



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## 3D TISKÁRNA TYPU SCARA

SCARA 3D PRINTER

### SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Batelka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2024





# Semestrální práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Tomáš Batelka

**ID:** 243511

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2024/25

**NÁZEV TÉMATU:**

## 3D tiskárna typu SCARA

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se a nastudujte kinematiku 3D tiskáren typu SCARA. Proveďte srovnání jednotlivých typů kinematik. Navrhněte konstrukční řešení SCARA mechanismu a proveďte výběr komponentů, pro budoucí stavbu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího semestrální práce.

**Termín zadání:** 16.9.2024

**Termín odevzdání:** 7.1.2025

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

**doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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**

Práce pojednává o technologii FFF 3D tiskáren a popisuje jejich komponenty. Dále se věnuje nejčastěji používaných kinematikách a porovnává jejich vlastnosti z hlediska složitosti konstrukce a tiskových vlastností. Cílem práce je navrhnout a zkonstruovat kompletní 3D tiskárnu využívající kinematiku SCARA. Dále pak implementovat tuto kinematiku pro Klipper firmware. Práce se dále zaměřuje na kalibraci a testování tiskárny pro dosažení co možná nejvyšší kvality a zkrácení času tisku.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

3D tiskárna, 3D model, 3D tisk, SCARA kinematika, Klipper, FFF, FreeCAD

## **ABSTRACT**

The paper discusses the technology of FFF 3D printers and describes their components. It also discusses the most commonly used kinematics and compares their properties in terms of design complexity and printing properties. The aim of the thesis is to design and construct a complete 3D printer using SCARA kinematics. Then to implement this kinematics for Klipper firmware. The thesis also focuses on calibrating and testing the printer to achieve the highest possible quality and reduced printing time.

## **KEYWORDS**

3D printer, 3D model, 3D printing, SCARA kinematics, Klipper, FFF, FreeCAD



BATELKA, Tomáš. *3D tiskárna typu SCARA*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.





# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Tomáš Batelka  
**VUT ID autora:** 243511  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2024/25  
**Téma závěrečné práce:** 3D tiskárna typu SCARA

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/diplomové/disertační práce panu doc. Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.



# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Úvod</b>   | <b>21</b> |
| <b>1 Aditivní výroba a 3D tisk</b>                    | <b>23</b> |
| 1.1 Technologie FFF . . . . .                         | 24        |
| 1.2 Části 3D tiskárny . . . . .                       | 24        |
| 1.2.1 Tisková hlava . . . . .                         | 24        |
| 1.2.2 Tisková podložka . . . . .                      | 26        |
| 1.2.3 Rám . . . . .                                   | 26        |
| 1.2.4 Krokové motory . . . . .                        | 26        |
| 1.2.5 Řídící deska . . . . .                          | 27        |
| <b>2 Kinematika</b>                                   | <b>29</b> |
| 2.1 Konstrukce FFF 3D tiskáren . . . . .              | 29        |
| 2.1.1 Kartézská . . . . .                             | 29        |
| 2.1.2 Kinematika SCARA . . . . .                      | 29        |
| 2.1.3 Kinematika Delta . . . . .                      | 29        |
| 2.1.4 Polární kinematika . . . . .                    | 29        |
| <b>3 Praktická část</b>                               | <b>31</b> |
| 3.1 3D model . . . . .                                | 31        |
| 3.1.1 Základna . . . . .                              | 31        |
| 3.1.2 Skříň s elektronikou . . . . .                  | 32        |
| 3.2 Tisk . . . . .                                    | 32        |
| 3.3 Implementace kinematiky SCARA do Klippy . . . . . | 32        |
| 3.3.1 Přímá a inverzní kinematika . . . . .           | 33        |
| 3.4 Konfigurace tiskárny . . . . .                    | 34        |
| 3.5 Kalibrace tiskárny . . . . .                      | 34        |
| <b>Závěr</b>  | <b>35</b> |
| <b>Literatura</b>                                     | <b>37</b> |
| <b>Seznam symbolů a zkratk</b>                        | <b>39</b> |
| <b>Seznam příloh</b>                                  | <b>41</b> |



# Seznam obrázků

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Detailní pohled na tiskovou hlavu s přímým extruderem (direct-drive):<br>(1) PTFE trubička, (2) Pasivní chladič (heatsink), (3) Ventilátor pro<br>chlazení materiálu (part fan), (4) Ventilátor k chlazení extruderu, (5)<br>Tepelný izolátor (heat break), (6) Topný blok (heat block) [8] | 25 |
| 1.2 | Detailní pohled na depozici vrstvy: (a) s ventilátorem pro chlazení<br>materiálu a (b) bez ventilátoru [1]  | 25 |





# Seznam tabulek



## Seznam výpisů



# Úvod

Tato práce se zabývá konstrukcí a řízením 3D tiskárny s kinematikou SCARA. Základní model vychází z open-source projektu x-scara

Test cilu

# 1 Aditivní výroba a 3D tisk

Aditivní výroba, též nazývaná 3D tisk, je technologie umožňující výrobu dílů pomocí nanášení materiálu ve vrstvách. Tato technologie našla uplatnění nejen ve výrobě prototypů a výrobě v malých sériích, ale i v medicínských aplikacích, architektuře, vesmírném průmyslu a mnoha dalších oblastech.

V porovnání s využitím subtraktivní výroby, má aditivní výroba řadu výhod. Velkou výhodou aditivního výrobního procesu je **flexibilita při návrhu a výrobě** komplexních tvarů, které by byly obtížně nebo vůbec nevyrobitelné konvenčními technologiemi. Při použití subtraktivních procesů jsou limitujícími faktory návrhu zejména potřeba přípravků, relativně velkého množství nástrojů a také možnost výskytu obráběného výrobku s nástrojem. V porovnání s tvářecími technologiemi (jakou jsou například vstřikování, přetlačování nebo třeba lisování), které vyžadují výrobu potřebných nástrojů a forem, což značně limituje geometrii výrobku. Technologie aditivní výroby umožňuje umístit materiál tam, kde je potřeba bez ohledu na nástroje potřebné k výrobě. To umožňuje například výrobu topologicky optimalizovaných dílů a výrobků. [3]

Další výhodou oproti subtraktivním technologiím je **malé množství odpadního materiálu**, protože je materiál nanášen pouze v oblastech, kde je potřeba. Oproti tvářecím technologiím je výhodou například využití neúplné výplně, která šetří materiál a zkracuje dobu tisku.

Velkou výhodou pak je **konstantní cena při výrobě dílů s komplexní geometrií**. Cena výroby u aditivní výroby není závislá na složitosti geometrie dílu, ale pouze na množství a typu materiálu použitého k výrobě a době tisku, resp. spotřebě elektrické energie.[3]

Při výrobě komplexních geometrií pomocí aditivní výroby **není často potřeba rozdělovat díl nebo výrobek na více částí**, které je následně potřeba spojit. To v praxi znamená nižší náklady na výrobu, menší riziko chyb při montáži a také nižší hmotnost výrobku. Při výrobě takových dílů vzrůstá potřeba tiskových podpor, které mohou komplikovat čištění a kompletaci výrobku. Při odstraňování podpor může způsobit geometrické nepřesnosti. [3]

Limitací 3D tisku může být právě geometrická přesnost a omezená kvalita povrchu, která je navíc ovlivněna metodou výroby (tj. FFF, SLA, SLS, ...). 3D tiskárny využívají zejména k výrobě dílů o rozměrech v řádu několika milimetrů až desítek centimetrů a jejich tolerance se pohybuje v rámci několika desetin až setin milimetru. [3]

## 1.1 Technologie FFF

FFF (Fused Filament Fabrication) je zejména z důvodu nízké pořizovací ceny stroje i materiálu jednou z nejrozšířenějších technologií aditivní výroby. Tato technologie využívá plastové polymery, které mohou obsahovat příměsi jiných materiálů ve formě vláken nebo práškové příměsi. Tento materiál je prodáván ve formě tiskových strun o průměru 1,75 mm nebo 2,85 mm navinutých na cívku. Tato struna je odvíjena extruderem a vytlačena rozehrátou tryskou. Tryska způsobí tavení termoplastu a dojde tak k vytlačení přesného množství materiálu, které je řízeno průměrem otvoru trysky, rychlostí pohybu tiskové hlavy vůči tiskové podložce a rychlostí vytlačování materiálu. Tisková hlava nanáší materiál v definovaných vrstvách na tiskovou podložku. Tato podložka je většinou vyhřívaná, což zabraňuje deformaci tiskového výrobku a jeho případné oddělení od tiskové plochy. [9]

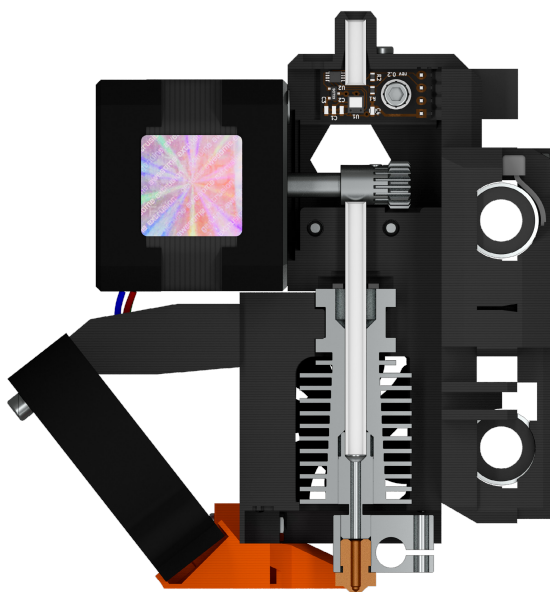
## 1.2 Části 3D tiskárny

### 1.2.1 Tisková hlava

Tisková hlava slouží k zahřátí a následnému vytlačení tiskového materiálu. Pohybem tiskové hlavy nebo podložky dochází k vytvoření tenké vrstvy materiálu na tiskovou podložku. Složením těchto vrstev vzniká tisknutý výrobek.

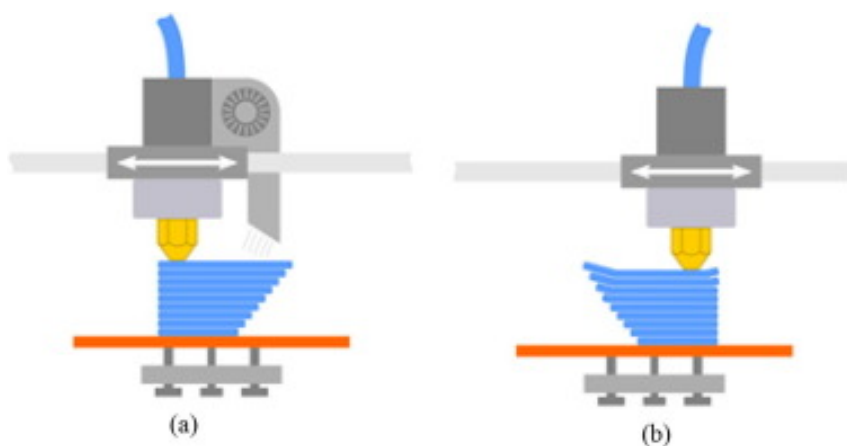
Filament je extruderem vtlačován do hotendu skládající se z PTFE trubičky, která je zavedena do pasivního chladiče, který je chlazen ventilátorem. Tento ventilátor zabraňuje tavení materiálu mimo hotend. Následně je filament protlačován tepelným izolátorem, který odděluje studenou a teplou zónu. Tepelný izolátor je kovová trubička na jejíž koncích jsou vnější závity, a tak spojuje chladič a topný blok. Tepelný izolátor slouží hlavně k omezení přenosu tepla do předchozích částí hotendu. Posledními částmi jsou topný blok a tisková tryska. Topný blok má kromě průchozího otvoru pro materiál další dva otvory, jeden pro topnou patronu a druhý pro termistor, který slouží k monitorování aktuální teploty tepelného bloku potažmo trysky. Tryska se společně s krokovým motorem, tloušťkou tiskové struny podílejí na množství vytlačovaného materiálu. [8]





Obr. 1.1: Detailní pohled na tiskovou hlavu s přímým extruderem (direct-drive):  
 (1) PTFE trubička, (2) Pasivní chladič (heatsink), (3) Ventilátor pro chlazení materiálu (part fan), (4) Ventilátor k chlazení extruderu, (5) Tepelný izolátor (heat break), (6) Topný blok (heat block) [8]

Podstatnou částí tiskové hlavy je ventilátor, který chladí tiskový materiál po jeho vytlačení z trysky. Tento ventilátor zabráňuje deformaci výtisku a redukuje stringing. Správné nastavení tohoto ventilátoru je relativně podstatné pro kvalitu výtisku. Při správném nastavení je tiskárna schopna překlenout relativně velké mezery bez použití podpůrných struktur. [1]



Obr. 1.2: Detailní pohled na depozici vrstvy: (a) s ventilátorem pro chlazení materiálu a (b) bez ventilátoru [1]

## 1.2.2 Tisková podložka

Tisková podložka je část 3D tiskárny, na kterou je nanášen materiál. Tato podložka je zpravidla vyhřívána, aby nedocházelo k deformaci výtisku a nedošlo tak k jeho oddělení od tiskové podložky.

Vyhřívání podložky je realizováno několika způsoby. Jedním z nich je například topná DPS (deska plošných spojů). Může jít například o běžně používaný kompozitní materiál FR-4 se skleněným jádrem nebo MCPCB (Metal Core PCB)/IMS (Insulated Metal Substrate) s jádrem hliníkovým. V tomto případě jako topné těleso slouží vodivá cesta ve tvaru meandru nebo spirály. Na DPS je poté připevněna tisková podložka případně jako tisková podložka slouží samotná DPS.

Dalším způsobem vyhřívání je hliníková deska se silikonovým topným tělesem, které je přilepeno k její spodní straně. Alternativou silikonového topného tělesa můžou být i topné patrony. Na tuto hliníkovou desku je připevněna tisková podložka.

Tiskových podložek existuje několik druhů. Tiskové podložky mohou být vyrobené z různých materiálů, jako je například PEI (polyetherimid) ve formě přířezu nebo pružinové oceli s práškově lakovaným PEI povrchem. Dalším materiálem je sklo, které se velice hladké, odolné a vlivem jeho nízké tepelné vodivosti dobře rozptyluje teplo. [7] Dalšími poměrně rozšířenými povrchy jsou různé lepicí pásy. Příkladem je například polyimidová páska nebo papírová páska.

Tiskové podložky se liší i svými povrchy. Například PEI podložky se prodávají v hladké, texturované i variantě se vzorem.

## 1.2.3 Rám

Rám 3D tiskáren je často realizován pomocí hliníkových profilů stejně jako jiné průmyslové stroje. Tyto profily jsou spojovány pomocí rohových spojek vyrobené z odlévaného hliníku případně tisknutými, tlakově odlévanými nebo vstřikovanými díly. Rámy komerčních 3D tiskáren mají nejčastěji rám zhotovený z tlakově litými hliníkovými díly nebo řezáním, lisováním a tvářením hliníkových nebo ocelových přířezů.

Konstrukci rámu nelze podcenit. Má totiž přímý vliv na tisknuté výrobky. Málo pevné spoje můžou způsobovat vibrace a nepřesnosti, zatímco profily s nerovným koncem můžou způsobit deformace výtisku klidně i v několika osách.

## 1.2.4 Krokové motory

Krokové motory zajišťují veškerý pohyb tiskové hlavy vůči poloze na tiskové podložce. Krokové motory se též používají v extruderu pro vytlačování filamentu.

Krokový motor je ve své podstatě synchronní motor, který přeměňuje vstupní digitální elektrický signál na odpovídající mechanický pohyb. Krokové motory pracují v tzv. otevřené smyčce, tedy nepoužívají zpětnou vazbu. Pro nastavování polohy nebo rychlosti otáčení není totiž u krokových motorů potřeba. Po přivedení impulzu se motor pootočí o přesně definovaný úhel – krok. Počet těchto pulzů obvykle odpovídá počtu vykonaných kroků. [5]

Běžným úhlem jednoho kroku hybridního krokového motoru používaného v 3D tiskárnách je  $1,8^\circ$ . Přepočtem tak můžeme zjistit, že takový motor má 200 kroků. Takového úhlu lze docílit díky konstrukci hybridního krokového motoru.

### 1.2.5 Řídící deska

Slouží k propojení zdroje, všech elektricky řízených součástí a senzorů tiskárny. Slouží k napájení vyhřívané podložky (v případě použití vyhřívané podložky napájené síťovým napětím 230V 50Hz pouze řídí spínání relé). Dále se k ní připojují krokové motory a jejich drivery, nejsou-li integrované na řídící desce. K desce jsou připojeny i ventilátory, zejména ty se řízenými otáčkami (ventilátor hotendu a ventilátor pro chlazení materiálu). Dále k ní jsou připojeny koncové spínače, termočlánky a například i osvětlení tiskárny. Řídící desky též slouží k připojení displeje a ovládání uživatelského rozhraní tiskárny. V případě použití firmware Klipper je k desce připojen jednodeskový počítač. Nejčastěji se setkáme s počítačem Raspberry nebo jeho klony. Některé desky umožňují připojení do počítačové sítě rozhraním Ethernet nebo WiFi.

Řídící desky jsou nejčastěji řízené 8, 16 nebo 32 bitovými mikrokontrolerem. Mikrokontroler zajišťuje čtení z paměťového média, zpracování instrukcí tzv. G-kódu (GCode případně BGCode – binární formát GCode).



## 2 Kinematika

### 2.1 Konstrukce FFF 3D tiskáren

FFF 3D tiskárny využívají především paralelní kinematiku

#### 2.1.1 Kartézská

Tiskárny s kartézskou kinematikou jsou nejrozšířenější a zároveň nejjednodušším typem kinematiky FFF tiskáren. Kinematika vyžaduje tři krokové motory, jeden pro každou z os. Kartézská kinematika je v současné době nejrozšířenější kinematika a to díky jednoduchosti konstrukce a jednoduchosti kinematické transformace.

#### Portálová kinematika (gantry)

Tato kinematika vyžaduje nejméně čtyři krokové motory, tedy jeden motor pro každou z os a jeden další motor pro jednu z os. Zpravidla to bývá osa Z. Tím se eliminuje prověšení ramene osy X. Ačkoliv jsou tyto tiskárny kompaktní, tak při tisku vyžadují v ose Y větší prostor pro pohyb tiskové podložky. Nejpopulárnější tiskárnou využívající portálovou kinematiku je Prusa i3 navržena Josefem Průšou nebo cenově přívětivější Creality Ender 3.

#### Kinematika CoreXY

Tato kinematika umožňuje díky stacionárním motorům (v osách X a Y) dosáhnout vyšší rychlosti tisku

#### Kinematika CoreXZ

#### 2.1.2 Kinematika SCARA

#### 2.1.3 Kinematika Delta

#### 2.1.4 Polární kinematika



## 3 Praktická část

### 3.1 3D model

Pro modelování dílů jsem se rozhodl použít CAD software FreeCAD. Pro tento CAD jsem se rozhodl proto, že je open source a tedy dostupný pro každého, kdo jej chce používat. Software FreeCAD byl nedávno vydán ve verzi 1.0, což ve světě open-source mj. znamená připravenost pro použití v praxi.

FreeCAD je univerzální parametrický modelovací systém vydaný pod licencí LGPL, tudíž jej lze libovolně šířit a modifikovat. FreeCAD je také multiplatformní, tudíž jej lze používat v operačních systémech Windows, Linux i MacOS. FreeCAD je napsán v jazyce C++ a pro manipulaci s geometrií využívá knihovny OpenCASCADE. FreeCAD lze jej rozšiřovat pomocí zásuvných modulů (pluginů). FreeCAD též umožňuje psaní vlastních skriptů v jazyce Python a nahrávání vlastních maker. [2]

Můj návrh tiskárny vychází z projektu x-scara [6]. Ve svém návrhu jsem použil shodné rozměry hliníkových profilů, trapézových a vodících tyčí. Vzhledem k tomuto faktu se můj návrh projektu x-scara velmi podobá, ačkoliv můj návrh nevyužívá žádný díl z tohoto projektu.

Model je rozdělen do tří dílčích částí. První je základna, druhou skříň s elektronikou, třetí je rameno a čtvrtou je nástroj – tisková hlava.

Soubory ve formátu FCStd (zdrojové soubory modelů) jsou organizovány podle části, do které spadají. Pro generování tiskových souborů ve formátu 3MF (3D Manufacturing Format) vhodného pro slicery slouží python skript. Tento skript postupně otevře, přepočítá a exportuje všechny díly. Skript exportuje pouze ty objekty, které jsou obsažené v kontejneru Std Part. Jako název souboru se volí název dílu, který obsahuje i počet výtisků konkrétního dílu. K výrobě tištěných dílů pak postačí adresář 3mf a soubory, které obsahuje.

#### 3.1.1 Základna

Základna je složena ze hliníkových profilů 20x20mm a 20x40mm. Na základnu je upevněno rameno, které se díky lineárně valivým ložiskům pohybuje po třech vodících tyčích o průměru 8mm. V horní části základny je upevněn krokový motor, který pomocí trapézové tyče o průměru 8mm pohybuje ramenem v ose Z. Druhá strana trapézové tyče je uložena v ložisku ve spodní části základny.

Pro spojení hliníkových profilů jsem zvolil metodu "Blind Joint", která umožňuje pevné a levné spojení dvou hliníkových profilů. Tuto techniku jsem zvolil i z důvodů snadnější montáže akrylové desky a možnosti zapuštění elektroniky do rámu

tiskárny.

### 3.1.2 Skříň s elektronikou

V zadní části základny je umístěna skříň s elektronickými komponentami tiskárny. Ta je od prostoru tiskárny oddělena akrylovou deskou, která je upevněna přítlakem DIN lišt. Pro upevnění elektronických komponent slouží tři DIN lišty upevněné z vnitřní části bočních hliníkových profilů. Elektronika je od okolí oddělena plastovými díly, které společně tvoří skříň, chránící před nechtěným dotykem. Uvnitř skříně najdeme upevněný zdroj, řídicí desku, jednodeskový počítač Raspberry Pi a sadu řadových svorek.

Po obvodu skříně jsou upevněny další části tiskárny. Jednou z nich je dotykový displej BTT PITFT43, který je ke konstrukci skříně upevněn na pohyblivém pantu. Tento pant je realizován pomocí dílu upevněného ke skříně, zadní části krytu displeje, vložky pro jeho dotažení a šroubu SHCS M3x60. V přední části se také nachází kolébkový spínač pro spínání napájení celé tiskárny. Pod spínačem se nachází jeden z ventilátorů jehož účelem je nasát chladný vzduch do skříně. Na opačné straně v horní části je též upevněn ventilátor, který naopak odsává teplý vzduch. Na opačné straně displeje je též upevněn keystone s RJ-45 konektorem pro připojení tiskárny do počítačové sítě. Pod ním se ještě nachází napájecí konektor IEC 60320 C14 s tavnou pojistkou.

## 3.2 Tisk

Nastavení sliceru vychází z nastavení doporučení projektu Voron. Jedná se tedy následující nastavení:

- Výška vrstvy: **0,2mm**
- Šířka extruze: **0,4mm**
- Výplň: **40%**
- Typ výplně: mřížka, **gyroid**, plástev, trojúhelníky nebo kubický
- Počet stěn: **4**
- Plných vrstev: **5 vrchních, 5 spodních**

## 3.3 Implementace kinematiky SCARA do Klippy

Klippy je část firmwaru Klipper, která běží na počítači uvnitř 3D tiskárny, ke kterému je připojena řídicí deska. Kód je napsán převážně v jazyce Python, přičemž některé funkce jsou implementovány v jazyce C. Volání těchto funkcí je realizováno použitím rozhraní CFFI (C Foreign Function Interface). [4]



### 3.3.1 Přímá a inverzní kinematika

Kinematické transformace se používají k převodu natočení kloubů na souřadnice koncového bodu (přímá transformace) a naopak (inverzní transformace). Pro výpočet transformace je třeba znát délky ramen  $L_1$  a  $L_2$ , offsety ramen  $x_{offset}$  a  $y_{offset}$  a Elbow Crosstalk Ratio (ECR).

Pro další výpočty je potřebné znát Elbow Crosstalk Ratio (převodový poměr řemenice v ose ramene vůči řemenici v ose kloubu).

$$ECR = \frac{n_S}{n_E} \quad (3.1)$$

#### Přímá kinematika

$$\phi_S = a \quad (3.2)$$

$$\phi_E = b - \frac{a}{ECR} \quad (3.3)$$

$$a\_sin = -\sin(\phi_S) \cdot L_1 \quad (3.4)$$

$$a\_cos = \cos(\phi_S) \cdot L_1 \quad (3.5)$$

$$b\_sin = -\sin(\phi_S + \phi_E) \cdot L_2 \quad (3.6)$$

$$b\_cos = \cos(\phi_S + \phi_E) \cdot L_2 \quad (3.7)$$

Nakonec je potřeba přičíst odsazení souřadného systému nástroje vůči souřadnému systému báze (konkrétně odsazení kloubu ramene vůči počátku tiskové podložky).

$$x = a\_sin + b\_sin + x_{offset} \quad (3.8)$$

$$y = a\_cos + b\_cos + y_{offset} \quad (3.9)$$

#### Inverzní kinematika

Nejprve je třeba kompenzovat offset polohy TCP v osách x a y.

$$x = -(raw_x - x_{offset}) \quad (3.10)$$

$$y = (raw_y - y_{offset}) \quad (3.11)$$

Dalším krokem je výpočet vzdálenosti od počátku.

$$hypot = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.12)$$

Dále se vypočítají úhly ramen  $\phi_S$  (shoulder) a  $\phi_E$  (elbow).

$$\phi_S = \arctan2(x, y) - \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot hypot}\right) [\text{rad}] \quad (3.13)$$

kde  $L_1$  a  $L_2$  jsou délky ramen.

$$\phi_E = \frac{\phi_S}{ECR} + \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 + L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right) [\text{rad}] \quad (3.14)$$

kde  $ECR$  je Elbow Crosstalk Ratio,  $L_1$  a  $L_2$  jsou délky ramen.

Následně stačí převést úhel v radiánech na stupně.

$$\Phi_S = \phi_S \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ] \quad (3.15)$$

$$\Phi_E = \phi_E \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ] \quad (3.16)$$

## 3.4 Konfigurace tiskárny

## 3.5 Kalibrace tiskárny

# **Závěr**

Shrnutí studentské práce.



# Literatura

- [1] Choudhary, M.; Mukherjee, S.; Kumar, P.: Analysis and optimization of geometry of 3D printer part cooling fan duct. *Materials Today: Proceedings*, ročník 50, 2022: s. 2482–2487, ISSN 2214-7853, doi:- <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.444>, 2nd International Conference on Functional Material, Manufacturing and Performances (ICFMMP-2021).  
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321069534>
- [2] FreeCAD: About FreeCAD – FreeCAD Documentation. 2013.  
URL [https://wiki.freecad.org/About\\_FreeCAD](https://wiki.freecad.org/About_FreeCAD)
- [3] Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; aj.: The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, ročník 69, 2015: s. 65–89, ISSN 0010-4485, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.  
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448515000469>
- [4] Klipper 3D: Klipper Code Overview. 2023, accessed: 2023-10-10.  
URL [https://www.klipper3d.org/Code\\_Overview.html](https://www.klipper3d.org/Code_Overview.html)
- [5] Kolíbal, Z.: *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIU, první vydání. vydání, 2016, ISBN 978-80-214-4828-5.
- [6] madl3x: x-scara. 2020, GitHub repository.  
URL <https://github.com/madl3x/x-scara>
- [7] Materialpro3D: Typy povrchů tiskové podložky. 2021, přístup k 5. lednu 2025.  
URL <https://www.materialpro3d.cz/blog/typy-povrchu-tiskove-podlozky/>
- [8] Stříteský, O.: *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research, 2019.
- [9] Systems, M.: FFF - Technologie aditivní výroby. n.d., přístup k 5. lednu 2025.  
URL <https://www.mcae.cz/technologie/fff/>



## Seznam symbolů a zkratk

|                |  |
|----------------|--|
| <b>TCP</b>     | poloha koncového bodu – Tool Center Point    |
| <b>FFF</b>     | Fused Filament Fabrication                   |
| <b>SLA</b>     | Stereolithography                            |
| <b>PEI</b>     | Polyetherimid                                |
| <b>SLS</b>     | Selective Laser Sintering                    |
| <b>DPS/PCB</b> | Deska plošných spojů – Printed Circuit Board |
| <b>MCPCB</b>   | Metal Core PCB                               |
| <b>IMS</b>     | Insulated Metal Substrate                    |





## Seznam příloh