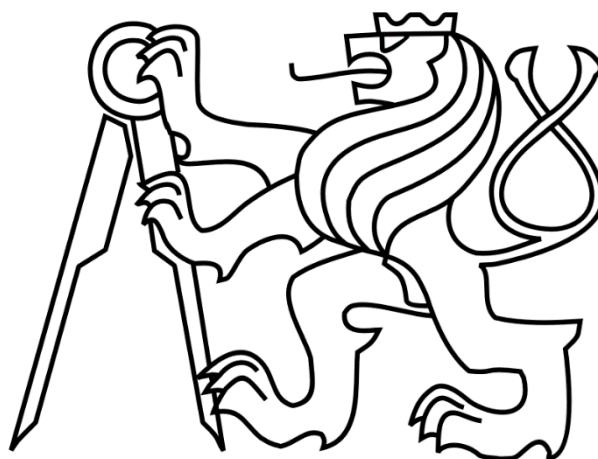


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Návrh a realizace 3D tiskárny

Bc. Miroslav Kotrč

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kotrč** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **483251**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Robotika a výrobní technika**
Specializace: **Výrobní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a realizace 3D tiskárny

Název diplomové práce anglicky:

Design and realization of 3D printer

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Práce se bude zabývat návrhem a stavbou mechanické konstrukce a řízením 3D tiskárny na plastové materiály technologií FDM. Součástí bude také identifikace dosažitelné přesnosti vytvořené tiskárny. Osnova práce: Rešerše v oblasti 3D tiskáren a jejich řízení. Koncepční návrh tiskárny a platformy pro řízení. Konstrukce 3D tiskárny a její stavba. Návrh a realizace řízení tiskárny - pohyb tiskárny, ovládání extruderu a přehřevu, kalibrace podložky. Příprava uživatelského rozhraní. Testování a měření přesnosti. Rozsah textové části: 60 - 80 stran; Rozsah grafické části: 3D model tiskárny, výkresy vybraných dílců, schéma zapojení, grafické výsledky měření.

Seznam doporučené literatury:

JACKSON, O'CONNELL. What is 3D printing? How does 3D printing work? Hubs [online]. [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>; The 7 Main Types of 3D Printing Technology in 2022. All3DP [online]. 28. říjen 2021 [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Švéda, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Tomáš Havlan ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **24.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **24.09.2023**

Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze 24. 7. 2023

Miroslav Kotrč

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Jiřímu Švédovi, Ph.D., za jeho odborné vedení mé diplomové práce, připomínky a čas, který mi věnoval. Dále bych rád poděkoval konzultantovi práce Ing. Tomášovi Havlanovi, za jeho odborné připomínky, pomoc při měření stroje a za čas, který mi věnoval. V neposlední řadě patří poděkování také Ing. Tomášovi Urbanovi za pomoc s měřením stroje. Rovněž bych rád poděkoval rodičům za jejich podporu v průběhu celého mého studia. Dále bych chtěl poděkovat své snoubence za její podporu.

ANOTACE

Autor:	Bc. Miroslav Kotrč
Název DP:	Návrh a realizace 3D tiskárny
Rozsah práce:	105 stran, 70 obrázků, 11 tabulek, 9 grafů
Akademický rok:	2022/2023
Škola:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Provedení testu konceptu obráceného FDM tisku. Ověření přesnosti polohování Core XY mechanismu sestaveného s užitím běžně dostupných komponent pro 3D tiskárny a ověření jejich přímosti.
Klíčová slova:	3D tisk, PLC, Core XY, 3D tiskárna, PLC řízení, Klipper firmware, FDM
Anotace:	Tato práce se zaměřuje na kinematiku 3D tiskáren, analyzuje používané komponenty a zkoumá možnosti open source softwaru a PLC řízení. Na základě provedené rešerše je navržena konstrukce 3D tiskárny a poté se zabývá její stavbou, oživením a testováním. Nakonec je provedeno měření přesnosti stroje.

ANOTATION

Author:	Bc. Miroslav Kotrč
Title of diploma thesis:	Design and realization of 3D printer
Extent:	105 pages, 70 figures, 11 table, 9 graphs
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Submitter:	CTU FME
Application:	Performing a test of the inverted FDM printing concept. Verifying the positional accuracy of a Core XY mechanism assembled using commonly available components for 3D printers and confirming its alignment.
Key words:	3D printing, PLC, Core XY, 3D printer, PLC control, Klipper firmware, FDM
Annotation:	This thesis focuses on the kinematics of 3D printers, analyzes the utilized components, and explores the possibilities of open-source software and PLC control. Based on the conducted research, a design for a 3D printer is proposed, followed by addressing its construction, activation, and testing. Finally, the machine's accuracy is measured.

OBSAH

1. Úvod.....	10
2. Cíle práce	12
3. Přehled technologií v oblasti 3D tisku.....	13
3.1. FDM tiskárny.....	13
3.2. Materiály pro FDM tisk	14
3.3. FDM tiskárny pro průmysl.....	15
3.4. FDM tiskárny pro domácí užití.....	18
3.5. Kinematické struktury 3D tiskáren.....	21
3.6. Komponenty FDM tiskáren.....	31
3.7. Pohony a řízení	33
3.8. Měření přesnosti.....	42
4. Konstrukční návrh.....	48
4.1. Rám.....	49
4.2. Tisková hlava.....	50
4.3. Pohybový mechanismus XY	55
4.4. Pohybový mechanismus Z.....	62
4.5. Tisková podložka	67
4.6. Souhrn užitých komponent.....	68
5. Stavba, řízení a uvedení do provozu.....	70
5.1. Stavba rámu.....	70
5.2. Elektronika	72
5.3. Uvedení stroje do provozu.....	74
5.4. Rozhraní.....	75
5.5. Zkušební tisk.....	77
6. Identifikace přesnosti a její měření.....	78
6.1. Identifikace rozlišení pohybových os.....	78
6.2. Měření pomocí Renishaw BallBar QC20	78
6.3. Měření pomocí Optodyne MCV – 2002	83
7. Závěr.....	95
Seznamy.....	97

SEZNAM ZKRATEK

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
BF	Binder Jet
CAD	Computer Aided Design
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
HARP	High Area Rapid Printing
I/O	Input/Output
IPC	Industrial Personal Computer
LCD	Liquid Crystal Display
LMD	Laser Metal Deposition
MJF	Multi Jet Fusion
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PEEK	Polyetheretherketon
PETG	Polyethylentereftalát
PLA	Polylaktit
PLC	Programmable Logic Controller
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Scelective Laser Sintering

SEZNAM SYMBOLŮ A VELIČIN

f	Hz	Frekvence
t	°C	Teplota
L_{MNG9}	km	Životnost vedení MGN9C
L_{MNG12}	km	Životnost vedení MGN12C
m_{hlava}	kg	Hmotnost tiskové hlavy
$m_{příčnick}$	kg	Hmotnost příčnicku
J_M	kg . m ²	Moment setrvačnosti rotoru motoru
J_r	kg . m ²	Moment setrvačnosti řemenice
J_{kh}	kg . m ²	Moment setrvačnosti hladké kladky
J_{ko}	kg . m ²	Moment setrvačnosti ozubené kladky
J_{redM}	kg . m ²	Moment setrvačnosti redukováný na motor
$F_{TMGN12C}$	N	Třecí síla od vozíku MGN12C
F_{TMGN9C}	N	Třecí síla od vozíku MGN9C
M_{kM}	Nm	Potřebný krouticí moment motoru
F_{o6}	Hz	Frekvence předepnutého řemene pro osy X a Y
m_t	kg	Hmotnost tištěného dílce vyplňujícího polovinu tiskového prostoru
m_c	kg	Celková hmotnost sestavy osy Z
F_Z	N	Síla od hmotnosti sestavy osy Z
F_{Zm}	N	Síla od hmotnosti sestavy osy Z na jeden motor
M_{km}	Nm	Krouticí moment jednoho pohonu osy Z
M_{kmp}	Nm	Potřebný krouticí moment motoru osy Z
F_{09}	Hz	Frekvence předepnutého řemene osy Z

1. Úvod

3D tiskárny představují moderní způsob výroby, který zejména v případě prototypů značným způsobem zvyšuje efektivitu. 3D tiskárna je zařízení pracující na aditivním principu. Výroba dílců tedy probíhá postupným vrstvením materiálu do požadovaného tvaru. Existuje řada typů tiskáren, práce se však specializuje na FDM tiskárny, jejich konstrukci a řízení. Dále jsou tiskárny užívající jako vstupní materiál prášek, který spojují například pryskyřicí či v případě kovového tisku laserem. Pro detailní plastové modely a například při tvorbě zubních protéz se užívají tiskárny tisknouce ze světlem vytvrditelné pryskyřice. Výhodou 3D tisku je možnost vytvářet tvarově složité dílce bez potřeby specializovaných nástrojů. K nevýhodám zejména FDM dílců patří anizotropická pevnost dílců.

Předložená práce se zabývá návrhem konstrukce a stavbou 3D tiskárny včetně implementace řízení a identifikace dosažitelné přesnosti. V úvodu práce shrnuje aktuální stav v dané oblasti včetně posouzení kinematických struktur 3D tiskáren, možnosti řízení i technik měření. Na základě provedené rešerše je vybrána vhodná kinematická struktura tiskárny Core XY a byl zpracován její konstrukční návrh. Dále práce popisuje vlastní stavbu tiskárny a její oživení. Na závěr práce popisuje testování přesnosti vytvořené 3D tiskárny a zkušební výtisky.

V rámci rešerše byly porovnávány různé kinematiky 3D tiskáren, jejich výhody a nevýhody, vše bylo doplněno o zjednodušené schéma rozložení pohonů dané struktury. Dále práce pojednává o jednotlivých komponentech 3D tiskáren a také možnostech open source řízení. Jednotlivá řízení jsou popsána obecně a prostor je věnován spíše firmwaru než ovládacím deskám, kterých je na trhu k dispozici nepřeberné množství a mohou být také proprietární.

Tiskárna je uvažována s invertovanou osou Z. Tisk tedy probíhá opačně. Tisková platforma je orientována směrem dolů a tryska hotendu směřuje vzhůru. Práce se příliš nezaměřuje na testování rozdílů v kvalitě tisku mezi běžným přístupem a tím invertovaným. Teoreticky by však měla tiskárna být schopna tisknout delší

mosty a vzhledem k umístění pohybového mechanismu nízko v rámu také stabilnější. Nevýhodou invertovaného mechanismu je možnost pádu tištěného dílce z podložky.

Přesnost byla měřena pomocí dvojice průmyslově užívaných zařízení pro vysoce přesné měření v řádu mikrometrů, a to Renishaw BallBar QC20 a laserový interferometr Optodyne MCV – 2002.

2. Cíle práce

Hlavním cílem práce je navrhnout, postavit a uvést do provozu 3D tiskárnu. Dalším krokem je pak ověření její přesnosti měřením a uskutečnění testovacího tisku. Jednotlivé cíle lze shrnout v následujících bodech:

- Rešerše v oblasti 3D tiskáren a jejich řízení
- Koncepční návrh 3D tiskárny a platformy pro řízení
- Konstrukce 3D tiskárny a její stavba
- Návrh a realizace řízení – pohyb tiskárny, ovládání extrudéru, předehřevu a kalibrace podložky
- Příprava uživatelského rozhraní
- Testování a měření přesnosti

3. Přehled technologií v oblasti 3D tisku

3D tiskárny jsou zařízení využívající aditivní technologii výroby. Vyrábí tedy dílce přidáváním materiálu do požadovaného tvaru. Tisk probíhá nejčastěji z různých polymerů, kompozitních polymerů a kovů. Je možné tisknout také polymerové betony, tyto tiskárny se však využívají zejména ve stavebnictví. [1]

Strojírenské využití mají především tiskárny pracující s polymery a kovy. Tyto tiskárny se využívají pro výrobu prototypů, které urychlují vývoj nových součástí, či pomáhají při optimalizaci stávajících. 3D tisk je využitelný také pro tvorbu různých přípravků. Další využití 3D tisku je v malosériové nebo kusové výrobě. Metalický 3D tisk má uplatnění pro tvarově složité dílce, například části forem s vnitřním chlazením, které může být lépe optimalizováno. 3D tisk totiž umožňuje výrobu tvarovaných vnitřních chladicích kanálů. [1]

Existuje několik kategorií tiskáren, práce se zaměřuje na FDM (FFF) tiskárny, jejich kinematické struktury, konstrukci a řízení. 3D tiskárny lze rozdělit do tří hlavních skupin. První skupinou jsou tiskárny využívající vstupního materiálu ve formě pryskyřice, kterou vytvrzují pomocí světelného záření, nejčastěji UV záření. Patří sem SLA, DLP, LCD, Volumetric a HARP 3D tiskárny. Druhým typem jsou tiskárny pracující na principu extruze. Do této kategorie se řadí již zmiňované FDM tiskárny, tiskárny tisknouce biologické materiály, ale také tiskárny tisknouce kov pomocí laseru (LMD). Třetí skupinou jsou tiskárny využívající tiskový materiál ve formě jemného prášku. Ten je následně chemicky nebo tepelně spojován do požadovaného tvaru. Tiskárny tohoto typu mohou tisknout z různých druhů polymerů a kovů, díky tisku v prášku nepotřebují podpurné struktury a jsou vhodné k tisku tvarově složitých dílců. Lze sem zařadit BJ, MJF, SLS, DMLS/SLM a EBM tiskárny. Jedná se zejména o průmyslově orientované tiskárny s vyšší cenou. [2] [3] [4] [5]

3.1. FDM tiskárny

FDM 3D tiskárny extrudují tiskový materiál ve formě struny nebo granulátu. Tiskovým materiálem je nejčastěji termoplast. V závislosti na formě vstupní suroviny je tiskový materiál extrudován do prostoru topného tělesa kladkovým mechanismem, nebo pomocí šneku. Natavený materiál je následně

v požadovaném množství dávkován skrze trysku. Pohybem tiskové hlavy pak vzniká po vrstvách dílec žádaného tvaru. Tisk je složen z více částí: tisku podpůrných struktur a samotného dílce. [6] [7]

Podpůrné struktury mohou být tištěny z jiného materiálu, než je materiál dílce. K tisku podpor lze využít snadno odstranitelných materiálů, které lze rozpustit v technologické kapalině, například ve vodě. [6] [7]

Podpory jsou generovány pomocí sliceru. Jedná se o program, který převádí CAD data, nejčastěji ve formátu .stl, na G-kód, který čte řídicí systém tiskárny. Ve sliceru lze nastavit veškeré parametry tisku. Mezi ty základní patří tiskové teploty a výška vrstvy. Součástí sliceru bývají přednastavené profily pro různé typy tiskáren a materiály. Hodnoty rychlostí a zrychlení mohou být určeny také hodnotami v řídicím systému stroje. [8]

FDM tiskárny se vyrábí v množství rozličných konfigurací a typů. Lze je zakoupit již od několika tisíc korun, tyto tiskárny jsou určeny primárně pro domácí užití. Mají jednoduchou konstrukci bez krytování pracovního prostoru. Takové tiskárny vyrábí například firma Creality. Tiskárny pro průmyslové aplikace mívají tiskový prostor zakrytovaný a také vyhřívaný. Krytování a vyhřev tiskové komory umožňuje tisk průmyslových materiálů díky řízenému chlazení. [5]

Probíhají také experimenty s pěti a sedmiosým tiskem. Tisk touto metodou nevyžaduje tisk podpor, šetří tak materiál a probíhá v kratším čase. Výhodou je také homogennější chování tištěných součástí, vzhledem k jinému rozložení vrstev. Díly tištěné planárně vykazují nejhorší mechanické vlastnosti ve směru kolmém na jednotlivé vrstvy. Pohybová struktura těchto tiskáren využívá kolébky s otočným stolem pro tiskovou podložku a otočněsklopné tiskové hlavy. [9]

3.2. Materiály pro FDM tisk

Existuje řada materiálů vhodných pro FDM tištěné díly, u domácích tiskáren se nejčastěji tiskne z PLA, PETG, ABS a flexibilních TPU a TPE. Pro tisk PLA se volí teplota extrudéru v rozmezí 150 až 210 °C a podložky do 60 °C. PLA je vhodné tisknout na tiskárnách bez krytovaného tiskového prostoru, kvůli potřebě

chlazení. Teplota skelného přechodu PLA se pohybuje okolo 60 °C. Pro tisk PETG jsou vhodné teploty v rozmezí 210 až 235 °C, teplota podložky se volí od 45 do 80 °C. Během tisku není vhodné intenzivně chladit u výstupu z extrudéru. PETG má teplotu skelného přechodu přibližně 80 °C. ABS je jedním z prvních tiskových materiálů užívaných pro FDM tiskárny. K jeho tisku jsou vhodné uzavřené 3D tiskárny s temperovanou komorou, teplota extrudéru se volí 220 až 275 °C, u podložky je to 100 až 130 °C. ABS má teplotu skelného přechodu přibližně 100 °C. TPU je flexibilní materiál tisknutelný při teplotě extrudéru v rozmezí 240 až 260 °C a teplotě podložky 40 až 60 °C. Pro jeho tisk je doporučeno užít přímého extrudéru. [10]

Materiály užívané v průmyslových 3D tiskárnách mají lepší mechanické vlastnosti než ty pro domácí 3D tiskárny. Některé tyto materiály je možné tisknout i na domácích tiskárnách s uzavřeným tiskovým prostorem, například PC a PA. Průmyslově užívaným materiálem je především PEEK, který si zachovává mechanické vlastnosti až do teploty 250 °C, je odolný vůči UV záření, většině chemikálií a teplotu tavení má 343 °C. Pro jeho tisk je potřeba vyhřívaná komora s teplotou nad 120 °C a extrudér pracující na teplotě vyšší než 350 °C. PC se tiskne při teplotách 250 až 290 °C na extrudéru a 100 až 130 °C u podložky. PC odolává teplotám až do 150 °C. PA neboli nylon se tiskne při teplotách 235 až 260 °C s teplotou podložky 100 až 130 °C. Teplota skelného přechodu je přibližně 70 °C. [10]

Na trhu jsou rovněž dostupné tiskové materiály plněné kompozity, například uhlíkovým vláknem. Přidání kompozitní složky zlepšuje mechanické vlastnosti filamentu. Pro jejich tisk je však nutné používat tvrzené či wolframové trysky, vzhledem k abrazivním vlastnostem těchto filamentů. [10]

3.3. FDM tiskárny pro průmysl

Tiskárny jsou určeny pro stálý provoz s přidanými funkcemi pro sledování jejich provozu a vzdálenou správu. Využívají certifikované tiskové materiály, které většinou dodává přímo výrobce tiskáren. Zaručují tak materiálové vlastnosti tištěných dílů a také jejich přesnost a opakovatelnost. [11]

Bývají určeny k tisku teplotně a mechanicky odolných materiálů, například PEEK, které potřebují vyhřívanou tiskovou komoru. Rovněž bývají opatřeny více tryskami, a tak zvládají jednoduše tisknout podpůrné struktury z jiných materiálů, například vodou odbouratelných. Jejich součástí bývá také zásobník materiálu, který udržuje stálé skladovací podmínky, teplotu, vlhkost.[12]

Průmyslové tiskárny také bývají vybaveny filtry pro ochranu obsluhy, protože některé tiskové materiály mohou v průběhu tisku produkovat jedovaté plyny a také mikročástice. Další výhodou průmyslových tiskáren je systém pohonu, který využívá uzavřené smyčky řízení, odměrování polohy většinou získává polohu z motorů. [11]

Essentium HSE 280i HT

Essentium HSE 280i HT je vysokorychlostní průmyslová 3D tiskárna dosahující tiskové rychlosti 500 mm/s. Maximální teplota trysky je 550 °C a tisková komora může být temperována na 185 °C. Tiskový prostor má 430x350x405 mm. Pro slicování využívá Materialise a Simplify3D. Tiskárna umožňuje tisknout PEEK, ULTEM i nylon. Cena této tiskárny začíná na 150 000 \$. [11]



Obr. 1 Essentium HSE 280i HT [13]

EVO-tech EL-1040

Průmyslová tiskárna s velkým tiskovým prostorem a čtyřmi tiskovými hlavami. Ty umožňují tisknout současně 4 shodné díly najednou, nebo lze využít více průměrů trysek k tisku detailů. Možné je i užití více materiálu na jednom tisku.

Velikost tiskového prostoru je 1300x1000x800 mm. K pohonu tiskárny slouží kuličkové šrouby. Maximální teplota trysky je 420 °C, tiskové podložky 160 °C a tisková komora je temperována až na 100 °C. Prostor pro tiskový materiál je rovněž vyhříván. K přípravě tisku využívá vlastních profilů pro Ultimaker Cura slicer. [14]



Obr. 2 EVO-tech EL-1040 [14]

CreatBot PEEK-300

Tiskárna umožňující tisk PEEK v relativně nízké cenové kategorii. Tiskový prostor má 300x300x400 mm pro jeden extrudér a 240x300x400 mm pro dvojistou extruzi. Tisková rychlost je až 120 mm/s. Dosahovaná teplota trysky je 500 °C, tiskové podložky 200 °C a tiskové komory 120 °C. Cena tiskárny se pohybuje kolem 300 000 Kč. [11][15]



Obr. 3 CreafBot PEEK 300 [11]

3.4. FDM tiskárny pro domácí užití

Tato zařízení bývají jednodušší a velmi často otevřené konstrukce bez vnějšího krytování. Cenově se pohybují od několika tisíc po stovky tisíc korun v závislosti na výrobcu a přídatných systémech. Nejlevnější dostupné tiskárny nemívají ani vyhřívanou podložku, což snižuje jejich možnosti tisku z různých materiálů. [16]

Velká část těchto tiskáren, je kartézské koncepce založené na Průša i3 tiskárně, také mohou být s paralelní kinematikou, například delta (tripod). Dále se vyskytují tiskárny s podložkou, která je ve formě nekonečného pásu. Tiskárny mají u kartézského typu rozdílné rozložení pohonné struktury. [17] [18]

Tiskárny se odlišují dosažitelnou teplotou hotendu a podložky, dále pak tiskovou rychlostí a přidávanými funkcemi. Mezi tyto funkce se řadí automatické vyrovnání podložky, sledování tiskové struny a další, zejména softwarové funkce, které zjednodušují obsluhu tiskáren. [16] [19]

Průša i3 MK3S

Tiskárna využívá XZ hlavy s duálním pohonem pro osu Z, k vedení os slouží lineární ložiska na vodicích tyčích. K pohonu os X a Y slouží ozubené řemeny, osu Z pohání trapézový šroub Tr 8x8. Tiskárna využívá přímého extrudéru. Rozměry tiskového prostoru jsou 250x210x210 mm, maximální teplota trysky 300 °C, maximální teplota podložky 120 °C a maximální rychlost posuvu přesahuje 200 mm/s. Prodejní cena tiskárny je 28 490 Kč ve složeném stavu

a 20 990 Kč za stavebnici. Tiskárna je však open-source a existují i levnější alternativy, jak ji postavit. Ty však postrádají podporu od Průša Research. K tiskárně lze rovněž dokoupit také další tiskové pláty z pružinové oceli s různými povrchy, například práškovým PEI. [20]



Obr. 4 Průša i3 MK3S+ [20]

Trilab DeltiQ 2

Tiskárna s delta konstrukcí využívající nepřímého extrudéru. Výhodou nepřímého extruderu je nižší hmotnost tiskové hlavy, nevýhodou je menší přesnost podávání filamentu a obtížnější tisk z flexibilních materiálů. Vozíky tripodu jsou na lineárním vedení a k pohonu užívají ozubeného řemenu. Tiskový prostor má 250 mm v průměru a jeho výška je 300 mm (celková výška tiskárny je 810 mm). Tryska dosahuje teploty 300 °C a tisková podložka 105 °C. Tiskárna má vestavěnou kameru pro sledování tisku a umožňuje vzdálený přístup pomocí webového rozhraní. Cena se pohybuje okolo 90 000 Kč. [21]



Obr. 5 Trilab DeltiQ 2. [21]

Creality CR-30

Tiskárna využívá pásu jako tiskové podložky, velikost tiskové plochy je 200x170, ve směru pásu je teoreticky nekonečná. Tisková hlava se pohybuje po rámu pod úhlem 45° vůči tiskovému pásu. Teplota dosahovaná tryskou je 240 °C a podložkou 100 °C. Tisková rychlost se bez dalších úprav pohybuje kolem 35 mm/s. [22]



Obr. 6 Creality CR-30 [22]

RatRig V-Core 3.1

Tiskárna s Core XY kinematikou je vyráběná ve 4 velikostech 200 až 500 mm³. Konstrukce tiskárny má tvar kostky s možností plného zakrytí s filtrem. Tisková hlava nabízí několik možností pro výběr hotendu a extrudéru. Tisková podložka je automaticky vyrovnávána s tiskovou hlavou a umístěna na třech

samostatně řízených pohonech. Tiskárna je vyvíjena v rámci open-source licence. Cena tiskárny na stránkách výrobce závisí na konfiguraci, pro tiskárnu s tiskovým objemem 300 mm³ a krytováním je to necelých 36 000 Kč. Tisková rychlost se pak pohybuje kolem 300 mm/s, s úpravami i více. [23]



Obr. 7 RatRig V-Core 3.1 [23]

3.5. Kinematické struktury 3D tiskáren

Pro funkci FDM tiskárny je nutno zajistit souvislou interpolaci tří pohybových os. Obvykle se jedná o osy XY a E. Tisk tedy probíhá v rovině XY, osou Z se nastavuje výška tisknuté vrstvy. Výjimku tvoří neplanární tisk, při němž je pohyb realizován plynulým pohybem ve všech třech pohybových osách. Experimentuje se také s víceosými tiskárnami. [9] [24] [18]

Existuje řada možností, jak rozložit pohybové osy v rámci kartézského uspořádání. Pohyb tiskové hlavy bývá realizován v rovinách XZ a XY, u varianty s pohybem tiskové hlavy v rovině XZ je pohyb v Y uskutečněn pohybem tiskové podložky. U tiskáren využívajících pásu jako tiskové podložky se tisková hlava pohybuje v rovině nakloněné vůči podložce. K tiskárnám s paralelní kinematikou patří tiskárny typu delta (tripod). [17]

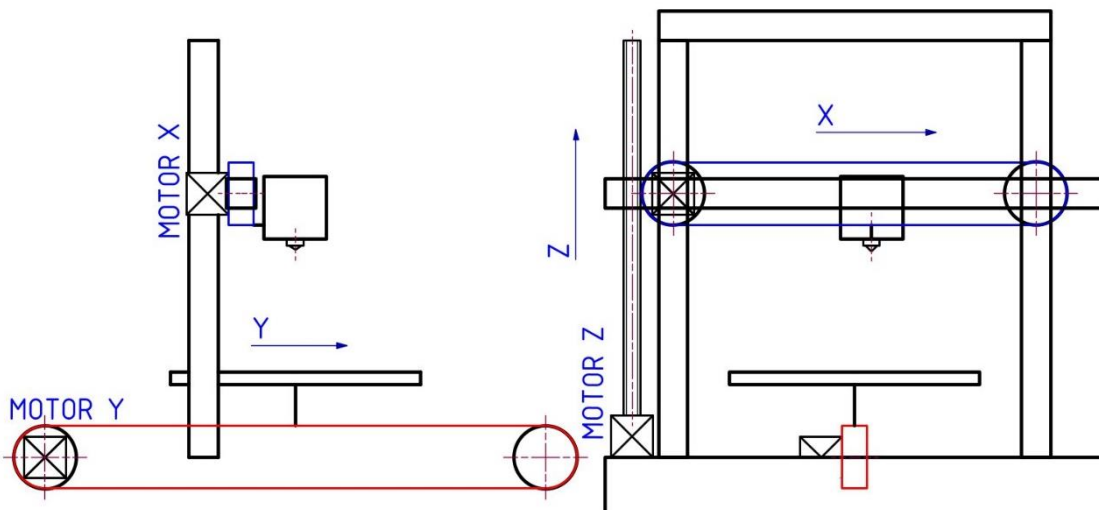
Kartézská tisková hlava XZ

Uspořádání je shodné s koncepcí tiskáren Průša. Tisková hlava je umístěna na portálu, který se pohybuje v rovině XZ. Během planárního tisku se tedy tisková hlava pohybuje ve směru osy X a postupně přidává výšku vrstvy v Z. Tisková

podložka se spolu stišťeným dílem pohybuje ve směru osy Y. Hmotnost tištěného dílu tak přímo ovlivňuje dynamické vlastnosti tiskárny a v průběhu tisku přidává zátěž pro motor. [5] [18] [25]

Pro pohyb ve směru jednotlivých os je potřeba jednoho motoru, konfigurace se samozřejmě může lišit v závislosti na velikosti tiskárny. Pro pohyb každé osy však kinematicky dostačuje jeden pohon. [5]

Nevýhodou tohoto uspořádání je realizace pohybu v ose Y pomocí tiskové podložky. Toto uspořádání vnáší do mechanismu vibrace, které ovlivňují kvalitu tisku a omezují tiskovou rychlost a možné zrychlení os. Hmotnost tištěného dílce tak má zásadní vliv na dynamické parametry osy Y, které nejsou díky tomu konstantní. [17] [18]



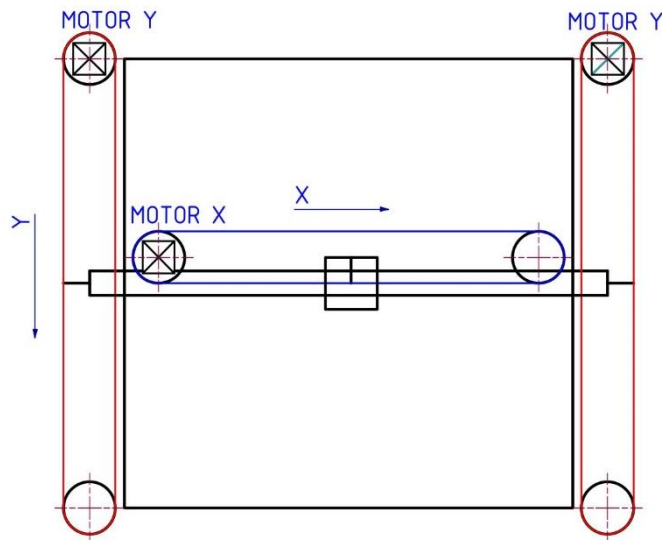
Obr. 8 Kartézská XZ

Kartézská tisková hlava XY

Tato varianta počítá s pohybem tiskové hlavy v rovině XY. Tisková platforma se obvykle pohybuje po ose Z směrem dolů od roviny s tiskovou hlavou a určuje tak výšku vrstvy. Na trhu jsou dostupné také tiskárny, které pohybují celým mechanismem tiskové hlavy v ose Z. [17]

Motor pro pohyb tiskové hlavy po příčnici bývá součástí jeho konstrukce. K pohybu ve směru jednotlivých os opět dochází bez součinnosti více motorů.

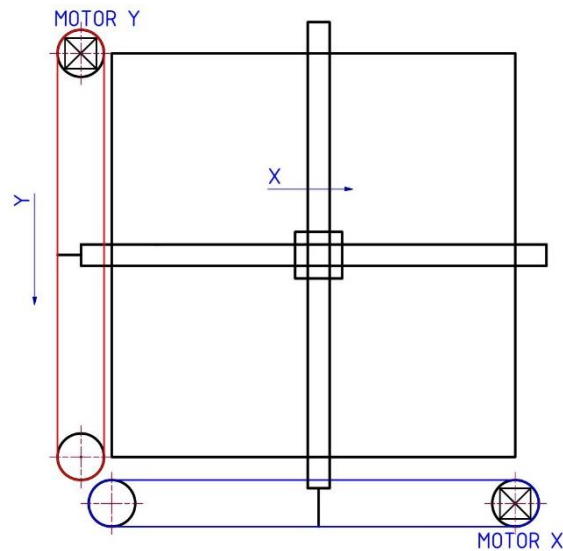
Pro pohyb příčnicku může být použito více motorů, ty však mohou dostávat pulzy od jednoho driveru. [17] [18]



Obr. 9 Kartézská XY

Pro uspořádání tiskové hlavy v rovině XY jsou zde tři hlavní typy uspořádání: sériové, křížové a paralelní. U sériového uspořádání je hmotnost portálu navýšena o hmotnost motoru, který je jeho součástí. Pro vysokorychlostní tisk tak není vhodná. Druhým typem je křížové uspořádání, u toho jsou motory umístěny pevně v rámu a tisková hlava je na dvou křížem umístěných tyčích, ty jsou na koncích poháněny. Tiskárna s tímto uspořádáním pak zaujímá větší prostor. Výhodou je užití kratších ozubených řemenů, pohyb lze také realizovat pohybovými šrouby. [17] [18]

Do paralelního typu se řadí Core XY, H-bot a Core H-bot, která jsou velikostně omezena délkou řemenů. Uspořádání XY je vhodné pro velkoformátové tiskárny, kdy podložka může být pevně součástí rámu a veškeré pohyby vykonává tisková hlava. [18] [25]



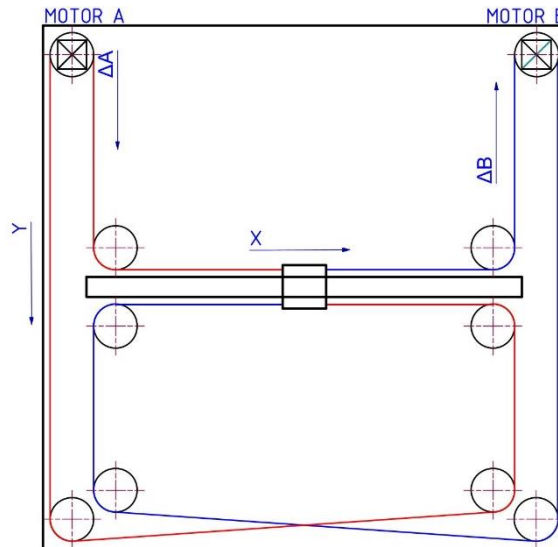
Obr. 10 Kartézská XY křížová

Core XY

Konstrukčně je tato varianta podobná verzi s tiskovou hlavou na portálu a pohybující se v rovině XY. Rozdílem je uložení motorů, které jsou v této variantě umístěny fixně na rámu a pohyb tiskové hlavy v obou osách je zajištěn pomocí dvou řemenových okruhů. Místo řemenů lze využít také Synchronmesh kabel. Tento typ pohonu může být použit také pro pohyb v rovině XZ. Na Obr. 11 lze vidět uspořádání pohonů. [18] [26] [27] [28]

Pro pohyb v ose X nebo v ose Y je nutná současná interpolace pohonů minimálně dvou os. Při zapojení pouze jednoho pohonu se tisková hlava pohybuje pod 45°. Tato koncepce je výhodná pro tisk vyššími rychlostmi s vyšší akcelerací. Pro správnou funkci však klade vyšší nároky na tuhost, správné sestavení rámu a také na napínání řemenů. [18] [26] [27] [28]

Pohybový mechanismus je vhodný pro tisk vysokými rychlostmi, díky pevně uchyceným motorům je hmotnost pohyblivých částí nízká. Spolupráce motorů na pohybu umožňuje vyšší hodnoty zrychlení při zachování přesnosti. Oproti koncepci H-Bot je Core XY stabilnější, pracuje s nižšími vibracemi a má jednodušší nastavení předpětí řemenů. [29]



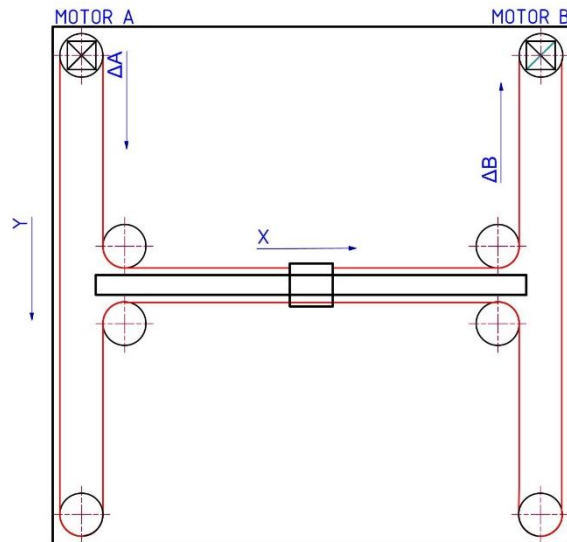
Obr. 11 Core XY schéma řemenu

H-Bot

Konstrukce obdobná s Core XY, avšak využívá pouze jednoho řemenu. Díky využití jednoho řemenu je menší celková délka řemenů, avšak užitý řemen je delší než jednotlivé využívané u Core XY. Přesnost tohoto systému je závislá na sestavení rámu a správném napnutí řemenu, které je komplikovanější dosažitelné než u Core XY systému. [18] [25] [27] [30]

Pohyb v osách X a Y je opět dosažen spoluprací alespoň dvou poháněných os. Na Obr. 12 je znázorněn pohyb příčnicku spolu s vozíkem v závislosti na rotaci motorů. Při pohybu pouze jednoho z motorů bude sestava vykonávat pohyb pod úhlem 45 °. [18] [25] [27] [30]

H-bot je náchylnější na vibrace než Core XY, který je stabilnější a má jednodušší napínání řemenu, díky využití dvou. Dlouhé vedení řemenu také omezuje rozměrové možnosti této koncepce. Při správném předpětí řemenů a dobrém sestavení jsou tyto tiskárny přesné a rychlé. Konstrukce je tak vhodná pro střední a malé tiskárny. [25] [28]



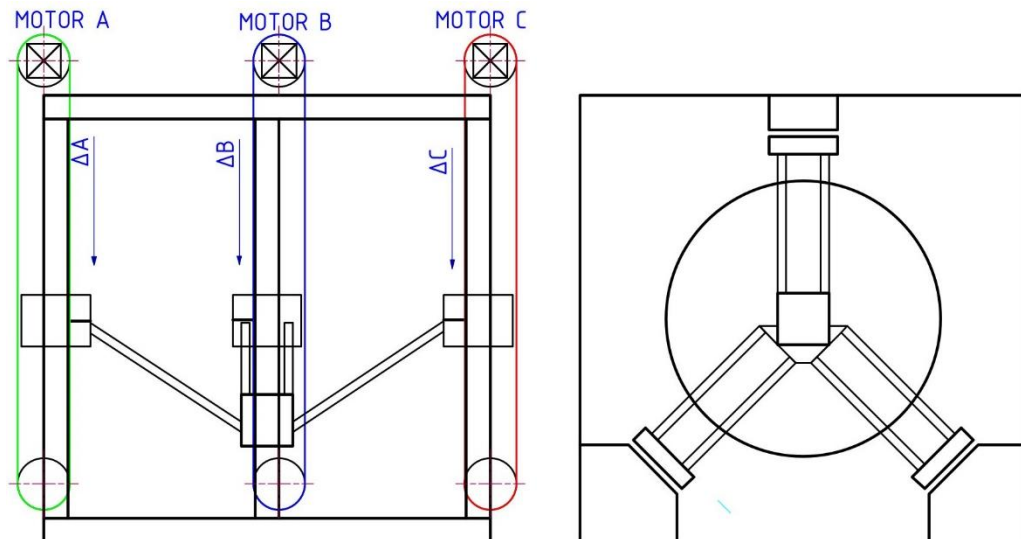
Obr. 12 H-bot schéma řemenu

Delta

Tento typ rozložení pohonu se řadí k paralelním kinematikám. Delta tiskárny obvykle užívají trojice motorů k pohonu tiskové hlavy v tiskovém prostoru, která je válcového tvaru. Tento typ tiskáren většinou využívá nepřímých extrudérů a dosahuje vyšších tiskových rychlostí než standardní typy pohonů. Jedná se o druhý nejběžnější typ FDM tiskáren dostupných na trhu. [5] [17] [25] [31]

Pro pohyb tiskové hlavy je využíváno souvislého pohybu všech třech motorů, to umožňuje vyšší akceleraci a tiskové rychlosti než u tiskáren typu Průša i3. Toho dosahují také díky relativně malé hmotnosti tiskových hlav. Díky užití nepřímého extrudéru a také nepotřebují hmotný portál. [5] [17] [25] [31]

Jedná se o systémy pracující mimo kartézské uspořádání, rozložení pohybových os je různé. Delta využívá tří svislých pojezdových vozíků a tisková hlava je umístěna na tyčích mezi nimi. Díky současnému využití více motorů a nižší hmotnosti tiskové hlavy je možná vyšší akcelerace. [5] [25] [31]

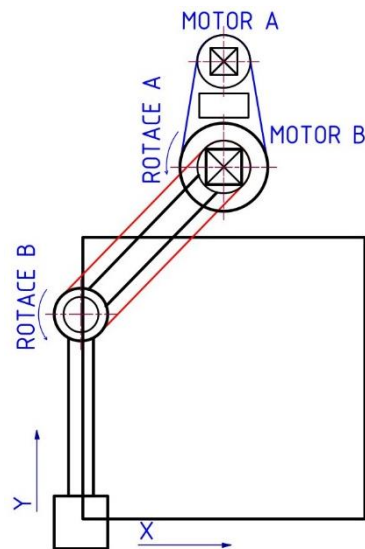


Obr. 13 Delta

SCARA

Tisková hlava je uložena na konci dvou ramen s kloubem, případně může být umístěna na jednom rameni s ovládaným kloubem. Tato koncepce může jednoduše tisknout na více tiskových ploch uspořádaných v kruhu kolem sloupu s motory. Ty ovládají ruku s tiskovou hlavou, která umožňuje pohyb v ose Z. Zkratka SCARA označuje Selective Compliance Articulated Robot Arm. Tento typ tiskáren se vyskytuje velmi zřídka. Pro pohyb v rovině XY je nutná společná interpolace dvou ovládaných angulárních os. [5] [18] [25] [31]

SCARA je méně tuhá, lze ji realizovat pomocí jednoho ramene s kloubem, či pomocí dvou paralelních ramen pro vyšší tuhost. Rameno koná pohyby v rovině XY a celý mechanismus se posouvá v ose Z. Přesnost mechanismu je nižší, avšak při využití nepřímého extrudéru dosahuje vysokých tiskových rychlostí. [5] [17]

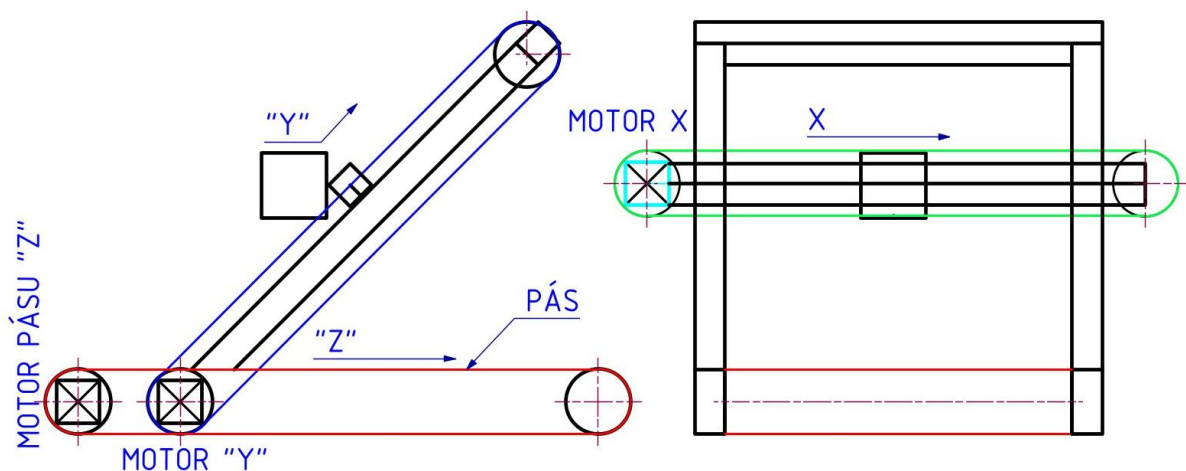


Obr. 14 SCARA

Pásová tiskárna

Rovina pohybu tiskové hlavy je skloněna pod úhlem, díky tomu funguje podložka ve formě pásu obdobně jako osa Z u klasické koncepce. Pro pohyb v tiskové rovině lze použít různých druhů rozložení pohonných os od klasického portálu, přes Core XY, po H-bot. Tisková hlava může být také umístěna na tripodu. Tiskárna je vhodná pro tisk dílců s jedním rozměrem výrazně delším než ostatní, například různé nosníky, nebo pro sériovou výrobu menších komponent. [18]

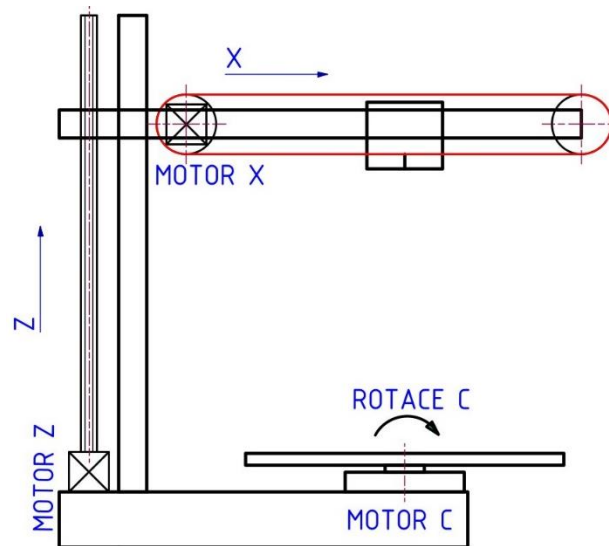
Pohybové osy jsou u tiskárny rozloženy v závislosti na druhu pohonu tiskové hlavy. Pro variantu s delta kinematikou tiskové hlavy je pás tiskové podložky další přidanou osou. [18]



Obr. 15 Pásová tiskárna

Polar tiskárna

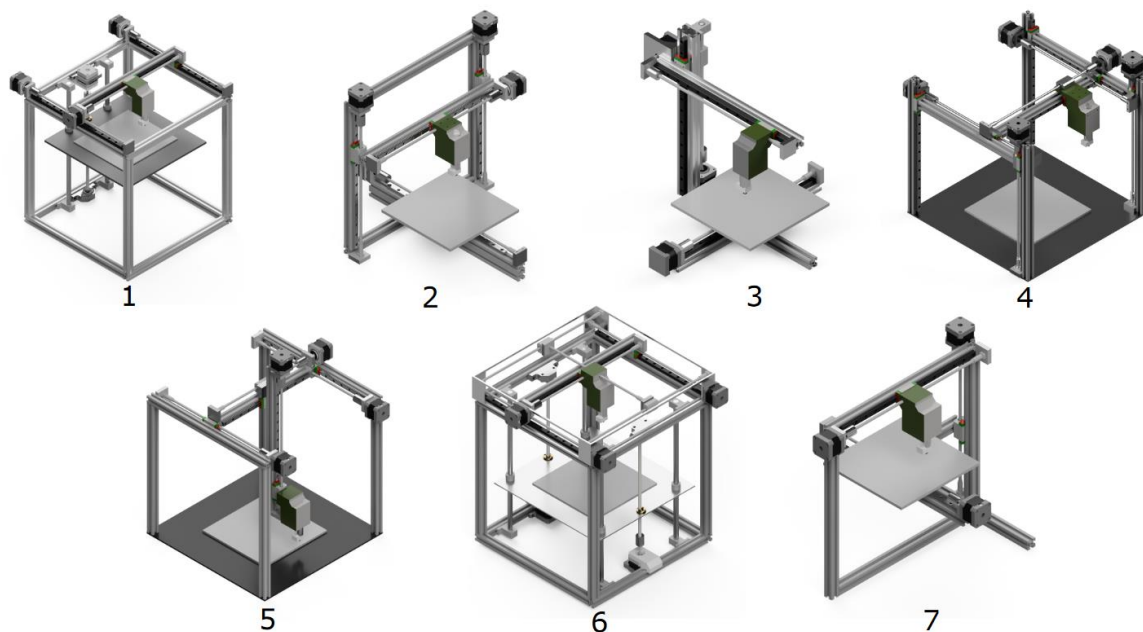
Tento typ tiskáren využívá cylindrických souřadnic. Tisková podložka je kruhového tvaru a rotuje kolem své osy. Tisková hlava se pohybuje v rovině XZ. Tiskárna je rozložením pohybových os shodná s karuselovým soustruhem. Je vhodná zejména pro tisk kruhových dílců, avšak umožňuje tisknout součásti libovolného tvaru. [31]



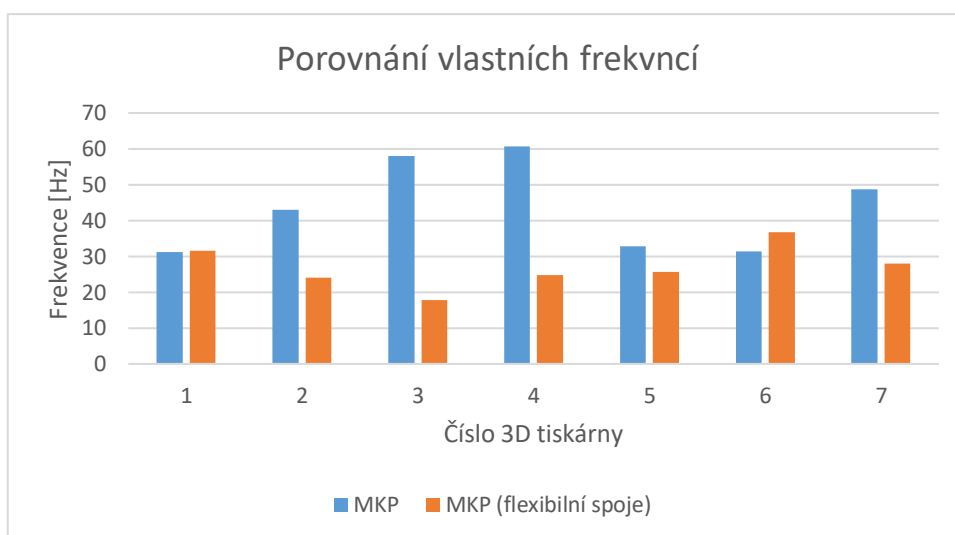
Obr. 16 Polar

Porovnání strukturálních vlastností kartézských struktur

Tiskárny lze porovnat také z hlediska jejich vlastních frekvencí. K tomuto účelu poslouží zpracovaná studie, která porovnává sedm běžných typů kartézských tiskáren v rámci dvou početních modelů. První početní model považuje spoje dílů rámu za dokonale tuhé a druhý je považuje za flexibilní. Na Obr. 17 jsou k vidění typy zkoumaných tiskáren. Na grafu jsou pak jejich vlastní frekvence, MKP považuje spoje za tuhé a do grafu (Obr. 18) zanáší data nejnižší frekvence vlastních kmitů, druhý způsob je založen na jejich kinematice s předpokladem poddajnosti kloubů. Pro tiskárny platí, stejně jako pro jiné výrobní stroje, snaha dosahovat vyšších vlastních frekvencí. [29]



Obr. 17 Příkladů typů tiskáren [34]



Obr. 18 Porovnání vlastních frekvencí [34]

Výsledné porovnání

Pro přehlednost byly jednotlivé vlastnosti tiskáren shrnuty do Tab. 1. Z Tab. 1 jsou patrné výhody plynoucí z využití Core XY uspořádání pohonů. Z tabulky byly vynechány tiskárny využívající pásu, nelze u nich určit vlastnosti vzhledem k možnostem realizace pohybu tiskové hlavy.

Podle zvolené metodiky bodování vychází nejlépe Core XY. Proto byla vybrána jako struktura pro návrh a konstrukci tiskárny v rámci DP. Tiskárna bude také

využívat přímého extrudéru pro možné zvýšení tiskové rychlosti, díky přesnějšímu podávání tiskového materiálu.

Tab. 1 Srovnání tiskáren

	Hmotnost mechanismu	Tuhost	Zástavbové rozměry	Vibrace	Přesnost	Zrychlení	Obvyklá rychlost	Body
Hlava XZ	1	3	1	1	2	1	2	11
Hlava XY sériová	3	4	3	3	3	2	3	21
Hlava XY křížová	4	4	2	4	4	3	3	24
Core XY	4	5	4	5	5	4	4	31
H-bot	4	4	4	4	4	4	4	28
Delta	5	4	3	4	3	5	4	28
SCARA	5	2	5	2	2	4	5	25
Polar	3	3	4	4	4	3	3	24

3.6. Komponenty FDM tiskáren

Součásti 3D tiskáren lze rozdělit do dvou hlavních skupin: mechanické a elektronické komponenty. K mechanickým se řadí části rámu, převodová ústrojí, různá vedení a podobně. Mezi elektronické lze zařadit topné prvky, čidla, koncové spínače, motory, řídicí a ovládací prvky. [19] [32]

Komponenty pohonů, řízení a jeho software a firmware jsou zmíněny v samostatné kapitole. Vzhledem k zaměření práce je jim věnováno více prostoru.

Komponenty rámu

Rámy mohou být sestaveny z hliníkových profilů a příslušenství, plechových výpalků, plastových dílů, svařenců, či z kombinace výše zmíněných. Záleží na užití tiskárny, rozdílnou konstrukci bude mít tiskárna pro průmyslové a domácí užití. Snahou u tiskáren je minimalizace hmotnosti pohyblivých částí, zejména portálu a tiskové hlavy. Nevýhodou levnějších tiskáren s otevřenou konstrukcí je absence krytování tiskového prostoru, kvůli čemuž dochází k rychlejšímu chladnutí dílů. S tím je spojené pnutí, deformace dílců a možná je i ztráta adheze od podložky, díky nestabilním okolním podmínkám. [19] [24] [33] [34]

Vedení

Pro vedení komponent pohybových struktur se využívají lineární kuličková vedení, axiální ložiska v kombinaci s vodicími tyčemi a různá další řešení, například kladková kola zapadající do vodicích tyčí v hliníkovém rámu (systém Bosch Rexroth), či V-kola s běhounem z plastu zapadající do V drážky v profilu. [34]

Tisková podložka

Část tiskárny, na kterou je postupně tištěn model. Je u ní kladen požadavek na teplotní stálost a rovinnost. V rámci konstrukce tiskárny je třeba zajistit mechanismus, kterým lze nastavit rovnoběžnost podložky s rovinou pohybu tiskové hlavy. Na tiskovou podložku se obvykle umísťuje tiskový plát, který slouží k usnadnění odebírání tištěných dílců a lepší adhezi pro první vrstvu. [19] [24] [33]

Topné těleso podložky

Využívá se několik typů topných těles, každý z typů má své přednosti i zápory. Využívá se topného tělesa ve formě tištěného spoje PCB, tento typ je pak přímo součástí podložky. V závislosti na konstrukci PCB výhřevné platformy umožňují sektorové vyhřívání, každý sektor pak disponuje vlastním tepelným čidlem pro řízení. Další typy topných těles se lepí na spodní stranu tiskové podložky, patří sem polyamidové výhřevné fólie, silikonové podložky a další typy. [19] [24] [33]

Hotend

Jedná se o díl složený ze dvou základních částí: horké a chladné. Součástí první zmíněné části je tepelné těleso, tryska termistor a heatbreak, který má za úkol oddělovat obě části hotendu. Celá tato část je určena k natavování materiálu a jeho aplikaci. Chladná část hotendu se skládá z heatbreaku, chladiče, montážní části pro extrudér, ventilátoru pro chlazení a případně fitinky pro PTFE trubici. [19] [24]

Extrudér

Komponent, který podává tiskový materiál do hotendu. Je vyráběno mnoho typů extrudérů pro podávání tiskové struny. K podávání filamentu nejčastěji

užívá ozubená podávací kola a přitlačné kladky. Základně je dělíme na přímé a nepřímé. Přímé extrudéry jsou součástí tiskové hlavy a materiál dodávají hotendu přímo. Nepřímé nebo také bovdenové jsou umístěny mimo tiskovou hlavu a materiál podávají skrze bovden z PTFE trubice nebo trubice z podobného materiálu s nízkým třením. [19] [24] [33]

Doplňkové systémy

Široká skupina obsahující veškeré příslušenství k tiskárnám. Lze sem tak zařadit mechanismy pro plynulou změnu tiskové struny během tisku pro více materiálový a vícebarevný tisk, sondy pro kalibraci tiskové platformy, kamery pro inteligentní sledování průběhu tisku a mnohé další. Firma Bambu Lab užívá u své tiskárny X1C LIDAR, kterým kontroluje kvalitu první vrstvy a také kompenzovat případné chyby. [5] [24] [33] [35]

3.7. Pohony a řízení

K základní funkci 3D tiskárny je potřeba samostatně řídit čtyři pohybové osy. Tři z nich jsou určeny k pohybu v osách XYZ, čtvrtou osou je E, tedy extrudér. K pohonu těchto os se využívají krokové motory, nebo servomotory. K zpřesnění pohybu lze doplnit osy o odměřování. U krokových motorů je rovněž možné doplnit enkodér pro odměřování na motoru. [24]

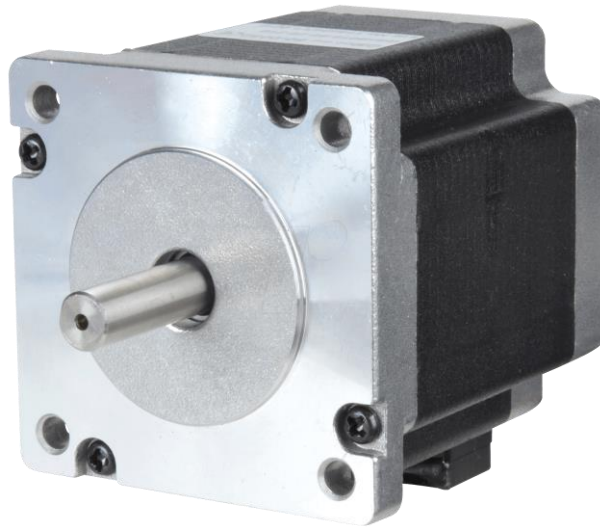
K převodu rotačního pohybu od motorů na translační slouží různé druhy pohybových šroubů, pro levnější domácí tiskárny jde nejčastěji o vícechodé trapézové šrouby, průmyslové tiskárny využívají i kuličkových šroubů. Dalším užívaným způsobem jsou ozubené řemeny se soustavami kladek. [24] [33] [34]

Řízení tiskáren pro průmysl a jejich firmware bývá podobné a skládá se ze silové a logické části. Pro jejich řízení se využívá průmyslových komponent a PLC, nebo si jednotliví výrobci vyvíjí proprietární řešení. [11]

PLC je programovatelný logický automat, skládá se z PC, komunikačních karet, I/O karet analogových a digitálních. Dále kním lze pomocí jejich sběrnice připojit nejrůznější ovládací periferie, například servoměniče a měniče krokových motorů. PLC jsou zařízení pracující v pevném taktu a vykonávající program na základě vstupů.

Krokové motory

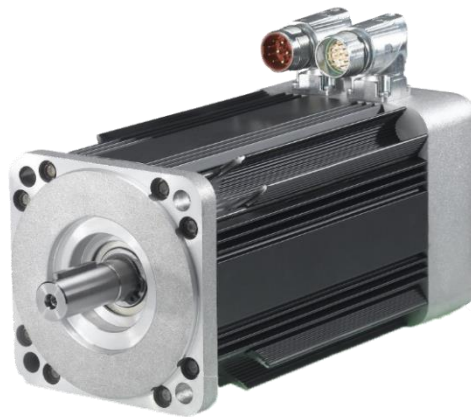
Jedná se o typ motorů s přesně definovanou rotací na jeden krok, nejčastěji se jedná o $1,8^\circ$ a $0,9^\circ$. Drivery těchto motorů umožňují takzvané mikrokrokování, které zvedá jejich rozlišovací schopnost na úkor točivého momentu, avšak přináší vyšší plynulost polohování. Běžně lze jeden krok motoru rozdělit až na 256 mikrokroků. Krokové motory velmi často fungují v režimu otevřené smyčky bez zpětné vazby, která by kontrolovala skutečné dosažení kroku. [24] [33] [37]



Obr. 19 Krokový motor [38]

Servomotory

Jedná se o motory pracující se zpětnou vazbou pro jejich polohování. Skládají se ze dvou částí motoru a senzoru polohy. Mohou mít střídavé či stejnosměrné napájení. Střídavé motory mohou užívat komutátor či elektronickou komutaci řízenou Hallovou sondou, ta není potřeba pro motory s absolutním odměřováním. Jako motory se nejčastěji užívají střídavé bezkartáčové třífázové motory, mohou být synchronní s permanentními magnety na rotoru nebo asynchronní s kotvou na krátko, ty však nejsou příliš vhodné pro přesné polohování. Servomotory se užívají pro pohybové osy strojů, či pro polohování vřeten. Díky zpětné vazbě na motoru mohou fungovat i bez pravítka přímo na ose. [39]



Obr. 20 Servomotor [40]

Pohybové šrouby

Pohybové šrouby se u tiskáren používají nejčastěji k realizaci pohybu v ose Z. U 3D tiskáren určených pro domácí užití se setkáváme s rovnoramennými lichoběžníkovými šrouby, nejčastěji Tr 8x2 a Tr 8x8. Pokud to umožňuje koncepce 3D tiskárny, lze využít pohybových šroubů také k pohonu v osách X a Y, je tomu tak u sériového a křížového kartézského uspořádání. Pro pohon v osách X a Y jsou však vhodnější kuličkové šrouby, vzhledem k jejich chodu bez vůlí. Lze jich využít také pro pohon tiskáren typu delta. Kuličkové šrouby jsou pak ve velké míře užívány u pohonů průmyslových 3D tiskáren. [32]



Obr. 21 Kuličkový šroub [41]

Řemenové převody

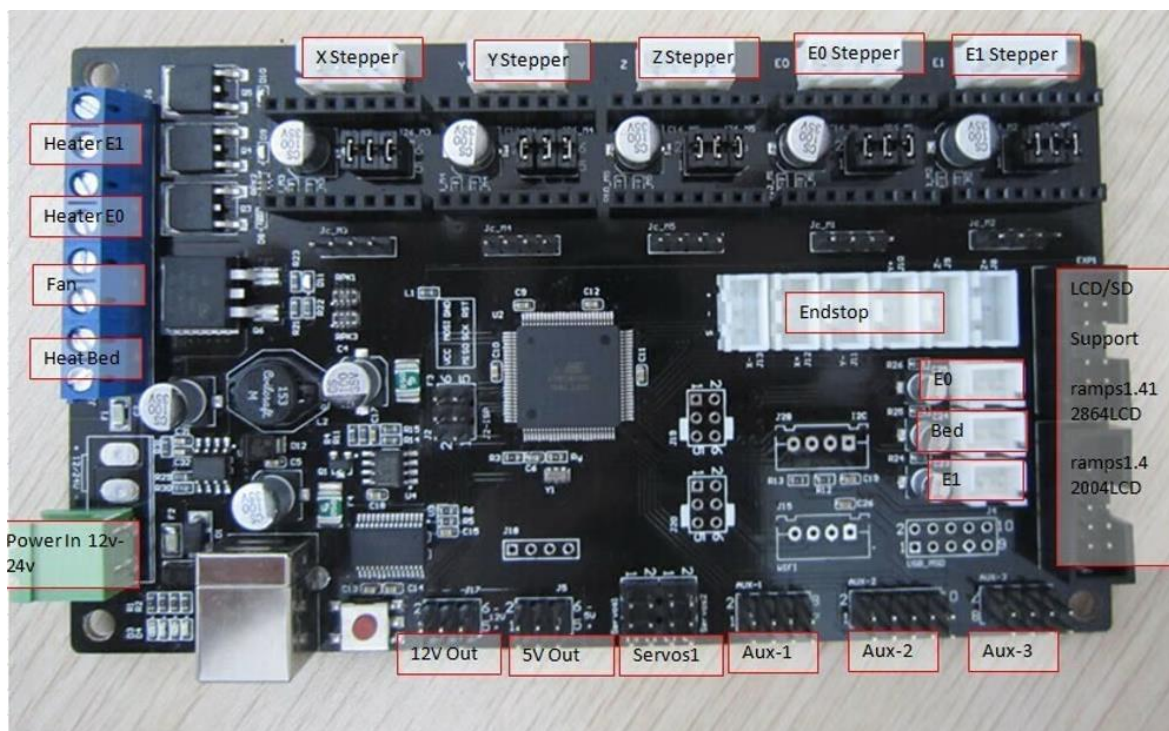
3D tiskárny pro domácí užití využívají zejména ozubených řemenů typu GT2 o šířce 6 mm. Kromě řemenů lze obdobně využít také Synchronmesh kabelů, které umožňují přenos sil i mimo rovinu. Řemenové pohony využívají paralelní kartézské struktury. Nevýhodou těchto pohonů je nutnost zajistit správné předepnutí a vedení větví řemenů rovnoběžně s pohybem os. [24]



Obr. 22 Řemenový pohon [24]

Řídicí systémy a firmware pro domácí 3D tiskárny

U tiskáren pro domácí použití je k dispozici řada open source řešení, které lze snadno modifikovat a přizpůsobit danému typu tiskárny a dané řídicí desce. K řízení tiskárny lze použít desek, které mají integrované funkce pro řízení topných těles a čtení termistorů nebo kombinaci Arduina a ovládací desky bez vlastního procesoru, tzv. shieldu. Součástí ovládací desky jsou také drivery pro krokové či jiné motory. Řídicí desky pro domácí 3D tiskárny bývají 8 a 32-bitové. K řídicím deskám lze připojit i jednodesková PC, například Raspberry Pi. Raspberry Pi pak následně vysílá řídicí signály do desky, která je jen vykonává, toto řešení zvyšuje celkový výpočetní výkon a přidává další funkce. Na Obr. 23 je zobrazena deska pro řízení 3D tiskárny s možností ovládat 5 krokových motorů, rozhraním pro koncové spínače, termistory, napájení topných těles, řízení serva a výstupem pro displej. [42]



Obr. 23 MKS řídicí deska [42]

Marlin – Opensource firmware

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších firmwarů pro řízení 3D tiskáren, pro jeho základní funkce postačuje deska s 8-bitovým procesorem. Pro pokročilejší funkce a lepší interpolaci je vhodné volit výkonnější 32-bitové řízení. Marlin je vyvíjen ve dvou variantách, a to pro 8-bitové a 32-bitové desky a je kompatibilní s většinou dostupných řídicích desek a Arduinem. Tiskárny pro domácí využití mají k dispozici celou řadu ovládacích desek, které již disponují moduly pro čtení teploty z termistorů a řízení stejnosměrných výhřevných těles. Tyto desky vyrábí například firma BigTreeTech. [42]

Z Marlin firmwaru vychází řídicí systém, který je užíván u tiskáren od Průša Research. Pro jejich účely je modifikován a jsou dodány další funkce, například bodové měření tiskové plochy pro nastavení výšky první vrstvy a kompenzaci deformace tiskové podložky. [42]

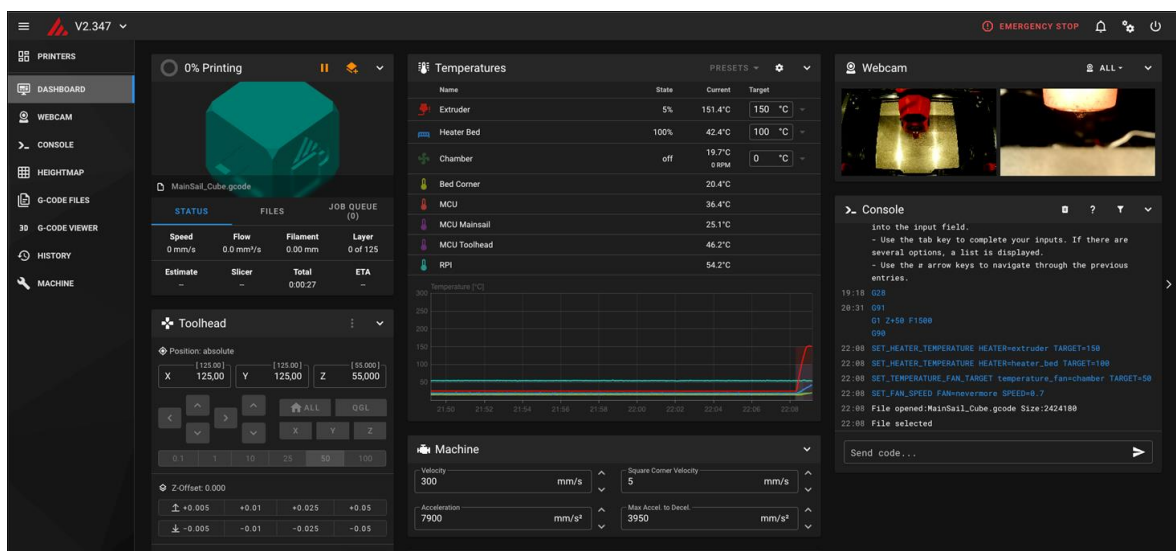
Klipper – Opensource firmware

K dalším firmwarům patří Klipper, který disponuje pokročilejšími funkcemi a k provozu vyžaduje výkonnější hardware (Raspberry Pi 3B apod.), ten je následně propojen s ovládací deskou pomocí USB. Umožňuje tiskárnu ovládat

přes webové rozhraní a má další funkce, které umožňují zkvalitnit a urychlit tisk, například: „input_shaper“, který optimalizuje ovládání motorů na základě frekvenční analýzy tiskárny, měřené pomocí akcelerometru. Ke zrychlení tisku také přispívá „pressure_advance“, tato funkce optimalizuje tok filamentu tryskou, není tak nutné využívat retrakce při přejezdech tiskové hlavy. Tento firmware používají například tiskárny RatRig a Voron. [42]

Úprava parametrů tiskárny a tvorba maker jsou možné úpravou konfiguračního souboru a není nutné nahrávat upravenou verzi firmwaru jako u Marlina. Lze to udělat pomocí webového rozhraní. Pomocí tohoto rozhraní lze tiskárnu také ovládat skrze webový prohlížeč. [42]

Existuje několik ovládacích rozhraní pro firmware Klipper, například: Mainsail a Fluidd. Skrze tato rozhraní lze upravovat konfiguraci stroje, spouštět tisk, pohybovat jednotlivými strojními osami, spouštět různá makra, spínat topná tělesa a další systémy. V tomto prostředí se následně zobrazuje průběh tisku a lze tam sledovat průběh tisku skrze kameru. Na Obr. 24 je k vidění výchozí obrazovka rozhraní Mainsail, tu je rovněž možné upravit změnou pozic jednotlivých ovládacích prvků. Vlevo je panel pro přepínání jednotlivých obrazovek. [42]

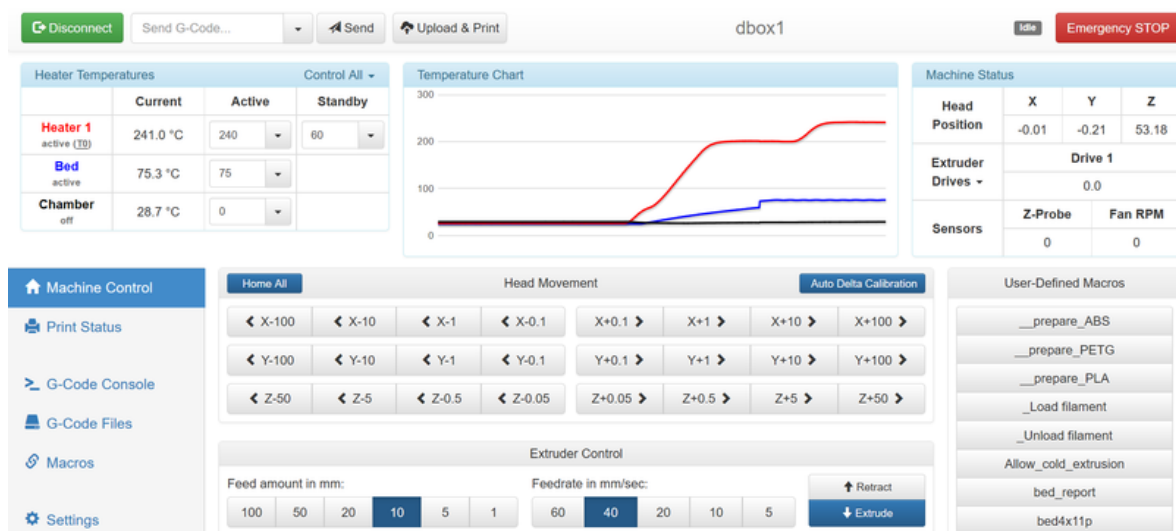


Obr. 24 MainSail prostředí [43]

RepRap – Opensource firmware

Firmware, který původně vznikl pro Duet řídicí desky. Byl jedním z prvních, který podporoval 32-bitové desky. Aktualizace firmware je prováděna pomocí změny konfiguračního souboru skrze SD kartu. Nevýhodou tohoto firmwaru je jeho omezená podpora. Lze jej nainstalovat na omezené množství desek s 32-bitovými AVR čipy. Řadíme sem Duet, RADDs a Smart-RAMPS desky. [42]

Firmware RepRap užívá Duet Web Control, který pracuje na deskách Duet a je možné jej připojit k síti pomocí WiFi či kabelového připojení. Umožňuje tak vzdálený přístup k ovládání skrze webový prohlížeč. Funkcemi je velice podobný jako výše zmiňované prostředí MainSail. Na Obr. 25 lze vidět obrazovku ovládání stroje, v levém dolním rohu je menu přepínání dalších obrazovek. [42]



Obr. 25 Duet Web Control - obrazovka ovládání stroje [44]

PLC řídicí systémy

PLC řízení je průmyslové řešení vhodné zejména pro profesionální stroje. Užívány jsou pro jejich stabilitu a možnosti řídit různé druhy pohonů, skrze různé doplňující karty. Mezi 3D tiskárny řízené pomocí PLC patří například velkoformátová tiskárna od společnosti Collosus. [45]

PLC je specializovaný počítačový řídicí systém pracující na bázi mikroprocesoru, který sleduje stav vstupních zařízení a na základě programu rozhoduje o řízení výstupních zařízení. Vyhodnocení programu probíhá v časově určeném cyklu.

Vstupy a výstupy, neboli I/O, mohou být jak digitální, tak analogové. PLC se skládá z několika částí: logické jednotky, vstupů a výstupů a komunikační sběrnice. PLC jednotky vyvíjí a dodává řada firem, například Beckhoff, Siemens a Temex. [46]

Pro programování PLC si jejich výrobci vyvíjí specializovaný software, který podporuje různé programovací jazyky v rámci normy IEC 61131-3 a další. Tento software také obsahuje knihovny připravených programových bloků a informace o fyzických zařízeních dodávaných danou společností pro usnadnění oživení stroje. Mezi tyto programy se řadí například TIA portal od společnosti Siemens a TwinCAT vyvíjený firmou Beckhoff. [47]



Obr. 26 PLC Beckhoff s periferiemi [48]

PLC Beckhoff

PLC Beckhoff pracuje na platformě průmyslového PC, na tom pracuje souběžně run-time řízení i Windows Embedded. Díky tomu jsou PLC Beckhoff univerzální a umožňují databázové aplikace, vzdálenou správu apod. Cyklus PLC je vždy přesně definován a nemění se v závislosti na běhu a délce programu, díky tomu jsou tato PLC vhodná pro náročné aplikace v oblasti servopohonů a měření. [49]

Hardware PLC Beckhoff je složen z průmyslového PC, od malých vestavěných PC, až po průmyslové servery s vysokým výpočetním výkonem. Dále jsou k dispozici různé I/O moduly, pracující na Beckhoff sběrnici EtherCAT a také HMI zařízení. Dále Beckhoff dodává také karty pro propojení pomocí dalších

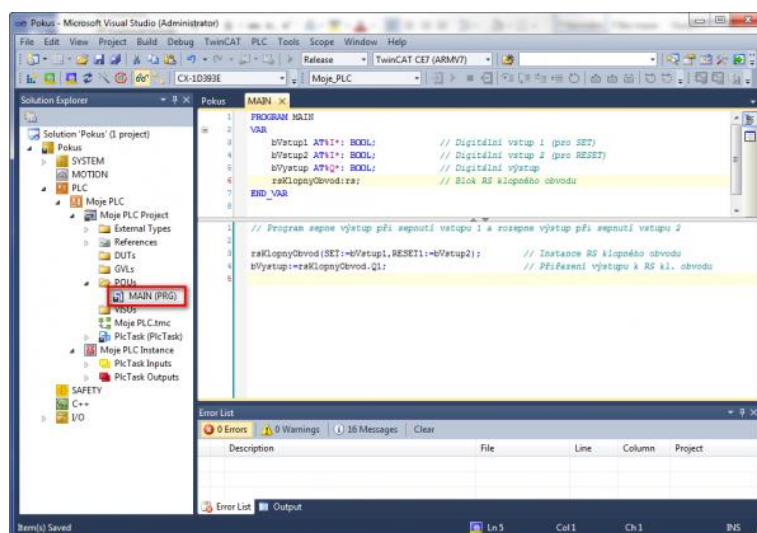
průmyslových sběrnic. K rozšiřujícím kartám se řadí také zařízení pro ovládání motorů a dalších zařízení. [49]

TwinCAT

TwinCAT slouží k programování PLC Beckhoff. V současnosti je podporována zejména verze TwinCAT 3. Program je k dispozici ke stažení zcela zdarma, platí se pouze run-time licence používané v reálných aplikacích. Pro odladění programu je k dispozici zkušební sedmidenní licence, ta lze následně i obnovit. [49]

TwinCAT pracuje se všemi programovacími jazyky definovanými normou pro PLC programování IEC 61131-3, lze také vyvíjet real-time PLC aplikace v C++ a UML. Pomocí komunikační vrstvy Automation Device Specification (ADS) lze komunikovat s aplikacemi vytvořenými v .NET, JAVA, C/C++ etc. Prostředí TwinCAT je k vidění na Obr. 27. [49] [50]

Důležitou součástí každého PLC je také HMI neboli Human Machine Interface. Jedná se o rozhraní, skrze které lze přímo ovládat zařízení řízené PLC a sledovat jeho provoz v reálném čase. K ovládání se užívá různých zařízení, nejčastěji dotykových obrazovek. [50]



Obr. 27 Prostředí TwinCAT [49]

PLC Siemens

Siemens vyrábí svá PLC pod označením SIMATIC, to je složenina slov Siemens a Automatic. Nynější generace PLC nese označení SIMATIC S7. Jsou dále rozděleny podle výkonu a možností. K výpočetnímu modulu lze připojit další karty vstupů a výstupů, ty mohou být digitální i analogové. Jednotlivé moduly ze série S7 spolu komunikují pomocí sběrnice PROFIBUS a ProfiNET. Výpočetní jednotky jsou rozděleny v sérii S7 od modelu 1200 až 1500. [51] [52]

TIA portal

Jedná se program fungující na platformě Windows určený pro programování PLC Siemens. Skrze něj lze také simulovat chod PLC pro vytvoření simulace například v MS Visual Components. Pomocí TIA portalu lze rovněž navrhnout a simulovat HMI panel pro ovládání PLC. [53]

V rámci TIA portalu lze nakonfigurovat fyzické PLC včetně přídatných karet, může rovněž skrze něj jednotlivé moduly aktualizovat. TIA portal slouží k programování PLC a jeho simulaci. Pro správnou funkci simulace je potřeba nastavit fyzickou konfiguraci PLC v TIA, této konfiguraci odpovídají jednotlivé vstupy a výstupy. [53]

3.8. Měření přesnosti

Přesnost strojů lze rozdělit do několika skupin: geometrická přesnost, přesnost polohování a její opakovatelnost. Pro měření geometrické přesnosti se kontrolují geometrické tolerance. Jejich dovolené hodnoty stanovuje výrobce stroje či norma. Metody měření jednotlivých úchylek geometrické přesnosti stanovuje norma ČSN ISO 230–1: Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek. Zásady měření přesnosti polohování stanovuje norma ČSN ISO 230–2: Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 2: Stanovení přesnosti opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. [54] [55]

Renishaw BallBar QC20

BallBar je velmi přesný teleskopický lineární snímač s dvojicí přesných koulí na obou koncích. Pro měření užívá dvojice přesných magnetických držáků, jeden

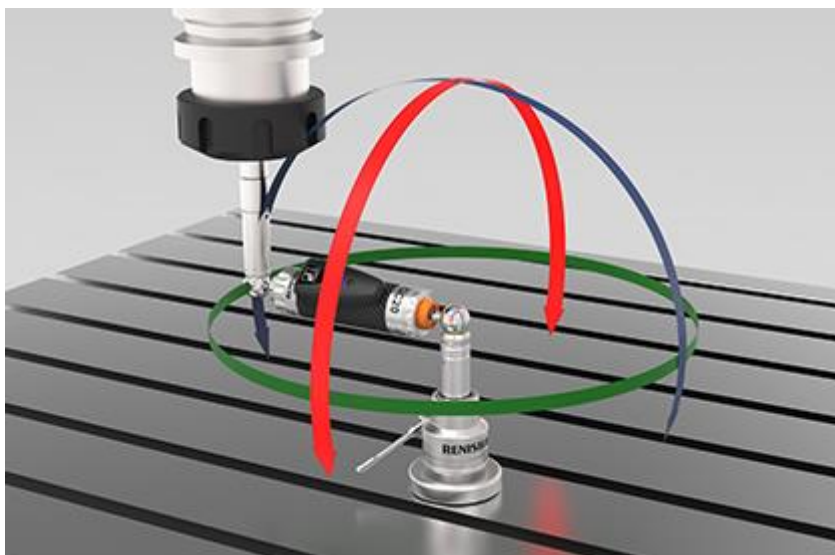
se umísťuje do vřetene stroje a druhý se umísťuje na pracovní stůl stroje pomocí magnetu. Pomocí různých nástavců lze měnit vzdálenost mezi konci přístroje. Délka měřidla je 100 mm, jsou k němu dodávány nástavce o délkách 50, 150 a 300 mm. Pro kalibraci je součástí sady také skleněná kalibrační deska s přesnými magnetickými body. Technické parametry měřidla viz Obr. 28. [56]

Rozlišení snímače	0,1 μm
Přesnost snímače ballbaru (při 20 °C)	$\pm 0,5 \mu\text{m}$
Přesnost měření systému (při 20 °C)	$\pm 1,25 \mu\text{m}$
Rozsah měření snímačem	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Max. rychlost snímání	1000 Hz
Přenos dat Bluetooth, třída 2	zpravidla 10 m
Pracovní dosah signálu	0 °C - 40 °C
Rozměry kufříku	395 x 300 x 105 mm
Hmotnost kufříku	3,75 kg (přibližně)

Obr. 28 Technické parametry Renishaw BallBar QC20 [56]

Pro měření je nutno BallBar QC20 propojit s PC pomocí Bluetooth a v PC mít nainstalován příslušný software. Následně je nutno vygenerovat G-kód, který projede kružnici o daném poloměru po a proti směru hodinových ručiček. V průběhu těchto dvou měření BallBar vyhodnotí geometrickou přesnost stroje. Měření vyhodnotí kolmost os, mrtvý chod, amplitudu cyklické chyby, kruhovitost a další parametry. [56]

Měření lze provádět v několika rovinách (XY, XZ, YZ), měření také nemusí opisovat celou kružnici, ale může být například pro 180° nebo 220° rozsah, avšak pro tato měření nelze vyhodnotit kolmosti. Nastavit lze také velikost přejezdů, měření tedy začíná až při chodu stroje, neprojeví se tak možné nežádoucí vlivy rozběhů a doběhů. Směry měření jsou k vidění na Obr. 29. [56]



Obr. 29 Renishaw BallBar QC20 [56]

Optodyne MCV – 2002

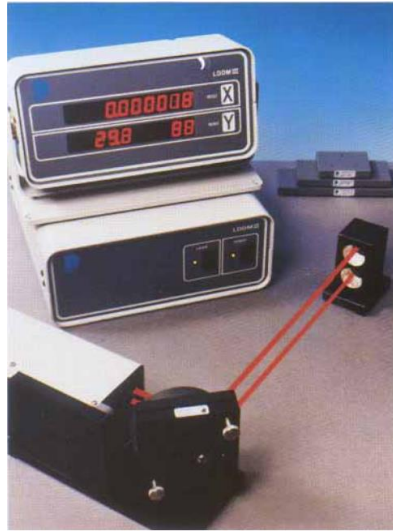
Jedná se o zařízení pro měření obráběcích strojů, které užívá dvojice laserových paprsků pro měření přesnosti polohování, přímosti os, rovinnosti a úhlu mezi osami. K tomuto měření užívá pevně uložený zdroj laserového paprsku a dílec s dvojicí koutových odražečů, které mají vůči sobě definovanou pozici. Parametry měřidla jsou vyobrazeny na Obr. 30. [57]

Laser Stability	0.1 ppm
Linear Accuracy	1 ppm (typical)
Angular Accuracy	± 2%
Angular Resolution	1 microradian /0.2 arcsec
Flatness Resolution	1 microinch
Max Angular Sweep	± 10 degrees
Max Distance	33 feet linear, 16 feet angular; option: 66 feet/33 feet
Slew Rate	72 ips
Power	90 to 230 VAC, 50 to 60 Hz

Obr. 30 Optodyne MCV - 2002 parametry

Měřicí zařízení se skládá ze zdroje laserového paprsku, teploměru pro měření teploty povrchu stroje, tlakoměru, koutových odražečů, převodníku signálu od teploměru a analyzátoru, který obsahuje zdroj. Analyzátor se následně propojí s počítačem pro vyhodnocení výsledků měření v programu LDDM, zde se rovněž

volí mód měření a lze generovat grafy z naměřených dat. Sestava měřidla je k vidění na Obr. 31. [57]




Obr. 31 Laserový interferometr Optodyne MCV – 2002 [57]

Pro měření je nejprve nutné nastavit vzájemnou polohu odražeče a zdroje laserového paprsku. Následně je pohybováno odražečem ve směru měřené osy. V závislosti na poloze odražeče lze měřit přímost osy ve dvou směrech, například při měření osy X se jedná o přímost v osách Y a Z. Pro měření přesnosti polohování nezáleží na poloze odražeče. Odražeč během měření projede osu v nastaveném rozsahu buď pouze jedním směrem nebo oběma směry. Požadovaný počet průjezdů se nastavuje před začátkem měření. [57]

Renishaw XL80

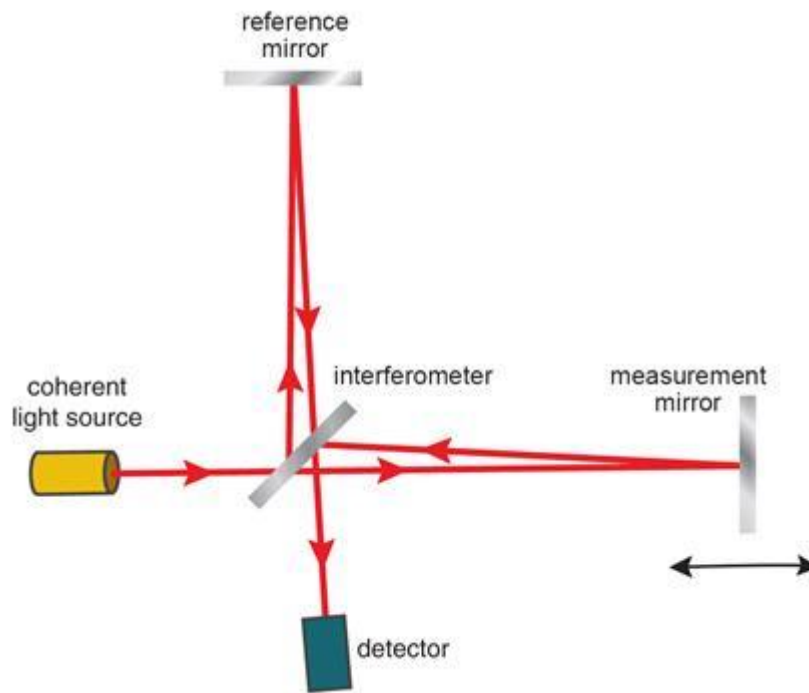
Jedná se o laserový interferometr sloužící pro kalibraci strojů. Zařízení se skládá ze zdroje laserového paprsku s optikou, koutového odražeče a kompenzátoru s teploměry a barometrem, který se připojuje do zdroje paprsku. Zdroj paprsku je následně propojen s PC přes USB. [58]

Zařízení je schopno měřit následující parametry: polohovou přesnost, úhel natočení osy, rotační osy, rovinnost, přímost a kolmost. Přesnost a rozsahy měření pro jednotlivé odchylky jsou v katalogu na stránkách výrobce. Obr. 32 zobrazuje základní parametry měřidla. [58]

Parametry systému			
Rozsah lineárního měření	80 metrů		
Přesnost lineárního měření	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$		
Přesnost frekvence laseru	$\pm 0,05 \mu\text{m/m}$		
Rozlišení	1 nm		
Maximální rychlost snímaného pohybu	4 m/s*		
Frekvence snímání dat	10 Hz – 50 kHz**		
Doba stabilizace	< 6 minut		
Pracovní teplota	0 °C – 40 °C		
Snímače parametrů prostředí			
	Rozsah	Přesnost	
Teplota materiálu	0 °C – 55 °C	$\pm 0,1 \text{ °C}$	
Teplota vzduchu	0 °C – 40 °C	$\pm 0,2 \text{ °C}$	
Tlak vzduchu	650 mbar – 1150 mbar	$\pm 1 \text{ mbar}$	
Relativní vlhkost (%)	0 % – 95% nekondenzující	$\pm 6\%$	
*1,6 m/s (při rozlišení obdélníkového výstupního signálu 80 nm) 0,2 m/s (při rozlišení 10 nm) ** 20 MHz v režimu výstupu obdélníkového signálu			

Obr. 32 Technické parametry Renishaw XL80 [58]

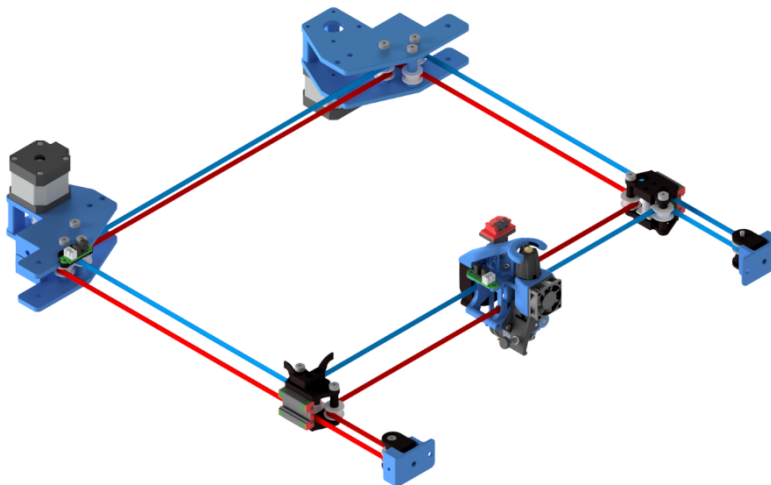
Měřidlo pracuje na principu interferometrie, užívá tedy jeden zdroj paprsku, který následně dělí na dva, rozdíl vzdáleností mezi paprsky vytvoří fázový rozdíl. Jeden z paprsků je referenční a druhý měřicí. Dle fázového rozdílu se následně určuje vzdálenost měřeného dílce. [59]



Obr. 33 Schéma funkce interferometru [59]

4. Konstrukční návrh

Tiskárna je na základě řešerše navržena jako Core XY, tato kinematická struktura užívá dvojice řemenů k pohybu tiskové hlavy a příčnicku. Toto rozložení bylo zvoleno pro jeho dobré dynamické vlastnosti a možnost motory umístit mimo tiskový prostor. Osa Z je navržena invertovaná se třemi pohony, ty následně umožňují vyrovnání tiskové platformy vůči rovině pohybu tiskové podložky. Výhodou invertovaného rozložení je zejména nízké uložení pohybového mechanismu XY v rámu. Tím je pak rám méně buzen od dynamických pohybů. Další výhodou je lepší tisk mostů. K nevýhodám patří možnost pádu tištěného dílce do pohybového mechanismu a horší přístup k tiskové desce. Tiskárna má rovněž rám navrženy tak, aby bylo možné ji otočit pro standardní tisk. Obr. 34 zobrazuje koncept pohybového mechanismu, jsou zde vidět dvě řemenové smyčky, držáky motorů a příčnicku a napínání řemene. Návrh počítá s tiskovým prostorem o rozměrech 300 x 300 x 300 mm.



Obr. 34 Core XY mechanismus koncept

V rámci konstrukčního návrhu 3D tiskárny bylo nutno vyřešit množství konstrukčních uzlů. Jednotlivé konstrukční uzly jsou sdruženy ve funkční celky. Pro přehlednost lze konstrukční návrh rozdělit do několika částí: rám, tisková hlava, pohybový mechanismus XY, tisková platforma a pohybový mechanismus Z.

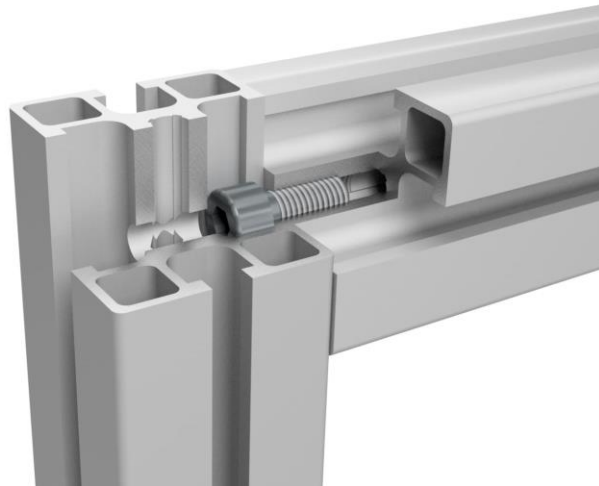
Jednotlivé části jsou nezbytné pro správné fungování stroje a musí splňovat množství kritérií. Kritéria se liší v závislosti na jednotlivých částech. Například u tiskové hlavy je kladen důraz na nízkou hmotnost, vysokou tuhost a kompaktnost.



Obr. 35 Render 3D tiskárny

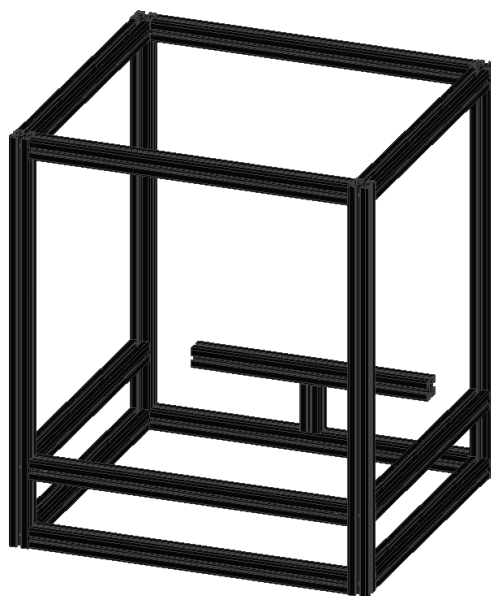
4.1. Rám

Rám tiskárny je složen z hliníkových profilů AlutecKK o rozměru 30x30 mm. Tyto profily byly zvoleny pro jejich modulárnost, dobrý poměr hmotnosti k pevnosti, dostupnost a na základě rešerše. Profily díky drážkám umožňují variabilní montáž dalších komponent stroje bez nutnosti obrábění. Pro sestavení rámu byl zvolen systém montáže pomocí krátkých šroubů, které profily spojují zašroubováním do jeho středového otvoru. Hlava šroubu je pak uložena v drážce profilu. Takto lze sestavit rám bez nutnosti užití dalších spojovacích komponent. Toto spojení zaručuje také kolmost jednotlivých profilů po zafrézování konců profilů.



Obr. 36 Ukázka spoje profilů [60]

Rám spojuje jednotlivé uzly stroje a definuje jejich vzájemnou polohu. Na Obr. 37 je vyobrazen rám bez dalších komponent. Rám je složen ze 4 hlavních vertikálních profilů a jednoho podpůrného, ten má posílit uložení motorů pro rovinu XY. Dále je rám složen ze dvou sad horizontálních profilů a jednoho pro uchycení držáku motorů. Veškeré profily jsou k sobě spojeny pomocí spojení viz Obr. 36.



Obr. 37 Rám

4.2. Tisková hlava

Tisková hlava obsahuje řadu komponent. Může užívat přímou a nepřímou extruzi. Extrudér tedy může a nemusí být součástí tiskové hlavy. Nepřímý extrudér je umístěn pevně v rámu a filament je khotendu veden pomocí

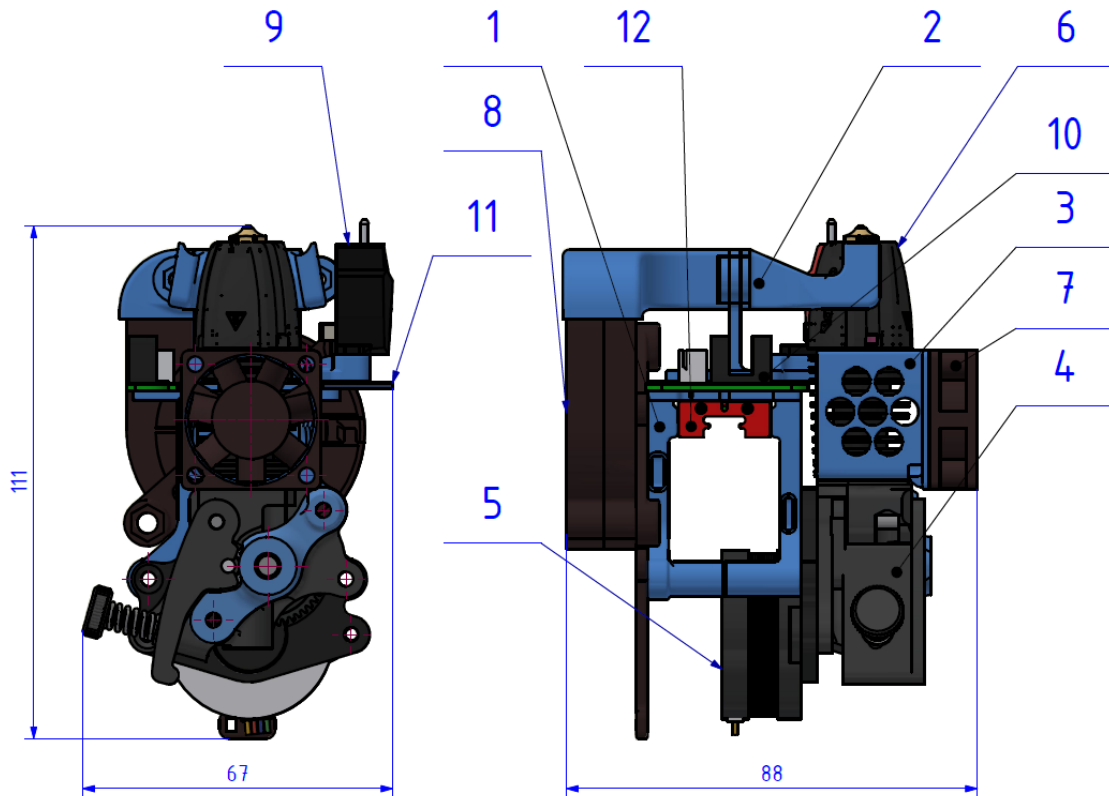
bowdenu. Přímý extrudér je umístěný co nejbližší hotend, tisková hlava tedy s sebou nese jeho sestavu a motor. Pro konstrukci tiskárny byl zvolen přímý typ extruderu. Dále je součástí tiskové hlavy hotend s jeho chladicím ventilátorem, systém chlazení tištěného dílce, dotyková sonda pro kalibraci první vrstvy a akcelerometr, který lze užít pro ladění tiskárny pomocí funkce input shaping, neboli impulzní buzení. Funkce přizpůsobuje pulzy motorům na základě naměřených frekvencí stroje. Za účelem snížení vibrací během dynamických pohybů. Veškeré zmíněné komponenty jsou uchyceny na vozíku, který je spojen s domkem lineárního vedení.

Vozík tiskové hlavy je jeden z nejdůležitějších komponent a je navržen, tak aby k němu bylo možno připevnit veškeré komponenty tiskové hlavy. Další požadavky na něj jsou tuhost, nízká hmotnost a kompaktní rozměry. Součástí vozíku jsou držáky řemene pro jeho pohon.

Jako extrudér byl vybrán open-source projekt založený na extrudéru BMG, HextrudORT, pro jeho malé rozměry, nízkou hmotnost a užití dvou podávacích kol. Na extrudér navazuje hotend Phaetus Rapido, ten byl vybrán pro jeho vysoký průtok (až 45 mm³/s). Soupis komponent s pozicemi je k vidění v Tab. 2.

Tab. 2 Tisková hlava komponenty

Pozice	Komponenta
1	Vozík tiskové hlavy
2	Vedení chladicího vzduchu dílce
3	Chlazení hotendu
4	Extrudér HextrudORT
5	Krokový motor extruderu
6	Hotend Phaetus Rapido
7	Axiální ventilátor 3010
8	Radiální ventilátor 5015
9	Sonda BiQu Microprobe
10	Optický koncový spínač
11	Akcelerometr ADXL 345
12	Domek lineárního vedení MGN9C

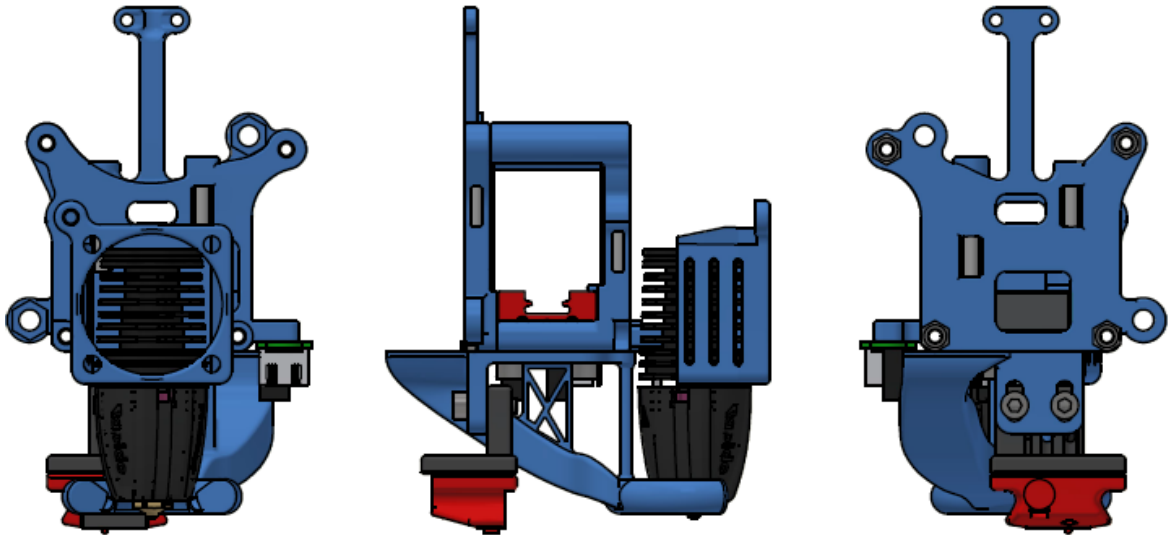


Obr. 38 Tisková hlava

Vývoj tiskové hlavy

Vozík tiskové hlavy prošel několika vývojovými fázemi, které upravovaly uchycení řemenů, vedení chlazení k tištěnému dílu a také dotykovou sondu pro vyrovnání tiskové podložky. Jednotlivé části byly několikrát revidovány s cílem zachovat nízkou hmotnost, tuhost a udržet jednoduchou montáž.

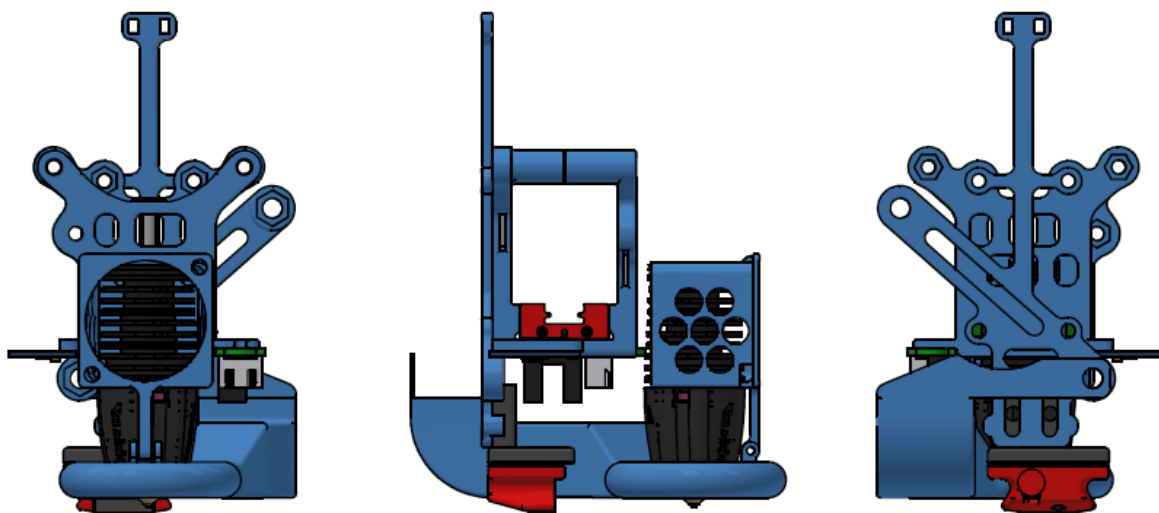
V průběhu vývoje byly vytvořeny 4 varianty tiskové hlavy. Ke změnám docházelo zejména u uložení řemenic ve vozíku. První varianta tiskové hlavy měla na každé straně dvě tyče pro uchycení řemene. Další verze začala používat jednu tyčku pro oba řemeny. To mělo zmírnit namáhání vozíku od předpětí řemenů a pohonů. Na Obr. 39 je k vidění varianta s dvojicí tyček na každé straně a Clicky sondou, součástí vozíků je rovněž držák kabelů a držák ventilátoru chlazení. Popis Clicky sondy viz níže.



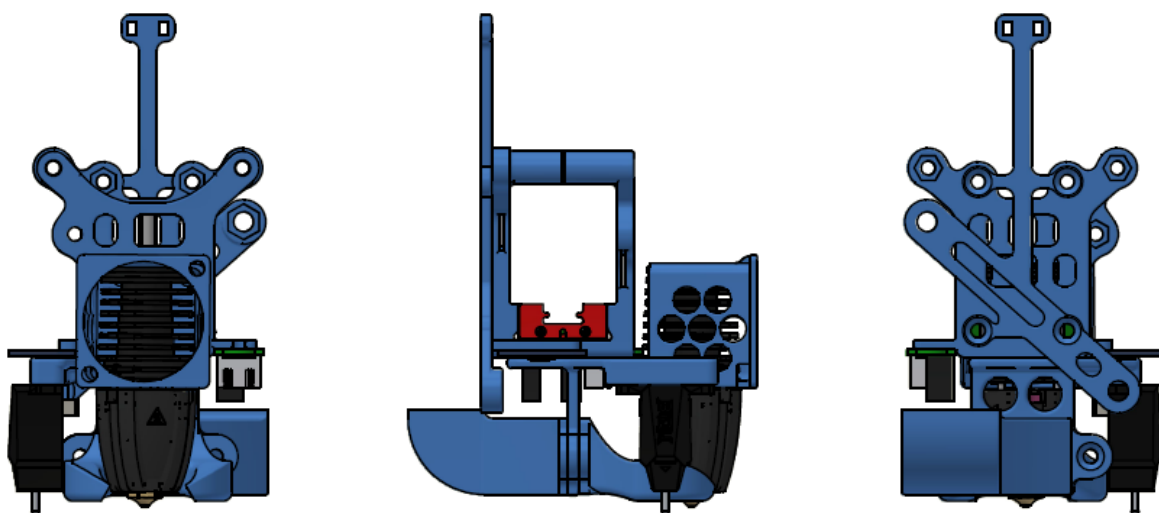
Obr. 39 Vozík tiskové hlavy verze 1

Rovněž došlo ke změnám na vedení chladicího vzduchu sloužícího k chlazení tištěného dílce. První verze byly usazeny příliš nízko a mohlo docházet ke kontaktu vedení vzduchu s držákem tiskové desky.

Pro vyrovnání tiskové podložky byla nejprve vybrána sonda Clicky, červené těleso viz Obr. 39 a Obr. 40. Tato sonda je složená ze 3D tělesa s magnety, koncového spínače, držáku s magnety na tiskové hlavě a dokovací stanice. Sonda je na tiskové hlavě jen když je potřeba, během tisku je odložena v doku. Vzhledem k nutnosti použít motorizovaný dok a celkové složitosti odložitelné sondy byla následně vybrána sonda BiQu Microprobe, černé těleso se stříbrným hrotem na Obr. 41 a Obr. 42. Jedná se o dotykovou sondu používající kovový dotykový hrot, který je výsuvný pomocí servomotoru. Verze 3 a 4 se liší zejména přívodem chladicího vzduchu tisknutých komponent. Další změny jsou drobné a týkají se spíše výrobních tolerancí a úprav pro lepší sestavitelnost.

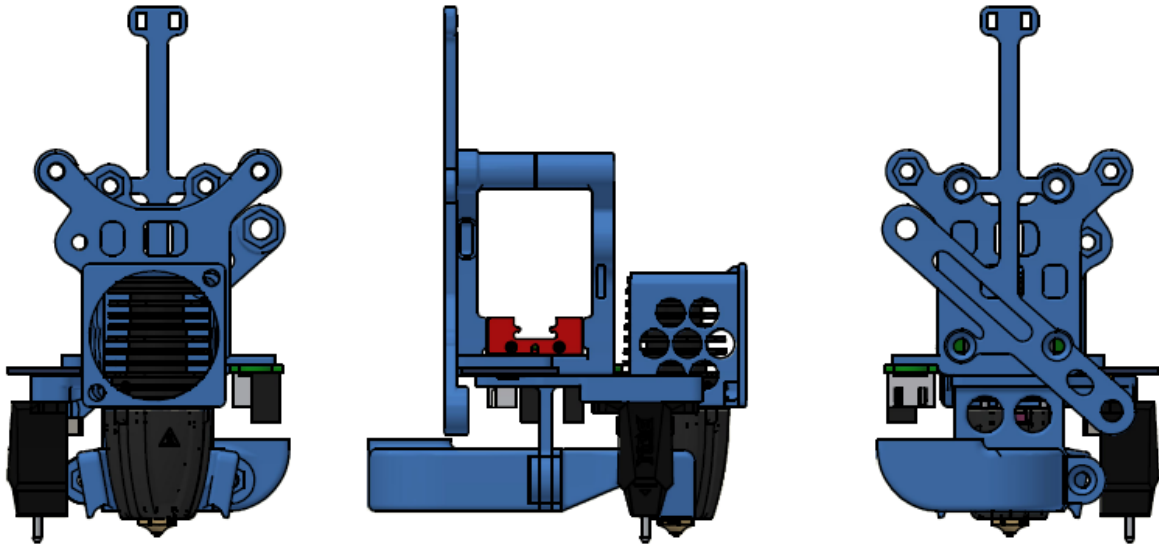


Obr. 40 Vozík tiskové hlavy verze 2



Obr. 41 Vozík tiskové hlavy verze 3

Veškeré modré dílce na Obr. 39, Obr. 40, Obr. 41 a Obr. 42 jsou vyvinuty specificky pro danou tiskárnu, dílce jiných barev jsou nakupované nebo se jedná o úpravy dostupných dílců.



Obr. 42 Vozík tiskové hlavy verze 4

4.3. Pohybový mechanismus XY

Na základě rešerše byl vybrán pohybový mechanismus Core XY, pro pohon byl zvolen řemen Gates profilu GT2 o šířce 6 mm v kombinaci s krokovými motory. O vedení se následně starají lineární kolejnice MGN12 a MGN9. Tisková hlava je umístěna na příčníku. Motory pro pohon v rovině XY jsou uloženy mimo tiskový prostor, aby nebyly tepelně zatěžovány tiskovým prostředím. Díky jejich uložení pevně v rámu má tento mechanismus nízkou hmotnost pohyblivých těles a dosahuje vysokých dynamických parametrů.

Výpočty pohybového mechanismu XY

Je potřeba ověřit životnost lineárních vedení, potřebný točivý moment motorů a provést kontrolu tuhosti řemenů. Pro životnost lineárních vedení je podstatné jejich zatížení. Pro výpočet točivého momentu bylo nutné určit celkový moment setrvačnosti redukováný na motor. Kontrola řemenů následně počítá s přenášenými silami z předchozích výpočtů.

Životnost lineárních vedení

Hmotnost sestavy příčníku a tiskové hlavy činí 703 gramů, hmotnost tiskové hlavy je 335 gramů. Pro vedení příčníku bylo vytipováno vedení MGN 12C a pro vedení tiskové hlavy MGN 9C. Výpočty životnosti jsou označeny (1) a (2).

$$L_{MGN9} = \left(\frac{C_{dyn}}{f_w \cdot F} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{1860}{3,5 \cdot 3,29} \right)^3 \cdot 50 = 2,1 \cdot 10^8 \text{ km} \quad (1)$$

$$L_{MGN12} = \left(\frac{C_{dyn}}{f_w \cdot F} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{2840}{3,5 \cdot 3,46} \right)^3 \cdot 50 = 6,45 \cdot 10^8 \text{ km} \quad (2)$$

Z výpočtu je patrné, že zvolená vedení mají více než dostatečnou životnost.

Krouticí moment motoru

Pro určení kroutícího momentu motoru bylo nutné určit moment setrvačnosti soustavy redukovaný na motor. Do toho je nutné zahrnout setrvačné síly od posouvajících i rotujících těles. Také bylo zvoleno požadované zrychlení pohybu v rovině XY, a to na 5G ($50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). Vzhledem k podstatě mechanismu je pro něj kritický pohyb pod úhlem 45° , kdy zabírá pouze jeden z motorů. Další výpočty s tímto jevem počítají. Moment setrvačnosti motoru byl zvolen z dostupných krokových motorů a zpětně upraven pro zvolený typ. Posuv na otáčku vychází z řemenic s 20 zuby, stejný počet zubů mají také ozubené kladky a hladké kladky mají odpovídající průměr.

Pod číslem (3) je výpočet převodu posuvu na 1 otáčku. Rovnice (4) označuje výpočet momentu setrvačnosti redukovaného na motor. Následující dvě rovnice (5) a (6) vypočítávají odpor vozíků lineárního vedení. Rovnice (7) se zabývá výpočtem momentu potřebného pro zvolené zrychlení pohybového mechanismu.

Tab. 3 Hmotnosti a momenty setrvačnosti pohybového mechanismu XY

Tisková hlava – m_{hlava} [kg]	0,335
Příčnick – $m_{příčnick}$ [kg]	0,368
Řemen – $m_{řemen}$ [kg]	0,0166
J motor – J_M [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	$8,45 \cdot 10^{-6}$
J řemenice – J_r [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	$1,43 \cdot 10^{-7}$
J kladka hladka – J_{kh} [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	$1,144 \cdot 10^{-7}$
J kladka ozubená – J_{ko} [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	$1,144 \cdot 10^{-7}$

$$p = \frac{L_{posuv}}{2 \cdot \pi} = \frac{0,04}{2 \cdot \pi} \quad (3)$$

$$J_{redM} = (m_{hlava} + m_{příčnick} + m_{řemen}) \cdot p^2 + J_M + J_r + 2 \cdot J_{kh} + 4 \cdot J_{ko} \quad (4)$$

$$J_{redM} = 3,845 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

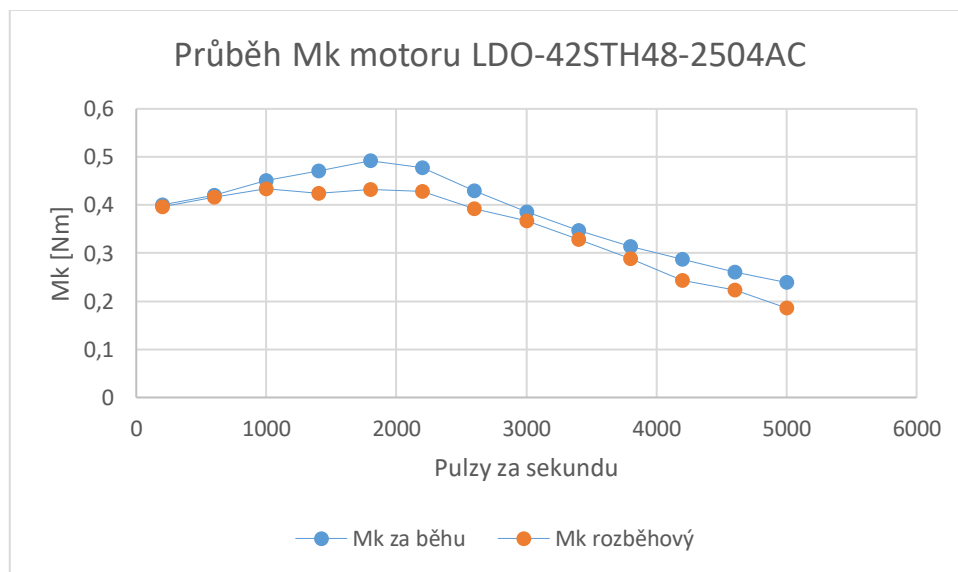
$$F_{TMGN12C} = \mu \cdot W + S = 0,004 \cdot 3,4599 + 0,2 = 0,0213 \text{ N} \quad (5)$$

$$F_{TMGN9C} = \mu \cdot W + S = 0,004 \cdot 3,297 + 0,1 = 0,113 \text{ N} \quad (6)$$

$$M_{kM} = (2 \cdot F_{TMGN12C} + F_{TMGN9C}) \cdot \frac{d_x}{2} + J_{redM} \cdot \frac{a_{Lin}}{p} \quad (7)$$

$$M_{kM} = (0,427 + 0,113) \cdot \frac{0,0191}{2} + 3,845 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{50}{\frac{0,04}{2 \cdot \pi}} = 0,307 \text{ Nm}$$

Dle výpočtu kroutícího momentu byl zvolen krokový motor LDO-42STH48-2504AC s kroutícím momentem $M_{kM} = 0,430 \text{ Nm}$ při 2600 pulzech za sekundu (odpovídají posuvové rychlosti 500 mm za sekundu), viz Obr. 43.



Obr. 43 Průběh točivého momentu LDO-42STH48-2504AC [59]

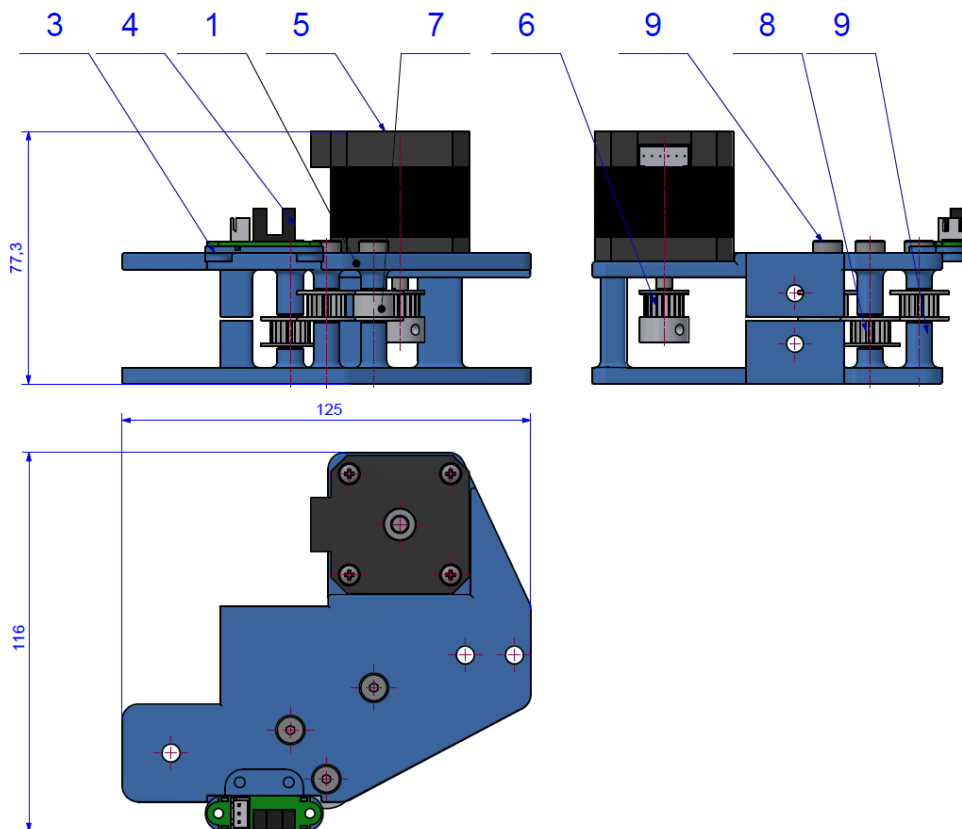
Držáky motorů

Vzhledem k použité kinematice je možno motory uložit mimo tiskový prostor. Držáky motorů zároveň slouží k vedení obou řemenů pohonu. Držák je složen ze dvou plochých komponent, tato koncepce zjednodušuje tisk sestavy držáku. Držák motoru je vyobrazen na Obr. 44, dále si lze také povšimnout optického koncového spínače na dílci v levé části držáku. Popis pozic z Obr. 44 je k vidění v Tab. 4.

Na Obr. 44 je držák motoru zobrazen třemi pohledy dle pravoúhlého zobrazování ISO-E. Jedná se o levý držák motoru, který pohání horní řemen. Dvojice horních kladek je určena k vedení řemenu k motoru, samostatná vede řemen ke druhému držáku. Motor je na druhém držáku umístěn ve spodní části, aby byla vzdálenost řemenice od příruby motoru co nejmenší.

Vývoj držáku

V rámci vývoje držáku došlo k několika změnám v pozici jednotlivých řemenic. Rovněž byla snížena tloušťka držáku pro snížení vzdálenosti řemenice od příruby a byly přidány vzpěry u motorů. Byly vytvořeny celkem 3 varianty, všechny počítaly s motory mimo tiskový prostor.



Obr. 44 Držák motoru

Tab. 4 Držák motoru pozice komponent

Pozice	Komponenta
1	Horní díl
2	Spodní díl
3	Držák koncového spínače
4	Optický koncový spínač
5	Krokový motor
6	Řemenice GT2 20 zubů
7	Hladká kladka
8	Kladka GT2 20 zubů
9	Lícovaný šroub Ø5

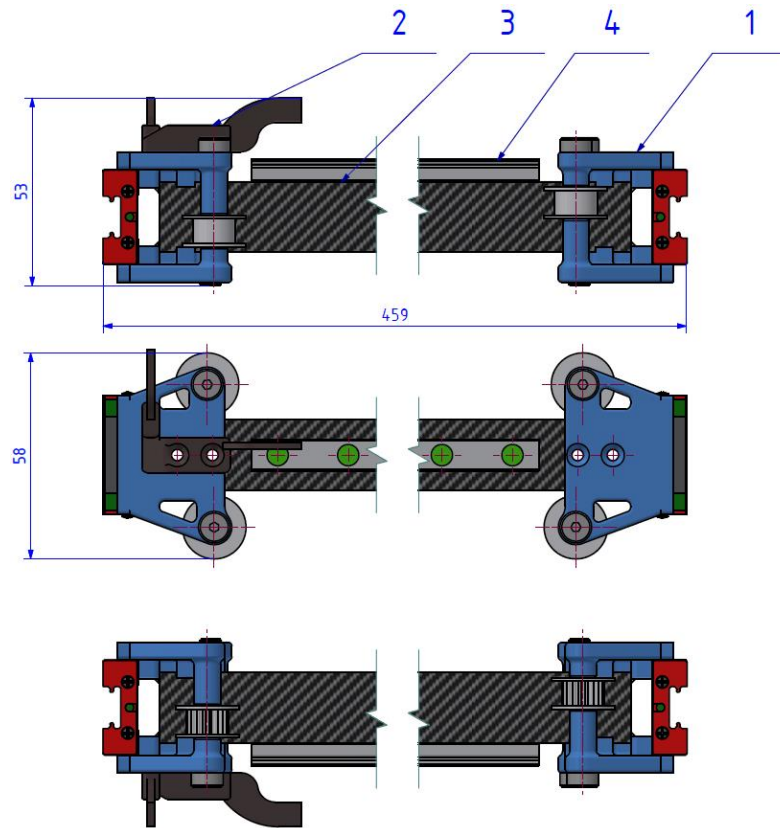
Portál

Pro pohyb tiskové hlavy v celé rovině XY byl potřebný portál. Portál byl vyroben z uhlíkového kompozitního materiálu pro snížení jeho hmotnosti. Na obou koncích je portál uložen v držáku, který jej spojuje s vozíky lineárních vedení v ose Y. Uložení portálu je rovněž tištěný dílec. K portálu je přimontováno lineární vedení viz Obr. 45. Lineární vedení je s trubkou příčnicku spojeno pomocí šroubů a matic uložených v tištěném dílci pro ustavení jejich pozice. Na tomtéž obrázku je také vyobrazen dílec pro spínání optického koncového snímače, dále jsou zde vyobrazeny pozice, které korespondují s Tab. 5.

Tab. 5 Portál pozice komponent

Pozice	Komponenta
1	Pravý držák příčnicku s domkem lineárního vedení MGN12C
2	Levý držák příčnicku s domkem lineárního vedení MGN12C a spínačem koncových spínačů
3	Příčnick z uhlíkových vláken
4	Kolejnice lineárního vedení MGN9

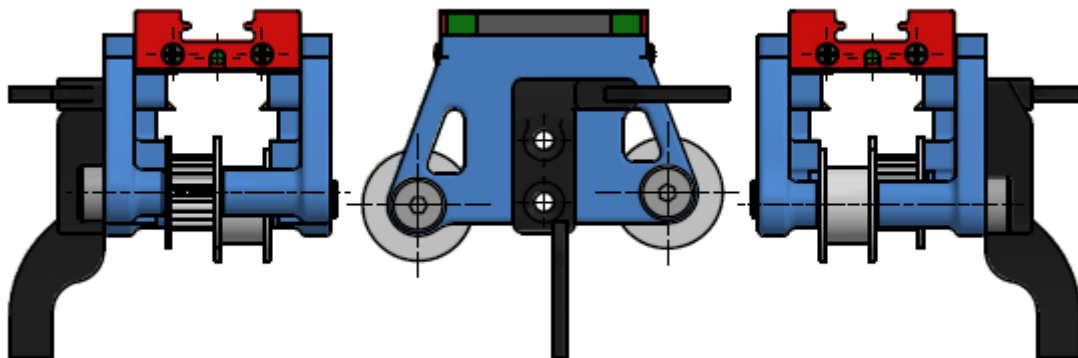
Na Obr. 45 lze vidět obě řemenice pro vedení řemenu, jedna je ozubená a druhá hladká. Řemenice byly takto umístěny s ohledem na orientaci řemene. Ozubená řemenice tak vede řemen z ozubené strany a neozubená z hladké. Oba konce řemene jsou následně fixovány v tiskové hlavě. Pozice dílců jsou popsány viz Tab. 5.



Obr. 45 Uložení portálu v rámu

Uložení příčnicku

Držák příčnicku počítá s průchodem řemene mezi příčnickem a domkem lineárního vedení. Tento koncept byl zvolen pro jeho výhodnou pozici řemene v rámci rámu. Dalším důvodem pro toto vedení řemene byl lepší poměr zastavěného a tiskového prostoru. Pozice řemenic jsou voleny, tak aby byl řemen veden rovnoběžně s osami, viz Obr. 46.



Obr. 46 Držák příčnicku verze 2

Napínání řemenů

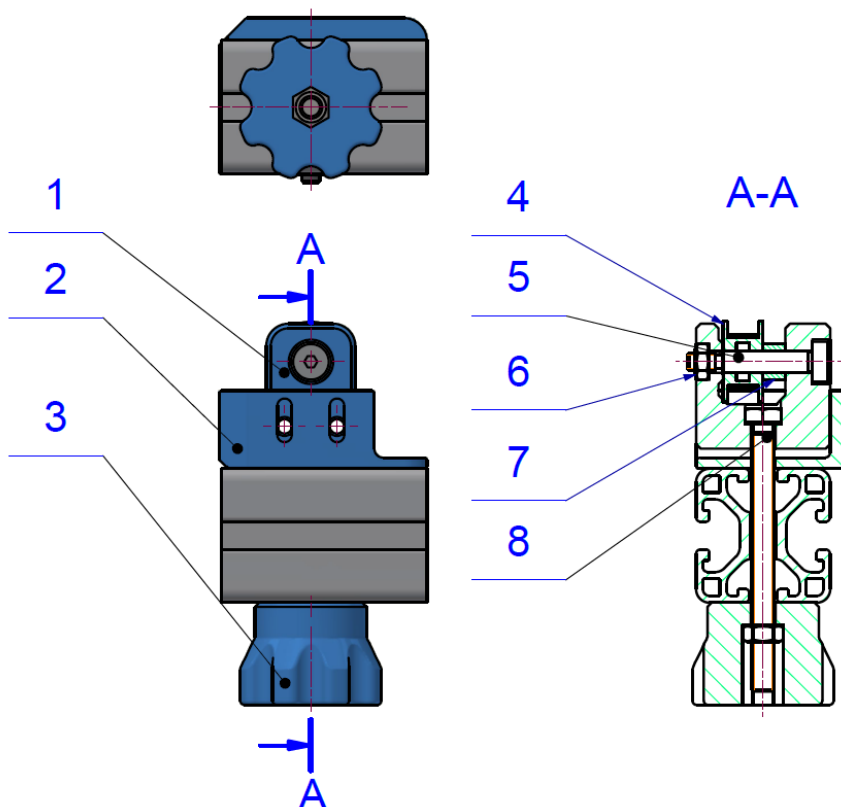
Napínací šroub prochází skrze rám pro lepší rozložení sil. Napínání je realizováno pomocí M5 šroubu, napínací matice je uložena v plastovém dílci pro snazší nastavení předpětí. Správné předpětí udávané výrobcem řemenů Gates je v rozmezí 26 až 35 N. Napínací mechanismus je k vidění na Obr. 47, je zde vidět lícovaný šroub a těleso napínání s drážkou pro upevňovací šrouby. Tyto šrouby prochází pohyblivým dílcem s kladkou a slouží k fixaci pozice. V dílci s kladkou je šroub s šestihrannou hlavou, který přenáší napínací sílu. Veškerým dílcům na Obr. 47 byly přiděleny pozice, které popisuje Tab. 6. [61]

V rámci návrhu bylo uvažováno také napínání pomocí posuvu motoru. Od toho bylo upuštěno vzhledem k vyšší komplexnosti dílce držáku motoru. Napínání v přední části rámu je rovněž pohodlnější pro obsluhu tiskárny. V rámci vývoje bylo napínání řemenů pro X a Y opatřeno fixačními šrouby, aby nedocházelo k samovolnému povolování napínačů. Součástí napínání je také vedení napínače.

Napínací síla řemenů

Pro určení napínací síly byl využit výpočet (8), který určí frekvenci, na které řemen rezonuje na základě délky volné větve a předpětí. Předpětí bylo zvoleno $F_{p6} = 30 \text{ N}$, hmotnost řemenu GT2 o šířce 6 mm je $\mu_{\text{ř6}} = 0,0083 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$.

$$f_{o6} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_{p6}}{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot 0,32} \sqrt{\frac{30}{0,0083}} = 93,93 \text{ Hz} \quad (8)$$



Obr. 47 Napínání řemene

Tab. 6 Napínání řemene pozice komponent

Pozice	Komponenta
1	Napínák
2	Těleso napínáku
3	Nastavovací klička
4	Kladka GT2 20 zubů
5	Lícovaný šroub Ø5
6	Matice M4
7	Distanční kroužek
8	Napínací šroub M6x60

4.4. Pohybový mechanismus Z

Pohyb v ose Z je realizován pomocí 3 samostatně ovládaných vozíků, které jsou vedeny pomocí vodicích tyčí s axiálními ložisky. Tyče jsou uloženy v tištěných držácích, které umožňují jejich axiální prodloužení pod tepelným zatížením. K pohonu osy Z slouží řemen Gates GT2 o šířce 9 mm.

Pohon

Pro pohon slouží krokový motor s převodem 3:1 pro snížení jeho potřebného krouticího momentu. Tento převod je realizován také řemenem Gates GT2

o šířce 9 mm. Řemenice jsou zvoleny s 20 a 60 zuby. Pohonná jednotka je umístěna v horní části rámu mimo tiskový prostor. Součástí jednotky je také napínací šroub pro napínání řemene od motoru. Sestava pohonu je vyobrazena viz Obr. 49.

Výpočet kroutícího momentu motorů

Kroutící moment motoru je nutno vypočítat na základě předpokládaného zatížení tiskové podložky tištěným dílcem a hmotnosti sestavy tiskové desky. Pro snížení potřebného momentu motorů byl použit předřazený převod 3:1. K pohybu osy Z byly použity 3 samostatně řízené motory.

Tab. 7 Hmotnost tiskové podložky

Sestava tiskové desky [kg]	1,62
Vozíky tiskové desky 3 ks [kg]	0,045
Tištěný díl zabírající 50 % tiskového prostoru m_t [kg]	20,25
Celková hmotnost [kg]	21,92

$$m_t = \rho_{PLA} \cdot \frac{X_{max} \cdot Y_{max} \cdot Z_{max}}{2} = 1500 \cdot \frac{0,3 \cdot 0,3 \cdot 0,3}{2} = 20,25 \text{ kg} \quad (9)$$

$$m_c = m_t + m_d = 20,25 + 1,665 = 21,92 \text{ kg} \quad (10)$$

$$F_Z = m_c \cdot g = 21,92 \cdot 10 = 219,2 \text{ N} \quad (11)$$

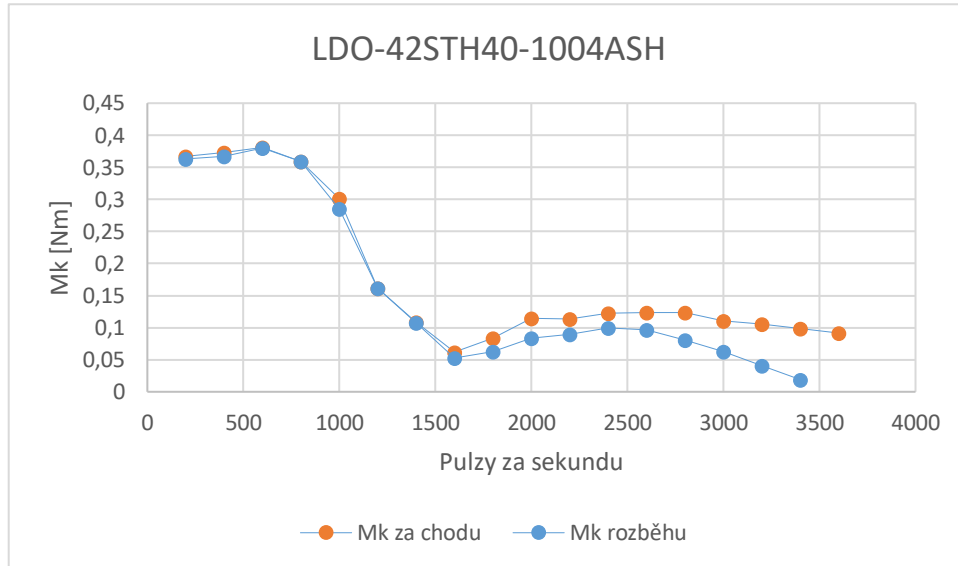
$$F_{Zm} = \frac{F_Z}{3} = \frac{219,2}{3} = 73,05 \text{ N} \quad (12)$$

$$M_{km} = F_{Zm} \cdot \frac{d_r}{2} = 73,05 \cdot \frac{0,0191}{2} = 0,697 \text{ Nm} \quad (13)$$

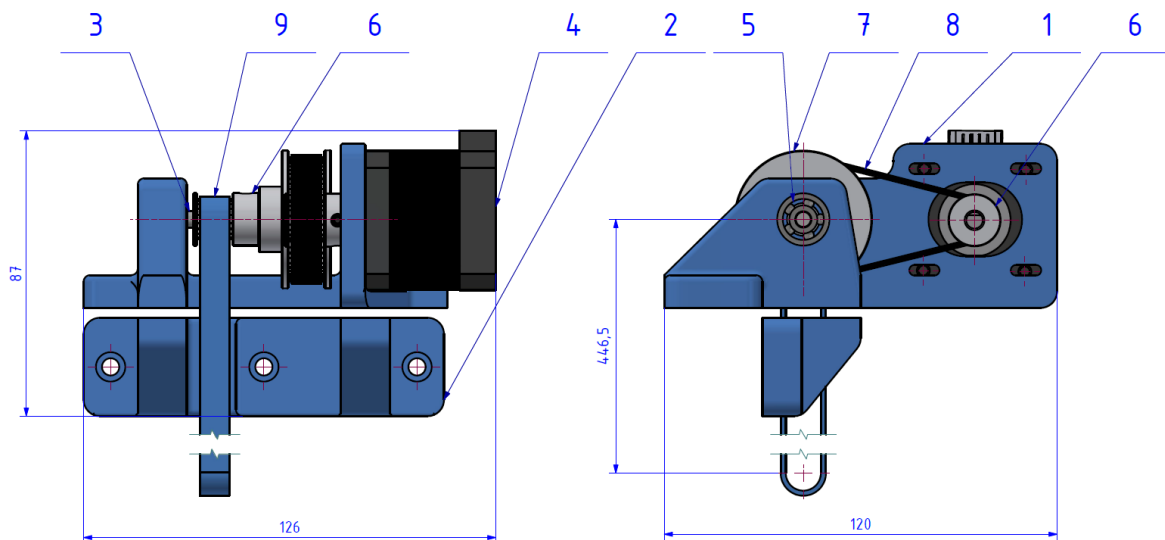
$$M_{kmp} = \frac{M_{km}}{p} = \frac{0,697}{3} = 0,232 \text{ Nm} \quad (14)$$

Rovnice (9) řeší maximální hmotnost tištěného dílce a rovnice (10) celkovou hmotnost tiskové desky a tištěného dílce. Rovnice (11) převádí hmotnost na sílu. Rovnice (12) dělí sílu mezi jednotlivé motory, následující výpočty (13), (14) počítají potřebný kroutící moment motorů.

Na základě výpočtu byl vybrán motor LDO-42STH40-1004ASH. Průběh momentu motoru je vyobrazen na Obr. 48. Graf vyobrazuje krouticí moment v poměru vůči pulzům za sekundu. 400 pulzů za sekundu se rovná otáčky za sekundu.



Obr. 48 Průběh točivého momentu motoru LDO-42STH40-1004ASH [59]



Obr. 49 Pohon osy Z

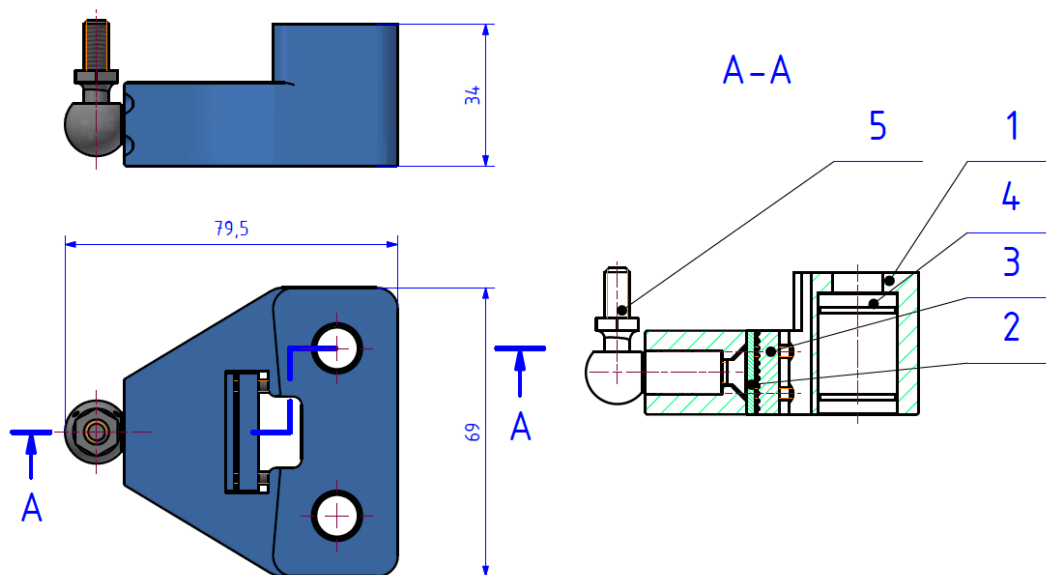
Vzhledem k nízkému zrychlení osy Z ($1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) a počítané hmotnosti tištěného dílce, která je několikanásobně předimenzovaná, nebyla do výpočtu zahrnuta síla potřebná pro zrychlení. Hmotnost většiny výtisků se bude pohybovat do 2 kg. Pohybový mechanismus Z tak má faktor bezpečnosti přibližně 8 i při zahrnutí síly potřebné pro akceleraci.

Tab. 8 Pohon osy Z pozice komponent

Pozice	Komponenta
1	Držák motoru
2	Podstavec
3	Hřídel Ø5
4	Krokový motor
5	Ložisko SKF 625
6	Řemenice GT2 20 zubů
7	Řemenice GT2 60 zubů
8	Řemen GT2-186 šířka 9 mm
9	Řemen GT2-930 šířka 9 mm

Vozík Z

Tiskový vozík je veden pomocí dvojice vodicích tyčí o průměru 10 mm. Kinematickou dvojici s nimi tvoří zalisované axiální ložisko typu LMU 10. Tisková podložka je s vozíky propojena pomocí sférických čepů (M6 DIN 71802), to umožňuje její náklon pro vyrovnání podložky s rovinou pohybu XY. Řemen byl zvolen nekonečný a s vozíkem je spojen svěrným spojem. Vozík je vyobrazen viz Obr. 50, Tab. 9 obsahuje soupis jednotlivých komponent a jejich pozice.



Obr. 50 Vozík osy Z

Tab. 9 Vozík osy Z pozice komponent

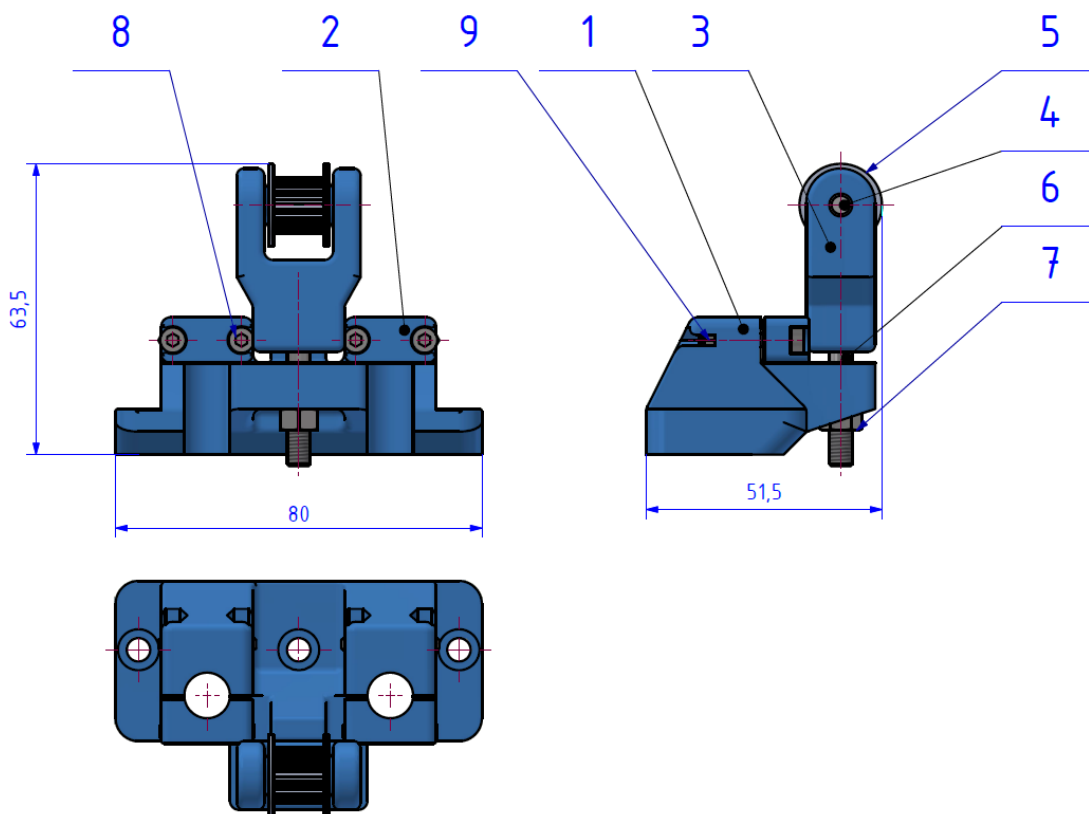
Pozice	Komponenta
1	Těleso vozíku
2	Podložka řemene
3	Držák řemene
4	Lineární ložisko LMU10
5	Sférický čep M6 DIN 71802

Napínání řemenu

Napínání řemenu je součástí spodního držáku vodicích tyčí. Napínání je obdobně jako u mechanismu XY realizováno pomocí šroubu M5. Součástí napínače je ozubená kladka s 20 zuby. Celý dílec je zobrazen na Obr. 51.

Napínací síla řemenu

Pro určení napínací síly byl využit výpočet, který určí frekvenci, na které řemen rezonuje na základě délky volné větve a předpětí. Předpětí bylo zvoleno $F_{p9} = 35 \text{ N}$, hmotnost řemenu GT2 o šířce 9 mm je $\mu_{R9} = 0,0124 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$. Rovnice (15) ukazuje výpočet frekvence pro zvolené předpětí.



Obr. 51 Napínání řemene osy Z

$$f_{09} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_{p9}}{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot 0,32} \sqrt{\frac{35}{0,0124}} = 82,84 \text{ Hz} \quad (15)$$

Tab. 10 Napínání řemen osy Z pozice komponent

Pozice	Komponenta
1	Těleso vedení
2	Držák tyčí
3	Napínač řemene
4	Hřídel Ø5
5	Řemenice GT2 20 zubů
6	Napínací šroub M6
7	Matice M6
8	Šroub M3 DIN 912
9	Matice M3

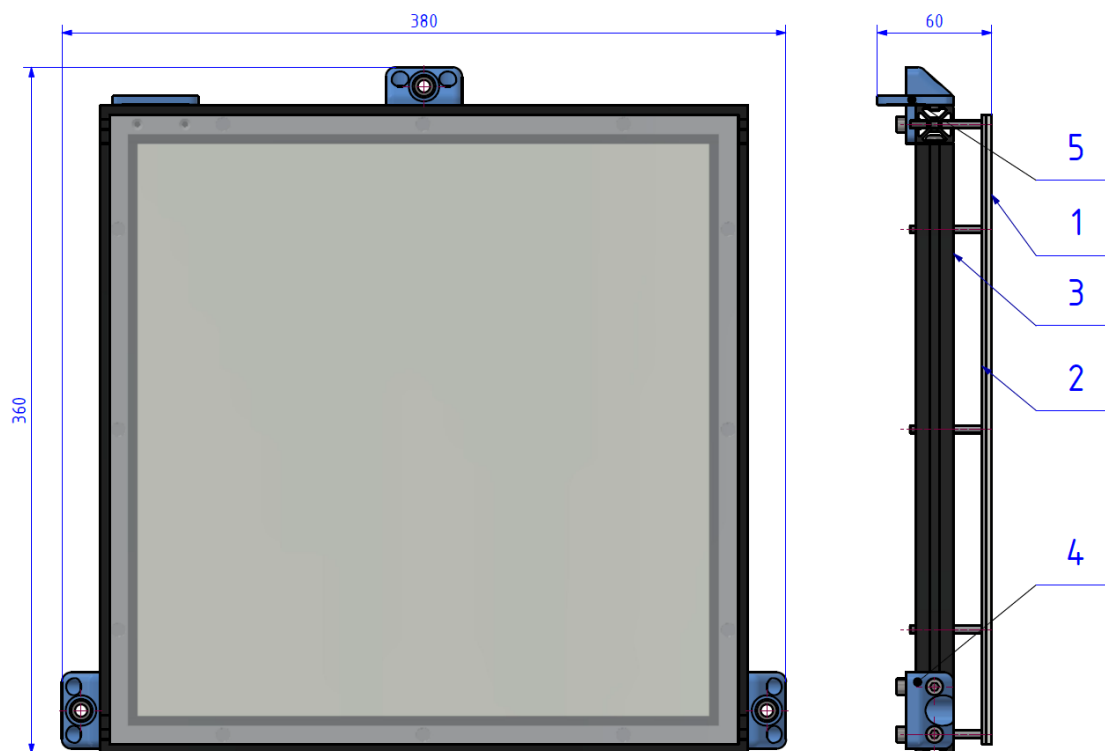
4.5. Tisková podložka

Tisková podložka se skládá ze samotné tiskové plochy a rámu. Tisková plocha byla zvolena z temperovaného skla pro snížení ceny při zachování teplotní stálosti a rovinnosti. Rozměr tohoto skla je 330 x 330 x 4 mm. Na sklo byla také přidána PEI vrstva pro lepší adhezi k tiskovým dílcům. Z druhé strany je na skle přilepeno polyamidové topné těleso s odporovou spirálou o výkonu 90 W, která pracuje na 48 V.

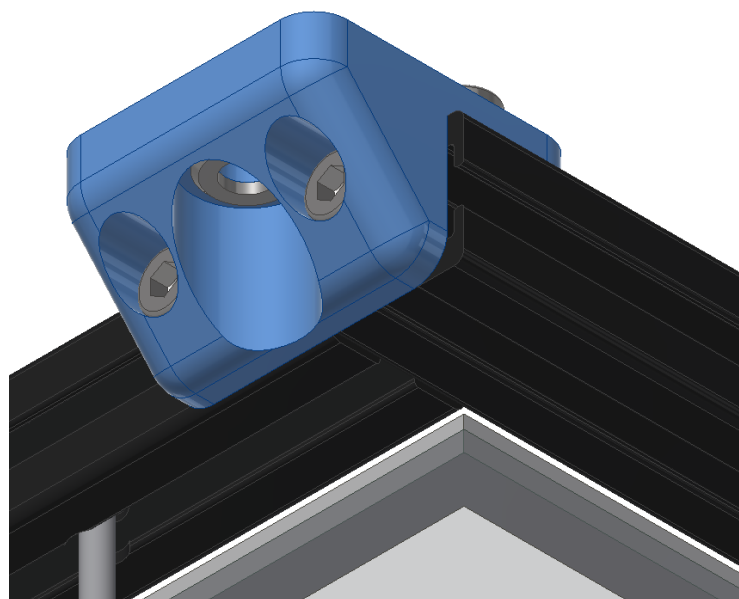
Tab. 11 Tisková podložka pozice komponent

Pozice	Komponent
1	Temperované sklo s topným tělesem
2	Nerezový rámeček
3	Rám tiskové desky AlutecKK 102020
4	Držák vozíku
5	Držák kabelu

Rám tiskové podložky je složen ze dvou částí: rámu z **AlutecKK 102020** hliníkových profilů a nerezového rámečku, který slouží kupevnění skla. Rámeček je upevněn k rámu podložky pomocí šroubů s pružnými silikonovými podložkami, díky kterým lze rámeček vyrovnat vůči rámu. Rám je spojen s vozíky osy Z skrze sférické čepy, které jsou uchyceny v tištěných držácích.



Obr. 52 Tisková deska a její rám



Obr. 53 Uložení rámu tiskové desky

4.6. Souhrn užitých komponent

Pro řízení slouží Raspberry Pi 4, které dává povely silové desce BTT Octopus v1.1. Do silové desky jsou zapojeny veškeré další komponenty tiskárny. Hotend byl vybrán Phaetus Rapido pro jeho vysoký průtok (až 45 mm³/s), na něj navazuje extrudér HevORT HextrudORT, který byl zvolen zejména pro jeho nízkou hmotnost. Extruder pohání krokový motor LDO-36STH17-0354AHG. Pro chlazení

hotendu byl vybrán axiální ventilátor 3010 a pro ofuk tištěného dílce radiální ventilátor 5015. Koncové snímače pro osy X a Y jsou optické a pro nastavení tiskové nuly a vyrovnání desky slouží BiQu Microprobe. O pohon v osách X a Y se starají krokové motory LDO-42STH48-2504AC. Pro vedení příčnicku slouží lineární vedení MGN12 s domky MGN12C, tisková hlava užívá vedení MGN9 a domek MGN9C. Vedení MGN9 je umístěno na uhlíkové trubce čtvercového průřezu. K pohonu mechanismu v rovině XY následně slouží řemeny Gates GT2 o šířce 6 mm, které jsou vedené soustavou kladek. Tisková platforma, tedy osa Z, je vedena pomocí 6 vodicích tyčí $\varnothing 10h6$ s lineárními ložisky LMU10. Dvojice ložisek je uložena v každém z vozíků tiskové desky. Pro pohon slouží 3 krokové motory LDO-42STH40-1004ASH. Tyto motory pohání vozíky tiskové desky skrze řemenový převod s redukcí 3:1. Všechny krokové motory jsou poháněny drivery TMC 2209. Osa Z používá k referování změnu proudu v motorech, je tedy bez koncových spínačů.

5. Stavba, řízení a uvedení do provozu

Tato kapitola se zabývá popisem stavby 3D tiskárny. Stavba stroje je rozdělena do dvou hlavních částí: mechanická stavba, zapojení elektroniky a uvedení do provozu. V rámci mechanické stavby je nutno dbát na geometrickou přesnost, zejména u stavby rámu hraje kolmost velkou roli.

Dalším krokem je instalace firmwaru jednodeskového PC Raspberry Pi. Nastavení jednotlivých prvků tiskárny se realizuje pomocí konfiguračního souboru, do kterého se zapisují pozice připojených komponent a jejich typ.

Náklady na stavbu stroje se pohybují kolem 35 000 Kč. Největší položkou jsou části pohonu a řízení, motory jsou v ceně přibližně 3000 Kč, lineární vedení pro všechny osy také a řízení ve formě desky BTT Octopus spolu s Raspberry Pi 4 4 200 Kč.

5.1. Stavba rámu

Rám je složen z hliníkových extrudovaných profilů dvou typů. Prvním typem jsou profily AlutecKK o rozměrech 30x30 mm s 6 mm drážkou typu 103030. Rám stroje je složen z těchto extrudovaných profilů. Druhým typem jsou profily AlutecKK o rozměru 20x40 mm s 5 mm drážkou typu 102040, ty se liší oproti modelu, kde jsou použity profily 102020 z důvodu dostupnosti.

Jednotlivé profily byly zafrézovány na daný rozměr, toto řešení usnadnilo následnou montáž a zaručilo kolmost konců profilů. Do otvorů ve středu profilu byly obrobena závity M6. Ty slouží ke spojení profilů pomocí šroubu DIN 7984 M6x16. Toto spojení je jednoduché bez potřeby přídavných dílců a umožňuje vzájemné propojení více profilů. Nevýhodou spojení je jeho menší styková plocha. Hlava šroubu je v kontaktu s vnitřní stranou drážky. Malá styková plocha šroubu a profilu má vliv na tuhost spoje.

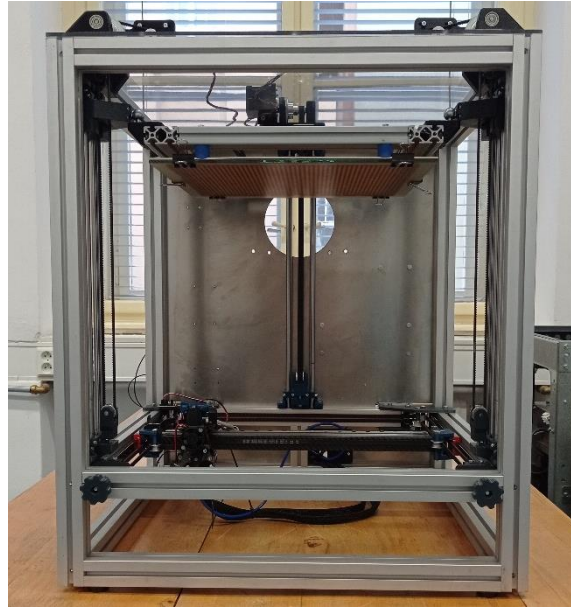


Obr. 54 Sestavený rám

Rám byl následně osazen lineárním vedením příčnicku. Vedení byla vůči sobě vyrovnána ve směru osy Z pomocí číselníkového úchylkoměru. Poté byla ověřena jejich rovnoběžnost.

Na vozíky lineárních motorů lze montovat držáky příčnicků a samotný příčnick s osazeným vedením pro osu X. Dalším krokem byla montáž zadního krytu elektroniky, s předpřipravenými otvory pro jednotlivé komponenty. Dále bylo možné namontovat zadní profil a k němu připojit osazené držáky motorů pro osy X a Y. Dále bylo nutno osadit komponenty napínání řemenů pro pohyb v osách X a Y. Poté byly nataženy smyčky řemenů a upevněny k vozíku tiskové hlavy, který byl spojen s vozíkem vedení osy X. Následovalo předeptnutí řemenů na požadovanou hodnotu.

Dalším krokem byla příprava vozíků tiskové desky a montáž držáků vodicích tyčí do rámu. Do vozíků bylo nutno zalisovat axiální ložiska LMU10 a upevnit sférický kloub. Vozíky byly nasunuty na vodicí tyče a ty byly namontovány do držáků, upevněných na rámu.



Obr. 55 Sestavená 3D tiskárna

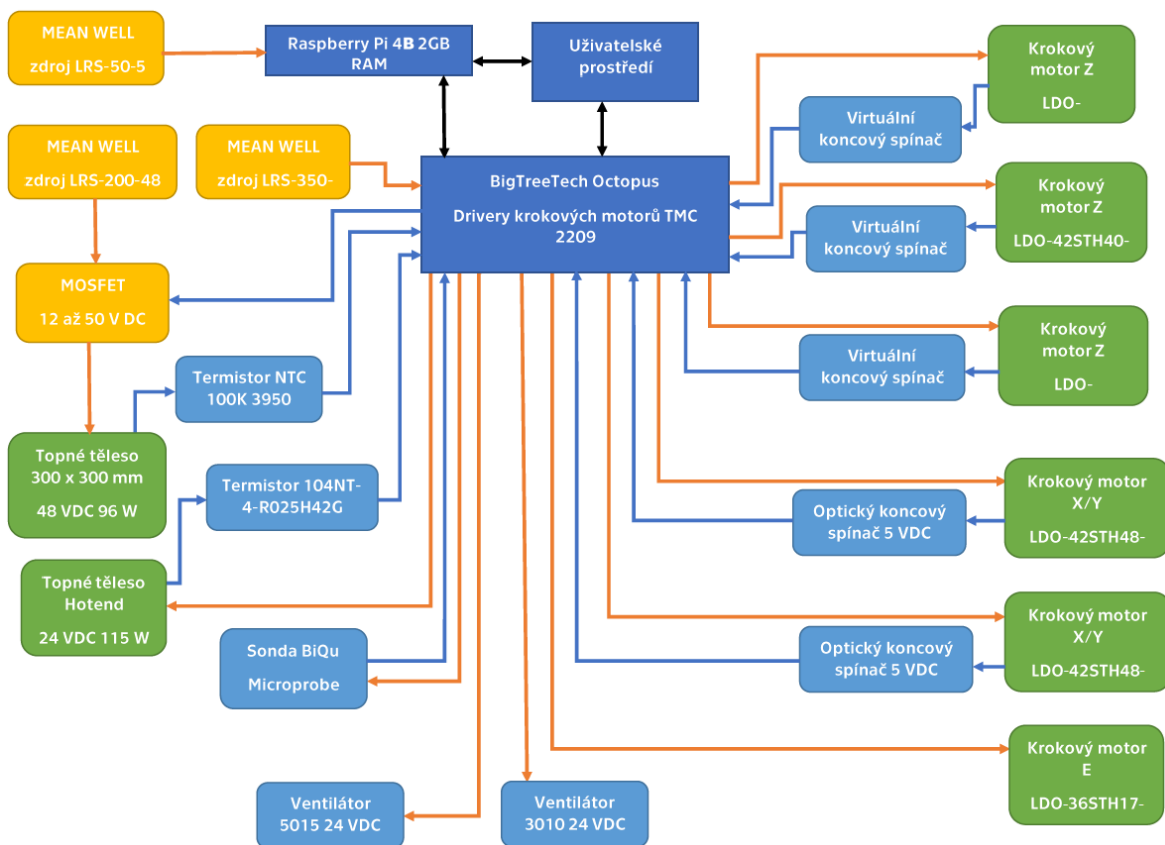
Po montáži horního krycího polykarbonátu byly umístěny držáky osazené motory pohonu osy Z. V rámci osazování na ně byly nasazeny řemeny, řemenice, ložiska, hřídel a motor s řemenicí. K řemenům osy Z byly připojeny vozíky tiskové desky.

Rám tiskové desky je složený z profilů Aluteckk 20x40 mm s 5mm drážkou. K rámu je poté upevněn rámeček tiskové desky. K němu je namontováno tiskové sklo s PEI fólií a topným tělesem. Rám je následně pomocí tištěných dílců přes sférické čepy upevněn k vozíkům osy Z. Na Obr. 55 je zobrazena mechanicky sestavená 3D tiskárna.

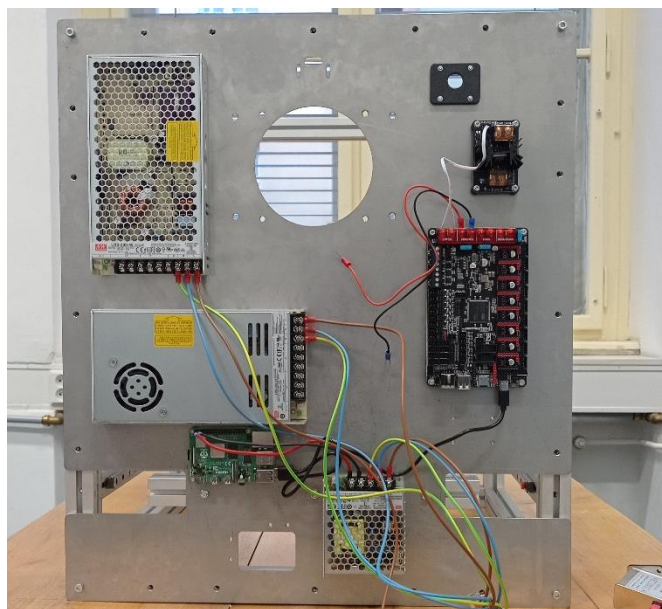
5.2. Elektronika

Elektronické komponenty jsou umístěny v zadní části stroje. Přimontovány jsou na nerezovém plechu o síle 2 mm. Základem elektronické části stroje jsou 3 spínané zdroje MeanWell, které dodávají napětí 5, 24 a 48 V.

Pro napájení jednodeskového PC Raspberry Pi 4 je využit 5V zdroj o výkonu 50 W. Silovou desku BTT Octopus v1.1 napájí 24V zdroj o výkonu 350 W. Pro napájení topného tělesa podložky je využit 48V zdroj o výkonu 200 W, který dodává podložce proud skrze externí MOSFET. Obr. 57 zobrazuje základní elektronické komponenty tiskárny před připojením motorů, koncových spínačů a dalších komponent.



Obr. 56 Blokové schéma zapojení elektrických komponent



Obr. 57 Elektronický panel

Motory jsou napájeny a řízeny skrze silovou desku a drivery krokových motorů TMC 2209. Silová deska dostává povely od jednodeskového PC. Silová deska rovněž předává informace o stavu koncových spínačů, čte hodnoty z termistorů a stará se o spínání topných těles.

Schéma (Obr. 56) zobrazuje blokové zapojení komponent pohonů, topných těles, spínaných zdrojů, dotykové sondy a komponent chlazení. Modré čáry vyznačují zpětnou vazbu k řízení, oranžově jsou vyznačené signály od silové desky a napájení a černou barvu jsou označeny datové toky. V oranžových rámečcích jsou označeny komponenty napájení, světle modře senzory a ventilátory, zeleně jednotlivé pohony a topná tělesa a tmavě modře prvky řízení.

5.3. Uvedení stroje do provozu

Pro uvedení do provozu bylo nutné nainstalovat operační systém MainSailOS na Raspberry Pi. Jsou zde i jiné možnosti, například: OctoPrint nebo Fluid. MainSailOS byl vybrán pro jeho jednoduchou instalaci a přehledné uživatelské prostředí. Součástí MainSailOS je firmware Klipper a webové rozhraní MainSail. Instalace se provádí vytvořením obrazu na SD kartu, obraz operačního systému lze vytvořit pomocí programu Raspberry Pi Imager. Po zasunutí SD karty a zapnutí Raspberry Pi dojde k instalaci softwaru. Z něj lze vygenerovat firmware pro silovou desku. [62]

Pro vygenerování firmwaru silové desky je potřeba se připojit k Raspberry Pi pomocí programu se vzdáleným přístupem k příkazovému řádku. Například lze využít software PuTTY. Následný postup je vybrat mikročip silové desky. Dle tohoto výběru je vygenerován firmware a ten lze stáhnout nebo ho lze pomocí příkazového řádku poslat do silové desky. Firmware pro silovou desku je také možno stáhnout ze stránek vývojáře firmwaru. [62]

Po nahrání firmwaru na silovou desku lze pomocí USB připojit Raspberry Pi. Dále je možné zkontrolovat komunikaci pomocí příkazového řádku. Dalším krokem ožívání je vytvoření konfiguračního souboru. Konfigurační soubor obsahuje informace o zapojení jednotlivých komponent. Pozice jsou specifikovány pomocí příslušných pinů mikroprocesoru na silové desce. [62]

Kromě pozic se také specifikují konkrétní typy komponent. Knihovna konfigurace Klipperu obsahuje přednastavené parametry pro řadu běžně užívaných komponent, jako jsou drivery krokových motorů a termistory. Pro

konfiguraci termistoru tedy stačí zapsat příslušný pin mikroprocesoru, typ termistoru a očekávaný rozsah teplot, vše ostatní je načteno z knihovny komponent. [62]

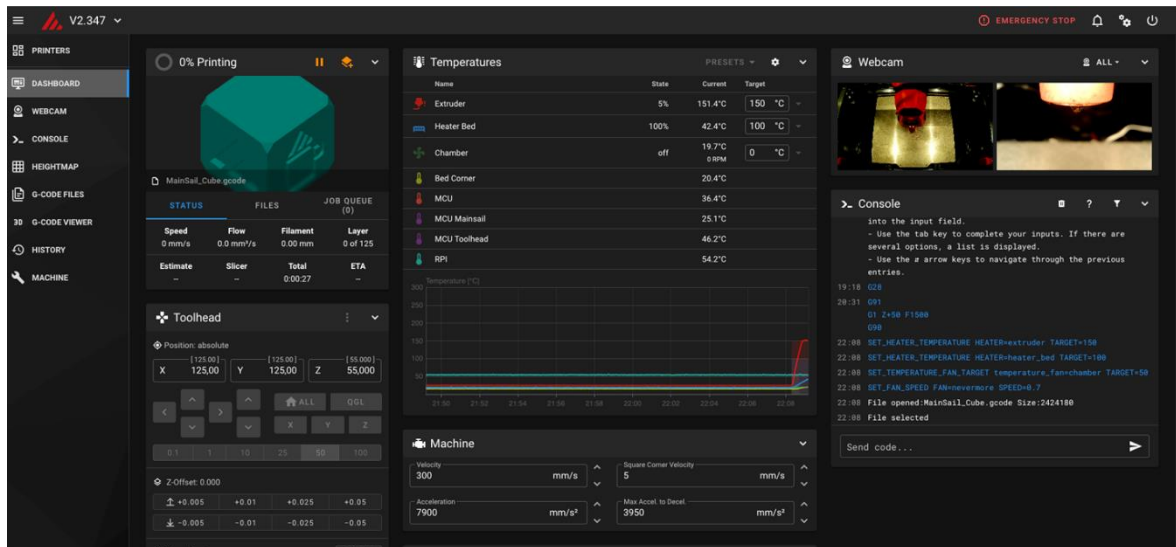
Dalším krokem nastavení tiskárny je nastavení funkce pro vyrovnání podložky s rovinou tiskové hlavy. U této funkce se nastavují sondovací body, pozice kulových čepů, počet opakování sondování a další parametry. Funkce Klipperu pro toto vyrovnání se jmenuje Z_Tilt. správně vytištěnou první vrstvu je vhodné ještě nastavit kalibrování tiskové desky, k tomu slouží funkce Bed_Mesh, u které se nastavuje rozsah sítě, počet snímaných bodů a další parametry. [62]

Pro správný chod tiskárny je také dobré mít nastavená makra, která definují její chování při pozastavení tisku, návratu k tisku, začátku a konci tisku a v dalších situacích. Tato makra jsou psána v jazyku Python a mohou obsahovat G-kód. Také mohou reagovat na různé stavy tiskárny a spouštět různé funkce. [62]

Tato makra usnadňují práci s tiskárnou a nastavení sliceru. Ve sliceru stačí pro zahájení startovací sekvence před tiskem užít daného makra, slicer jej přidá na začátek G – kódu. Obdobně to lze aplikovat pro konec tisku, například pro odjetí tiskové hlavy na stranu, vypnutí topných těles etc.

5.4. Rozhraní

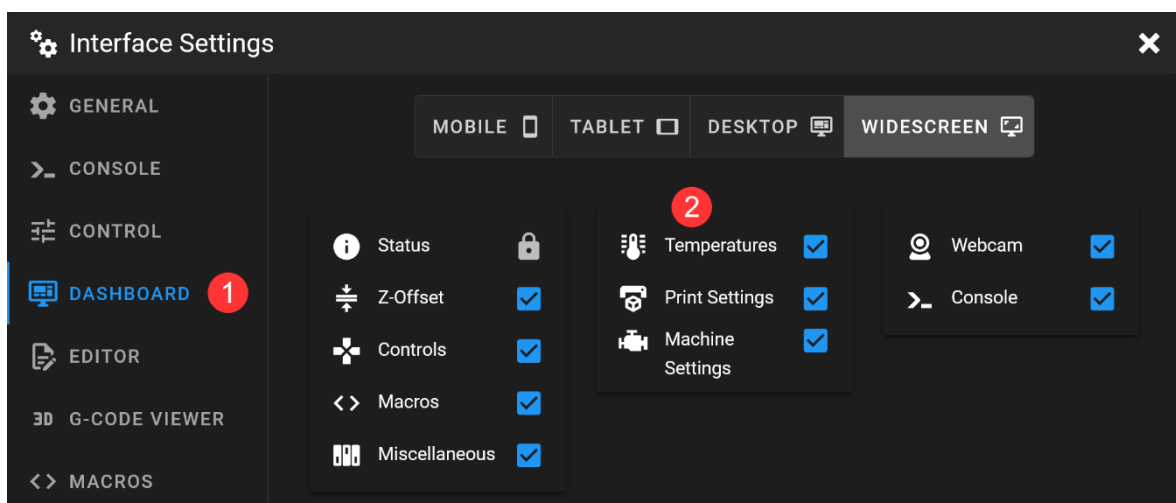
Již zmíněné rozhraní MainSail lze zobrazit pomocí webového prohlížeče na PC připojeném na stejné síti jako je tiskárna přes url: <http://mainsailos.local/>. Po spuštění se zobrazí základní obrazovka (Dashboard), viz Obr. 58. Zde se zleva nachází menu s dalšími obrazovkami. Dále je zde zobrazen průběh tisku s možností jej pozastavit či nastavit vrstvu, kdy se zastaví. Pod tímto polem je pole s možnostmi ovládní tiskové hlavy. Níže je ještě možnost nastavení Z – offsetu. Uprostřed jsou vyobrazeny teploty hotendy, tiskové podložky, tiskové komory a teploty desek řízení. Níže jsou základní parametry tiskárny, jako je posuvová rychlost, zrychlení a jerk. Vpravo se nachází zobrazení kamer, pod kterým je příkazový řádek. [43]



Obr. 58 Mainsail – Dashboard [63]

Nastavení rozhraní

V MainSail lze v rámci uživatelského rozhraní upravit zejména pozice jednotlivých panelů na nástěnce (Dashboard). Lze si volit pozice jednotlivých panelů a jaké panely se tam budou zobrazovat. Na výběr jsou následující panely: status (ten nelze odebrat, lze pouze měnit jeho pozici), nastavení Z–offsetu, ovládání tiskárny, makra, položka různé (pro ventilátory a další periférie), teploty, nastavení tisku, nastavení tiskárny, zobrazení kamery a příkazový řádek. Pozice jednotlivých panelů lze nastavit pro 4 druhy zařízení: telefon, tablet, PC a PC se širokoúhlým monitorem. V těchto 4 záložkách lze měnit pozice panelů posouváním a přizpůsobit si tak ovládání tiskárny. Další úpravy vzhledu lze provádět úpravou CSS stránky. [43]



Obr. 59 Nastavení Dashboard [63]

Rozsáhlejší možnosti rozdělení nabízí MainSail pro rozložení uživatelsky vytvořených maker. Ty lze dělit do jednotlivých skupin a měnit barvy jejich ikon. Rovněž lze nastavit, jaká makra se zobrazí v závislosti na stavu tiskárny. Pokud například tiskne, zobrazí se jiná sada maker, než když je pouze v pohotovostním režimu.

5.5. Zkušební tisk

V rámci testování stroje bylo vytištěno množství zkušebních dílců. Část z nich sloužila ke kalibraci tiskárny. K těm patřila zkušební kalibrační kostka, po jejímž vytištění byly zkalibrovány osy. Dále byla vytištěna kalibrační věž pro nastavení funkce pressure advance, která umožňuje tisk s minimálními retrakcemi filamentu. Zkušební výtisky ukázaly potřebu posílit chlazení tisknutého modelu, vzhledem k vyšší tiskové rychlosti ($100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ pro vnější perimetry). Toto se projevilo při tisku PLA u dílce s převisy. Řešením tohoto problému by bylo přidání druhého chladicího ventilátoru 5015 nebo změna jeho typu, případně užití pevně umístěného ventilátoru s vedením vzduchu. Na Obr. 60 je k vidění vytištěná kalibrační kostka.



Obr. 60 Vytištěný dílec

6. Identifikace přesnosti a její měření

V rámci této kapitoly byla identifikována maximální teoreticky dosažitelná přesnost polohování pohybových os. Následovalo měření geometrické přesnosti stroje pomocí Renishaw Ballbar QC20. Dále byla změřena přímost jednotlivých os pomocí laserového interferometru Optodyne MCV – 2002. Stejným měřidlem byla měřena také přesnost polohování jednotlivých os.

První měření v rovině XY probíhalo pomocí Renishaw BallBar QC20. Po tomto měření byl ještě vyrovnán příčnick vůči zbytku rámu pomocí číselníkového úchylkoměru. Následovalo ověřovací měření v rovině XY a byla provedena měření v rovinách XZ a YZ. Dalším krokem bylo měření pomocí laserového interferometru Optodyne MCV – 2002.

6.1. Identifikace rozlišení pohybových os

Maximální dosažitelná přesnost polohování vychází z kombinace možností řízení, motoru a převodového mechanismu pohonu. Maximální rozlišení polohování pohonu osy lze definovat jako posun na jeden pulz.

U tiskárny jsou užívány krokové motory s 200 kroky na otáčku, každý krok v osách X a Y je řízen skrze 16 pulzů. Celá otáčka reprezentuje posuv o 40 mm a je k tomu potřeba 3200 pulzů. Tedy jeden pulz odpovídá posuvu o 0,0125 mm. Pro osu Z jsou shodně použity krokové motory s 200 kroky na otáčku, každý krok pak vyplňuje 32 pulzů, tedy 6400 pulzů na otáčku. Dále je připojen převod 3:1, hodnota posuvu na pulz je tedy 0,002 mm.

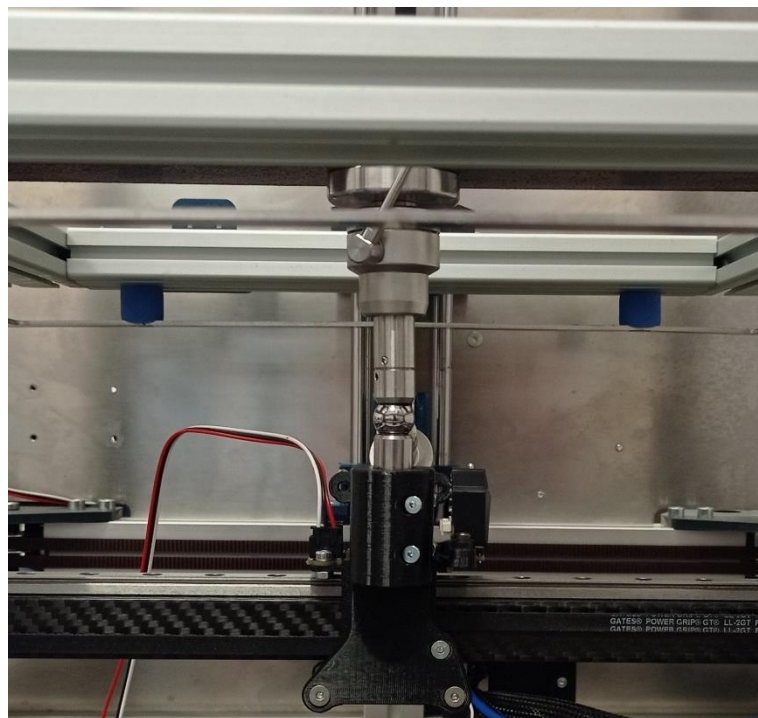
Reálná přesnost je však zatížena výrobními a dalšími chybami, její hodnota je předpokládána v řádu setin milimetru. Hodnotu posuvu na otáčku lze upravit v nastavení tiskárny pod položkou `rotational_distance`. Tou lze ladit délku posuvu na základě měření. Firmware Klipper bohužel neobsahuje korekční tabulku, `rotational_distance` tak platí v celém pojezdu os.

6.2. Měření pomocí Renishaw BallBar QC20

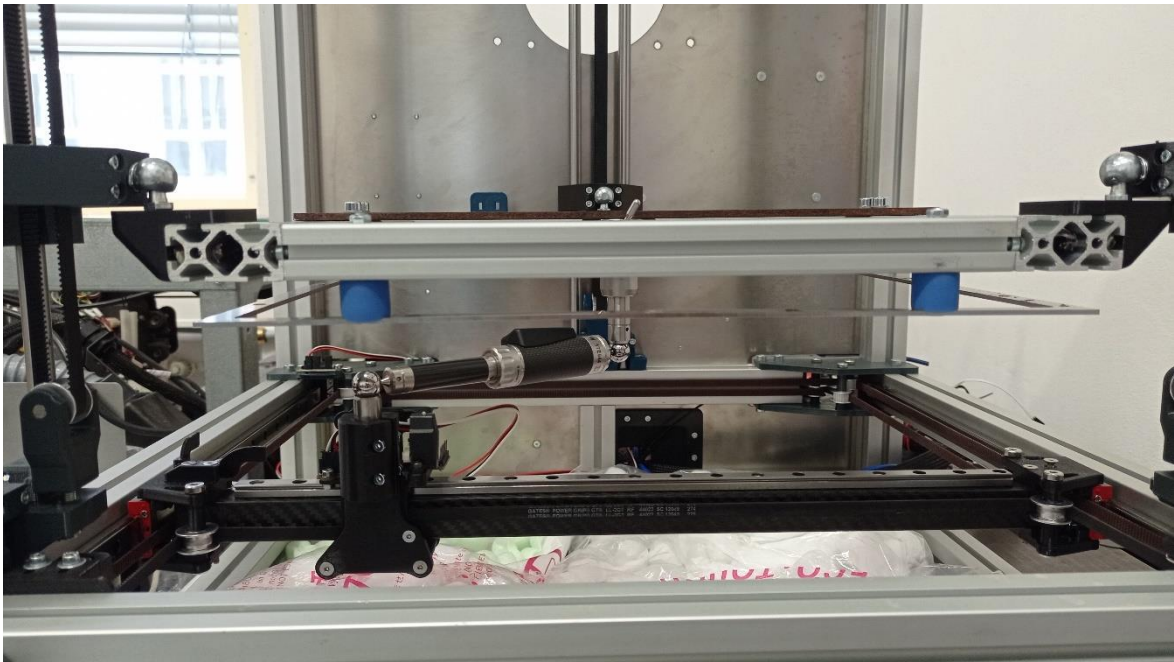
Pro měření pomocí Renishaw BallBar byl vytvořen držák magnetického lůžka. Pozice magnetického lůžka odpovídala pozici tiskové trysky v rovině XY. Do

tohoto držáku se umístilo magnetické lůžko, do kterého zapadá jeden z kulových konců měřidla. Druhý konec měřidla byl uložen v magnetickém stojánku, jehož součástí je shodné lůžko. Stojánek byl uložen na rámu tiskové desky skrze přidanou ocelovou pásovinu. Nastavení nulové pozice pro měření BallBarem viz Obr. 61.

Pro měření bylo připraveno 6 NC kódů, dva pro měření v každé rovině. Vždy se měřilo nejprve proti a pak po směru hodinových ručiček. Pro měření v XY umožnil firmware Klipper užití příkazů G2 a G3, které dělily kružnici po lineárních úsecích o délce 0,01 mm. Pro měření v rovinách XZ a YZ byl NC kód generován pomocí CAM složky programu Siemens NX. Klipper totiž neumožnil použití příkazu G2 a G3 pro jinou rovinu než XY.



Obr. 61 Nastavení uložení BallBaru



Obr. 62 Měření pomocí Renishaw BallBar QC20 v rovině XY

Před začátkem měření bylo nutné sestavit a zkalibrovat BallBar. Sestavení znamenalo přidání prodlužovacího dílce, aby vzdálenost mezi kulovými konci odpovídala 150 mm. Prodloužení na 150 mm bylo využito, aby měření obsáhlo celý rozsah os. Poté bylo měřidlo zapnuto a spárováno s PC pomocí Bluetooth. Následovala kalibrace pomocí přiloženého skleněného kalibračního etalonu, ten je k vidění na Obr. 63. Po kalibraci měřidla bylo strojem najeto na požadovanou souřadnici. Pro měření v rovině XY se jednalo o souřadnici (X0, Y150), viz Obr. 61, následně byl BallBar uložen mezi magnetická lůžka a byl mu dán povel k začátku měření. Dalším krokem bylo spuštění příslušného NC programu. Obdobně probíhala veškerá měření. Průběh měření v rovině XY je k vidění na Obr. 62.

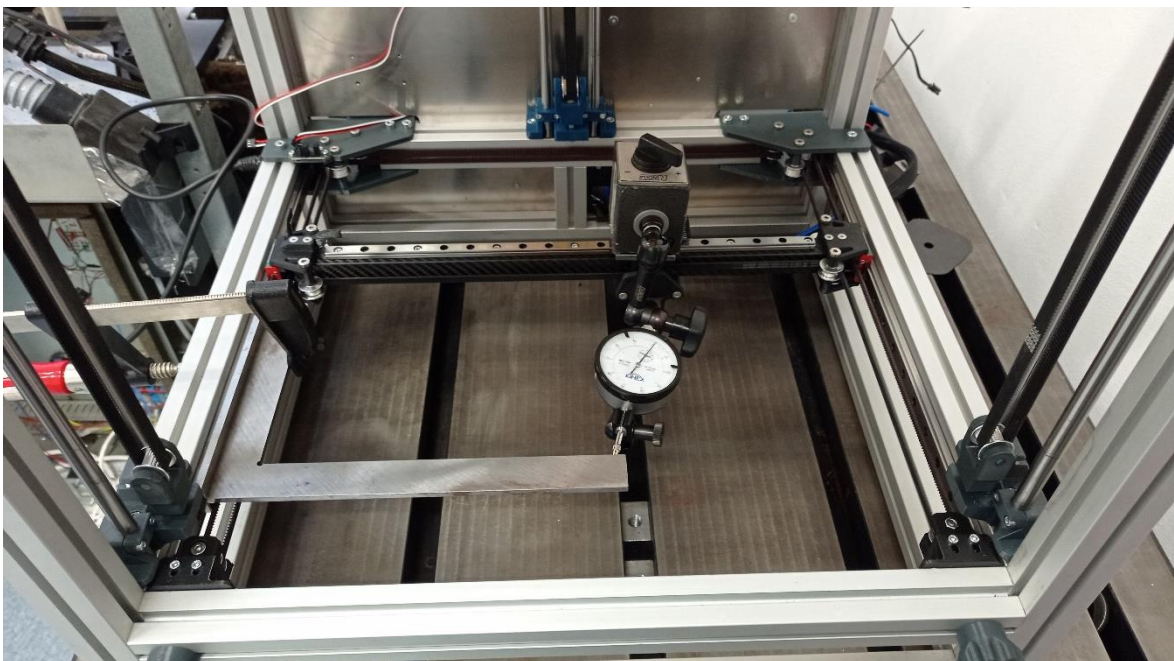
První měření nepřineslo příliš povzbudivé výsledky, tak byl před dalšími měřeními zkontrolován stav sestavení rámu, rovnoběžnost lineárních vedení a poté byl znovu usazen a vyrovnán příčník stroje. Tento zásah přinesl desetinásobné zlepšení kolmosti os v rovině XY. Na Obr. 64 je k vidění vyrovnávání příčníku.

Následovala pak měření stroje ve všech rovinách, avšak pouze pro rovinu XY bylo možno projet celý kruh. Pro měření v rovinách XZ a YZ byl projet půlkruh.

Všechna měření byla opakována třikrát. Ukázka výsledku měření viz Obr. 65. Toto měření proběhlo před vyrovnáním příčnicku a úpravě nastavení motorů. Během tohoto měření měly motory pro X a Y různé nastavení rotational_distance. Projevilo se to odchylkou vrcholů elips.



Obr. 63 Kufř měřidla Renishaw BallBar QC20 spolu s kalibračním etalonem



Obr. 64 Vyrovnání příčnicku pomocí číselníkového úchylkoměru

Ballbar diagnostika (%)

RENISHAW

XY 360stup 150mm Kalibrován 20230419-151742

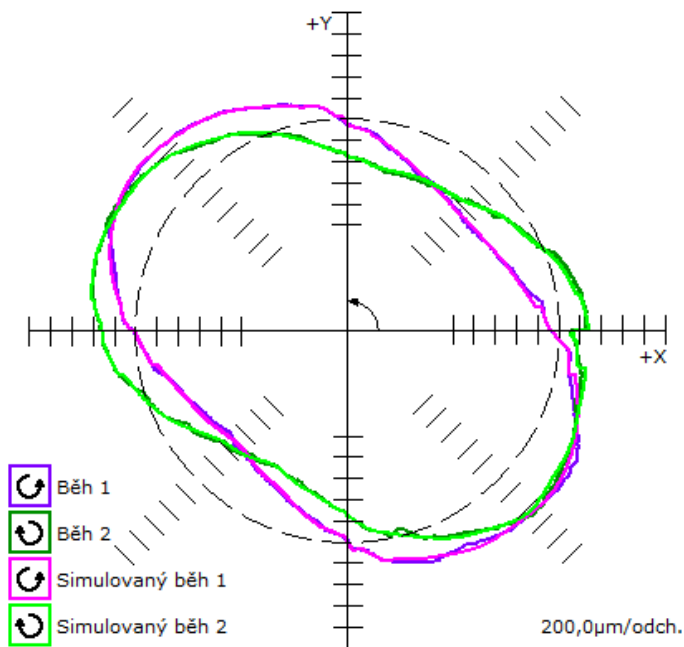
Obsluha: mirek

Stroj: Rychlý test

Datum: 2023-dub-19 15:17:42

QC20-W: 1TE644, Datum poslední kalibrace: 2019-02-11

36% Kolmost	5600,3 μ m/m
16% Příkladná vůle Y	<ul style="list-style-type: none"> ▲ -342,1μm ▼ -399,7μm
13% Relativní chyba odměřování	606,4 μ m
13% Příkladná vůle X	<ul style="list-style-type: none"> ▶ -138,0μm ◀ -412,9μm
6% Mrtvý chod X	<ul style="list-style-type: none"> ▶ -136,7μm ◀ -3,9μm
Tolerance polohy	3704,9 μ m
Nejllepší poloměr	150,0631mm
Kruhovitost	1060,9 μ m



Obr. 65 Výsledek měření pro rovinu XY před vyrovnáním příčnicku

Měření v rovině XY

Měření v rovině XY díky naměření celého kruhu vyhodnotilo kolmost os XY a další parametry os. Průměrná odchylka kolmosti z 5 měření byla **516,86 μ m/m**. Kolmost má nejvyšší vliv na odchylku kruhovitosti. Dle shodných vrcholů elips lze usoudit, že motory jsou správně nastaveny. Další vyhodnocené parametry jako je mrtvý chod, amplituda cyklické chyby a příčná vůle jsou tvořeny vůlemi v lineárním vedení, házením řemenic a poddajností řemene. Vzhledem k poddajnosti mechanismu a vedení řemenů nebylo možno více vyrovnat příčnick. Výsledek jednoho z měření je vyobrazen, viz Obr. 66.

Ballbar diagnostika (%)

RENISHAW

XY 360stup 150mm Kalibrován 20230517-091359

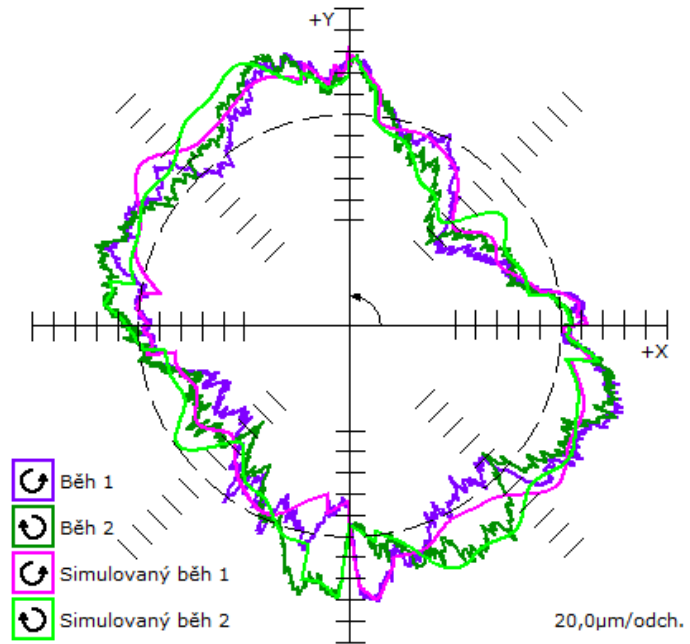
Obsluha: mirek

Stroj: Rychlý test

Datum: 2023-kvě-17 09:13:59

QC20-W: 1TE644, Datum poslední kalibrace: 2019-02-11

23% Kolmost	516,2 μ m/m
17% Mrtvý chod Y	<ul style="list-style-type: none"> ← 6,7μm → 57,3μm
10% Amplituda cyklické chyby Y	<ul style="list-style-type: none"> ↑ 30,6μm ↓ 38,9μm
10% Příčná vůle X	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 59,4μm ◀ -64,6μm
9% Amplituda cyklické chyby X	<ul style="list-style-type: none"> ↑ 27,1μm ↓ 31,2μm
Tolerance polohy	387,1 μ m
Nejlepší poloměr	149,9872mm
Kruhovitost	165,0 μ m



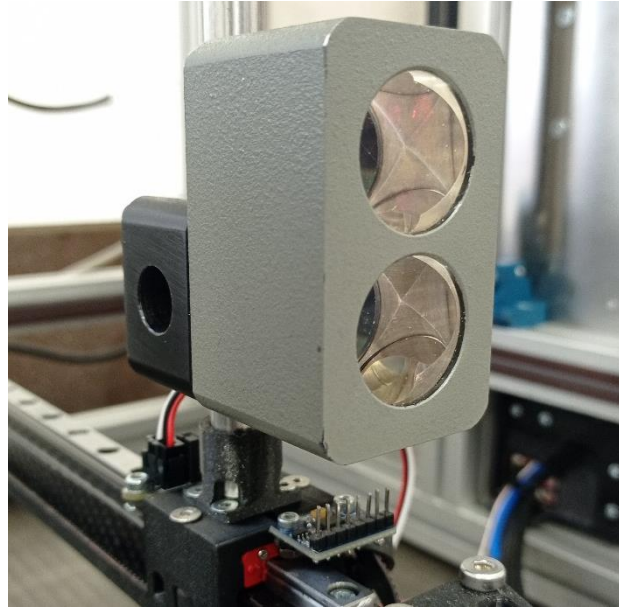
Obr. 66 BallBar měření v rovině XY

Měření v rovině XZ a YZ

Vzhledem k tomu že nebylo možné dokončit celý kruh během měření, nebylo možné vyhodnotit kolmost os ani další parametry. Výsledkem měření jsou tak zejména hodnoty kruhovitosti a rychlosti posuvu. Bylo provedeno celkem pět měření. Jejich výsledky však nebylo možné nijak interpretovat. Projetí celého kruhu nebylo možné vzhledem ke konstrukci stroje a užitém systému uložení magnetického držáku BallBaru.

6.3. Měření pomocí Optodyne MCV – 2002

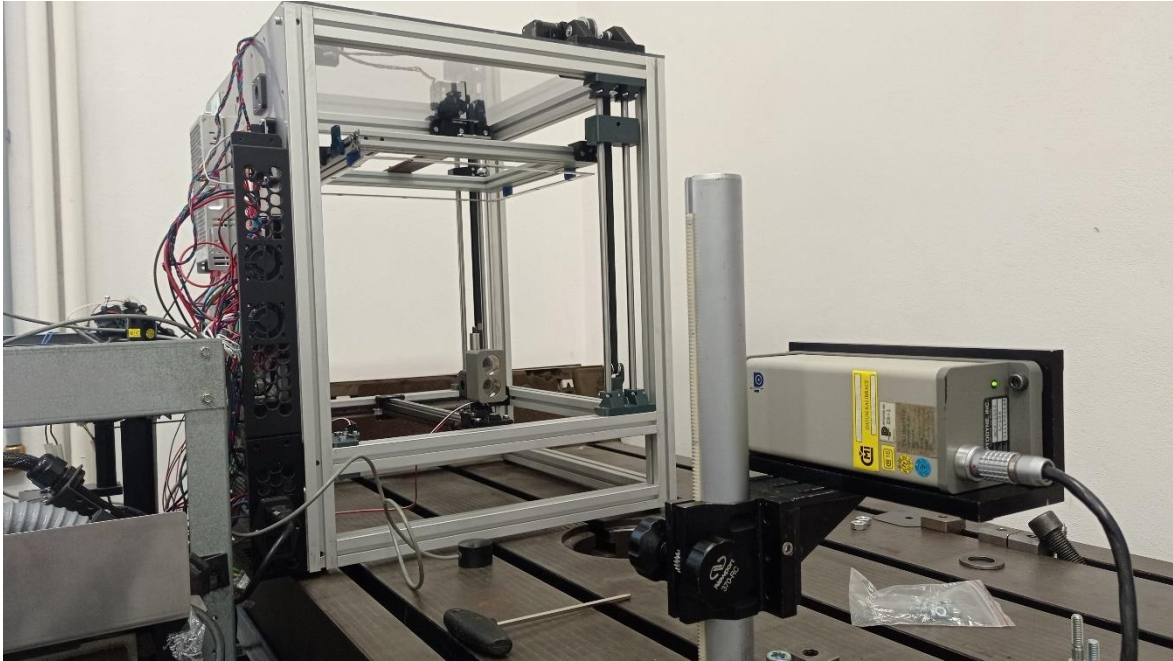
Pro měření laserovým interferometrem v osách X a Y byl vytvořen držák odražeče umístěný na vozíku tiskové hlavy co nejbližší k domečku lineárního vedení, viz Obr. 67, aby se do měření přeneslo minimum negativních vlivů od tuhosti vozíku a především příčnicku. Pro měření v ose Z bylo využito magnetického stojánku, který byl upnut na již zmiňovanou pásovinu přimontovanou k rámu desky. Na Obr. 68 Je vyobrazeno měřicí zařízení, je zde vidět zdroj laserového paprsku, který je uložen na stojanu. V pozadí je měření stroj, na jehož tiskové hlavě je umístěn koutový odražeč.



Obr. 67 Odražeč laserového paprsku

Pro každou osu probíhaly 3 sady měření, vždy bylo provedeno měření polohové přesnosti dané osy a její přímost v jednom směru. Pro měření přímosti ve druhém směru bylo nutné přestavit odražeč laserového paprsku i samotný laser. To bylo nutné vzhledem k pozici dvojice laserových paprsků vysílaných ze zdroje a dvojice koutových odražečů. Přímost byla možná měřit jen ve směru dvojice zdrojů paprsků.

Měření přímosti probíhalo vždy ve 2 směrech oproti směru osy. Rozjezd všech os byl nastaven jako 300 mm, měření probíhalo v 11 bodech, osy byly tedy rozděleny po 30 mm. Program LDDM zpracoval naměřená data do grafu, který vyobrazuje průběh přímosti osy. Měření bylo prováděno ve dvou směrech. Směrem od zdroje paprsku a následně zpětným pohybem ke zdroji. Pohyb tam a zpět se počítal jako jedno měření.



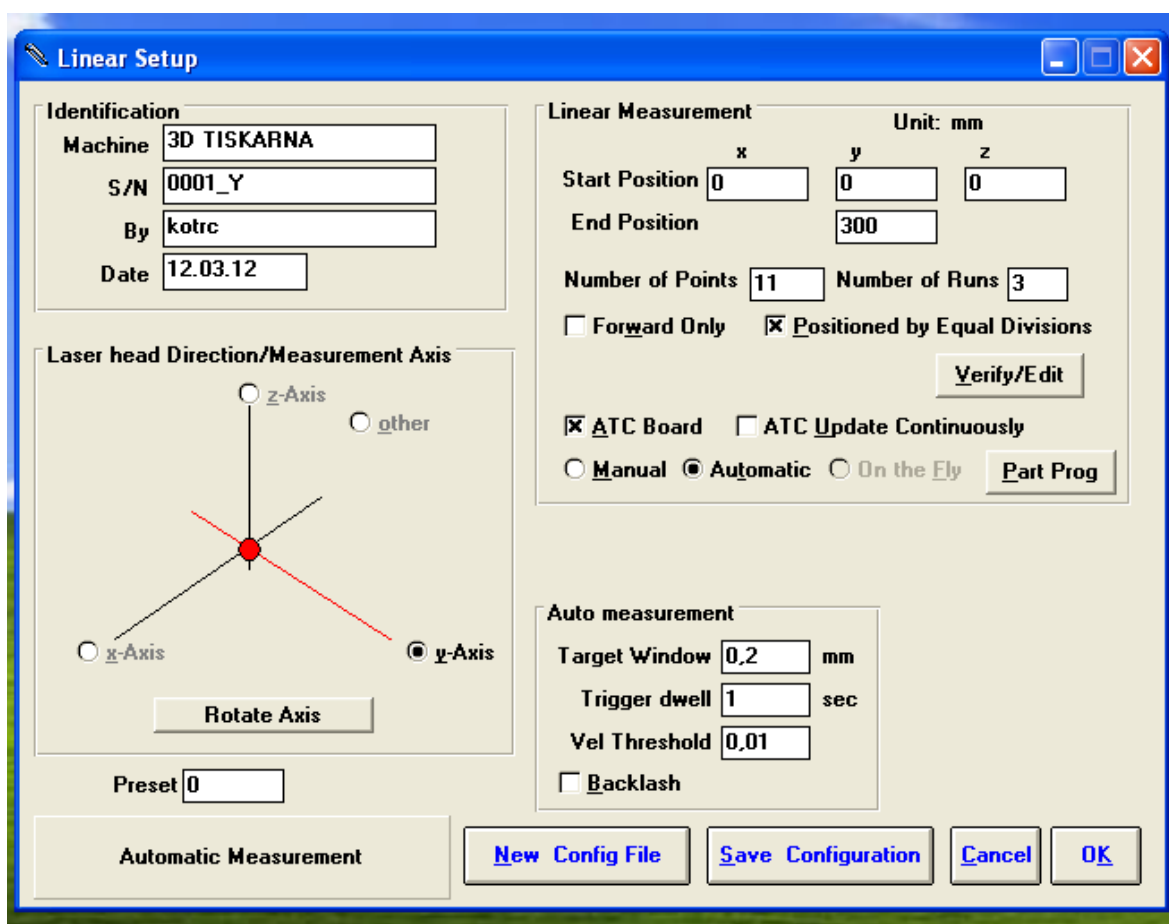
Obr. 68 Měření laserovým interferometrem

6.3.1. Měření přesnosti polohování

Přesnost polohování jednotlivých os byla změřena v rozsahu 0 až 300 mm, měření bylo provedeno v 11 bodech ve 2 směrech a 3krát opakováno. Nejprve proběhlo měření ve směru od zdroje paprsku a následně bylo měřeno zpět k němu. Měření probíhalo v dopředném směru shodně s kladnou orientací dané osy.

Na Obr. 69 je vyobrazeno okno nastavení měření přesnosti os v programu LDDM. Je zde vidět rozsah měření, zvolená měřená osa, počet bodů měření jednoho průjezdu, zda je měřeno v obou směrech, počet měření a další potřebné parametry.

Výsledkem měření je tabulka ukazující odchylku naměřené hodnoty od požadované v obou směrech měření a grafy, které toto měření znázorňují graficky. Požadovaná přesnost polohování v osách X a Y je 0,1 mm. Pro osu Z je potřebné přesnější polohování, a tak byla přesnost stanovena na 0,05 mm.



Obr. 69 Nastavení měření přesnosti os

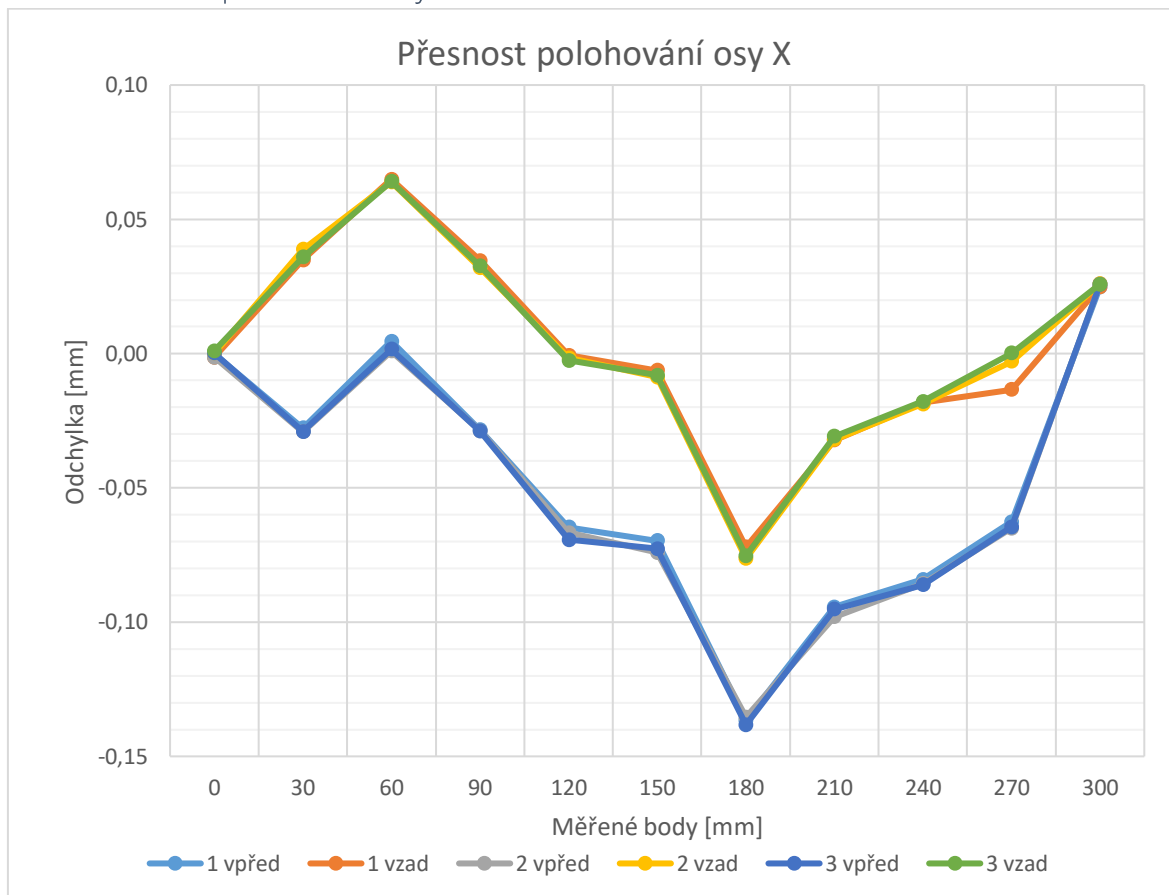
Přesnost v ose X

Graf 1 zobrazuje průběh měření přesnosti polohování osy X. Lze z něj vyčíst průběh odchylky, která ve směru ke středu rozjezdu osy narůstá. Minimální odchylka dosahovala hodnoty $-0,138\text{ mm}$, maximální odchylka se rovnala $0,065\text{ mm}$. Průměrná odchylka od požadované polohy byla $\pm 0,041\text{ mm}$ a medián se rovnal $\pm 0,030\text{ mm}$.

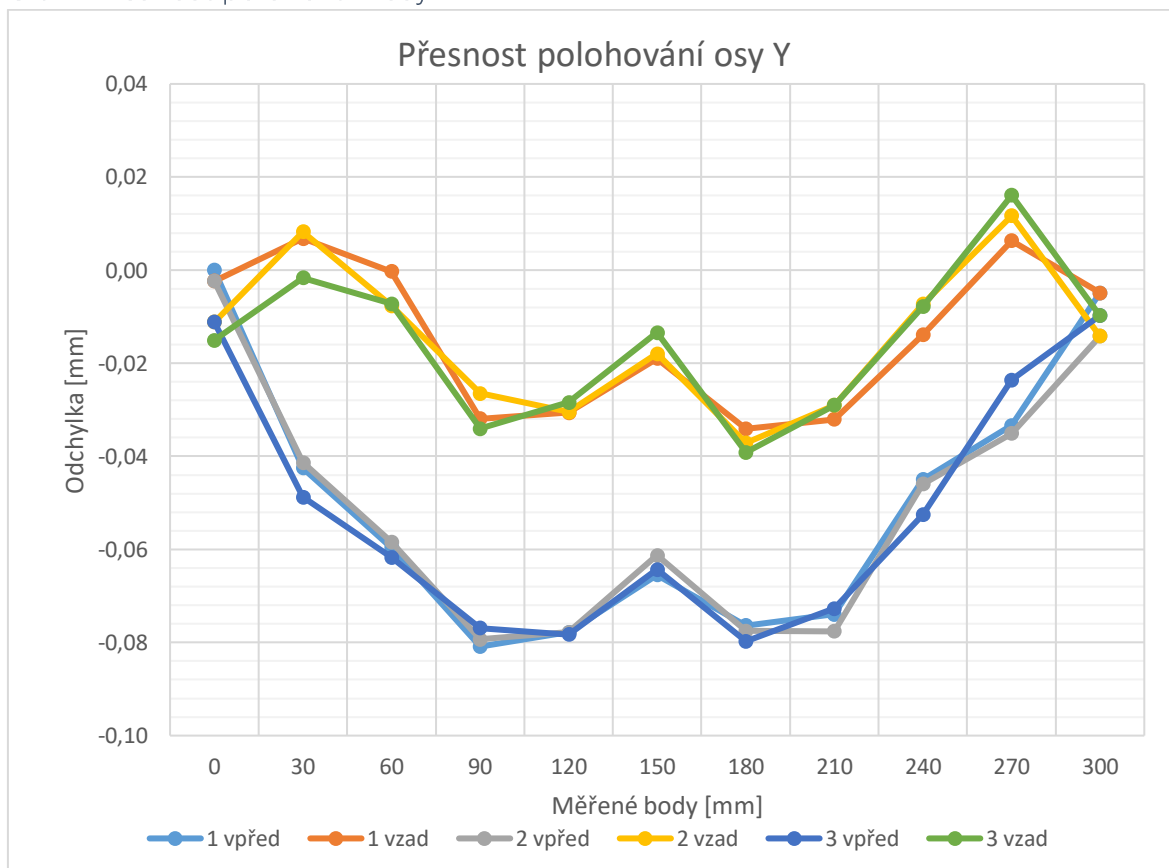
Přesnost v ose Y

Graf 2 zobrazuje průběh měření přesnosti polohování osy Y. Je na něm vidět, že odchylka v kladném směru osy byla vyšší než u zpětného pohybu. Minimální odchylka dosahovala hodnoty $-0,081\text{ mm}$, maximální odchylka se rovnala $0,016\text{ mm}$. Průměrná odchylka od požadované polohy byla $\pm 0,035\text{ mm}$ a medián se rovnal $\pm 0,031\text{ mm}$.

Graf 1 Přesnost polohování osy X



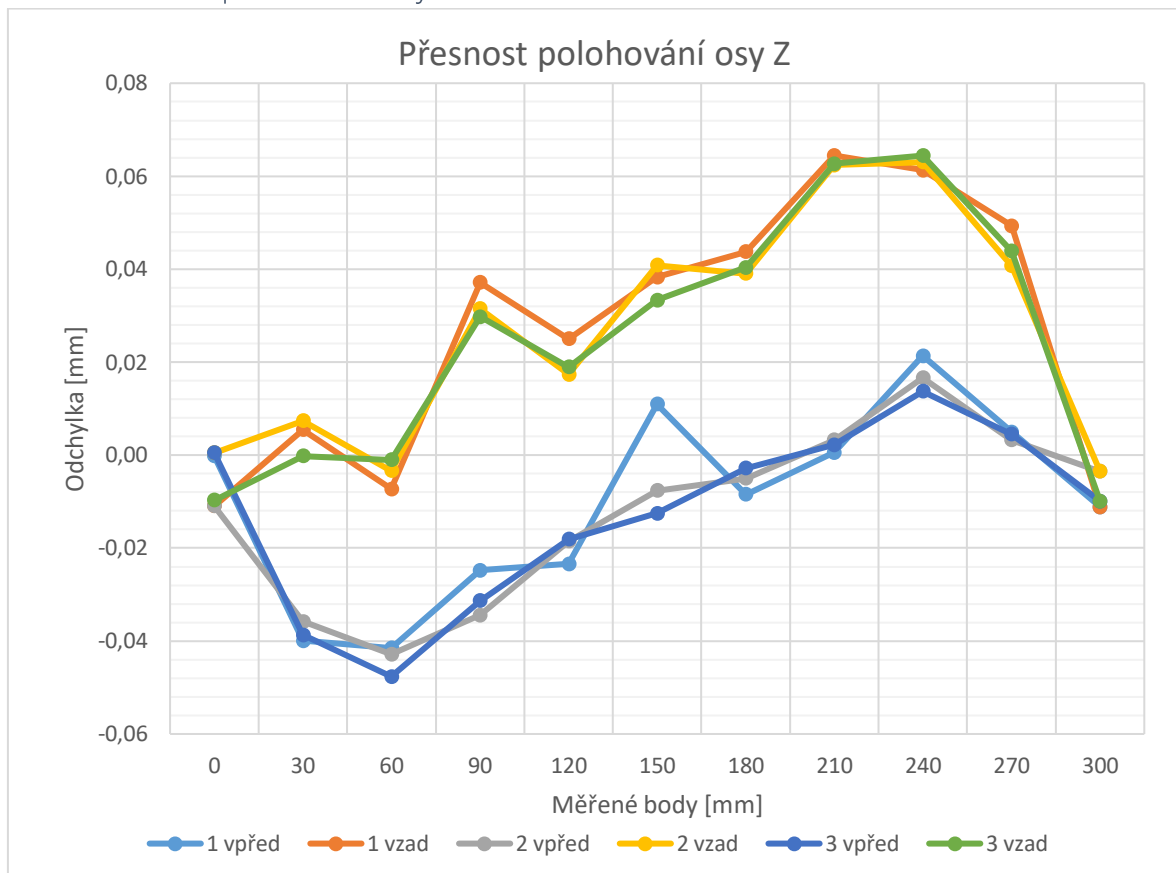
Graf 2 Přesnost polohování osy Y



Přesnost v ose Z

V Graf 3 lze vidět rozdíl v přesnosti polohování v závislosti na směru pohybu. Pohyb vpřed znamená pohyb vozíku desky směrem vzhůru. Při pohybu směrem dolů se projevuje vyšší odchylka polohy než při pohybu v kladném směru osy Z. Maximální odchylka dosahovala hodnoty **0,064 mm**, minimální odchylka se rovnala **-0,048 mm**. Průměrná odchylka od požadované polohy byla **$\pm 0,023$ mm** a medián se rovnal **$\pm 0,018$ mm**.

Graf 3 Přesnost polohování osy Z



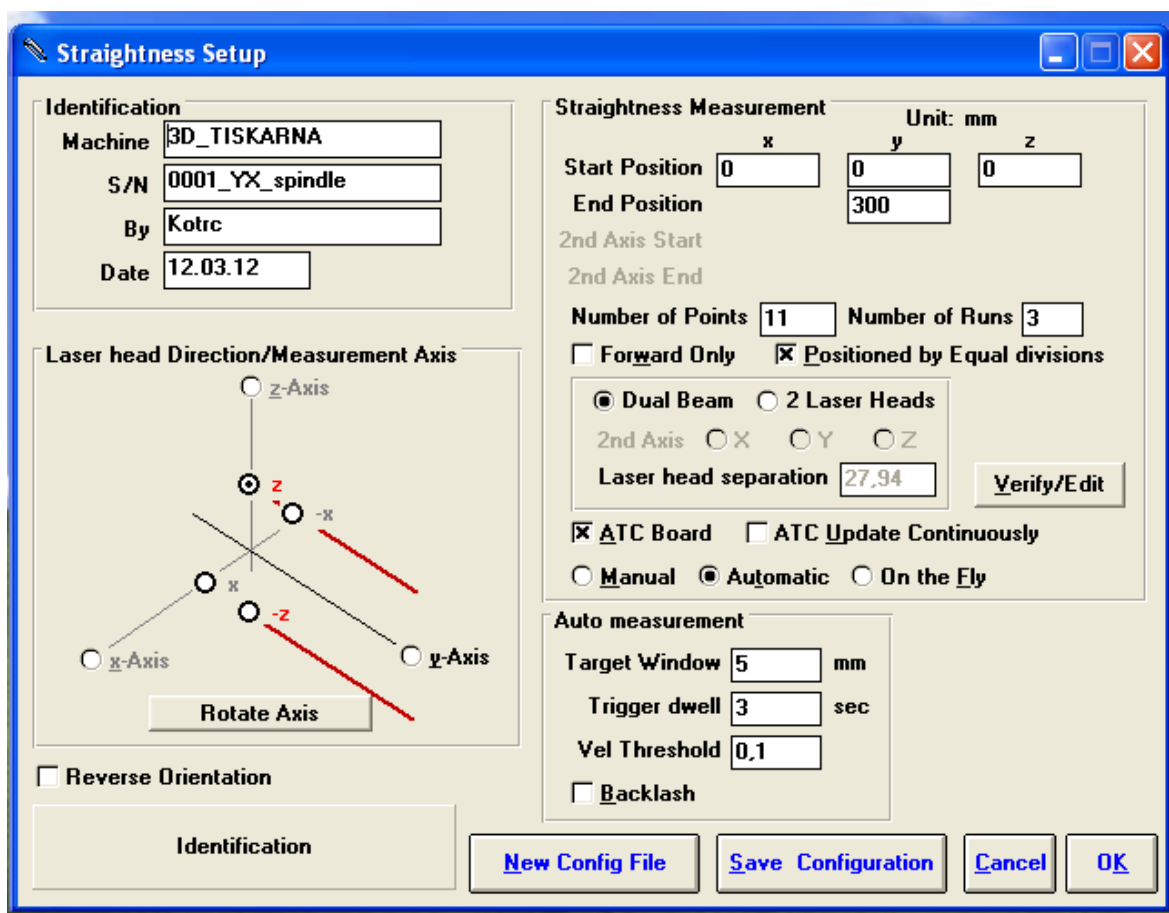
Vyhodnocení výsledků

Přesnost jednotlivých os dosahuje očekávaných výsledků. Přesnost os X a Y se pohybuje v desetině milimetru, vzhledem ke složitému pohybovému mechanismu a dlouhému vedení řemenu je to přijatelná hodnota. Přesnost osy Z je přibližně **0,05 mm**, což je přijatelná hodnota.

6.3.2. Měření přímosti

Přímost os byla rovněž měřena v rozsahu 0 až 300 mm v 11 bodech, měřeno vždy nejprve od zdroje laserového paprsku v kladném směru měřené osy a následně zpět. Směry výchylek přímosti jsou vyobrazeny na Obr. 70. Zde je také vidět nastavení počtu měřených bodů, zda je měřeno v obou směrech, počet jednotlivých měření, jejich rozsah a další parametry. Rovněž si lze na obrázku povšimnout kam směřuje kladná a záporná odchylka přímosti.

Přímost os je ovlivněna zejména lineárními vedeními a přímostí příčnicku. K jejímu zlepšení by přispělo přidání dotlačovacích šroubů a případně odtlačovací lišty pro vyrovnání vedení pro zajištění vyrovnání lineárního vedení.



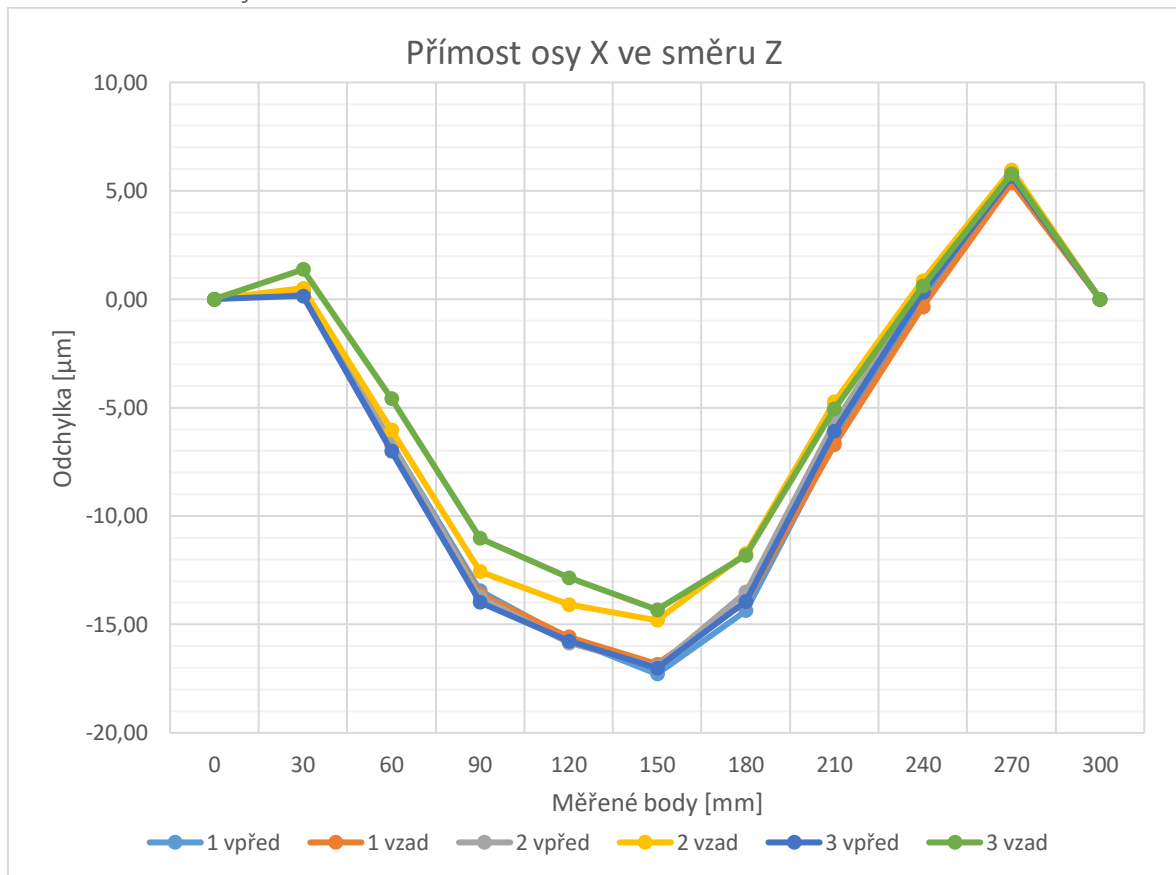
Obr. 70 Nastavení měření přímosti os

Přímost osy X

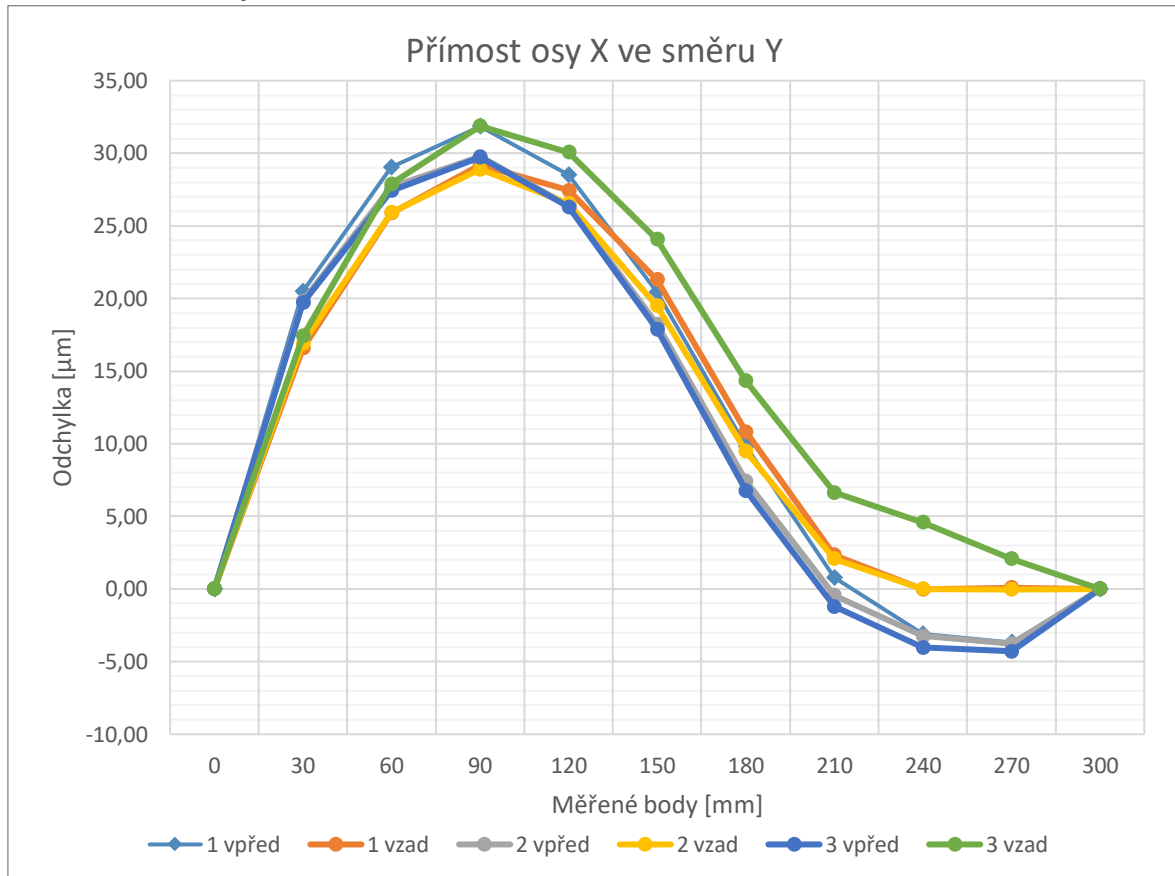
Přímost osy X byla měřena dvakrát, nejprve byla měřena přímost ve směru osy Z a poté přímost do směru Y. Měření probíhalo na souřadnici Y150 od pozice X0 do X300. Výsledná výchylka od přímosti ve směru Z dosahovala maxima

5,973 μm a minima $-17,286 \mu\text{m}$. Průběh přímosti vyobrazuje Graf 4. Přímost osy X v tomto směru je ovlivněna přímostí lineárního vedení, uhlíkového příčnicku a jeho uložením. Následné měření ve směru Y mělo maximální odchylku 31,873 μm a minimální $-4,288 \mu\text{m}$. V tomto případě může být přímost ovlivněna také nežádoucím posuvem příčnicku ve směru osy Y vzhledem k užitému pohybovému mechanismu. Její průběh je k vidění na Graf 5.

Graf 4 Přímost osy X ve směru Z



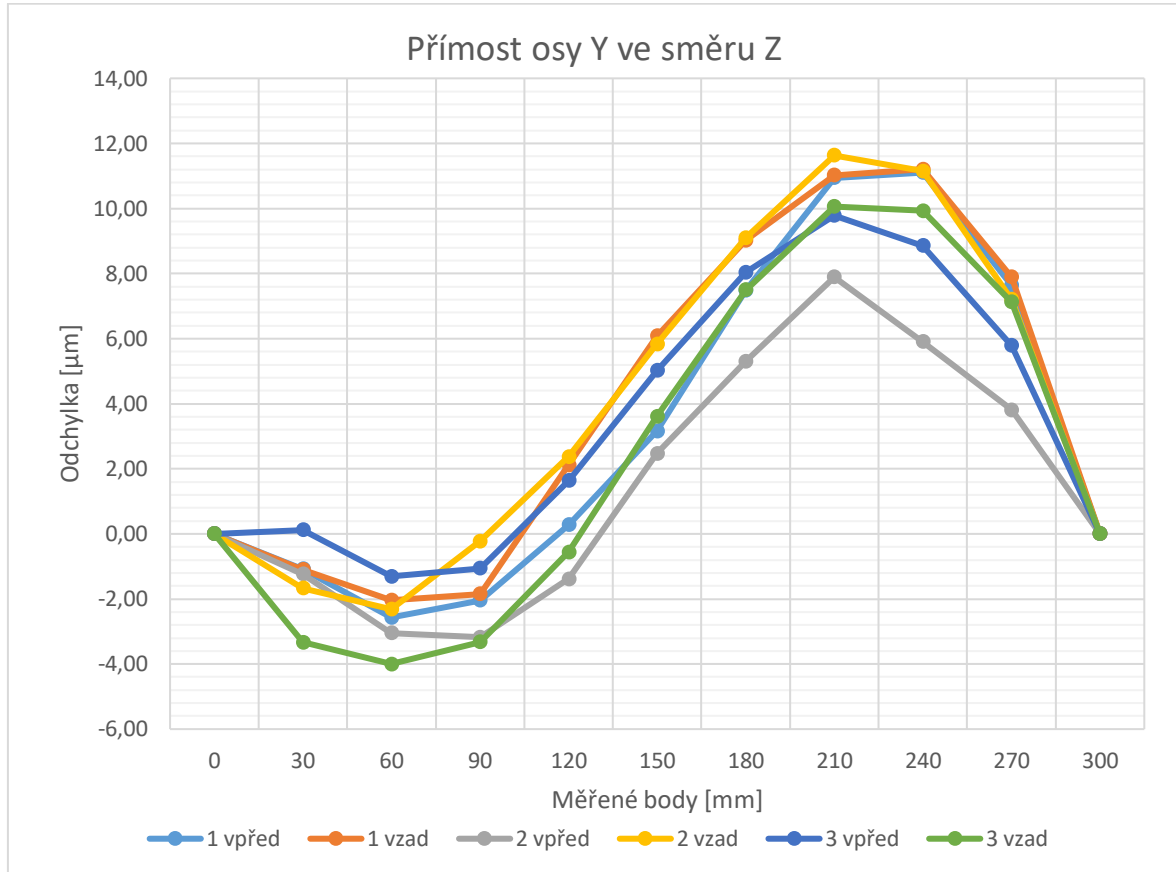
Graf 5 Přímost osy X ve směru Y



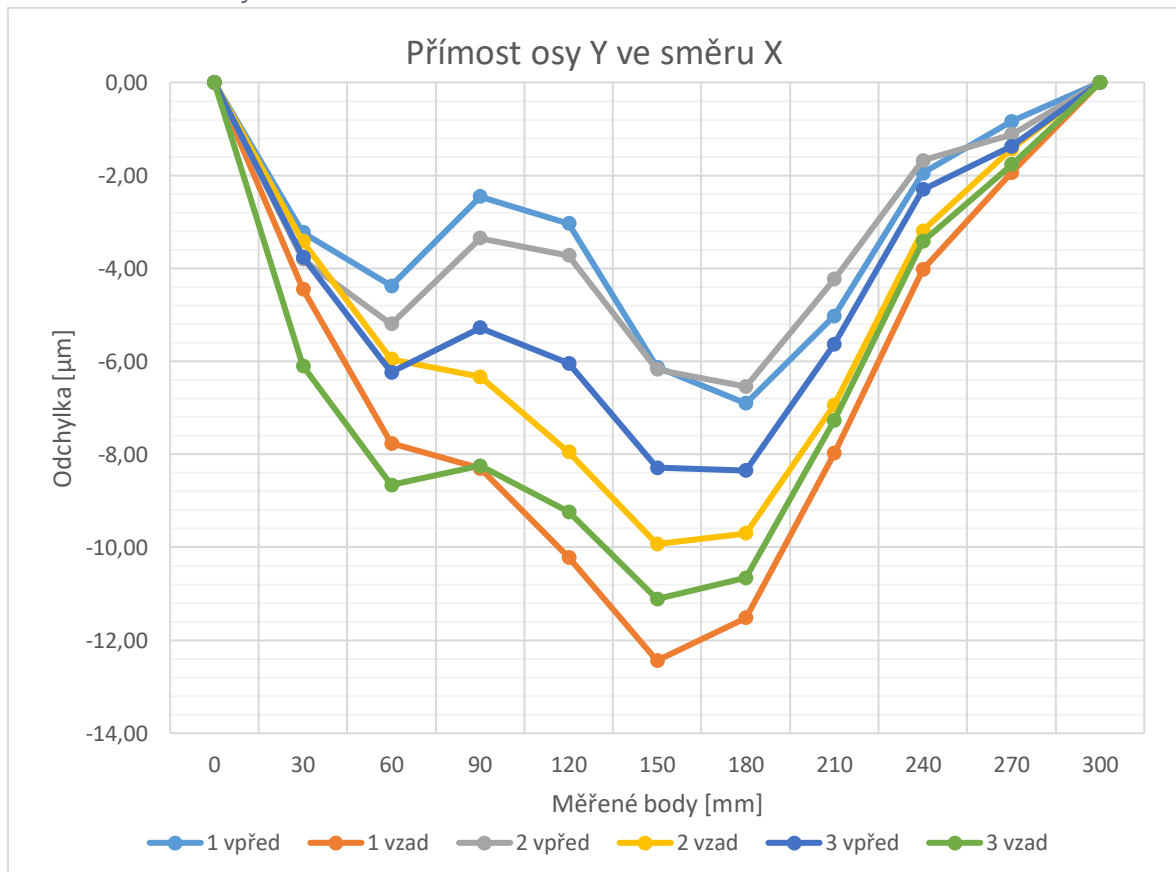
Přímost osy Y

Přímost osy Y byla měřena s vozíkem tiskové hlavy na pozici X150, aby se během měření projevila rovnoměrně chyba obou lineárních vedení souměrně. Obě vedení totiž nemusí být zcela rovnoběžná i přes jejich vyrovnání během stavby tiskárny. Maximální odchylka přímosti ve směru Z byla **11,629 µm** a minimální **-3,997 µm**. Průběh měření ve směru Y viz Graf 6. Měření ve směru X vykázalo maximální odchylku **0 µm** a minimální **-12,437 µm**. Zde vzhledem malé odchylce nejspíše nedošlo k žádnému nežádoucímu pohybu vozíku ve směru X. Průběh viz Graf 7.

Graf 6 Přímost osy Y ve směru Z



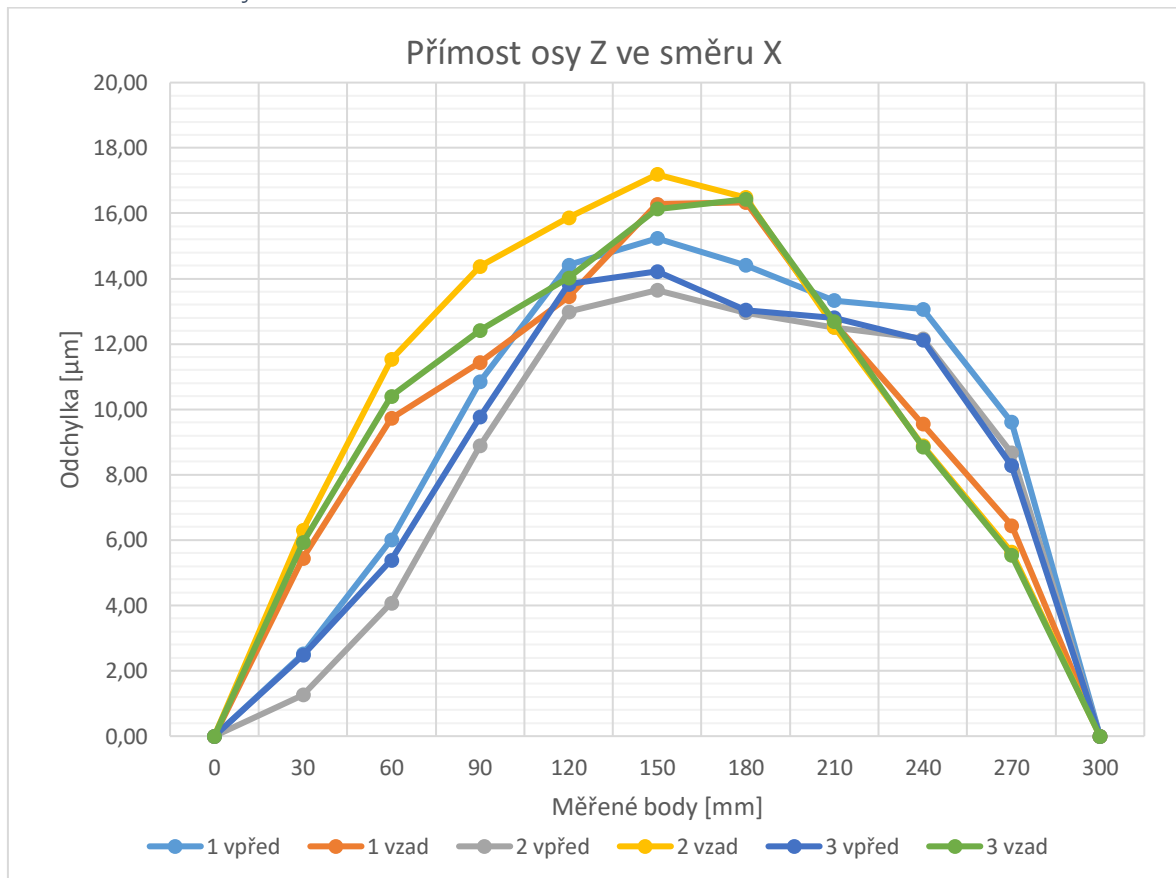
Graf 7 Přímost osy Y ve směru X



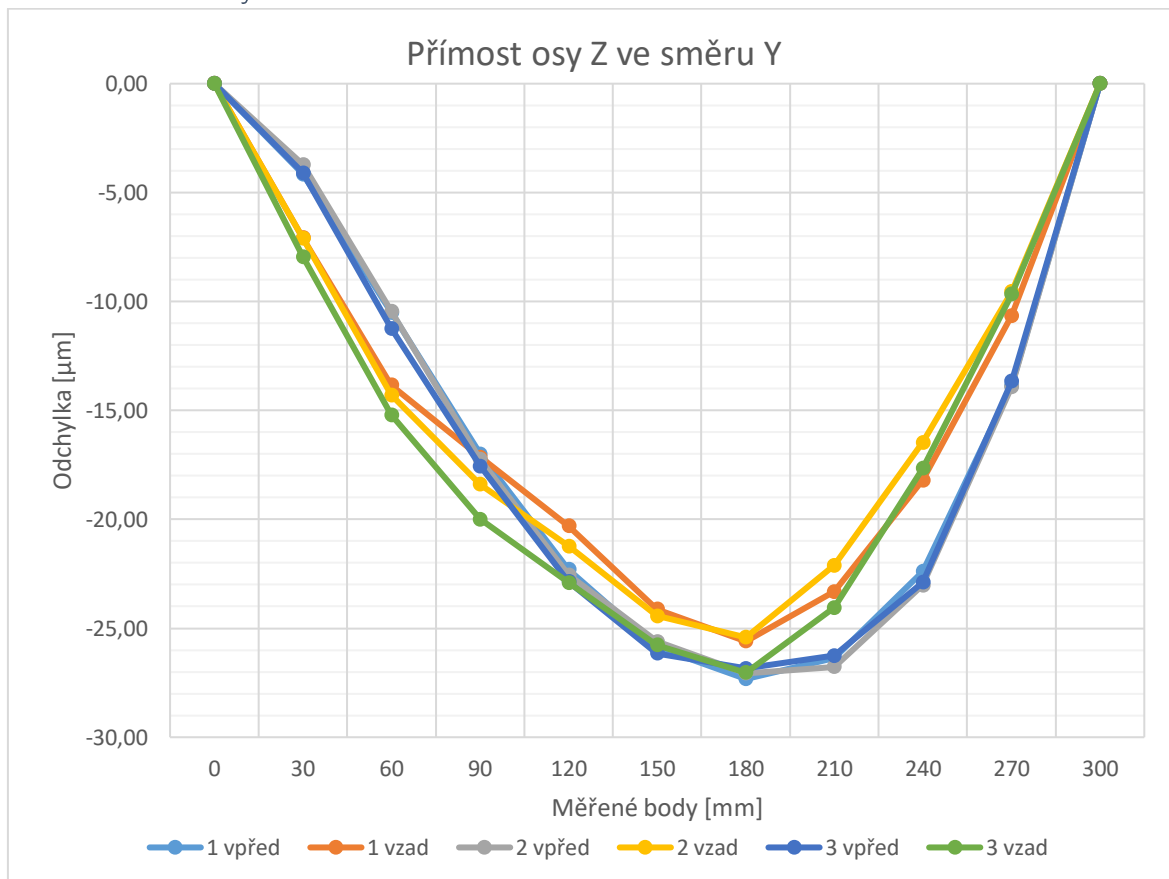
Přímost osy Z

Přímost osy Z, tedy tiskové desky, byla měřena ve středu tiskové plochy na rozsahu Z0 až Z300. Přímost této osy je závislá na přímosti vodicích tyčí a uložení jejich držáků. Měření probíhalo nejprve zjišťováním přímosti ve směru X, kde byla maximální výchylka $17,187 \mu\text{m}$ a minimální $0 \mu\text{m}$. Průběh odchylyky zobrazuje Graf 8. Ve směru Y byla maximální výchylka $0 \mu\text{m}$ a minimální $-27,327 \mu\text{m}$. Naměřenou odchylyku ukazuje Graf 9.

Graf 8 Přímost osy Z ve směru X



Graf 9 Přímost osy Z ve směru Y



Vyhodnocení výsledků

Výsledky měření zcela odpovídají požadavkům vzhledem k charakteru stroje. Nejvyšší naměřená odchylka přímosti se rovná $31,873 \mu\text{m}$, ta byla naměřena na ose X ve směru Y. Naměřené hodnoty přímosti by neměly mít vliv na kvalitu tisku ani jeho přesnost.

7. Závěr

V rámci práce byla navržena 3D tiskárna, která užívá Core XY pohybové kinematiky s invertovanou osou Z. Core XY pohybový mechanismus byl zvolen na základě rešerše pro jeho statické uložení motorů a možnost dosažení vysokých dynamických parametrů. Invertovaná kinematika osy Z je pak poháněná 3 samostatnými motory, aby mohla být vyrovnána vůči rovině pohybu tiskové hlavy. Tisková podložka je umístěna na spodní straně rámu vozíku tiskové podložky a tryska extruderu směřuje směrem vzhůru.

Tento obrácený koncept 3D tisku přináší výhody i nevýhody. Mezi výhody patří vyšší stabilita rámu tiskárny bez dalších vzpěr, lepší tisk mostů a možnost automatizace. K nevýhodám patří vyšší pravděpodobnost ucpání hotendu, možnost pádu dílce z desky a horší přístup k tištěnému dílci.

Rám tiskárny je sestaven z hliníkových profilů AlutecKK. V zadní části rámu je nerezový plech pro uchycení elektronických komponent. Další funkční dílce jsou vytištěny na 3D tiskárně. Poslední částí tiskárny je krytování to je složené z polykarbonátových desek, to však nebylo v rámci práce plně realizováno. Tiskárna je řízena pomocí Open – Source řešení Klipper s operačním systémem MainSailOS a pro ovládání slouží webové rozhraní MainSail.

Celková cena stavby této tiskárny byla přibližně 35 000 Kč. Tiskový prostor má rozměry 300 x 300 x 300 mm, tiskovou podložku tvoří temperované sklo s PEI folií. K tisku je využito přímého extrudéru a hotendu s vysokým průtokem. Tiskárna je poháněna pomocí krokových motory. Hmotnost stroje je přibližně 30 kg.

V rámci měření pomocí Renishaw BallBar QC20 byla zjištěna kolmost sestavení roviny XY a další parametry pohybového mechanismu, jako jsou vůle. Ty jsou způsobeny poddajností řemenu, házením řemenic a dalšími výrobními chybami. Kolmost os byla však hlavní příčinou chyby, její hodnota je $516,86 \mu\text{m}/\text{m}$. Při měření rovin ZX a ZY byl zjištěn pouze průběh kruhovitosti a rychlost polohování.

Následovalo měření pomocí laserového interferometru Optodyne MCV – 2002. Tímto měřidlem byla změřena přesnost polohování jednotlivých os a také jejich přímost. Polohová přesnost v osách X a Y se pohybuje řádově v desetině milimetru. Přímost jednotlivých os nepřesáhla v maximu **50 μm** .

Jednotlivé cíle práce lze považovat za splněné, byla provedena rešerše 3D tiskáren, jejich kinematických struktur a dostupných komponent. Na jejím základě byl vytvořen koncepční návrh s invertovanou osou Z, který užívá Core XY pohybového mechanismu. Koncept byl následně zkonstruován, dle vytvořené dokumentace byla tiskárna sestavena, oživena a otestována. Jako ovládací rozhraní byl zvolen Mainsail, pod kterým běží firmware Klipper. Posledním krokem bylo měření stroje. Na základě měření bylo upraveno nastavení os pro vyšší přesnost.

Seznamy

Seznam literatury

- [1] JACKSON, O'CONNELL. What is 3D printing? How does 3D printing work? *Hubs* [online]. [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>
- [2] MATT AHART. *Types of 3D Printing Technology Explained* [online]. [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.protolabs.com/resources/blog/types-of-3d-printing/>
- [3] The 7 Main Types of 3D Printing Technology in 2022. *All3DP* [online]. 28. říjen 2021 [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [4] What Are the Different Types of 3D Printing? *FutureLearn* [online]. [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.futurelearn.com/info/courses/getting-started-with-digital-manufacturing/0/steps/184102>
- [5] *Typy tiskáren a rozdíly mezi nimi | Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi__112464
- [6] LUCAS CAROLO. What Is FDM 3D Printing? – Simply Explained. *All3DP* [online]. 8. červen 2022 [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- [7] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping. Hackensack, New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-40-1.
- [8] LUCAS CAROLO. What Is a 3D Slicer? – Simply Explained. *All3DP* [online]. 13. duben 2020 [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-a-3d-slicer-simply-explained/>
- [9] LUCAS CAROLO. 5-Axis 3D Printer: The Latest Advancements. *All3DP* [online]. 28. únor 2020 [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/5-axis-3d-printer-the-latest-advancements/>
- [10] MATERIALPRO3D.CZ. Seznam materiálů pro 3D tisk. *materialpro3d.cz* [online]. [vid. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [11] The Best Industrial FDM 3D Printers in 2022. *All3DP Pro* [online]. 5. červenec 2022 [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-industrial-fdm-3d-printers-2021/>

- [12] FABIO TROTTI. *The Ultimate Guide to Choosing the Best Material for FDM 3D Printing* [online]. [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.weerg.com/en/global/blog/the-ultimate-guide-to-choosing-the-best-material-for-fdm-3d-printing>
- [13] 3D Printers. *Essentium* [online]. [vid. 2023-06-28]. Dostupné z: <https://essentium.com/3d-printers/>
- [14] *EVO-tech EL-1040: Průmyslová 3D tiskárna pro velké výtisky* [online]. 3. srpen 2022 [vid. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/termoplasty/evo-tech/evo-tech-el-1040/>
- [15] *High performance PEEK 3D Printer from CreatBot PEEK-300* [online]. [vid. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.creatbot.com/en/creatbot-peek-300.html>
- [16] MARRHEW MENSLEY. The Best 3D Printers of 2022 – Buyer’s Guide. *All3DP* [online]. 27. září 2022 [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-3d-printer-reviews-top-3d-printers-home-3-d-printer-3d/>
- [17] *What Are The Four Types Of FDM 3D Printers? Cartesian, Delta, Polar & Scara - Manufactur3D* [online]. 19. červenec 2020 [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://manufactur3d.com/understanding-the-four-types-of-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-scara/>
- [18] JACKSON O’CONNELL. The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY, & More. *All3DP* [online]. 23. duben 2022 [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
- [19] LIZA WALLACH KLOSKI a NICK KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. 2017. vyd. B.m.: Computer press, nedatováno. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [20] 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši. *Prusa3D by Josef Prusa* [online]. [vid. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
- [21] 3D tiskárna DeltiQ 2. *TRILAB* [online]. [vid. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://trilab3d.com/cs/3d-tiskarna-deltiq-2/>
- [22] Creality CR - 30 (3D Printmill). *Creality - 3D Tisk* [online]. [vid. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.crealitystore.cz/produkt/cr-30-3d-printmill/>
- [23] RIG, Rat. *Rat Rig - V-Core* [online]. [vid. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://v-core.ratrig.com/>

- [24] LUCAS CAROLO. 3D Printer Axis: The Basics Simply Explained. *All3DP* [online]. 9. červenec 2022 [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/>
- [25] IDA, Edoardo, Federico NANETTI a Giovanni MOTTOLA. An Alternative Parallel Mechanism for Horizontal Positioning of a Nozzle in an FDM 3D Printer. *Machines* [online]. 2022, 10(7), 542. Dostupné z: doi:10.3390/machines10070542
- [26] HOOPER, Shane. *3D Printer Kinematics -CoreXY vs Cartesian* [online]. 2021. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.13012.94088
- [27] MARTIN. CoreXY vs. H-Bot: Which System is Better for a 3D Printer? *The 3D Printer Bee* [online]. 22. září 2020 [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://the3dprinterbee.com/corexy-vs-hbot/>
- [28] ILAN E. MOYER. *CoreXY / Cartesian Motion Platform* [online]. [vid. 2022-10-23]. Dostupné z: <http://corexy.com/index.html>
- [29] KOPETS, Ekaterina, Artur KARIMOV, Lorenzo SCALERA a Denis BUTUSOV. Estimating Natural Frequencies of Cartesian 3D Printer Based on Kinematic Scheme. *Applied Sciences* [online]. 2022, 12(9), 4514. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app12094514
- [30] *[White Paper] Introducing Galil's New H-bot Firmware | Galil* [online]. [vid. 2022-10-29]. Dostupné z: <https://www.galil.com/news/whats-new-galil/white-paper-introducing-galils-new-h-bot-firmware>
- [31] ALEXANDRE MARTEL. The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar). *3Dnatives* [online]. 15. prosinec 2017 [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/>
- [32] 3D Printing Concepts and 3D Printer Parts. *Leapfrog 3D Printers* [online]. [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.lpfrg.com/guides/3d-printing-concepts-and-3d-printer-parts/>
- [33] JOZEF PRŮŠA. Základy 3D tisku s Josefem Průšou | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši. *Prusa3D by Josef Prusa* [online]. [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou__490/?gclid=CjwKCAjw-rOaBhA9EiwAUkLV4pkmPcvKlBh8RR67tPLMIG7UgMGhc834mNdITgHBI__LMIOCeYQk8hoCBP8QAvD__BwE
- [34] VISEUR, Robert a Nicolas JULLIEN. 3D printer builders' Open-hardware strategies. In: *Proceedings of the 18th International Symposium on Open Collaboration* [online]. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, s. 1–8 [vid. 2022-10-13]. OpenSym '22. ISBN 978-1-4503-9845-9. Dostupné z: doi:10.1145/3555051.3555069

- [35] Bambu Lab X1 Series. *Bambu Lab Global* [online]. [vid. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://store.bambulab.com/products/x1-carbon-3d-printer>
- [36] 3D tisk z termoplastů – od prototypů po funkční díly [online]. 27. červenec 2020 [vid. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/termoplasty/>
- [37] JACKSON O'CONNELL. What Is Microstepping? – Simply Explained. *All3DP* [online]. 10. únor 2021 [vid. 2022-11-02]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/microstepping-simply-explained/>
- [38] *Stepper motor Motor controller Engine DC motor, engine, angle, hybrid, transport png | PNGWing* [online]. [vid. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://www.pngwing.com/en/free-png-kpqzb>
- [39] Jak funguje servomotor a zpětnovazební řízení. *RAVEO s.r.o.* [online]. 21. únor 2021 [vid. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/jak-funguje-servomotor-a-zpetnovazebni-rizeni>
- [40] *Electric motor Servomechanism Servomotor Industry Servo drive, robot, angle, electronics, industry png | PNGWing* [online]. [vid. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://www.pngwing.com/en/free-png-yemem>
- [41] *Helix Linear Technologies, Inc. Ball screw Leadscrew, screw, angle, technic, screw png | PNGWing* [online]. [vid. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://www.pngwing.com/en/free-png-prqid>
- [42] PRANAV GHARGE. The Best 3D Printer Firmware of 2022. *All3DP* [online]. 21. srpen 2022 [vid. 2022-10-14]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-firmware-which-to-choose-and-how-to-change-it/>
- [43] *Welcome to Mainsail* [online]. [vid. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://docs.mainsail.xyz/>
- [44] *Duet Web Control - RepRap* [online]. [vid. 2023-06-27]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Duet_Web_Control
- [45] "Colossal" 3D printer benefits from high-performance data processing. 2019.
- [46] ČASOPISU, Redakce. *Co je programovatelný logický automat (PLC) - 2. část - ElektroPrůmysl.cz* [online]. [vid. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/co-je-programovatelnny-logicky-automat-plc-2-cast>
- [47] LADISLAV ŠMEJKAL a JOSEF ČERNÝ. *Esperanto programátorů PLC: programování podle normy IEC/EN 61131-3 (souhrnné vydání částí*

- stejnomeného seriálu*) [online]. 2017 [vid. 2022-11-23]. Dostupné z: www.tecoacademy.cz
- [48] *Beckhoff Information System - English* [online]. [vid. 2022-11-22]. Dostupné z: https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf5110-tf5113_tc3_kinematic_transformation/3189021579.html&id=1565808911642377230
- [49] TOMÁŠ HAVLA a ŠTĚPÁN DRHA. *Začínáme s Beckhoffem / Automatizace.HW.cz* [online]. [vid. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/software/zaciname-s-beckhoffem.html>
- [50] *Časopis Automa TwinCAT HMI: jednoduché, otevřené a na platformě nezávislé operátorské rozhraní* [online]. [vid. 2022-11-22]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/twincat-hmi-jednoduche-otevrene-a-na-platforme-nezavisle-operatorske-rozhrani-2017_10_0_11083/
- [51] 60 years of SIMATIC. *siemens.com Global Website* [online]. [vid. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/specials/60-years-of-simatic.html>
- [52] Průmyslové automatizační systémy SIMATIC. *Siemens Česká republika* [online]. [vid. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/cz/cs/product-services/automation/systems/industrial.html>
- [53] TIA Portal. *Siemens Česká republika* [online]. [vid. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/cz/cs/products/automation/industry-software/automatizacni-software/tia-portal.html>
- [54] ČSN ISO 230-1 *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [55] ČSN ISO 230-2 (200300) *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [56] PLC, Renishaw. Renishaw: QC20 ballbar. *Renishaw* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/qc20-ballbar--11075>
- [57] *OPTODYNE Laser Metrology S.r.l.* [online]. [vid. 2023-06-29]. Dostupné z: https://www.optodyne.it/en_mcv2002.html

- [58] PLC, Renishaw. Renishaw: Laserový systém XL-80. *Renishaw* [online]. [vid. 2023-07-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/laserovy-system-xl-80--8268>
- [59] PLC, Renishaw. Renishaw: Jak funguje interferometrický systém? *Renishaw* [online]. [vid. 2023-07-16]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612>
- [60] [HTTPS://WWW.SOLIDPIXELS.COM](https://www.solidpixels.com), solidpixels. Spojení krátkým šroubem | ALUTEC KK s.r.o. *ALUTEC KK* [online]. [vid. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.aluteckk.cz/spojeni-kratkym-sroubem>
- [61] ZOLTAN. Benchtop Machine Shop: Printer: Belt Tension. *Benchtop Machine Shop* [online]. 10. duben 2019 [vid. 2023-04-02]. Dostupné z: <http://benchtopmachineshop.blogspot.com/2019/04/printer-belt-tension.html>
- [62] *Installation - Klipper documentation* [online]. [vid. 2023-07-22]. Dostupné z: <https://www.klipper3d.org/Installation.html>
- [63] *Dashboard* [online]. [vid. 2023-06-30]. Dostupné z: <https://docs.mainsail.xyz/overview/settings/dashboard>

Seznam Obrázků

Obr. 1 Essentium HSE 280i HT [13].....	16
Obr. 2 EVO-tech EL-1040 [14].....	17
Obr. 3 CreatBot PEEK 300 [11].....	18
Obr. 4 Průša i3 MK3S+ [20].....	19
Obr. 5 Trilab DeltiQ 2. [21].....	20
Obr. 6 Creality CR-30 [22].....	20
Obr. 7 RatRig V-Core 3.1 [23].....	21
Obr. 8 Kartézská XZ.....	22
Obr. 9 Kartézská XY.....	23
Obr. 10 Kartézská XY křížová.....	24
Obr. 11 Core XY schéma řemenu.....	25
Obr. 12 H-bot schéma řemenu.....	26
Obr. 13 Delta.....	27
Obr. 14 SCARA.....	28
Obr. 15 Pásová tiskárna.....	28
Obr. 16 Polar.....	29
Obr. 17 Příklady tipů tiskáren [34].....	30
Obr. 18 Porovnání vlastních frekvencí [34].....	30
Obr. 19 Krokový motor [38].....	34
Obr. 20 Servomotor [40].....	35
Obr. 21 Kuličkový šroub [41].....	35
Obr. 22 Řemenový pohon [24].....	36
Obr. 23 MKS řídicí deska [42].....	37
Obr. 24 MainSail prostředí [43].....	38
Obr. 25 Duet Web Control - obrazovka ovládání stroje [44].....	39
Obr. 26 PLC Beckhoff s periferiemi [48].....	40
Obr. 27 Prostředí TwinCAT [49].....	41
Obr. 28 Technické parametry Renishaw BallBar QC20 [56].....	43
Obr. 29 Renishaw BallBar QC20 [56].....	44
Obr. 30 Optodyne MCV - 2002 parametry.....	44
Obr. 31 Laserový interferometr Optodyne MCV – 2002 [57].....	45
Obr. 32 Technické parametry Renishaw XL80 [58].....	46
Obr. 33 Schéma funkce interferometru [59].....	47
Obr. 34 Core XY mechanismus koncept.....	48
Obr. 35 Render 3D tiskárny.....	49
Obr. 36 Ukázka spoje profilů [60].....	50
Obr. 37 Rám.....	50
Obr. 38 Tisková hlava.....	52
Obr. 39 Vozík tiskové hlavy verze 1.....	53
Obr. 40 Vozík tiskové hlavy verze 2.....	54
Obr. 41 Vozík tiskové hlavy verze 3.....	54
Obr. 42 Vozík tiskové hlavy verze 4.....	55
Obr. 43 Průběh točivého momentu LDO-42STH48-2504AC [59].....	57
Obr. 44 Držák motoru.....	58

Obr. 45 Uložení portálu v rámu	60
Obr. 46 Držák příčnicku verze 2.....	60
Obr. 47 Napínání řemene.....	62
Obr. 48 Průběh točivého momentu motoru LDO-42STH40-1004ASH [59]....	64
Obr. 49 Pohon osy Z.....	64
Obr. 50 Vozík osy Z.....	65
Obr. 51 Napínání řemene osy Z.....	66
Obr. 52 Tisková deska a její rám	68
Obr. 53 Uložení rámu tiskové desky.....	68
Obr. 54 Sestavený rám	71
Obr. 55 Sestavená 3D tiskárna.....	72
Obr. 56 Blokové schéma zapojení elektrických komponent.....	73
Obr. 57 Elektronický panel.....	73
Obr. 58 Mainsail – Dashboard [63].....	76
Obr. 59 Natavení Dashboard [63]	76
Obr. 60 Vytištěný dílec.....	77
Obr. 61 Nastavení uložení BallBaru	79
Obr. 62 Měření pomocí Renishaw BallBar QC20 v rovině XY.....	80
Obr. 63 Kufr měřidla Renishaw BallBar QC20 spolu s kalibračním etalonem	81
Obr. 64 Vyrovnání příčnicku pomocí číselníkového úchylkoměru.....	81
Obr. 65 Výsledek měření pro rovinu XY před vyrovnáním příčnicku.....	82
Obr. 66 BallBar měření v rovině XY	83
Obr. 67 Odražeč laserového paprsku.....	84
Obr. 68 Měření laserovým interferometrem.....	85
Obr. 69 Nastavení měření přesnosti os	86
Obr. 70 Nastavení měření přímosti os	89

Seznam Tabulek

Tab. 1 Srovnání tiskáren.....	31
Tab. 2 Tisková hlava komponenty	51
Tab. 3 Hmotnosti a momenty setrvačnosti pohybového mechanismu XY .	56
Tab. 4 Držák motoru pozice komponent	59
Tab. 5 Portál pozice komponent.....	59
Tab. 6 Napínání řemene pozice komponent.....	62
Tab. 7 Hmotnost tiskové podložky	63
Tab. 8 Pohon osy Z pozice komponent.....	65
Tab. 9 Vozík osy Z pozice komponent.....	66
Tab. 10 Napínání řemen osy Z pozice komponent.....	67
Tab. 11 Tisková podložka pozice komponent	67

Seznam Grafů

Graf 1 Přesnost polohování osy X.....	87
Graf 2 Přesnost polohování osy Y.....	87
Graf 3 Přesnost polohování osy Z.....	88
Graf 4 Přímost osy X ve směru Z.....	90

Graf 5 Přímost osy X ve směru Y	91
Graf 6 Přímost osy Y ve směru Z	92
Graf 7 Přímost osy Y ve směru X	92
Graf 8 Přímost osy Z ve směru X	93
Graf 9 Přímost osy Z ve směru Y	94

Seznam příloh – výkresová dokumentace

000-3DP01-000	3D TISKÁRNA
100-3DP01-000	TISKOVÁ HLAVA
100-3DP01-100	PRAVÝ DRŽÁK PŘÍČNÍKU
100-3DP01-150	LEVÝ DRŽÁK PŘÍČNÍKU
100-3DP01-200	PRAVÝ NAPÍNAČ XY
100-3DP01-250	LEVÝ NAPÍNAČ XY
100-3DP01-300	PRAVÝ DRŽÁK MOTORU
100-3DP01-350	LEVÝ DRŽÁK MOTORU
100-3DP01-400	RÁM 3D TISKÁRNY
100-3DP01-405	VZPĚRA
100-3DP01-500	PŘÍČNÍK
100-3DP01-600	KRYT ELETRONIKY
100-3DP01-800	FILTRAČNÍ SYSTÉM
200-3DP01-000	TISKOVÁ PODLOŽKA
200-3DP01-002	RÁMEČEK PODLOŽKY
200-3DP01-100	NAPÍNÁNÍ ŘEMEN Z + NAPÍNÁNÍ Z
200-3DP01-200	VOZÍK OSY Z KRÁTKÝ
200-3DP01-250	VOZÍK OSY Z DLOUHÝ
200-3DP01-300	HORNÍ ULOŽENÍ VEDENÍ OSY Z
200-3DP01-400	POHON OSY Z
200-3DP01-450	POHON OSY Z LEVÝ

Seznam příloh – CD

Příloha č. 1	CAD model – formát .stp
Příloha č. 2	Výkresová dokumentace
Příloha č. 3	Konfigurační soubory tiskárny
Příloha č. 4	Výpočty – Excel
Příloha č. 5	Diplomová práce ve formátu .pdf
Příloha č. 6	Diplomová práce ve formátu .docx