu dochází mezi motorem a pohyblivou osou, která zajišťuje pohyb řemenu. Zde jsem zvolil obě řemenice 2GT 20T (2GT - vzdálenost středů zubů je 2 mm, 20T - řemenice má 20 zubů) a slouží pouze ke zmírnění tlaku na motor napínáním řemene. Mezi těmito řemenicemi používám řemen šířky 6 mm.

$$\text{Gear ratio } m_{XY} = T1/T2 = 20/20 = 1 \quad (3.1)$$

kde Gear ratio  $m_{XY}$  - poměr řemenic [-], T1 - počet zubů řízené řemenice [-], T2 - počet zubů řemenice motoru [-].

Pro pohyb v ose X a Y dochází otáčením již zmíněné osy řízené motory. Zde dochází ke změně řemene z 6 mm na 10 mm a řízená řemenice je 2GT 16T.

$$\text{Gear ratio } 1 = T1/T2 = 16/20 = 0.8 \quad (3.2)$$

kde Gear ratio 1 - výsledný poměr řemenic [-], T1 - počet zubů řízené řemenice [-], T2 - počet zubů řídicí řemenice [-].

Pro gear ratio  $< 1$  dochází ke zvýšení rychlosti řízené části, díky tomu můžeme dosáhnout trochu vyšších maximálních rychlostí. Dosazením do vzorce 1.12 získáme teoretickou maximální rychlost:

$$v_{\max XY} = \frac{v_{\text{drive}}}{\text{gear ratio } 1} = 1.25 * r\omega_{\max} \quad (3.3)$$

kde  $v_{\max XY}$  - maximální lineární rychlost [ $m * s^{-1}$ ],  $v_{\text{drive}}$  - lineární rychlost motoru [ $m * s^{-1}$ ], gear ratio 1 - poměr řemenic [-], r - poloměr řemenice motoru [m],  $\omega_{\max}$  - maximální rychlost otáčení motoru [ $rad * s^{-1}$ ].

Reálná maximální rychlost se bude od této vypočítané hodnoty lišit hlavně z důvodů, že je nutné dbát na chlazení tištěných prvků, celkové vibrace tiskárny a další jevy, které by měly za následek špatný tisk. Z těchto důvodů nebude v současnosti využíváno této maximální rychlosti.

## **V ose Z**

V ose Z dochází k převodu mezi motory a trapézovými šrouby pro pohyb tiskové plochy v Z ose. V tomto případě již řemenice nemají stejný počet zubů. Řemenice na motoru je opět 2GT 20T, zatímco na šroubu je řemenice 2GT 40T.

$$\text{Gear ratio } 2 = T1/T2 = 40/20 = 2 \quad (3.4)$$

kde Gear ratio 2 - výsledný poměr řemenic [-], T1 - počet zubů řízené řemenice [-], T2 - počet zubů řemenice motoru [-].

Pro gear ratio  $> 1$  dochází ke snížení rychlosti pohybu, avšak docílíme vyššího točivého momentu. Trapézové šrouby jsem zvolil T8x8 (pitch = 2 mm, lead = 8 mm),

u kterých s jednou otočkou dojde k posunu o 8 mm. Protože je gear ratio 2 = 2, tak musí dojít ke dvěma otočkám krokového motoru, aby došlo k jedné otočce šroubu. Díky tomu docílím posunu tiskové plochy o 4 mm na jednu otáčku motoru, což by mělo umožnit vyšší kontrolu přesnosti v Z ose.

## U výložníku

Výložník je převážně řízený pomocí snímačů, avšak jeho program je nastavený na přesné otáčení motoru, proto je vhodné vypočítat gear ratio pro určení počtu otáček motoru pro požadovanou vzdálenost vysunutí.

Mezi motorem a hlavní osou spojující obě strany výložníku se nacházejí řemenice 2GT 20T, takže gear ratio = gear ratio mXY (ze vzorce 3.1).

Z řídicí osy řemenic 2GT 20T ovládám dvě řemenice 2GT 120T, které slouží k posunu tiskové plochy při vykládání.

$$\text{Gear ratio 3} = T1/T2 = 120/20 = 6 \quad (3.5)$$

kde Gear ratio 3 - výsledný poměr řemenic [-], T1 - počet zubů řízené řemenice [-], T2 - počet zubů řídicí řemenice [-].

$$v_{\max} = \frac{v_{\text{drive}}}{\text{gear ratio 3}} = \frac{1}{6} * r\omega_{\max} \quad (3.6)$$

kde  $v_{\max}$  - maximální lineární rychlost výložníku [ $m * s^{-1}$ ],  $v_{\text{drive}}$  - lineární rychlost motoru [ $m * s^{-1}$ ], gear ratio 3 - poměr řemenic [-], r - poloměr řemenice motoru [m],  $\omega_{\max}$  - maximální rychlost otáčení motoru [ $rad * s^{-1}$ ].

### 3.1.2 Výpočet délky řemenů

Protože provádím převody z motorů pomocí řemenů, musím určit správnou délku uzavřeného řemenu, aby byl dostatečně natažený a při řízení nedocházelo k vynechávání zubů. Abych byl schopný dostatečně natáhnout řemeny, upravil jsem uchycení motorů tak, aby bylo možné s nimi pohybovat v rozmezí 2 mm. Po nasazení řemene posunu motorem do správné polohy a utáhnu jej na místě, aby nedocházelo k povolování.

## V ose X a Y

V tomto případě potřebuji vypočítat pouze jednu délku řemene, protože je pro oba motory stejná. Výpočet se mi výrazně zjedodušil díky tomu, že je gear ratio mXY = 1

(ze vzorce 3.1), a proto nemusím řešit, jak velké části obvodu řemenice se bude řemen dotýkat (v tomto případě bude vždy polovina obvodu).

$$BeltXY = \frac{\pi * d_1}{2} + \frac{\pi * d_2}{2} + 2 * C = \pi * d + 2 * C \quad (3.7)$$

$$BeltXY = \pi * 12 + 62 = 99.7 \text{ mm}$$

kde BeltXY - délka řemene [mm], d - průměr řemenic [mm], C - vzdálenost středů řemenic [mm].

Z tohoto výpočtu je zřejmé, že potřebuji řemen délky 100 mm.

### V ose Z

Opět v ose Z jsou všechny řemeny stejné délky, avšak v tomto případě již musím započítat také část obvodu jednotlivých řemenic, kterou bude řemen obepínat.

$$l_1 = (\pi - 2\alpha)r_1 \quad (3.8)$$

$$l_2 = (\pi + 2\alpha)r_2 \quad (3.9)$$

kde  $l_1$  - délka řemene kolem menší řemenice [mm],  $l_2$  - délka řemene kolem větší řemenice [mm],  $r_1$  - poloměr menší řemenice [mm],  $r_2$  - poloměr větší řemenice [mm],  $\alpha$  - úhel dotyku řemenice [°].

$$BeltZ = (r_2 + r_1)\pi + 2(r_2 - r_1)\arcsin\left(\frac{r_2 - r_1}{C}\right) + 2C\sqrt{1 - \left(\frac{r_2 - r_1}{C}\right)^2} \quad (3.10)$$

$$BeltZ = (12.5 + 6)\pi + 2(12.5 - 6)\arcsin\left(\frac{12.5 - 6}{34}\right) + 68\sqrt{1 - \left(\frac{12.5 - 6}{34}\right)^2}$$

$$BeltZ = 127.4 \text{ mm}$$

kde BeltZ - délka řemene [mm], C - vzdálenost středů řemenic [mm].

Ideální délka řemene mi z výpočtu vyšla 127.4 mm, proto jsem zvolil řemen 130 mm, který budu schopný natáhnout díky úpravě zmíněné na začátku sekce 3.1.2.

## U výložníku

U výložníku musím provést výpočet délky řídicího řemene a řemene samotného výložníku. Pro první výpočet využiji rovnice 3.7, avšak pro druhý musím započítat třetí řemenici a proto je nutné využít upraveného vzorce 3.10.

$$BeltM = \pi * 12 + 86.5 = 124.2 \text{ mm}$$

kde BeltM - délka řídicího řemene pro výložník [mm].

Ideální délka řemene by měla být 124.2 mm, proto je možné použít buď řemen délky 124 mm nebo 126 mm.

Pro výpočet používám již odvozený vzorec:

$$\begin{aligned} BeltU = & \sqrt{C_1^2 - (r_2 - r_3)^2} + \sqrt{C_2^2 - (r_3 - r_1)^2} + \sqrt{C_3^2 - (r_1 - r_2)^2} + \\ & + (2\pi - \arccos(\frac{r_1 - r_2}{C_3}) - \arccos(\frac{r_1 - r_3}{C_2}) - \arccos(\frac{C_2^2 + C_3^2 - C_1^2}{2 * C_2 * C_3})) * r_1 + \\ & + (2\pi - \arccos(\frac{r_2 - r_3}{C_1}) - \arccos(\frac{r_2 - r_1}{C_3}) - \arccos(\frac{C_3^2 + C_1^2 - C_2^2}{2 * C_1 * C_3})) * r_2 + \\ & + (2\pi - \arccos(\frac{r_3 - r_1}{C_2}) - \arccos(\frac{r_3 - r_2}{C_1}) - \arccos(\frac{C_1^2 + C_2^2 - C_3^2}{2 * C_1 * C_2})) * r_3 \end{aligned} \quad (3.11)$$

kde BeltU - délka řemene [mm],  $r_1$  - poloměr malé řemenice [mm],  $r_2$  - poloměr první velké řemenice [mm],  $r_3$  - poloměr druhé velké řemenice [mm],  $C_1$  - vzdálenost středů velkých řemenic [mm],  $C_2$  - vzdálenost středů malé a první velké řemenice [mm],  $C_3$  - vzdálenost středů malé a druhé velké řemenice [mm].

Po dosazení získáme výpočet:

$$\begin{aligned} BeltU = & 94.5 + \sqrt{116^2 - (38.45 - 6)^2} + \sqrt{116^2 - (6 - 38.45)^2} + \\ & + (2\pi - \arccos(\frac{6 - 38.45}{116}) - \arccos(\frac{6 - 38.45}{116}) - \arccos(\frac{116^2 + 116^2 - 94.5^2}{2 * 116 * 116})) * 6 + \\ & + (2\pi - \arccos(0) - \arccos(\frac{38.45 - 6}{116}) - \arccos(\frac{94.5^2}{2 * 94.5 * 116})) * 38.45 + \\ & + (2\pi - \arccos(\frac{38.45 - 6}{116}) - \arccos(0) - \arccos(\frac{94.5^2}{2 * 94.5 * 116})) * 38.45 \\ & BeltU = 502.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Podle výpočtu jsem pro výložník vybral řemen 500 mm.

## 3.2 Elektrické komponenty

Na požadavek vedoucího jsem vynaložil snahu ponechat co nejvíce původních elektrických komponent, protože původní elektrifikace je dobrá a dojde ke snížení nákladů. Při výběru jsem se hlavně musel zaměřit na výběr řídicí jednotky, protože oproti původní tiskárně má můj návrh více motorů.

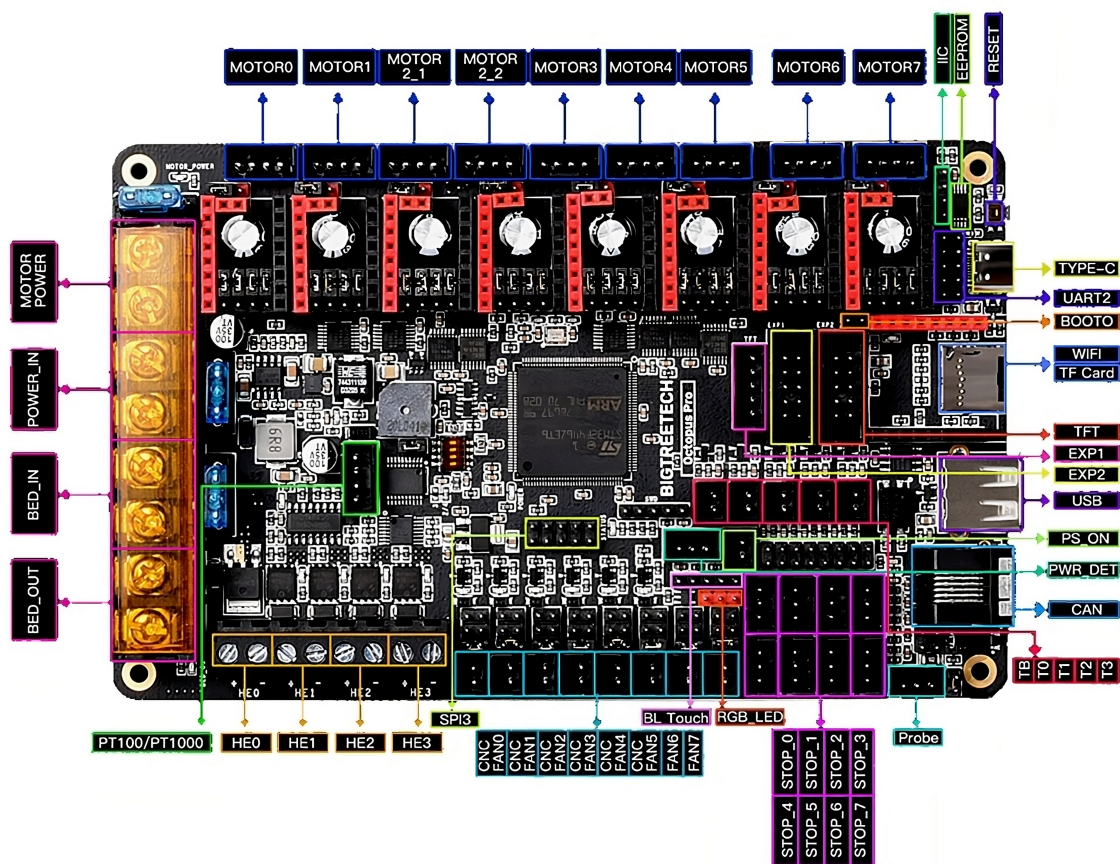
### 3.2.1 Řídicí deska

Tiskárna původně používala řídicí jednotku BIGTREETECH SKR v1.3. Tato deska umožňuje řízení pěti motorů, což však pro můj návrh není dostačující.

K řízení tiskárny jsem proto vybral desku BIGTREETECH Octopus Pro V1.0 F429, která je osazena 32-bit procesorem ARM cortex-M4. Deska je schopná ovládat až osm motorů, takže je dostačující pro můj návrh. Tato deska je navíc vybavena mnohými prvky, které by bylo možné využít při dalších vylepšeních tiskárny, jako například více-materiálový tisk. Mezi další prvky patří vyhřívání až čtyř hotendů, šest říditelných a dva neříditelné ventilátory, možnost připojení modulu WiFi nebo modulu pro opětovné nastartování tisku při výpadku proudu.

Drivery krokových motorů jsem z cenových důvodů částečně ponechal původní TMC2208-UART a pro zbylé motory jsem vybral drivery TMC2209. V těchto dvou driverech není výrazný rozdíl, oba druhy jsou schopny mikrokrokování na 256 mikrokroků a podpory módu UART, drivery TMC2209 mají navíc jisté funkce, kterých při svém řešení nevyužiji, ale pro budoucí úpravy by mohly být vhodné.

Při řízení motorů pomocí UART je možné implementovat limity os bez koncových snímačů, kdy driver při dosažení fyzického limitu pohybu detekuje ztrátu kroků motoru.



Obr. 3.1: Diagram řídicí desky [23]

### 3.2.2 Krokové motory

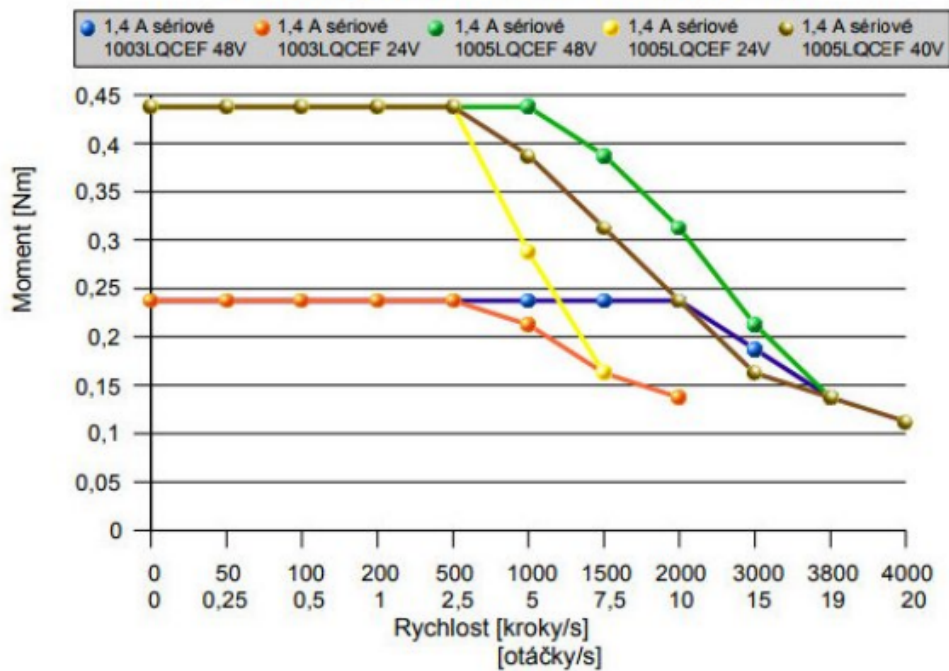
Oproti řídicí jednotce jsem byl schopen ponechat motory z původní tiskárny a dva motory stejného typu mi dodal vedoucí. Na původní tiskárně byly použity dvoufázové krokové motory NEMA SX17-1005LQCEF. Motory jsou napájeny 24 V, což odpovídá žlutému průběhu na obrázku č. 3.2, a mají délku kroku  $1.8^\circ$ .

U 3D tiskáren se standardně používá zrychlení krokových motorů  $a = 3 \text{ m} * \text{s}^{-2}$ , proto budu tuto hodnotu používat pro své veškeré výpočty.

#### V ose X a Y

V nejhorším případě pohybuje celou konstrukcí pouze jeden motor (při diagonálním pohybu), proto zatížení motoru budu počítat pouze pro jeden motor. Odhadovaná hmotnost hliníkového profilu je okolo 0.4 kg, hotend 0.1 kg a ostatní 0.2-0.3 kg, takže celková hmotnost pohyblivé konstrukce je okolo  $m = 0.7\text{-}0.8 \text{ kg}$ , ale výpočty budu provádět s rezervou (možné použití těžšího hotendu, ...) a stanovím  $m = 1 \text{ kg}$ .

Momentová charakteristika motoru SX17-1003LQCEF,  
 SX17-1005LQCEF s CD30x, CD30M (24; 48 VDC);  
 SX17-1005LQCEF s SD14RE (40 VDC)



Obr. 3.2: Momentová charakteristika motoru SX17-1005LQCEF [22]

$$F = m * a = 1 * 3 = 3 \text{ N} \quad (3.12)$$

kde  $F$  - nutná síla k pohybu [N],  $m$  - hmotnost pohyblivé konstrukce [kg],  $a$  - zrychlení [ $m * s^{-2}$ ].

Ze síly  $F$  jsem schopný vypočítat moment síly:

$$M = F * r = 3 * 0.006 = 0.018 \text{ Nm} \quad (3.13)$$

kde  $M$  - nutný moment síly krokového motoru [Nm],  $r$  - poloměr řemenice motoru [m].

Porovnáním vypočítané hodnoty s obrázkem č. 3.2 jsem ověřil, že krokové motory jsou dostačující k pohybu v osách X a Y. Dále jde z obrázku vidět, že krokové motory jsou schopné dosáhnout potřebného momentu přibližně do 7 otáček za sekundu. Z toho jsem schopný určit maximální rychlost pohybu:

$$\omega = 2 * \pi * n = 2 * \pi * 7 = 44 \text{ rad} * \text{s}^{-1} \quad (3.14)$$

kde  $\omega$ - rychlost otáčení motoru [ $\text{rad} * \text{s}^{-1}$ ],  $n$  - otáčky za vteřinu [otáčka/s].

Z rovnice 3.3 jsem schopný určit maximální lineární rychlost:

$$v_{\max XY} = 1.25 * 0.006 * 44 = 0.33 \text{ m} * \text{s}^{-1}$$

Mými výpočty vyšla maximální lineární rychlost v ose X nebo Y 330 mm/s. Tato hodnota je však bez započítání tření a hodnota 7 otáček za sekundu je již na hranici schopného pohybu krokového motoru. Při normálním tisku je také nutné počítat s chlazením tištěného materiálu.

### 3.2.3 Kapacitní snímač

K detekci vzdálenosti tiskové plochy od hotendu použiji kapacitní snímač CM18-3005PA. Tento snímač dodal vedoucí, protože jej již měl. Jedná se o PNP NO snímač s detekční vzdáleností 0 až 5 mm. Snímač je schopný pracovat v teplotním rozmezí -25 až +75 °C.



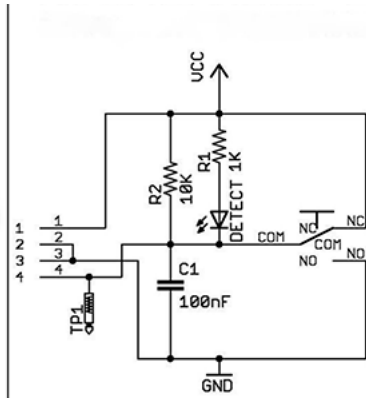
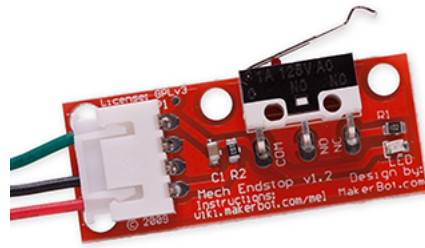
Obr. 3.3: Kapacitní snímač CM18-3005 [24]

Kapacitní snímač bude umístěn na pohyblivém nosníku spolu s hotendem. Díky tomu budu schopný implementovat automatické vyrovnání první vrstvy tisku.

### 3.2.4 Koncové snímače

Přestože použité drivery umožňují určení rozmezí tiskárny pomocí detekce vynechaných kroků motoru, je vhodnější nastavit limity tiskárny pomocí koncových snímačů. Použitím snímačů zabráním náporu na díly, který by vznikal bez senzorů.

Pro tiskárnu použiji původní mechanické spínače s RC filtrem. Tato filtrace omezuje rušení na snímači, které by způsobovalo špatnou detekci sepnutí. [22]



Obr. 3.4: Koncový snímač s RC filtrem [25]

### 3.2.5 Další komponenty

- Hotend E3D V6
- HeatBed
- SSR: DMWD SSR-25 DA
- Napájecí zdroj 230/24 V

## 4 Obslužný software

Pro funkci 3D tiskárny je nutné, aby na tiskárně pracoval obslužný firmware a dále je potřeba mít implementovaný profil tiskárny ve sliceru. Slicer je software, který převádí 3D model na jednotlivé příkazy pro tiskárnu (formou G-kódu), a proto musí mít přesně definované parametry tiskárny. Obslužný firmware dále pomocí G-kódu ovládá jednotlivé periferie tiskárny (motory, hotend, ...).

### 4.1 Klipper

Jako obslužný firmware jsem zvolil Klipper, což je open-source software, který je v dnešní době často používaný. Je vhodný pro vlastní návrhy tiskáren, protože lze snadno nastavit na požadovanou tiskárnu bez úprav samotného kódu. Klipper je možné provozovat na jakémkoliv zařízení, které pracuje na operačním systému Linux. Nejčastěji se u tiskáren instaluje na Raspberry Pi.

#### 4.1.1 Hlavní funkce

Klipper disponuje mnoha funkcemi, také je jednoduše modifikovatelný, což je pro 3D tiskárny velice vhodné. Jsou zde implementovány funkce, které značně usnadní práci s tiskárnou a vedou k lepší kvalitě tisku.

##### Ovládání krokových motorů s vysokou přesností

Klipper využívá výpočetního procesoru (např. Raspberry Pi) k výpočtu pohybů tiskárny. Jsou počítány přesné časy kroků motorů založené na fyzikálních principech akcelerace a strojové kinematiky. Tyto údaje jsou předávány mikrokontroléru, který vykonává požadované funkce v zadané časy. [26]

##### Podpora více mikrokontrolérů

Klipper je schopný synchronizovat hodinové cykly jednotlivých mikrokontrolérů. Při použití více mikrokontrolérů je například možné pomocí jednoho ovládat extruder, další ovládá topná tělesa a třetí zbytek tiskárny. [26]

##### Smooth Pressure Advance

Tento systém řeší tlak v hotendu, díky čemuž je schopný zabránit nechtěnému vytékání plastu a tím zlepšuje kvalitu tisku [26].

## Input Shaping

Redukuje vliv vibrací na kvalitu tisku, umožňuje vyšší tiskové rychlosti [26].

## Programovatelná makra

Příkazy G-kódu je možné definovat v nastavení tiskárny, pro vykonání těchto nových funkcí není nutné měnit kód Klipperu [26].

## Další funkce

- ovládání tiskárny přes webové rozhraní
- podpora standardních G-kódů z typických slicerů (Cura, PrusaSlicer, ...)
- podpora více extruderů
- automatické vyrovnání tiskové plochy

## 4.2 Implementace Klipperu

Jelikož Klipper nelze nainstalovat jako samostatný software, je nejprve nutné zvolit rozhraní, na kterém bude pracovat. Toto rozhraní pracuje na Raspberry Pi 3 model B+, které je pomocí USB kabelu připojeno k řídicí desce. Při tomto zapojení využívá tiskárna vyššího výkonu Raspberry Pi, které provádí veškeré výpočty a posílá řídicí desce příkazy na ovládání tiskárny.

Pro volbu rozhraní existují tři nejpoužívanější možnosti, a to jsou OctoPrint, Mainsail nebo Fluidd. Přestože všechny rozhraní mají své výhody, pro svůj návrh jsem zvolil OctoPrint, protože se jedná o velmi používaný software, který je oproti zbylým dvěma možnostem více univerzální a je pro něj možné vybrat různé dodatečné moduly.

Díky OctoPrintu jsem schopný využívat Wi-Fi pro komunikaci s Raspberry Pi, což značně usnadnilo další instalaci a také jsem schopný tiskárnu ovládat a monitorovat z počítače. Po instalaci OctoPrintu jsem nainstaloval Klipper, který bylo nutné nastavit pomocí konfiguračního souboru (*printer.cfg*) na přesné parametry tiskárny.

V konfiguračním souboru je nutné nastavit veškeré parametry tiskárny. U jednotlivých motorů je nutné vybrat vhodné piny ovládající parametry STEP, DIR a ENABLE, dále se zde nastavují limity jednotlivých os. Klipper podporuje možnost virtuálních koncových bodů, kdy na jedné straně je osa limitovaná koncovým spínačem a na druhé virtuálním koncem určeným vzdáleností. Mezi další nutné parametry krokových motorů patří počet kroků na otáčku, počet mikrokroků, rotační vzdálenost a gear ratio (vypočteno v kapitole 3.1.1).

Nutnou součástí konfiguračního souboru je také nastavený kinematický systém, což v mém případě je CoreXY. Dále se nastavují celkové parametry tiskárny, jako velikost tiskové plochy, maximální rychlost a akcelerace. Kalibrace PID regulátoru pro hotend je prováděna automaticky.

V další části je nutné provést kontrolu správného nastavení všech částí tiskárny (krokové motory, koncové spínače, ...). Tato kontrola se jednoduše provádí přes OctoPrint, kdy pro krokové motory posílám tiskárně příkaz na pohyb určitým směrem a kontroluji správnost provedení příkazu. V případě pohybu špatných motorů je nutné přenastavit piny jednotlivých motorů, aby odpovídaly zamýšlenému zapojení. Pokud dochází k pohybu správného motoru špatným směrem, je nutné směrový pin motoru negovat. Stejnou kontrolu provádím pro koncové spínače, kdy kontroluji správné mapování pinů a stav sepnutí. Správné zapojení termistorů lze pozorovat v OctoPrintu, který má graf sledující aktuální teploty z termistorů. Při správném zapojení termistorů jsem také schopný ověřit funkčnost zahřívání hotendu a heatbedu, kdy přes OctoPrint nastavím požadovanou teplotu a jsem schopný sledovat průběh v grafu.

**Ukázka mnou definovaných parametrů:**

Proměnná	Nastavení
STEP	PF13
DIR	PF12
ENABLE	!PF14
microsteps	32
rotation_distance	40
endstop_pin	PG6
position_max	300
homing_speed	50
gear_ratio	16:20

Tab. 4.1: Tabulka parametrů pro nastavení motoru

Proměnná	Nastavení
kinematics	corexy
max_velocity	200
max_accel	3000
max_z_velocity	20
max_z_accel	100

Tab. 4.2: Tabulka parametrů nastavení tiskárny

## 5 Reálné vyhotovení

V této kapitole řeším vyhotovení 3D tiskárny podle navrženého modelu. Při realizaci tiskárny jsem nejprve musel rozebrat původní tiskárnu, načež jsem sestavil novou tiskárnu a nakonec implementoval obslužný software (Klipper).

### 5.1 Sestavení

Při rozebírání tiskárny bylo nutné nejprve vyjmout veškeré původní prvky z rámu a poté jsem byl schopný předělat rám tak, aby odpovídal mému návrhu. Přestože byly elektrické komponenty převážně ponechány, bylo nutné pozměnit jejich rozpořazení a vytvořit nový prostor pro novou řídicí desku. Sestavení tiskárny jsem dále rozdělil na dvě hlavní části, kdy jsem tiskovou plochu a nosník os X a Y sestavil mimo rám tiskárny, které jsem následně vložil do rámu.

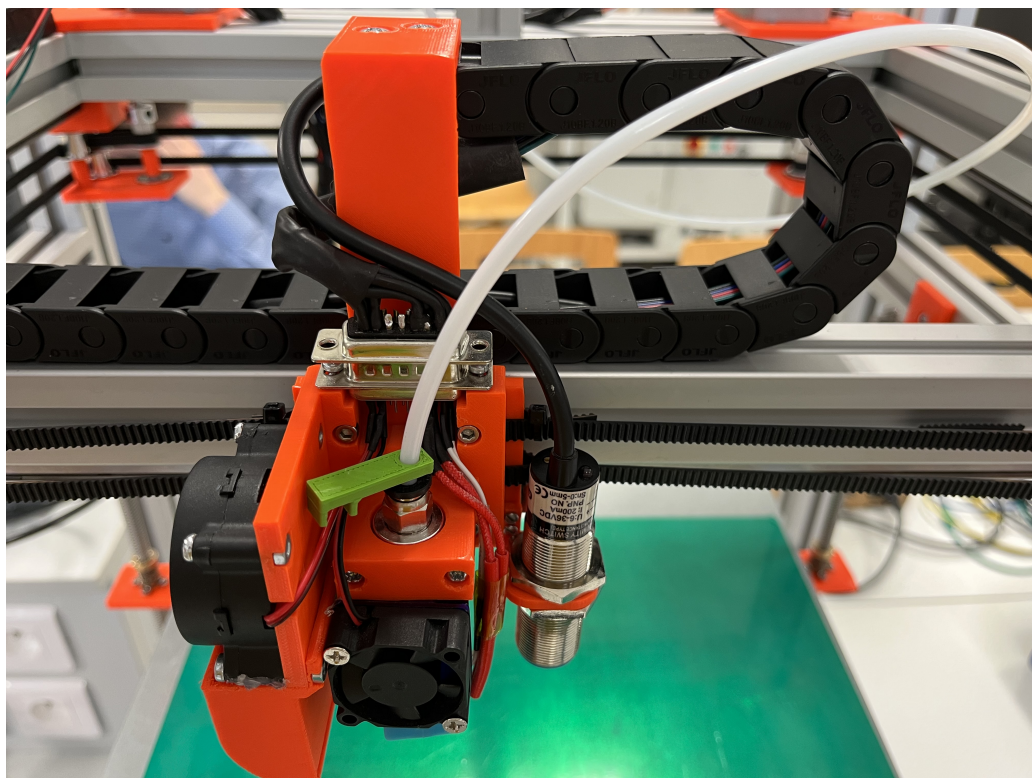
#### 5.1.1 Nosník tiskové hlavy

Hlavní oblastí mého návrhu bylo předělání kartézské kinematiky na kinematiku CoreXY. Jednotlivé bloky svého návrhu (idler, joint, driver) jsem sestavoval samostatně a postupně skládal na rám z hliníkových profilů. Idlery jsem umístil do bližší vzdálenosti vůči ostatním částem a po natažení řemenu jsem jejich posunutím do správné polohy docílil natažení řemenů.

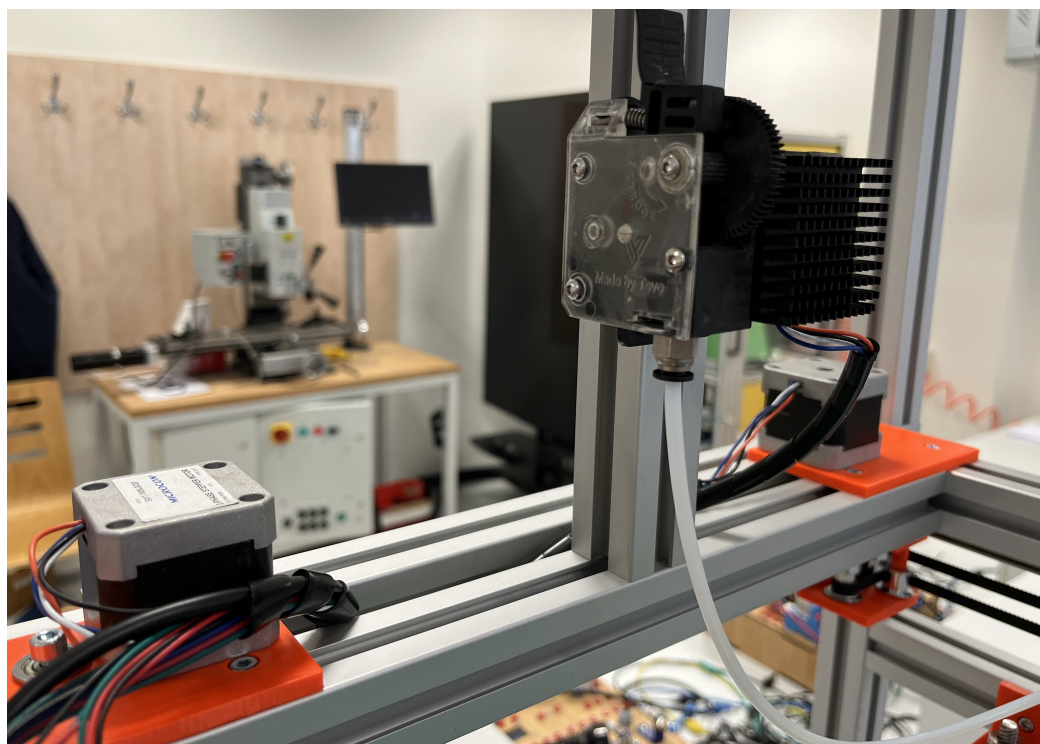
Na rozdíl od virtuálního modelu jsem pro pohyb v ose X využil původní kolejnici šířky 24 mm oproti zamýšlené kolejnici šířky 12 mm. Kolejnice jsou umístěny ze spodní strany profilů, proto je jejich maximální nosnost nižší oproti tomu, kdyby byly umístěny na horní části profilů. V normálních situacích by toto řešení nemuselo být vhodné, ale díky tomu, že celková konstrukce nosníku je vcelku lehká, to nebude způsobovat žádný problém.

Na vedení kabelů jsem využil vodících řetězců. Na původní tiskárně byly směřovány vodorovně, což vedlo k jejich zásahu do zadní části tiskárny. V mém návrhu jsem je umístil kolmo nad profily, díky čemuž se během tisku pohybují pouze nad profily (uchycení viditelné na obrázku č. 5.1).

Na obrázku č. 5.2 je možné vidět mé řešení uchycení extruderu. Toto uchycení se neobjevuje v modelu a navrhl jsem jej v průběhu plánování stavby tiskárny. Dále je na tomto obrázku možné vidět uchycení krokových motorů pro ovládní pohybu v osách X a Y, které jsou uchyceny v upravených dílech.

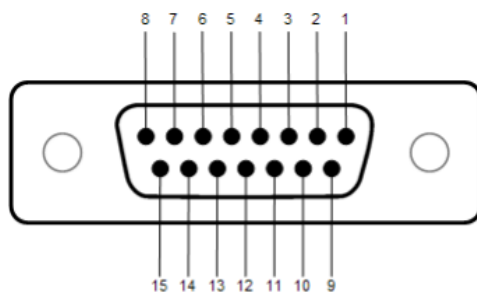


Obr. 5.1: Uchycení tiskové hlavičky



Obr. 5.2: Uchycení podávání filamentu

Koncové spínače jsem umístil tak, že výchozí pozice tiskárny (oba spínače sepnuty) se nachází v levém předním rohu. Pro vedení kabelů z hotendy jsem použil původního konektoru z předchozí bakalářské práce [22].



Obr. 5.3: Rozložení pinů konektoru hotendy [22]

PIN	Připojeno
1	termistor (+)
2	topné těleso (-)
3	topné těleso (+)
4	nezapojeno
5	nezapojeno
6	nezapojeno
7	ventilátor (-)
8	ventilátor (+)
9	termistor (-)
10	topné těleso (+)
11	topné těleso (+)
12	nezapojeno
13	nezapojeno
14	ventilátor boční (-)
15	ventilátor boční (+)

Tab. 5.1: Tabulka zapojení pinů konektoru k hotendy

### 5.1.2 Tisková plocha

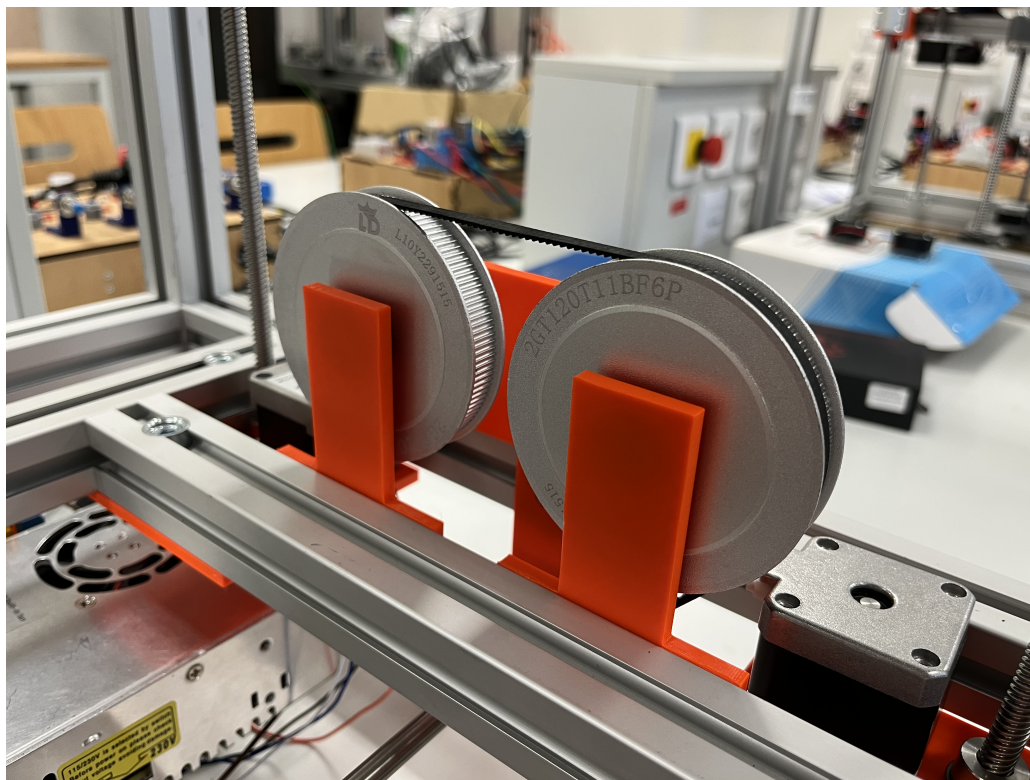
Pohyb tiskové plochy v Z ose zajišťují pomocí čtyř trapézových šroubů, které řídím pomocí krokových motorů. Šrouby jsou chyceny k tiskové ploše přes rám z hliníkových profilů 20x20 mm. V horní části tiskárny využívám uchycení šroubů do ložisek, které jsou částečně nastavitelné. Celková velikost tiskové plochy odpovídá 300x300x330 mm.



Obr. 5.4: Uchycení rámu tiskové plochy ke šroubům

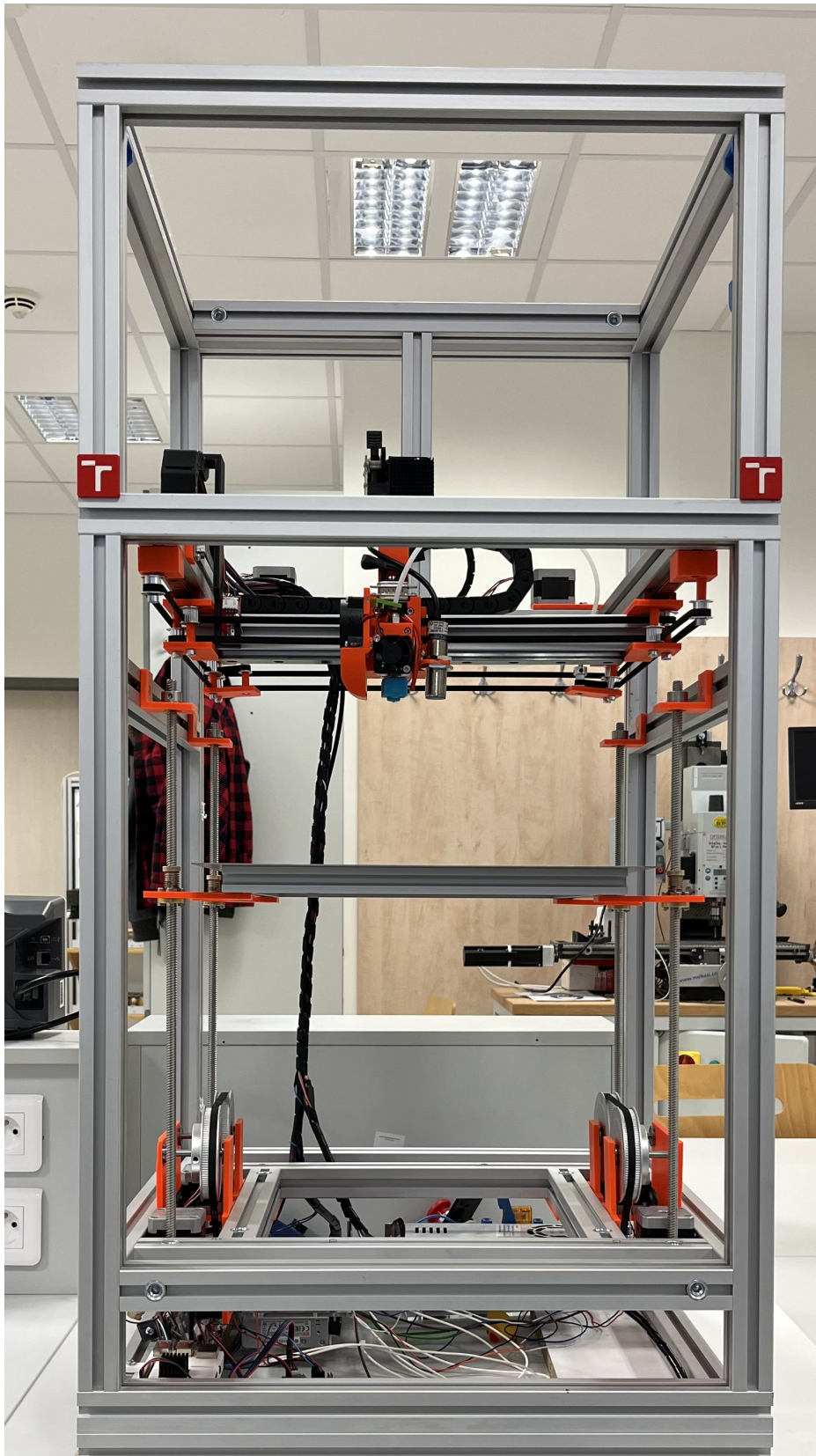
### 5.1.3 Výložník

Pro řešení výložníku jsem zvolil výrazně odlišné řešení oproti původnímu návrhu. Uchycení os otáčení velkých řemenic jsem umístil tak, aby nepřekážely rámu tiskové plochy. Díky tomu je možné výrazně nadzvednout tiskovou plochu, kdy tisková plocha je zastavena o velké řemenice, zatímco rám pokračuje ve snižování.



Obr. 5.5: Výložník tiskové plochy

Celý výložník je řízený pomocí jednoho krokového motoru, který otáčí hlavní osou, která se nachází ve spodní části tiskárny. Přes tuto osu pomocí řemenů otáčím velkými řemenicemi výložníku.



Obr. 5.6: Vyhotovená 3D tiskárna

## 5.2 Porovnání modelu a reálného vyhotovení

Při sestavování tiskárny jsem se co nejvíce snažil napodobit navržený model. Celkově jsem zachoval navržené prvky, největší změna oproti modelu nastala v posunutí základny tiskárny, protože při novém rozmístění elektronických částí (zdroj, řídicí deska, . . .) docházelo ke kolizi s vodícími šrouby. Další méně výraznou změnou bylo přidání hliníkového profilu v horní části tiskárny, který jsem použil pro uchycení podavače filamentu.

Do modelu jsem nepřidával elektronické části tiskárny, protože při původním záměru ponechat původní řídicí desku by nedocházelo k jejich přemístování a nepřekážely by modelu. Během sestavování jsem vyhodnotil, že řídicí jednotka není dostačující, což vedlo k přeuspořádání elektronických komponent a bylo nutné provést již zmíněné úpravy.

Mezi další části, které jsem z modelu vynechal, byly vodící řetězy na kabely. V tomto případě nebylo nutné předem plánovat jejich umístění, protože se nacházejí v horní části tiskárny, kde jim nic nepřekáží. Proto bylo vhodnější nejprve částečně postavit tiskárnu a pak rozhodnout o jejich vedení.

## 5.3 Možné vylepšení

Přestože jsem ve svém návrhu obsáhl velkou část oblasti 3D tisku, existují stále jisté možnosti, jak by bylo možné tuto tiskárnu vylepšit.

### 5.3.1 Automatické doplnění filamentu

Protože je tiskárna navržena tak, aby byla použitelná v tiskové farmě, je zaměřena na automatický tisk. Protože problém s odstraněním hotového výtisku je vyřešen výložníkem, tak se největším problémem automatické výroby stává nedostatek filamentu. Během automatického tisku vždy nastane situace, kdy nebude dostatek filamentu na pokračování tisku a bude nutné, aby jej doplnil uživatel. Automatickým doplněním filamentu by se tomuto problému dalo předejít. Jedno z možných řešení je využití principu multimateriálového tisku, kdy do samostatného bloku přivádíme několik filamentů a pomocí motoru měníme, se kterým tiskneme. Díky tomu by bylo možné automaticky přepnout na jiný filament v případě, že nevystačí jiný. Při tomto řešení se sice nezbavíme lidského zásahu úplně, ale nebudeme nuceni pozastavit tisk při výměně filamentu.

### **5.3.2 Kapalinou chlazený hotend**

Při chlazení hotendu pomocí ventilátoru nastává několik komplikací. Největší problém u této tiskárny způsobí uzavření tiskové komory, protože celková teplota vzroste a omezí chladicí schopnosti ventilátoru. Tomu lze předejít použitím kapalinou chlazeného hotendu, kdy jsme schopni umístit radiátor mimo tiskovou komoru a tím zachovat efektivitu chlazení.

# Závěr

V této bakalářské práci jsem se zaměřil na teoretický průzkum technologií 3D tisku a návrh grafického modelu v programu Siemens NX. Dále jsem podle zadání provedl výpočty komponent s následným výběrem konkrétních prvků, v dalším kroku jsem poté realizoval tiskárnu a implementoval obslužný software.

V teoretickém úvodu jsem se nejprve zaměřil na stručné shrnutí nejpoužívanějších technologií 3D tisku. Dále jsem částečně nastínil druhy materiálů pro FDM 3D tisk, abych byl lépe schopen vyhodnotit vhodný materiál pro tisk na navrhované tiskárně. V neposlední řadě jsem provedl detailnější rešerši kinematických systémů pro pohyb os X a Y, kde jsem závěrem vybral nejvhodnější typ pro návrh této tiskárny.

Při návrhu grafického modelu tiskárny jsem prošel několika iteracemi, dokud nebylo docíleno požadovaných parametrů. Výsledný model odpovídal požadovaným parametrům, kdy je možné tiskárnu kompletně uzavřít, díly jsou vybírány standardní nebo jsou navrženy tak, aby byly vyrobitelné z hliníku.

Při výběru komponent jsem se hlavně zaměřil na výběr vhodných mechanických dílů, které budou použitelné při mém návrhu. Protože je nová tiskárna značně menší než původní, tak jsem se toto zmenšení pokusil co nejvíce omezit, a proto byly tolerance pro výběr vhodných komponent vcelku malé a bylo nutné vybírat přesné díly. Z elektrických komponent jsem pro snahu snížení ceny ponechal většinu původních částí, u řídicí desky došlo k výměně za desku BIGTREETECH Octopus Pro V1.0 F429, která je schopná ovládat celou tiskárnu.

V poslední části jsem se věnoval realizaci. Ta proběhla podle vytvořeného modelu s malými úpravami. Následně jsem na tiskárnu implementoval obslužný software Klipper a ověřil funkčnost ovládání. Během nastavování konfiguračního souboru tiskárny jsem musel přesně definovat jednotlivé části tiskárny. Klipper si samostatně dokáže kontrolovat správné nastavení některých částí (například správné definování všech parametrů motoru) a zabrání špatnému spuštění.

Oproti původní tiskárně jsem provedl kompletně nový návrh a realizaci. Původní tiskárna využívala kartézské kinematiky pro pohyb v osách X a Y, pro posouvání v ose Z používala dva kuličkové šrouby a výložník se skládal z několika malých ložisek a řemenic. Dále jednotlivé díly původní tiskárny zasahovaly do rámu, což neodpovídalo požadavku na uzavření. V neposlední řadě byla tiskárna ovládaná menší řídicí deskou pouze na pět motorů. Nová tiskárna pro pohyb v osách X a Y používá kinematiku CoreXY, pro posun v ose Z čtyři trapézové šrouby a výložník je zjednodušen na dvě velké řemenice na každé straně. Všechny části jsou uvnitř tiskárny, takže je možné ji uzavřít, a díly jsou navrženy jednoduché, aby byly vyrobitelné z hliníku.

# Literatura

- [1] Hubs, *What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>>
- [2] Stratasys, *Stratasys FDM Technology* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/fdm-technology/>>
- [3] ResearchGate, *ResearchGate* [online]. [cit. 26.12.2022]. Dostupné z URL: <[https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-FDM-printing-process-3dlink-2016\\_fig1\\_328672825](https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-FDM-printing-process-3dlink-2016_fig1_328672825)>
- [4] Wikipedia, *Polylactic acid* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid)>
- [5] MaterialyPro 3D, *Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdil-abs-pla-petg/>>
- [6] Wikipedia, *Acrylonitrile butadiene styrene* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiene\\_styrene](https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene)>
- [7] Formlabs, *Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/>>
- [8] Prusa Research, *Prusa material table* [online]. [cit. 7. 5. 2023]. Dostupné z URL: <<https://help.prusa3d.com/materials>>
- [9] All3DP, *Direct Drive vs Bowden Extruder: The Differences* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>>
- [10] All3DP, *The 7 main types of 3D printing technology* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>>
- [11] 3D Printing Lightning, *Stereolithography (SLA)* [online]. [cit. 26.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://www.3dprinting.lightning/3d-printing-technologies/stereolithography/>>

- [12] All3DP, *The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY, & More* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>>
- [13] MAKKUSU, *CARTESIAN PRINTER* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://maxdesign1990.wordpress.com/2016/05/22/gmtech-printer-motion-platform-research/>>
- [14] YIN, M., CHEN, Y., LEE, K.H., FU, D., TSE, Z., KWOK, K.W., *Dynamic Modeling and Characterization of the Core-XY Cartesian Motion System*, 2018 IEEE, ISBN: 978-1-5386-6869-6
- [15] WEIKERT, S., RATNAWEERA, R., ZIRN, O., WEGENER, K., *Modeling and Measurement of H-Bot Kinematic Systems*, 2011 Švýcarsko
- [16] PHANOMCHOENG, G., CHANCHAREON, R., *Adaptive Gain Control for a Two-Axis, H-Frame-Type, Positioning System*, 2017 Bangkok, DOI:10.4186/ej.2017.21.3.223
- [17] MOYER, I. E., *CoreXY* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<http://corexy.com/index.html>>
- [18] Openbuilds, *C-Bot* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://openbuilds.com/builds/c-bot.1146/>>
- [19] Thingiverse, *D-Bot Core-XY 3D Printer* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://www.thingiverse.com/thing:1001065>>
- [20] VORON Design, *Voron Design* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://www.vorondesign.com/>>
- [21] 3D Distributed, *Best CoreXY 3D Printers 2022* [online]. [cit. 23.12.2022]. Dostupné z URL: <<https://3ddistributed.com/corexy-3d-printer/best-corexy-3d-printers/>>
- [22] PAVELKA, Martin, *Elektrifikace a řízení prototypu 3D tiskárny*, Brno, 2020, 55 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Jakub Arm
- [23] Biqu Equipment, *BIGTREETECH BTT Octopus Pro V1.0 for 3D Printer* [online]. [cit. 7. 5. 2023]. Dostupné z URL: <<https://biqu.equipment/products/bigtreetech-octopus-pro-v1-0-chip-f446?variant=39482177257570>>

- [24] YUMO Electric, *CM18-3005NA IP54 5mm Adjustable M18 Capacitance Proximity Switch for Level Detection* [online]. [cit. 16.5.2023]. Dostupné z URL: <https://www.yumoelectric.com/CM18-3005NA-IP54-5mm-Adjustable-M18-Capacitance-Proximity-Switch-for-Level-Detection-pd41206506.html>
- [25] Marlin Firmware, *Endstops* [online]. [cit. 16.5.2023]. Dostupné z URL: <https://marlinfw.org/docs/hardware/endstops.html>
- [26] Klipper 3D, *Features* [online]. [cit. 16.5.2023]. Dostupné z URL: <https://www.klipper3d.org/Features.html>

## Seznam symbolů a zkratek

<b>3D</b>	Trojrozměrný
<b>FDM</b>	Fused Depositing Modeling
<b>FFF</b>	Fused Filament Fabrication
<b>PLA</b>	Polyaktid
<b>PET</b>	Polyetylén tereftalát
<b>PET-G</b>	Polyetylén tereftalát-glakol
<b>ABS</b>	Akrylonitril-butadien-styren
<b>TPU</b>	Termoplastický polyuretan
<b>PVA</b>	Polyvinyl alkohol
<b>ASA</b>	Akrylonitril-syten-akrylát
<b>PC</b>	Polykarbonát
<b>SLA</b>	Stereolithography
<b>DLP</b>	Digital Light Processing
<b>SLM</b>	Selective Laser Melting
<b>MJ</b>	Material Jetting
<b>MJF</b>	Multi Jet Fusion
<b>LOM</b>	Laminated Object Manufacturing
<b>UART</b>	Universal asynchronous receiver-transmitter
<b>NO</b>	Normally Open
<b>SSR</b>	Solid State Relay

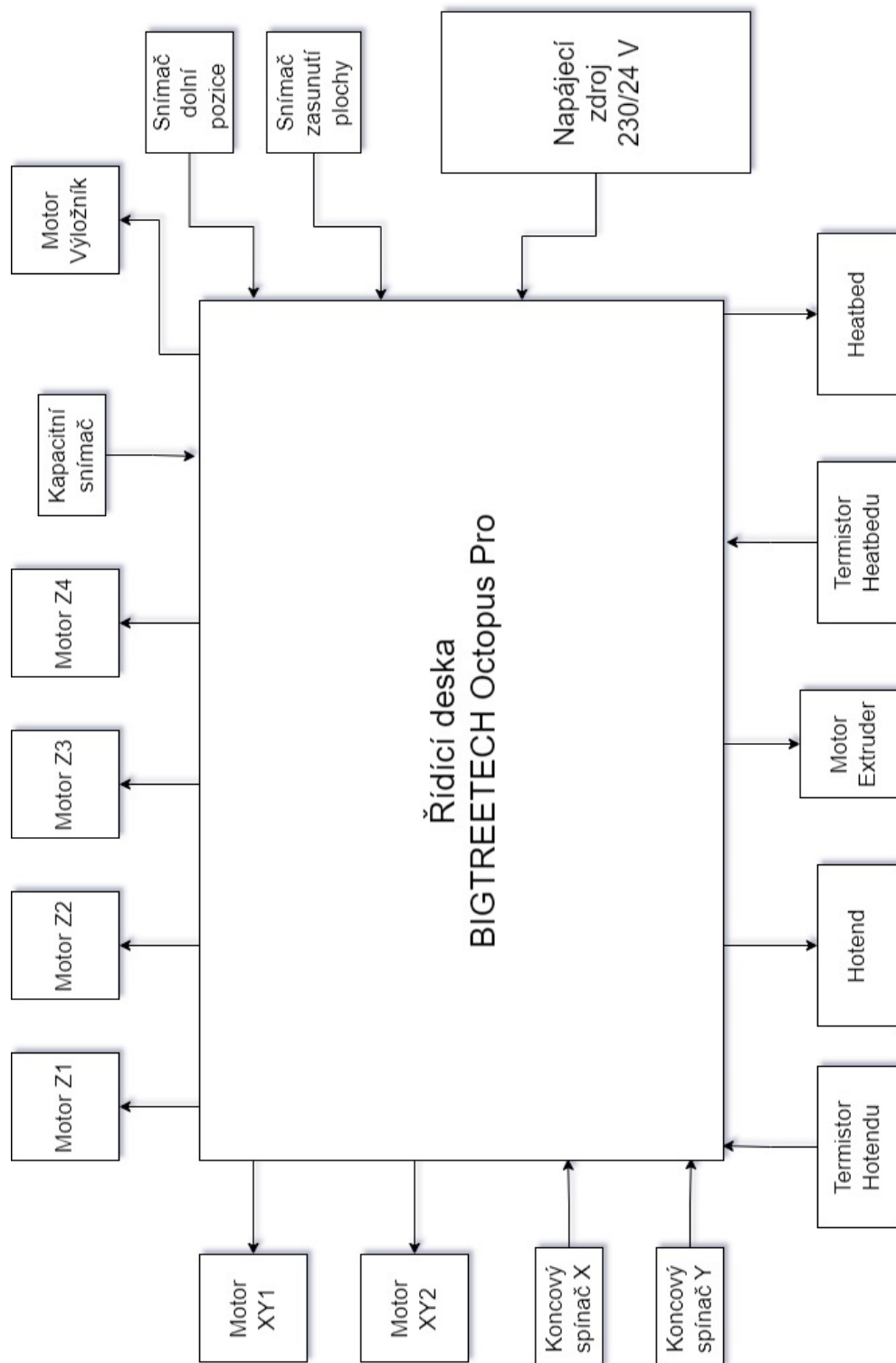
# Seznam příloh

A	Obsah přiložené SD karty	58
B	Blokový diagram zapojení tiskárny	59
C	Tabulka filamentů	60

## A Obsah přiložené SD karty

```
/
├── bp_2023_ctvrtnicek.pdf
├── corexy_printer.zip
├── printer_config.zip
├── diagram_zapojeni.pdf
└── tabulka_filamentu.pdf
```

## B Blokový diagram zapojení tiskárny



# C Tabulka filamentů

Material <sup>(2)</sup>	Printable on powder coated sheet <sup>(7)</sup>	Printable on smooth PEI sheet <sup>(7)</sup>	Printing with enclosure <sup>(7)</sup>	Nozzle temperature (+/-0 °C) <sup>(7)</sup>	Bed temperature (+/-0 °C) <sup>(7)</sup>	Hardened nozzle required <sup>(2)</sup>	Heat deflection temperature (avg. °C) <sup>(2)</sup>	Impact resistance Charpy (kJ/m <sup>2</sup> ) <sup>(7)</sup>	Tensile strength (Mpa) <sup>(7)</sup>	Soluble with common solvents <sup>(2)</sup>	Warping <sup>(2)</sup>
> PLA <sup>(1)</sup>	✓	✓	✗	210 - 215 °C	60 °C	✗	Orange	Red	Yellow	✓	✗
> Wood / metal filled <sup>(1)</sup>	✓	✓	✗	190 - 220 °C	60 °C	-	Orange	Red	Yellow	✓	✗
> PETG <sup>(1)</sup>	✓	with window cleaner	✗	240 - 270 °C	90 - 110 °C	✗	Green	Yellow	Orange	✓	✗
> ASA <sup>(1)</sup>	not recommended	✓	recommended	260 - 265 °C	95 - 110 °C	✗	Green	Orange	Red	✓	✓
> ABS <sup>(1)</sup>	not recommended	✓	recommended	240 - 255 °C	110 °C	✗	Green	Red	Orange	✓	✓
> PC (Polycarbonate) <sup>(1)</sup>	with glue stick	not recommended	recommended	270 - 275 °C	115 °C	✗	Green	Green	Orange	✓	✓
> CPE	✓	with window cleaner	✗	275 °C	90 °C	✗	Yellow	Orange	Orange	✓	✗
> PVA / BVOH	✓	✓	✗	195 - 215 °C	60 °C	✗	Orange	Red	Yellow	✓	✗
> HIPS	✓	✓	✗	220 °C	110 °C	✗	Grey	Grey	Grey	✓	✗
> PP (Polypropylene)	not recommended	with PP tape	✗	220 °C	100 °C	✗	Orange	Grey	Dark Red	✗	✓
> Flex <sup>(1)</sup>	✓	with glue stick	✗	230 - 260 °C	50 - 85 °C	✗	Yellow	Grey	Red	✓	✗
> nGen	✓	with window cleaner	✗	240 °C	90 °C	✗	Yellow	Grey	Orange	✓	✗
> Nylon	with glue stick	not recommended	recommended	250 °C	90 °C	✗	Yellow	Grey	Red	✗	✓
> Carbon filled	✓	✓	✗	260 °C	90 °C	✓	Yellow	Dark Red	Orange	✓	✗