



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

FDM 3D TISKÁRNA TYPU COREXY

COREXY TYPE FDM 3D PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Kyselica

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil

Jaššo

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Martin Kyselica

ID: 220819

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

FDM 3D tiskárna typu CoreXY

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku 3D tisku se zaměřením na tiskárny FDM. Porovnejte mezi sebou jednotlivé typy 3D tiskáren. Udělejte rešerši jednotlivých součástí a navrhnete řešení tiskárny typu CoreXY. Sestrojte tiskárnu a otestujte její funkčnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího závěrečné práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 2.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Kamil Jaššo

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cieľom tejto práce je teoretické vyhodnotenie vlastností a rozdielov medzi rôznymi spôsobmi 3D tlače s bližším zameraním na technológiu FDM. Princípy mechanizmov základných typov 3D tlačiarní využívajúcich túto technológiu sú bližšie vysvetlené a porovnané medzi sebou. Navrhnuté je riešenie a zoznam súčiastok FDM 3D tlačiarne s mechanizmom typu CoreXY, ktoré je následne zostavené a otestované.

Klíčová slova

3D tlač, 3D tlačiareň, FDM, kinematika 3D tlačiarní, karteziánska 3D tlačiareň, CoreXY

Abstract

The aim of this work is a theoretical evaluation of the properties and differences between the relevant 3D printing methods with a closer focus on FDM. The principles of the basic types of 3D printer mechanisms using this technology are explained in more detail and compared with each other. The solution and parts list of FDM 3D printer with CoreXY mechanism is proposed which is then constructed and tested.

Keywords

3D printing, 3D printer, FDM, kinematics of 3D printers, cartesian 3D printer, CoreXY

Bibliografická citace

KYSELICA, Martin. *FDM 3D tiskárna typu CoreXY* [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137433>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Kamil Jaššo.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Martin Kyselica</i>
VUT ID studenta:	<i>220819</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>FDM 3D tiskárna typu CoreXY</i>

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

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 1. června 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
1. ÚVOD.....	10
2. SPÔSOBY 3D TLAČE.....	12
2.1 3D TLAČ TYPU SLA.....	12
2.1.1 <i>Laser</i>	12
2.1.2 <i>DLP</i>	13
2.1.3 <i>MSLA</i>	14
2.2 3D TLAČ TYPU SLS	14
2.3 3D TLAČ TYPU FDM	15
3. DRUHY FDM 3D TLAČIARNÍ	16
3.1 3D TLAČIAREŇ TYPU DELTA	16
3.2 3D TLAČIAREŇ TYPU SCARA	18
3.3 PRIAMOČIARE KARTEZIÁNSKE 3D TLAČIARNE	19
3.3.1 <i>Štandardná priamočiara karteziánska 3D tlačiareň</i>	19
3.3.2 <i>Priamočiara karteziánska 3D tlačiareň typu Belt</i>	20
3.3.3 <i>Priamočiara karteziánska 3D tlačiareň typu H-bot</i>	21
3.3.4 <i>Priamočiara karteziánska 3D tlačiareň typu CoreXY</i>	21
4. POROVNANIE NAJPREDÁVANEJŠÍCH COREXY 3D TLAČIARNÍ	24
4.1 TWO TREES SAPPHIRE PRO.....	24
4.2 TRONXY X5SA	25
4.3 RAT RIG V-CORE 3	25
4.4 PROJEKT VORON	26
5. PRAKTICKÁ ČASŤ – ZOSTAVENIE TLAČIARNE	28
5.1 RÁM A MECHANIKA TLAČIARNE	28
5.2 ELEKTRONIKA TLAČIARNE	30
5.2.1 <i>Riadiaca doska</i>	31
5.2.2 <i>Jednodoskový počítač a software</i>	32
5.2.3 <i>Napájací zdroj</i>	33
5.2.4 <i>Tlačová podložka</i>	34
5.3 TLAČOVÁ HLAVA	35
5.4 MODIFIKÁCIE TLAČIARNE	37
5.4.1 <i>Sonda Klicky</i>	37
5.4.2 <i>Kamerový systém</i>	38
5.4.3 <i>Snímač struny filamentu</i>	39
5.4.4 <i>Čistič tlačovej trysky</i>	39
5.4.5 <i>Systém filtrovania vzduchu</i>	40
6. KALIBRÁCIA A TEST	42
6.1 KONTROLA ZAPOJENIA A ZÁKLADNÝCH FUNKCII TLAČIARNE	42
6.2 LADENIE TLAČE.....	45

6.2.1	<i>Napínanie remeňov</i>	45
6.2.2	<i>Výšková sieť tlačovej podložky.....</i>	45
6.2.3	<i>Eliminácia nežiadúcich zvlnení stien výtlačku – „ghosting / ringing“</i>	46
6.2.4	<i>Testovanie tlače</i>	48
7.	ZÁVĚR.....	50
	LITERATURA.....	52
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	55
	SEZNAM PŘÍLOH.....	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Selektívne osvetľovanie laserovým lúčom [3]	13
2.2	Selektívne osvetľovanie DLP projektorom [3].....	13
2.3	Selektívne osvetľovanie pomocou maskovacej vrstvy LCD [3]	14
2.4	Tlačová hlava FDM tlačiarne [4]	15
3.1	Rozdelenie FDM 3D tlačiarne podľa súradnicovej sústavy [6]	16
3.2	Konštrukcia osí 3D tlačiarne typu Delta [7].....	17
3.3	Konštrukcia osí 3D tlačiarne typu SCARA [9]	18
3.4	Konštrukcia osí štandardnej karteziánskej 3D tlačiarne [10]	19
3.5	Konštrukcia osí 3D tlačiarne typu Belt [13]	20
3.6	Konštrukcia osí X a Y 3D tlačiarne typu H-bot [14].....	21
3.7	Dva rôzne rozvodové systémy osí X a Y 3D tlačiarne CoreXY [16]	23
4.1	3D tlačiareň Two Trees Sapphire Pro [18]	24
4.2	3D tlačiareň Tronxy X5SA [20]	25
4.3	Rat Rig V-Core 3 [22]	26
4.4	Voron 2.4 [23]	27
5.1	Fotografia sčasti zostavenej konštrukcie tlačiarne Voron 2.4	30
5.2	Riadiaca doska BigTreeTech Octopus Pro F446 s drivermi TMC2209 osadená v tlačiarne	31
5.3	Jednodoskový počítač Raspberry Pi 4 Model B [26]	33
5.4	Napájací zdroj MeanWell LRS-350-24 namontovaný a pripojený v tlačiarne	34
5.5	Spodná strana tlačovej podložky s ohrievačom a kabelážou.....	35
5.6	Zostavená tlačová hlava Voron Stealthburner.....	36
5.7	Nákres zapojenia konektora tlačovej hlavy	37
5.8	Snímač Klicky pripevnený na spodnej strane tlačovej hlavy	38
5.9	Kamera trysky tlačovej hlavy.....	39
5.10	Ventilátory filtra Nevermore umiestnené pod tlačovou podložkou.....	40
5.11	Zásobníky vzduchových filtrov naplnené uhlíkovými peletami.....	41
5.12	Výstupný filter vzduchu so snímačom tlačovej struny	41
6.1	Grafické rozhranie Mainsail	44
6.2	Graficky znázornená výšková sieť tlačovej podložky	46
6.3	Závislosť výkonovej spektrálnej hustoty na frekvencii osí X a Y	47
6.4	Prvé testovacie výtlačky	48
6.5	Výtlačok testovacieho modelu „3D Printer Test“	49
7.1	Tlačová hlava Stealthburner	61
7.2	Ovládací panel tlačiarne	62
7.3	Pohľad zospodu tlačiarne na elektroniku	63
7.4	Konektor s kabelážou tlačovej hlavy Stealthburner	64
7.5	Tlač prvého modelu – kalibračnej kocky	64
7.6	Pohľad na vytlačený testovací model „3D Printer Test“	65
7.7	Zostavená tlačiareň Voron 2.4 so všetkými modifikáciami	66

1. ÚVOD

Proces vývoja väčšiny hmotných produktov takmer vždy zahŕňa aj návrh a výrobu prototypov. Prototyp je predbežnou verziou konečného produktu a používa sa na vyhodnotenie návrhu, testovanie technológie alebo analýzu princípu fungovania, z čoho sú zistené parametre a vlastnosti reálneho funkčného systému. Pomerne novým termínom je rapídne prototypovanie, čo znamená rýchla výroba prototypu pre vizuálne a funkčné overenie inžinierskeho návrhu. Týmto pomenovaním sa často nazýva aditívna výroba vo forme 3D tlače, ktorá vďaka jej rýchlosti postupne nahrádza subtraktívne metódy výroby prototypov.

3D tlač je aditívny výrobný proces slúžiaci na vytvorenie reálneho objektu z jeho digitálneho modelu. Technológia pracuje na princípe pridávania vrstiev materiálu v určitých tvaroch, z čoho následne vznikne hotový výrobok, ktorý by mal čo najvernejšie napodobňovať tvarom a rozmermi svoj digitálny model.

Proces 3D tlače bol vymyslený v 80. rokoch minulého storočia v Japonsku, avšak prvý patent na 3D tlač bol podaný v roku 1986 Charlesom Hullom v USA [1]. Jeho technológia bola založená na vytvrdzovaní fotocitlivej živice po jednotlivých vrstvách – Stereolitografia (SLA). O dva roky neskôr jeho spoločnosť vydala prvú komerčnú 3D tlačiareň s názvom SLA-1 [1]. V tom istom roku bol podaný patent na technológiu Selective Laser Sintering (SLS) [1]. Spočívala vo vytvrdzovaní práškovej hmoty pomocou laserových lúčov. Technológia Fused Deposition Modeling (FDM), momentálne najpoužívanejšia technológia 3D tlače, bola patentovaná v roku 1989 vynálezcom S. Scottom Crumpom [1]. Proces spočíva vo vytlačení roztaveného plastického materiálu z trysky.

Vďaka evolúcii a napredovaniu výrobných technológií, 3D tlač začala naberať na popularitu koncom 90. rokov. Umožňovala spoločnostiam rýchlejšiu a presnejšiu výrobu prototypov v porovnaní s inými výrobnými procesmi. V roku 2005 vznikol komunitný medzinárodný projekt RepRap vynájdený Adrianom Bowyerom [2]. Jednalo sa o 3D tlačiareň pozostávajúcu z približne 70% plastových dielov, ktoré mohli byť vytlačené na tej istej tlačiarňi, čo značne znížilo cenu celej konštrukcie. 3D tlač sa vďaka tomuto projektu prvýkrát dostala do domácností a menších dielní. Prvé komerčne dostupné tlačiarne typu FDM určené pre širokú verejnosť sa začali objavovať na trhu v roku 2010. Ich veľká popularita viedla k zlepšeniu kvality a zníženiu ceny. Na trhu sa postupne začala objavovať široká škála tlačových materiálov, poskytujúca rôzne vlastnosti, podľa požiadaviek zákazníka. V súčasnosti je 3D tlač jednou z najpoužívanejších technológií na výrobu prototypov zariadení, súčiastok, dekorácií, nástrojov, pomôcok a takmer všetkého, čo môže byť vyrobené aditívnou technológiou. Cenová dostupnosť tlačiarní,

tlačových materiálov a relatívna intuitívnosť aktuálnych softvérových produktov pre obsluhu 3D tlačiarní robí túto technológiu dostupnou takmer pre každého.

3D tlač je momentálne veľmi populárna hlavne v domácnostiach, dielňach, firmách pre prototypovanie menších dielov a výrobkov, avšak záujem o túto technológiu začalo prejavovať aj stavebníctvo a v blízkej budúcnosti sa očakáva jej rozšírenie aj do potravinárstva. Vďaka nízkym nákladom sa začína rozširovať aj v rozvojových krajinách, kde je využívaná na štúdium a vedecké účely.

2. SPÔSOBY 3D TLAČE

Spôsobov 3D tlače existuje niekoľko. Odlišujú sa od seba okrem svojho princípu aj cenou zariadenia, cenou a typom tlačového materiálu, nárokmi na údržbu, rýchlosťou a kvalitou tlače a mnohými ďalšími parametrami. Ich spoločnou vlastnosťou je aditívny proces výroby - metóda postupného vytvárania objektu nanášaním tlačového materiálu v jednotlivých vrstvách na seba. Základom 3D tlače je digitálny model tlačeneho objektu navrhnutý v CAD systéme. Väčšina tlačiarní dokáže spracovať vstupný model v forme G-kódu, ktorý je pre danú tlačiareň vytvorený príslušným softvérom práve z CAD modelu vo formáte .stl, prípadne .step. V súčasnej dobe neexistuje žiadna univerzálna technológia 3D tlače, ktorá by bola vhodná pre všetky použitia. Najpoužívanjšie metódy je možné rozdeliť do troch kategórií podľa typu materiálu a jeho spracovania.

2.1 3D tlač typu SLA

Stereolithography apparatus (SLA), čiže stereolitografický prístroj, je zariadenie pre 3D tlač založené na princípe vytvrdzovania fotocitlivej živice pomocou svetla. Fotocitlivá živica je v tekutej forme naliata v nádobe s priesvitným dnom, pod ktorým sa nachádza systém osvetlenia. Do nádoby je až po jej dno zvrchu ponorené rameno s tlačovou podložkou. Podložka sa po každej vytlačenej vrstve posunie o výšku jednej vrstvy, nevytvrdený fotopolymér vyplní vytvorenú medzeru a vykoná sa proces jeho vytvrdzovania na požadovaných miestach. Ojedinele sa osvetlenie fotopolyméru môže vykonávať zvrchu a tlačová podložka sa po každej vytlačenej vrstve posúva nižšie, avšak táto metóda vyžaduje zaistenie rovnomerného pokrytia už vytlačenej vrstvy fotopolymérom a jeho stálej úrovne hladiny v nádobe. Výhodou tohto procesu je vysoká presnosť a detailnosť výtlaku, jeho veľmi hladký povrch, možnosť tvorby komplexných geometrických tvarov, avšak celý proces tlače je zvyčajne pomalší než pri FDM metóde. Nevýhodou môže byť aj zvyčajne menšia tlačová plocha a toxicita fotocitlivej živice, slabšia pevnosť vytvrdeného materiálu a potreba pridania podporných štruktúr pre zamedzenie deformácie, prípadne úplného zlyhania tlače prevísajúcich častí tlačeneho objektu.

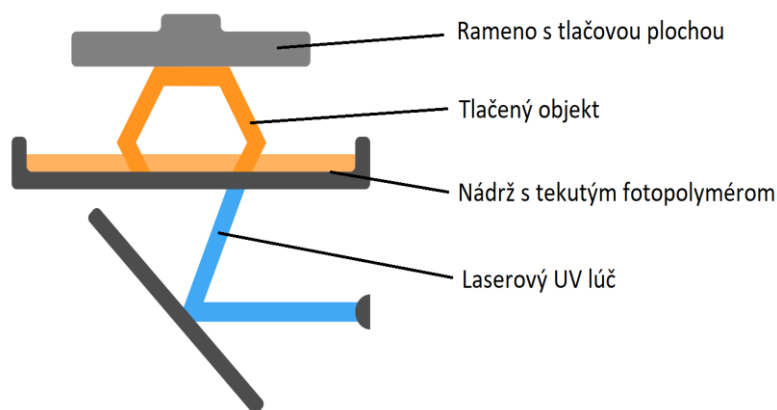
Vytlačený model je potrebné očistiť od nevytvrdennej živice rozpúšťadlom ako napríklad isopropylalkohol. Dodatočnú pevnosť výtlaku je možné dosiahnuť ďalším vytvrdzením celého výtlaku UV svetlom.

Existujú tri hlavné kategórie SLA procesu, líšiac sa spôsobom osvetlenia a vytvrdzovaním polyméru:

2.1.1 Laser

Proces tlače začína poklesom tlačovej plochy do nádrže s nevytvrdeným fotopolymérom, pričom medzi poslednou vytvrdenou vrstvou a spodkom nádrže zostane

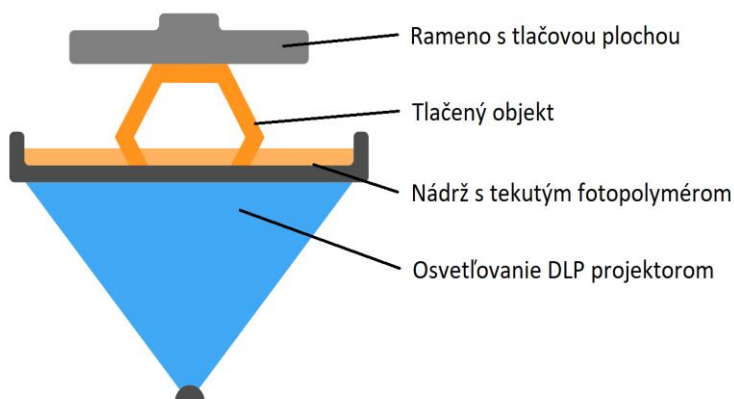
priestor rovný výške tlačenej vrstvy. Materiál je osvecovaný pomocou UV laserového lúča, kedy je lúč smerovaný dvomi zrkadlami a postupne vykresľuje tlačovú vrstvu. Doba tlače je závislá na rozlohe jednej vrstvy. Maximálne rozlíšenie detailov výtlačku je stanovené šírkou laserového lúča.



Obrázok 2.1 Selektívne osvetľovanie laserovým lúčom [4]

2.1.2 DLP

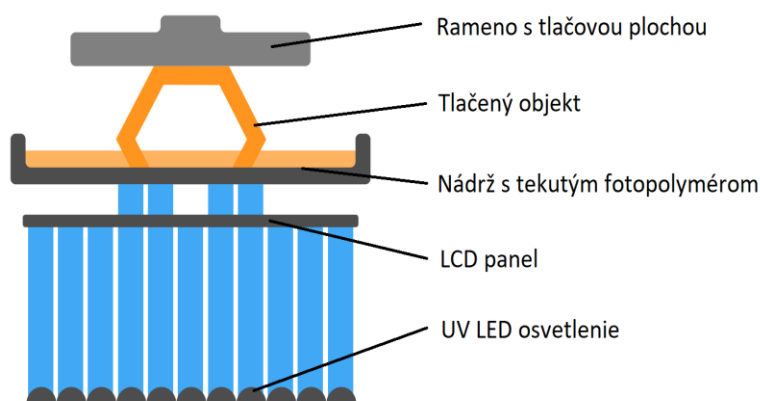
Digital Light Processing osvetľuje celú vrstvu naraz pomocou digitálneho projektor. Projektor zobrazí čiernobiely obraz prierezu jednej vrstvy. V miestach osvetu dochádza k vytvrdzovaniu polyméru. Doba tlače jednej vrstvy je vždy rovnaká, pretože sa osvetľuje celá plocha naraz. Rozlíšenie vytlačeného objektu je pevne dané rozlíšením použitého DLP čipu. Nevýhodou oproti laserovému osvetlu je zanechávanie jemných hrán medzi jednotlivými pixelmi DLP projektoru na výtlačku. Pre dosiahnutie jemnejších hrán je možné použiť funkciu antialiasingu, ktorá spriemeruje farby okolitých pixelov.



Obrázok 2.2 Selektívne osvetľovanie DLP projektorom [4]

2.1.3 MSLA

Mask Stereolithography využíva na osvetlenie UV LED, ktorých svetelné lúče prechádzajú cez LCD displej. Ten zatieni miesta, ktoré nemajú byť vytvrdzované a tak sa pomocou UV svetla vytvrdí polymér iba v miestach kde sú LCD pixely aktivované. Rozlíšenie vytlačeného objektu je pevne dané rozlíšením LCD displeja. Vďaka vytvrdzovaniu celej vrstvy naraz, je doba vytvrdenia jednej vrstvy vždy rovnaká. Taktiež je možné použiť antialiasing.



Obrázok 2.3 Selektívne osvetľovanie pomocou maskovacej vrstvy LCD [4]

2.2 3D tlač typu SLS

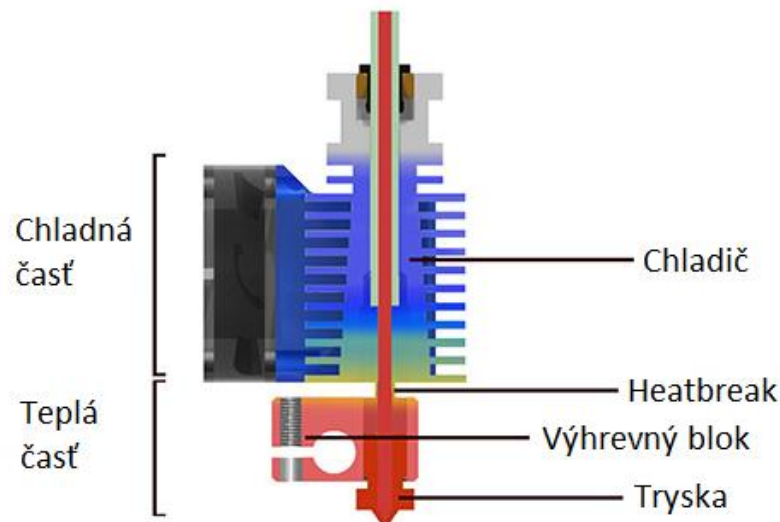
Selective Laser Sintering (SLS) je aditívny proces sintrovania práškoveho materiálu laserovým lúčom. Počas tlače novej vrstvy sa na tlačovú plochu naniesie vrstva jemného polymérového prášku a ten sa sintruje v miestach, kde majú byť časti konečného výtlaku. Po sintrovaní jednej vrstvy sa tlačová plocha posunie nižšie a proces sa znova opakuje. Po dokončení tlačového procesu sa vytlačený objekt vyberie a očistí od prebytočného nevytvrdeného prášku. Veľkou výhodou oproti FDM a SLA procesom je možnosť tlače s vynechaním podporných štruktúr, keďže je tlačený objekt upevnený vrstvou nevytvrdeného prášku. Preto je možné touto metódou relatívne jednoducho vytvárať zložitejšie pohyblivé mechanické systavy naraz, bez potreby zostavovania. Veľkou výhodou tohto procesu je aj šetrnosť k tlačovému materiálu. Nevytvrdený prášok je po dokončení tlače totiž možné použiť aj pri tlači ďalšieho objektu, s výnimkou niektorých materiálov, rýchlo oxidujúcich pri kontakte s ovzduším.

SLS tlačiarne sú však finančne príliš nákladné pre domáce použitie, preto majú využitie hlavne v priemysle a akademických výskumoch. [5]

2.3 3D tlač typu FDM

Jedná sa o najdostupnejší a najrozšírenejší spôsob 3D tlače. Stavebný materiál, prevažne plast, sa po roztavení nanáša v jednotlivých vrstvách na seba, z čoho vyplýva názov Fused Deposition Modeling (FDM). Dodáva sa väčšinou v podobe tlačovej struny (filamentu) s priemerom 1,75mm, prípadne 3mm pre staršie modely tlačiarní. Filament je vťahovaný krokovým motorom do tlačovej hlavy nazývanej extruder. V ňom prechádza cez kovový **chladič** a rúrku so závitom (**heatbreak**), ktorá je v jednej časti zúžená, pre obmedzenie prechodu tepla smerom nahor ku chladiču. Spodná strana heatbreaku je zaskrutkovaná do **výhrevného bloku** (heatblock), ktorý obsahuje elektrické výhrevné teleso a termistor pre spätnú väzbu o aktuálnej teplote. V tejto úrovni sa materiál roztaví a krokovým motorom je vytlačán von cez **trysku** (nozzle). Celý extruder je uchytený na konštrukcii s pohyblivými osami, ktoré ho podľa potreby presúvajú v súradnicovom systéme a tak po vrstvách vytvárajú hotový objekt. Na hotovom výtlačku sú viditeľné jednotlivé vrstvy, ktoré môžu mať výšku zvyčajne od 0,05 do 0,3mm pri použití trysky s priemerom 0,4mm, čo je najbežnejší používaný rozmer. [3]

Veľkou výhodou tejto tlačovej metódy je cenová dostupnosť tlačiarní a materiálu, jednoduchá obsluha a údržba zariadenia a vyššia rýchlosť tlače oproti iným technológiám. Vytlačený objekt má pomerne pevnú štruktúru, avšak záleží na použitom materiáli a teplote pri tlači. Nevýhodou je nižšia kvalita vytlačeného objektu a potreba pridania podporných štruktúr pre zamedzenie deformácie, prípadne úplného zlyhania tlače prevísajúcich častí tlačeného objektu.



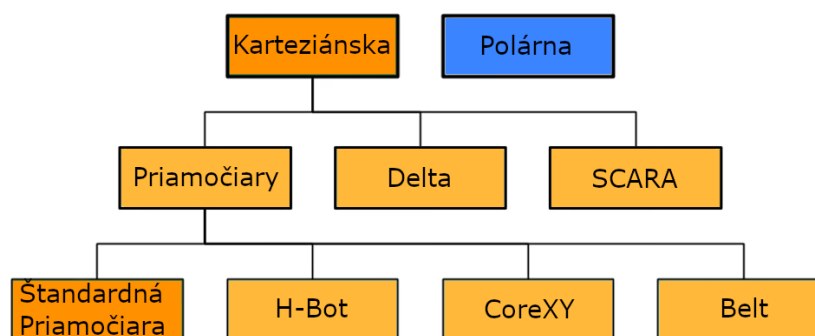
Obrázok 2.4 Tlačová hlava FDM tlačiarnie [4]

3. DRUHY FDM 3D TLAČIARNÍ

Najbežnejším rozdelením typov 3D tlačiarňí je ich súradnicový systém v ktorom sa tlačiareň orientuje a mechanický systém, zodpovedný za pohyb tlačovej hlavy.

Najbežnejším používaným súradnicovým systémom je karteziánsky, pozostáva z troch osí, po ktorých sa pohybujú jednotlivé časti tlačiarne. Mechanických spôsobov pohybu v karteziánskej sústave je niekoľko, najznámejšími sú priamočiara, Delta, a SCARA. Jednými z najpoužívannejších tlačiarňí so štandardným priamočiarým pohybom po karteziánskej sústave sú modely Prusa i3. Priamočiary typ mechanického pohybu osí sa podľa konštrukcie môže deliť na ďalšie iné druhy, ako napríklad H-bot, CoreXY, alebo Belt. Jedná sa o špecifické názvy, ktorými sú pomenované iné, ako štandardné mechanizmy priamočiareho pohybu.

Menej využívaným súradnicovým systémom je polárny, kedy je objekt tlačný na kruhovú podložku rotujúcu po vlastnej osi.



Obrázok 3.1 Rozdelenie FDM 3D tlačiarňí podľa súradnicovej sústavy [6]

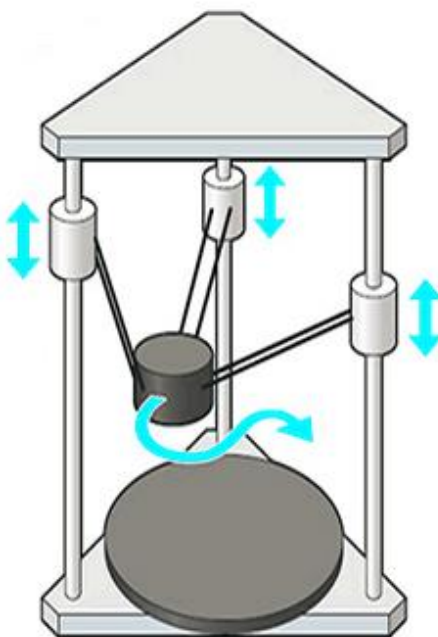
3.1 3D tlačiareň typu Delta

Tlačová hlava tohto typu tlačiarne sa pohybuje v karteziánskom súradnicovom systéme, avšak jej pohyb nie je vykonávaný po osiach paralelných so súradnicovým systémom. Namiesto toho je zavesená na troch ramenách rozmiestnených v rohoch pomysleného trojuholníka. Druhé konce týchto ramien sú upevnené na troch zvislých tyčiach, po ktorých sa dokážu pohybovať nahor a nadol. Napriek tomuto pohybu, obmedzenému iba vo vertikálnom smere, je umožnený pohyb tlačovej hlavy vo všetkých troch smeroch. To je možné pohybom ramien po zvislých tyčiach nezávisle od seba. Tento pohyb je vykonávaný tromi krokovými motormi, pre každé rameno jeden. Motory pohybujú ramenami prostredníctvom závitových tyčí, prípadne ozubených remeňov.

Pre zvýšenie rýchlosti a presnosti tlače je tlačová hlava odľahčená a zvyčajne priamo neobsahuje krokový motor pre posun tlačovej struny do výhrevného bloku a do trysky. Namiesto toho sa využíva tzv. Bowden systém, kedy je mechanizmus posuvu tlačovej struny umiestnený na kostre tlačiarne a prepojený s tlačovou hlavou cez PTFE rúrku. Cez túto rúrku je tlačová struna posúvaná do tlačovej hlavy, kde sa materiál roztaví a vychádza cez trysku.

Tlačová podložka je umiestnená v spodnej časti tlačiarne a nie je pohyblivá. Pohyb vykonávajú iba tri ramená s tlačovou hlavou. Väčšinou má tlačová podložka tvar kruhu, keďže tlačová plocha je kvôli konštrukcii tejto tlačiarne tiež kruhová. Priemer podložky býva zvyčajne pomerne malý, avšak maximálna výška tlače môže dosahovať násobky priemeru tlačovej podložky.

Tlačiareň typu Delta je preto vhodná pre tlač úzkych a vysokých objektov, ako sú napríklad nádoby, prípadne sochy. Veľkou výhodou je aj rýchla a efektívna tlač a relatívne vysoká kvalita výtlačku. Nevýhodou môže byť malý rozmer tlačovej plochy, prípadne obťažnejšia diagnostika problémov a ladenie presnosti a rýchlosti tlače. Taktiež treba dbať na opatrnejší výber typu tlačového materiálu kvôli použitému Bowden systému, kde sa tlačová struna nevhodného materiálu môže zasekávať v PTFE rúrke.



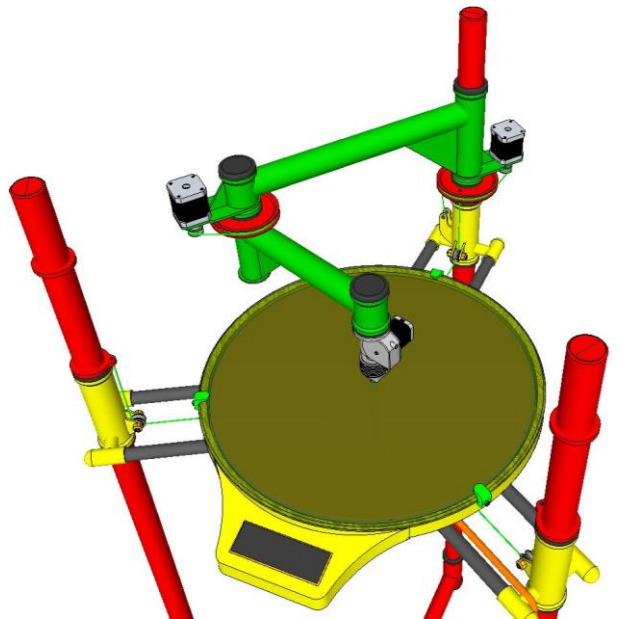
Obrázok 3.2 Konštrukcia osí 3D tlačiarne typu Delta [7]

3.2 3D tlačiareň typu SCARA

Názov tohto typu 3D tlačiarne znamená Selective Compliance Assembly Robotic Arm. Predstavuje unikátny typ pohybového systému, ktorý napodobňuje svojou sústavou spojov a kĺbov kinematiku ľudskej ruky. Túto technológiu vynášiel v roku 1981 Sankyo Seiki [8], avšak jej pôvodné využitie bolo v automatizovanom konštruovaní.

Pohyb tlačovej hlavy je vykonávaný v karteziánskej sústave pomocou sústavy ramien umiestnených v rovnakej rovine voči sebe. Ramená zvyčajne využívajú pre svoj pohyb krokové motory umiestnené na ich začiatku v základni tlačiarne, alebo pri jednotlivých kĺboch. Tento systém ramien zahŕňa mechanické väzby pre pokrytie celého rozsahu tlačovej plochy, ktorá má zvyčajne kruhový tvar. Vertikálny pohyb ramien je zvyčajne vykonávaný pomocou závitovej tyče poháňanej krokovým motorom. Rovnako ako tlačiareň typu Delta, aj SCARA využíva tlačovú hlavu so systémom Bowden, pre jej odľahčenie a zvýšenie rýchlosti tlače.

Výhodou je relatívne vysoká rýchlosť tlače v porovnaní so štandardnými priamočiarými tlačiarňami. Taktiež zaberá menej miesta na pracovisku. Nevýhodou je potreba vysokokvalitných kĺbových spojov, zdĺhavá kalibrácia tlače a veľmi nízka nosnosť ramien.



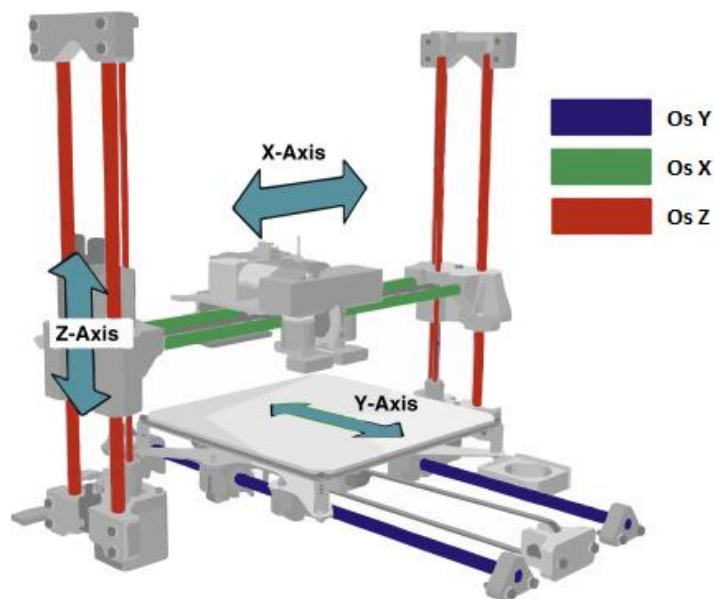
Obrázok 3.3 Konštrukcia osí 3D tlačiarne typu SCARA [9]

3.3 Priamočiare karteziánske 3D tlačiarne

Tento typ tlačiarne vo všeobecnosti pohybuje svojimi súčast'ami po osiach X, Y a Z za účelom pohybu tlačovej hlavy v trojrozmernom priestore. Tlačová hlava sa väčšinou pohybuje po osi X alebo Y (prípadne obidvoch súčasne) a následne je celá táto sústava vertikálne posúvaná po osi Z. V niektorých prípadoch je namiesto osí X a Y vertikálne posúvaná tlačová podložka.

3.3.1 Štandardná priamočiara karteziánska 3D tlačiareň

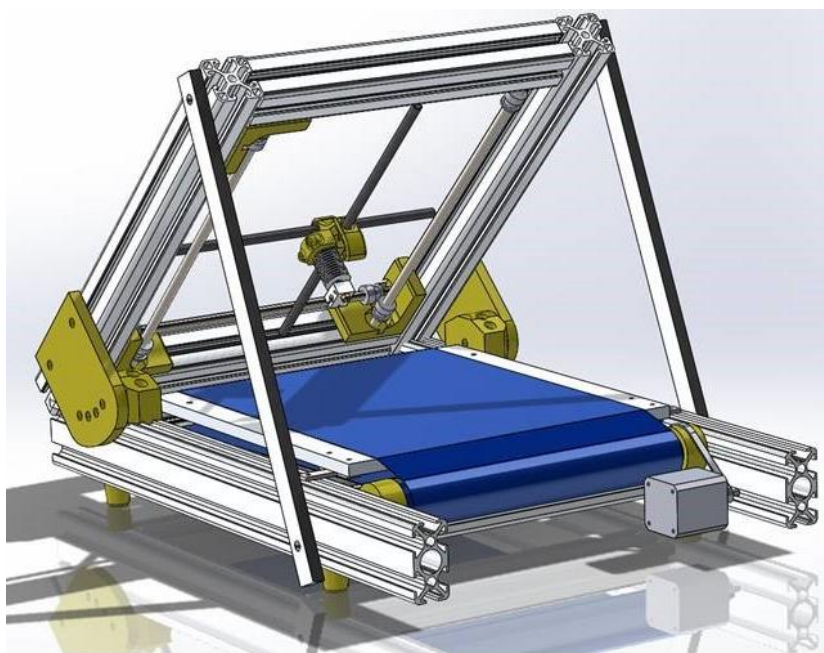
Taktiež prezývaná ako „i3“ alebo „Prusa“ podľa Českého konštruktéra Josefa Průši, je jedna z najpoužívanějších typov 3D tlačiarní v domácom a dielenskom prostredí. Tlačová hlava, upevnená na tyčiach alebo koľajniciach s lineárnymi ložiskami je pohybovaná mechanizmom tlačiarne po ose X. Pohyb po tejto osi je najčastejšie vykonávaný krokovým motorom a jednoduchou kladkovou sústavou s ozubeným remeňom. Celý mechanizmus osi X je pohybovaný vertikálne po osi Z jedným, alebo sústavou dvoch krokových motorov. Na tejto osi je vyžadovaná vyššia presnosť, pevnosť a stabilita, preto sa pre jej pohyb využívajú oceľové závitové tyče upevnené na osiach krokových motorov a mosadzné matice pripevnené na konštrukcii osi X. Vibráciám a nežiadúcim horizontálnym pohybom tejto konštrukcie zamedzujú oceľové tyče alebo koľajnice s lineárnymi ložiskami. Tlačová podložka je pohybovaná po osi Y pomocou krokového motora a ozubeného remeňa. Upevnená je na lineárnych ložiskách na dvojici koľajníc alebo oceľových tyčí, rovnako ako os X.



Obrázok 3.4 Konštrukcia osí štandardnej karteziánskej 3D tlačiarne [10]

3.3.2 Priamočiara karteziánska 3D tlačiareň typu Belt

3D tlačiarne typu Belt pracujú na princípe veľmi podobnom štandardnej priamočiarej tlačiarňi, avšak štandardnú tlačovú plochu nahrádza dopravníkový pás. Sústava osí X a Y je voči ploche dopravníku natočená o uhol 45° . Posun tlačenej objektu pre tlač jednotlivých vrstiev je vykonávaný posunom dopravníku. Vďaka tomu je osa Z teoreticky nekonečná. Prvé zmienky o tomto jedinečnom mechanizme tlače sa začali objavovať až v roku 2017 [11] a v nasledujúcich rokoch začali vznikať „opensource“ projekty. Prvá komerčne dostupná 3D tlačiareň typu Belt bola uvedená na trh začiatkom roku 2021 [11]. Najväčšou výhodou je možnosť tlače teoreticky nekonečne dlhého predmetu, pokiaľ je časť prevísajúca cez dopravník dostatočne podopretá. Taktiež umožňuje sériovú tlač predmetov bez potreby manuálneho odoberania výtlačku. Výtlačky sa uvoľnia na konci dopravníku samé a môžu byť zachytávané napríklad v nádobe umiestnenej pod dopravníkom [12]. Veľkou výhodou je aj potreba minimálneho množstva podporných štruktúr pri tlači prevísajúcich častí. Nevýhody tejto tlačovej metódy spočívajú hlavne v jej rannom štádiu vývoja. Často sa vyskytujú tlačové chyby, obťažná príľnavosť materiálu k podložke, menší výber vhodného tlačového materiálu a veľmi obmedzená softvérová podpora.

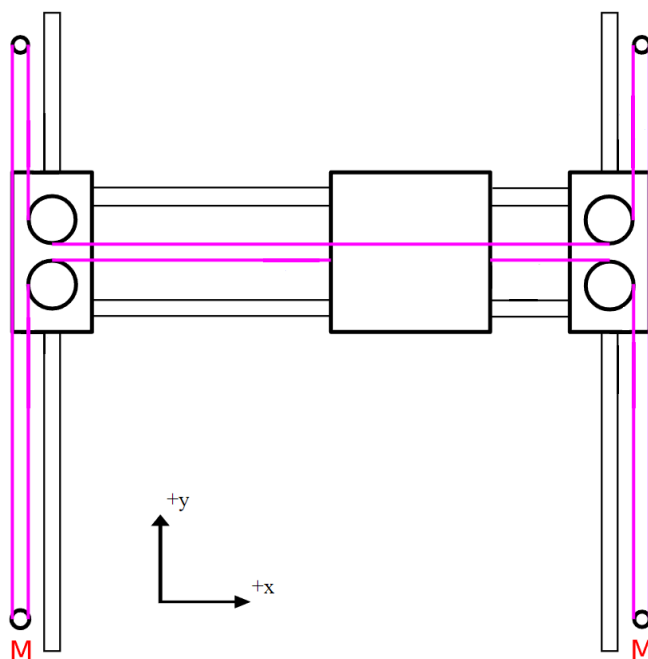


Obrázok 3.5 Konštrukcia osí 3D tlačiarne typu Belt [13]

3.3.3 Priamočiara karteziánska 3D tlačiareň typu H-bot

Názov H-bot vyplýva z usporiadania ozubeného remeňa a kladiek do tvaru písmena H. Sústava dvoch krokových motorov pohybuje tlačovou hlavou v osiach X a Y prostredníctvom jedného remeňa a sústavy kladiek. Priamočiary pohyb po osi X je vytvorený otáčaním oboch motorov naraz rovnakou rýchlosťou a rovnakým smerom. Pri zmene smeru otáčania jedného z motorov je tlačová hlava pohybovaná po ose Y. Tento princíp sa využíva nielen v 3D tlači, avšak napriek jeho jednoduchšej konštrukcii je postupne nahrádzaný inými metódami pohybu. Hlavným dôvodom je stáčanie a ohýbanie celej konštrukcie osí, ktorého veľkosť závisí hlavne na presnosti použitých dielov. Príčinou je remeň, ktorého konce sú prichytené z oboch strán tlačovej hlavy. Pri pohybe osí sa jeden koniec remeňa napne, avšak druhý sa mierne uvoľní, čo spôsobí spomínaný ohýb konštrukcie a tým aj nepresnosti pri tlačení [14]. Tento jav sa stáva problémom hlavne pri presných a rýchlych modeloch tlačiarňí.

Tlačová podložka je pohybovaná po ose Z jedným alebo sústavou krokových motorov a závitových tyčí, prípadne remeňov. Môže byť aj nepohyblivá, v tom prípade sa v ose Z pohybuje konštrukcia osí X a Y.



Obrázok 3.6 Konštrukcia osí X a Y 3D tlačiarne typu H-bot [14]

3.3.4 Priamočiara karteziánska 3D tlačiareň typu CoreXY

Konštrukcia osí CoreXY tlačiarne je na prvý pohľad veľmi podobná H-botu. Rozdiel medzi nimi je však v systéme rozvodových remeňov a kladiek. V prípade CoreXY sa na

pohybe osí X a Y podieľajú dva ozubené remene s dvomi krokovými motormi. Každý z krokových motorov pohybuje iba jedným remeňom, avšak na celkovom pohybe osí sa musia podieľať obidva motory súčasne. Výnimkou je diagonálny pohyb, na ktorého vykonanie postačí iba jeden z motorov. Spôsob, akým je tento systém skonštruovaný, eliminuje ohýbanie a skrúcanie celej konštrukcie prítomné v mechanizme H-bot. Vďaka tomu sa pohyb osí môže vykonávať s vyššou rýchlosťou, presnosťou a menším opotrebovaním pohyblivých dielov.

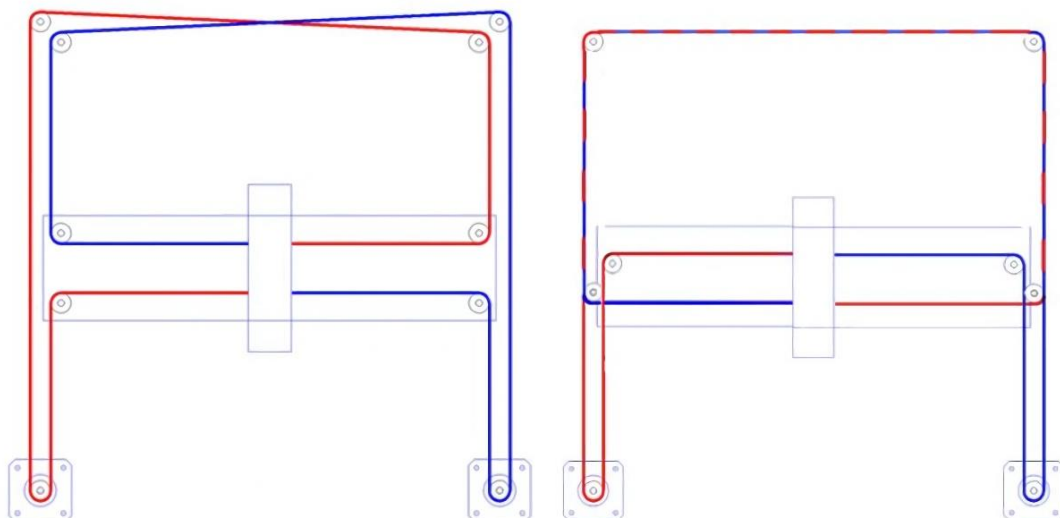
Vysoká rýchlosť a presnosť tohto typu tlačiarne je umožnená hlavne nízkou hmotnosťou osí, pretože všetky krokové motory sa nachádzajú pevne umiestnené na kostre tlačiarne a tlačová podložka sa voči tlačovej hlave pohybuje iba v ose Z, ktorej rýchlosť pri tlači nie je tak podstatná. Vibrácie spôsobované pohybom častí s vyššou hmotnosťou, hlavne ťažkou podložkou s tlačným objektom, sú taktiež čiastočne eliminované, čo značne redukuje zvlnenie stien tlačného predmetu.

V porovnaní so štandardnou karteziánskou tlačiarňou typu „i3“ má CoreXY menšie rozmery pri zachovaní rovnakého tlačového objemu. Je to z dôvodu pohybu tlačovej podložky (prípadne mechanizmu osí X a Y) iba v ose Z, čím nie je potrebné vyhradenie voľného priestoru pre pohyb podložky po ose Y.

Systém rozvodových remeňov, ktorý prináša CoreXY tlačiarňam veľké výhody, je sám o sebe aj veľkou nevýhodou. Najväčším problémom sú samotné remene, ktoré dokážu spôsobiť veľa problémov, ak nie sú dostatočne napnuté a zarovnané. Pri nesprávnom paralelnom zarovnaní remeňov voči sebe sa zvýši ich opotrebovanie, zníži sa presnosť tlače a môžu viesť až k ohýbaniu a poškodeniu pohyblivého mechanizmu tlačiarne. Príliš vysoká, prípadne aj nízka sila napnutia remeňov urýchli ich opotrebovanie a natiahnutie. Preto je dôležité používať rozvodové remene s dostatočnou kvalitou.

Pri zostavovaní CoreXY tlačiarne je veľmi dôležité dbať na čo najvyššiu presnosť pravých uhlov konštrukcie. Aj malé odchýlky dokážu spôsobiť väčšie nepresnosti v rozmeroch a uhloch tlačného objektu. Konštrukcie zostavené z hliníkových profilov je preto odporúčané dodatočne spevniť rohovými konzolami.

Správna a kvalitná konštrukcia CoreXY tlačiarne dokáže aspoň čiastočne eliminovať väčšinu jej nevýhod. Profesionálne 3D tlačiarne preto zvyknú preferovať práve tento typ konštrukcie pred inými, aj napriek ich vyššej cene.



Obrázok 3.7 Dva rôzne rozvodové systémy osí X a Y 3D tlačiarne CoreXY [16]

Aj keď sa tieto dva systémy medzi sebou príliš nelíšia, rozvodové remene systému na obrázku vpravo sa navzájom nekrižujú. Namiesto toho sú orientované jeden nad druhým, čo odstraňuje nežiadúce trenie medzi remeňmi v krížení, čo môže spôsobiť rýchle opotrebovanie remeňov a horšiu kvalitu tlače. Tento systém má zároveň aj mierne menšie rozmery oproti systému s krížením rozvodov.

4. POROVNANIE NAJPREDÁVANEJŠÍCH COREXY 3D TLAČIARNÍ

CoreXY 3D tlačiarne začali byť v posledných rokoch čoraz viac populárne aj vďaka vysokej kvalite a rýchlosti tlače. Na trhu je dostupných množstvo modelov v rôznych cenových kategóriách. Ceny modelov určených pre domáce a hobby použitie začínajú približne na úrovni 300USD, no môžu presiahnuť aj niekoľko tisíc USD [17]. Niektoré sa predávajú ako zostavené výrobky pripravené na používanie, iné sú zostavené iba z častí a vyžadujú dodatočné zostavenie po zakúpení. Dostupné sú však aj sady jednotlivých súčiastok pre zostavenie kompletnej tlačiarne, čím sa zníži ich nákupná cena, ale značne predĺži čas zostavovania a prvotného nastavenia a kalibrácie.

4.1 Two Trees Sapphire Pro

Model Sapphire Pro od spoločnosti Two Trees je jednou z cenovo najdostupnejších CoreXY 3D tlačiarňí na trhu v roku 2021, s cenou približne 300USD. Zakúpiť sa dá v čiastočne rozloženom stave, takže vyžaduje určitú montáž. Jej kostra je zložená z hliníkových profilov a osi X a Y sa pohybujú po lineárnych koľajniciach. Obsahuje extruder typu bowden, funkciu automatického vykompenzovania nerovností tlačovej plochy, vyhrievanú tlačovú podložku a riadiacu jednotku s 32-bitovým mikrokontrolérom. Tlačový priestor má rozmery 235x235x235mm.



Obrázok 4.1 3D tlačiareň Two Trees Sapphire Pro [18]

4.2 Tronxy X5SA

Ďalším veľmi predávaným modelom je X5SA od firmy Tronxy. Najväčším rozdielom oproti Two Trees Sapphire Pro je značne väčšia tlačová plocha s rozmermi 330x330mm a maximálnou výškou tlače 400mm. Predáva sa ako sada jednotlivých súčiastok s cenou približne 350USD. Obsahuje funkciu poloautomatického vyrovnania tlačovej plochy, kedy užívateľovi zobrazí vzdialenosti trysky od tlačovej podložky na rôznych miestach tlačovej plochy, avšak korekciu musí užívateľ vykonať ručne. Rovnako, ako Sapphire Pro, aj tento model obsahuje extruder typu bowden a pohyb tlačovej podložky po osi Z je vykonávaný dvomi krokovými motormi so závitovými tyčami. Nie je však príliš vhodná pre začiatočníkov kvôli svojej komplikovanejšej montáži a rôznym menším nedokonalostiam, ktoré je pre zvýšenie výdrže a kvality tlače vhodné vyriešiť [19].

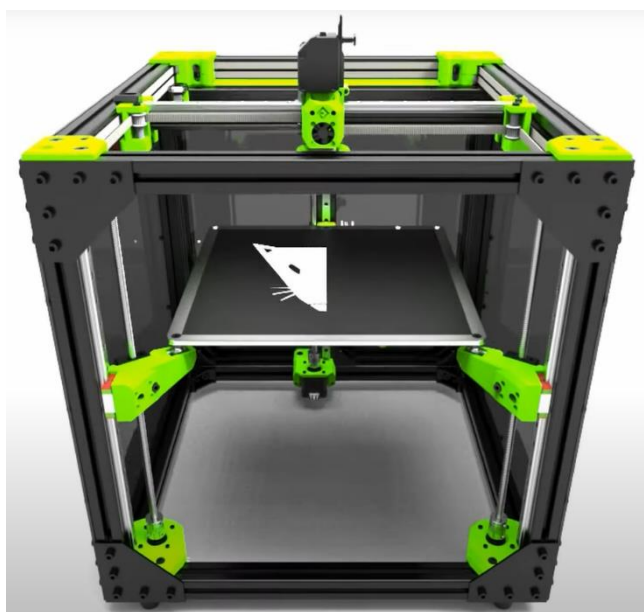


Obrázok 4.2 3D tlačiareň Tronxy X5SA [20]

4.3 Rat Rig V-Core 3

Rat Rig V-Core 3 je určený pre náročnejších používateľov vyžadujúcich rýchlu a kvalitnú tlač. Zakúpiť sa dá v troch rôznych veľkostiach tlačovej plochy ako hotová zostavená tlačiareň, ale aj ako sada dielov vyžadujúca vlastnú montáž. Pri nákupe sady dielov je možný výber typu niektorých komponentov, ako napríklad krokové motory, radiace jednotky, extrudery, alebo tlačové hlavy.

Šasi tohto modelu pozostáva z hliníkových profilov a rohových spojov z kovu. Tlačová podložka je umiestnená na troch od seba nezávislých vertikálnych osiach, poháňaných tromi krokovými motormi so závitovými tyčami. Vďaka senzoru BLTouch umiestneného na tlačovej hlave je možné automatické vyrovnanie tlačovej podložky. Všetky osi sa pohybujú po lineárnych koľajniciach. Predkonfigurovaný zostavený model obsahuje riadiacu jednotku s Wi-Fi pripojením, BLTouch senzor, tlačovú hlavu s priamym extruderom a E3D V6 hotendom [21]. Táto tlačiareň má veľkú podporu komunity a existuje pre ňu veľké množstvo úprav a modifikácií. Preto je vhodná hlavne pre užívateľov s nadšením do 3D tlače. Cena predkonfigurovaného modelu je približne 1400USD.



Obrázok 4.3 Rat Rig V-Core 3 [22]

4.4 Projekt Voron

Voron je jedinečný open-source projekt umožňujúci vlastnú úpravu, šírenie a návrh nových funkčných dielov. Pretože sa jedná o skupinový projekt a nie hotový predajný výrobok, zakúpiť je možné iba jednotlivé diely tejto tlačiarne, prípadne sady komponentov, ktorých zoznam je možné vygenerovať na webovej stránke tohto projektu podľa vlastnej konfigurácie niektorých prvkov. Na výber sú veľkosti tlačovej plochy a tak aj celej konštrukcie, prípadne je možné zvoliť vlastnú veľkosť. Taktiež je možný výber typu extrudera, typu ochranných reťazí pre kabeľáž, alebo aj spôsob montáže konštrukcie z hliníkových profilov. Niektoré mechanické komponenty sú dostupné aj ako digitálne modely vhodné pre 3D tlač.

Veľkým rozdielom oproti väčšine iných CoreXY 3D tlačiarňí je pohon všetkých osí vrátane osi Z pomocou ozubených remeňov a pohyb celej sústavy osí X a Y po ose Z namiesto tlačovej podložky, ktorá je v tomto prípade nepohyblivá. Ďalšou zaujímavosťou je vertikálny pohyb po osi Z vykonávaný až štyrmi nezávislými krokovými motormi, umožňujúcimi v spojení so senzorom vzdialenosti automatické vyrovnanie konštrukcie osí X a Y voči tlačovej podložke. Všetky osi sa pohybujú po lineárnych koľajniciach. Podporované je široké množstvo riadiacich jednotiek, extrudero, hotendov, rôznych senzorov vzdialenosti a akcelerácie a taktiež aj viacero kompatibilných firmvérov a softvérových spôsobov riadenia a monitorovania.

Vďaka tomu, že všetka dokumentácia tohto projektu je voľne dostupná pre každého, má Voron v aktuálnej verzii 2.4 veľkú podporu komunity a existuje pre neho veľké množstvo vylepšení. Oproti Rat Rig V-Core 3 má väčšiu prispôbitelnosť vlastností, väčšie množstvo funkcií, modifikácií a možností konštrukcie a ovládania. Cena Voron 2.4 sa pohybuje v oblasti 1000USD, záleží však na použitej konfigurácii.



Obrázok 4.4 Voron 2.4 [23]

5. PRAKTICKÁ ČASŤ – ZOSTAVENIE TLAČIARNE

Z prieskumu mnohých tlačových riešení typu CoreXY dostupných na trhu boli vybrané dve dvojice modelov 3D tlačiarň z dvoch rôznych cenových kategórií spĺňajúce aspoň väčšinu stanovených požiadaviek o kvalite, cene a modifikovateľnosti. Z tejto štvorice bol vybraný model Voron 2.4, ktorý ponúka najlepší pomer ceny a kvality a je vysoko konfigurovateľný a modifikovateľný. Voron 2.4 je open-source projekt, vďaka čomu sú jeho jednotlivé komponenty voľne dostupné na trhu a je zaručená vysoká kompatibilita s rôznymi inými komponentami vďaka aktívnej komunite. Tento projekt je predkonfigurovaný pre tlačovú plochu s rozmermi 250 mm, 300 mm a 350 mm. Z praktických dôvodov bola zvolená konfigurácia tlačiarne pre tlačovú plochu s rozmermi 300 mm.

Pri zostavovaní zoznamu všetkých súčiastok potrebných k stavbe Voron 2.4 bol využitý aj online konfigurátor, ktorý dokáže spracovať niektoré základné požiadavky na vlastnosti tejto 3D tlačiarne a vygenerovať kompletný zoznam dielov. Tento zoznam bol po dôkladnom prieskume dostupných kompatibilných dielov značne prerobený, kedy boli niektoré diely zamenené za iné, vyhovujúcejšie, prípadne boli pridané nové súčasti pridávajúce dodatočné vlastnosti tomuto modelu tlačiarne.

Pre zjednodušenie zostavovania bol použitý originálny zostavovací manuál vo verzii r1, obsahujúci iba elementárne kroky montáže. Správnosť montáže po zostavení tlačiarne bola overená podľa zostavovacieho manuálu vo verzii r2, ktorý ešte v čase zostavovania neexistoval.

5.1 Rám a mechanika tlačiarne

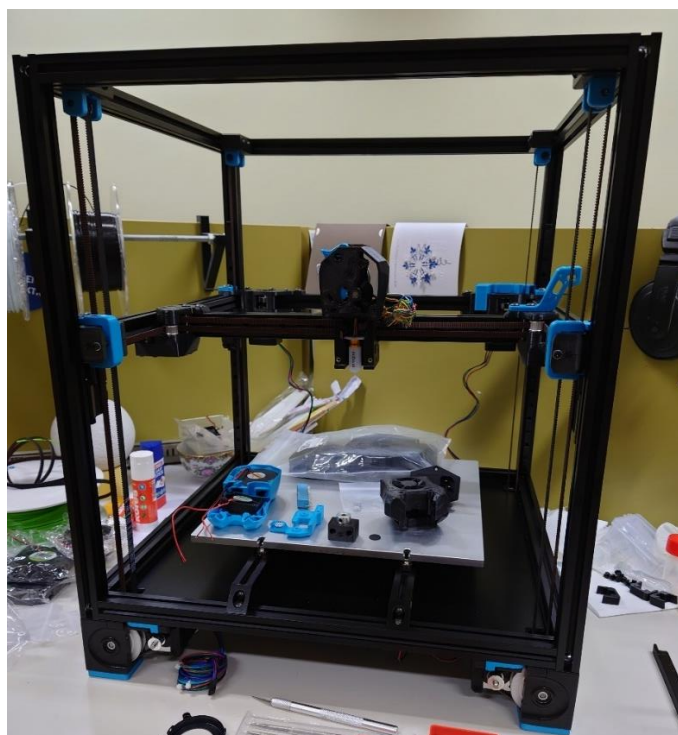
Zostavovanie tlačiarne začalo montážou jej kostry. Tá pozostávala zo sady hliníkových profilov s rozmermi 20x20 mm. Dĺžky jednotlivých profilov odpovedali rozmerom vo vygenerovanom zozname súčiastok. Povrchovú úpravu týchto hliníkových profilov predstavovalo eloxovanie v čiernej farbe, taktiež nazývané aj anodická oxidácia. Jednotlivé profily boli predpripravené pre spájanie metódou „blind joints“, kedy sa skrutka z časti zaskrutkuje do pozdĺžneho otvoru na konci profilu, jej hlava následne zasunie do drážky druhého profilu a cez priečne vyvrtanú dieru utiahne pomocou skrutkovača alebo príslušného kľúča. Tento spôsob spájania je najmenej nákladný, keďže nevyžaduje okrem skrutiek žiadne ďalšie súčiastky a zároveň vytvára dostatočne pevný a spoľahlivý spoj.

Rovnaký typ hliníkových profilov bol využitý aj na zostavenie pohyblivého portálu osí X a Y. Spojovacími prvkami boli v tomto prípade plastové časti vyrobené pomocou 3D tlače, upevnené k hliníkovým profilom pomocou metrických skrutiek a matic typu T.

Následne boli tieto diely medzi sebou upevnené metrickými skrutkami, zaskrutkovanými do mosadzných matíc zatavených do príslušných otvorov v plastových dieloch. Matice boli do otvorov zatavované čistým hrotom mikros pájky nastavenej na teplotu približne 300 °C. Jednotlivé plastové diely boli vytlačené na FDM 3D tlačiarňi z materiálov Innovatefil TPU Black a Fiberology Nylon PA12 Blue v čiernej a modrej farbe. Tieto materiály boli zvolené hlavne kvôli ich vysokej pevnosti a odolnosti voči vyšším teplotám, keďže komora tejto tlačiarne je uzavretá a môže dosahovať teplotu až do približne 80 °C. Spomenuté plastové diely portálu obsahovali aj otvory pre montáž dvoch krokových motorov pre pohyb osí X a Y, napínacie kladky a axiálne ložiská ozubených remeňov, úchyty pre kabeláž a ďalšie otvory pre zatavovacie mosadzné matice, určené pre montáž plastových dielov tvoriacich kľby osi typu Z. Ozubený remeň so šírkou 6 mm bol narezaný na dve časti s totožnou dĺžkou. Konce oboch častí boli pripevnené na plastovom vozíku tlačovej hlavy a prechádzali napínacími kladkami a ozubeniami kladiek motorov tak, aby vytvárali pohybovú sústavu typu CoreXY. V oboch predných rohoch portálu boli pripevnené plastové diely s napínacími kladkami a skrutkami typu M3, slúžiacimi na presné napnutie oboch remeňov. V každom rohu portálu bol kľb pripevnený skrutkami k lineárnemu ložisku. Hliníkový profil tvoriaci os X bol pomocou plastových dielov upevnený o lineárne ložiská pohybujúce sa po osi Y. Skrutky upínajúce hliníkové profily s plastovými dielmi boli pevne utiahnuté až po skompletizovaní celej mechanickej časti tlačiarne kvôli presnému paralelnému zarovnaniu osí Y a k nim pravoúhlej osi X. Pohyb všetkých osí zabezpečovali lineárne oceľové koľajnice s ložiskami typu MGN9H umiestnené na každom vertikálnom profile kostry pre pohyb v osi Z a takisto na profiloch portálu osí X a Y. Pred ich montážou boli koľajnice s ložiskami dôkladne očistené od konzervačného oleja pomocou isopropylalkoholu a premazané lítiovým mazivom. Montáž týchto koľajnic na profily bola vykonaná pomocou skrutiek typu M3 a príslušných matíc typu T umiestnených v drážkach profilov. Pre presnejšie zarovnanie koľajnic slúžili pomocné platové diely v tvare U, ktoré boli po montáži odobraté.

Pohyb po osi Z je v tomto projekte vykonávaný pomocou 4 navzájom nezávislých krokových motorov. Preto boli umiestnené do štyroch spodných rohov rámu tlačiarne, pripevnené o rám plastovými dielmi a skrutkami s maticami typu T. Točivý pohyb krokových motorov je prevádzaný na lineárny v ose Z pomocou jednoduchého prevodu pozostávajúceho z dvoch ozubených kladiek typu GT2 s počtom ozubení 80 a 20, ktoré sú prepojené s XY portálom pomocou ozubených remeňov so šírkou 9 mm. Tieto rohové časti, obsahujúce krokové motory a kladkové prevody slúžia aj ako nosné nohy celej konštrukcie tlačiarne a obsahujú otvory pre montáž gumových antivibračných nožičiek. Napínacie kladky remeňov osi Z sa nachádzajú v protiľahlých horných rohoch rámu tlačiarne a pozostávajú z plastových dielov upevnených ku hliníkovej kostre pomocou metrických skrutiek a matíc typu T. Remene sú zavesené na kladkách typu GT2 s 20 ozubeniami.

V spodnej časti konštrukcie tlačiarne boli pomocou rohových úchytoŧ priskrutkované dva hliníkové profily umiestnené paralelne voči sebe, slúžiace pre montáž vyhrievanej tlačovej podložky a spodného krytu s DIN lištami. Tlačová podložka bola prichytená ku profilom pomocou štyroch skrutiek typu M3, matic typu T umiestnených v drážkach profilov a matic M4 slúžiacich ako dištancné podložky medzi hliníkovými profilmi a tlačovou podložkou. Zo spodnej strany týchto paralelných profilov boli umiestnené ďalšie matice typu T, slúžiace na montáž DIN lišt ručne narezaných na dĺžku 410 mm a spodného krycieho panelu z hliníkového kompozitu s akrylátovým jadrom.



Obrázok 5.1 Fotografia sčasti zostavenej konštrukcie tlačiarne Voron 2.4

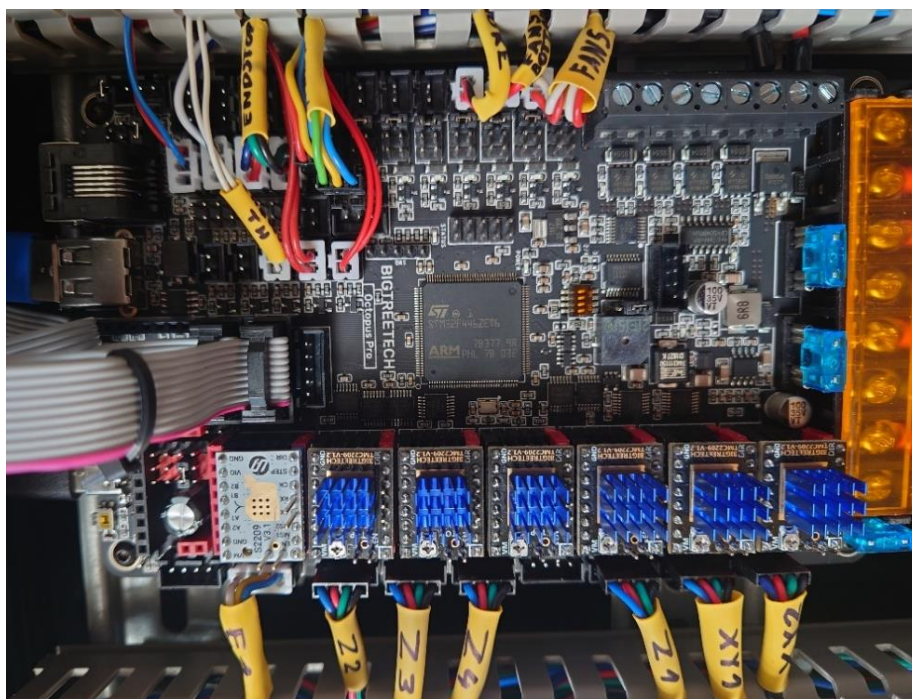
Rovnaký hliníkový kompozit čiernej farby s akrylátovým jadrom bol použitý ako zadný krycí panel tlačiarne a taktiež aj spodný kryt komory s elektronikou. Spodná komora bola zo strán ohraničená plastovými dielmi s mriežkou v podobe šesťhranného vzoru, dodávajúce tlačiarňi krajší vzhľad a zároveň slúžia ako zábrana proti vniknutiu veľkých objektov a častí tela do zóny s elektronikou. Toto krytie obsahuje aj jednofarebný LCD displej s ovládaním, dva ventilátory s priemerom 40 mm zboku tlačiarne a napájaciu zásuvku s vypínačom a poistkou v zadnej časti.

5.2 Elektronika tlačiarne

Takmer všetky elektronické prvky boli umiestnené v spodnej komore tlačiarne, osadené pomocou príslušných svoriek na DIN lištách. Nachádza sa tu riadiaca doska, jednodoskový počítač, napájacie zdroje, relé, kontaktné svorky a kabeláž.

5.2.1 Riadiaca doska

Projekt Voron oficiálne podporuje niekoľko rôznych typov riadiacich dosiek od rôznych výrobcov. Z týchto možností bola vybraná riadiaca doska Octopus Pro od firmy BigTreeTech. Dokáže naraz obsluhovať až 9 krokových motorov pomocou ôsmich driverov, čo eliminuje potrebu využitia dvoch riadiacich dosiek, keďže ostatné obsahujú päťice pre 6 alebo menej driverov. Voron 2.4 má vo svojom dizajne zakomponovaných až 7 krokových motorov. Riadiaca doska Octopus Pro môže byť napájaná až 24 V zdrojom a obsahuje regulátory napätia 5 a 12 V priamo na doske. Tieto napätia môžu byť neskôr využiteľné pre napájanie rôznych periférií, ako napríklad LED osvetlenie, ventilátory, alebo aj väčšinu štandardných jednodoskových mikropočítačov cez USB port typu A, vďaka 5 V impulznému zdroju Silergy SY8368A, ktorý je schopný stabilne dodávať prúd až 8 A a špičkovy až 16 A [24]. Doska okrem toho obsahuje aj výkonný 32bit mikroprocesor STMicroelectronics STM32F446 s veľkým množstvom vstupných a výstupných portov pre pripojenie všetkých potrebných periférií tlačiarne. Takmer rovnakými vlastnosťami oplýva aj riadiaca doska Fysetc Spider ktorú projekt Voron taktiež podporuje, avšak v čase výberu dosky bola nedostupná, navyše má táto doska podľa recenzií Voron komunity častý problém s pripojením k PC, neobsahuje zosilňovací obvod pre termistor PT100 a obsahuje signálové porty s napäťovou úrovňou 3,3 V, čo nemusí byť v niektorých aplikáciách praktické.



Obrázok 5.2 Riadiaca doska BigTreeTech Octopus Pro F446 s drivermi TMC2209 osadená v tlačiarne

Doska bola osadená siedmimi drivermi krokových motorov TMC2209 od firmy BigTreeTech. Tento model je jeden z dvoch softvérovo podporovaných projektom Voron a zároveň ponúka lepšiu účinnosť, výkon a viac funkcií oproti staršej variante TMC2208. Do príslušných konektorov bola pripojená kabeláž krokových motorov, koncových spínačov osí, termistorov tlačovej hlavy, podložky a komory, modul displeja s enkodérom Fysetc Mini12864, polovodičové relé SSR pre spínanie výhrevu tlačovej podložky, 70 W vyhrievač hot-endu, 24 V napájací zdroj, adresovateľné RGB LED a dátový prepoj USB s jednodoskovým počítačom. Konektory kabeláže pre väčšinu pripojených periférií okrem motorov a displeja boli krimpované ručne pomocou krimpovacích klieští a opatrne prispájkované, pre vyššiu odolnosť voči mechanickému namáhaniu a taktiež zaisteniu nízkeho prechodového odporu medzi vodičom a kontaktom konektora.

Riadiaca doska je mechanicky upevnená o kostru tlačiarne pomocou plastového držiaku s dvomi svorkami, zacvaknutými na kovových DIN lištách. Umiestnená bola strategicky na predný okraj komory s elektronikou priamo za displejom, ktorý je odklápatelný, čím je možné jednoducho odkryť USB konektor a slot na MicroSD kartu na riadiacej doske.

5.2.2 Jednodoskový počítač a software

Projekt Voron využíva firmvér Klipper, ktorý slúži na komunikáciu medzi štandardným počítačom a mikrokontrolermi. V tejto konfigurácii sa využíva výkon počítača na spracovanie a kalkuláciu príkazov o pohybe, indikácii a ovládaní tlačiarne. Mikrokontrolér v tomto prípade slúži iba ako rozširovač portov pre počítač a nevyužíva sa jeho výpočetný výkon. Klipper podporuje funkcie ako napríklad „Input Shaping“ a „Smooth Pressure Advance“, konfigurácia tlačiarne je možná priamo cez počítač bez nutnosti prehrávania firmvéru mikrokontroléra a dokáže spolupracovať s používateľskými rozhraniami OctoPrint, Mainsail a Fluidt. Po diskusii so skúsenejšími užívateľmi týchto systémov bolo zvolené rozhranie Mainsail, hlavne vďaka jeho aktívnejšiemu vývoju zo strany vývojárov oproti rozhraniu Fluidt. OctoPrint je možné využívať aj s inými typmi firmvéru než Klipper, avšak kvôli tejto univerzálnosti je zložitejší na ovládanie a nastavenie.

Ako jednodoskový počítač bol zvolený Raspberry Pi 4 Model B o verzii so 4 GB pamäťou RAM, osadený hliníkovým chladičom. V čase zostavovania ponúkal najvyšší výpočetný výkon a najlepšiu softvérovú podporu. Pri počiatočnom spúšťaní a konfigurácii tlačiarne bol však použitý model Raspberry Pi Model B+ s 512 MB pamäťou RAM, ktorého výkon bol však nedostačujúci na plynulý chod systému a tlače.

Inštalácia softvéru začala nahratím operačného systému MainsailOS na MicroSD kartu s kapacitou 32GB a jej vložení do príslušného slotu na počítači Raspberry Pi. Operačný

system MainsailOS je založený na Linuxovej distribúcii Debian s predinštalovanými prvkami používateľského rozhrania Mainsail a jeho serverovej časti Moonraker. Následne prebehlo prvé zapnutie systému a nakonfigurovanie komunikačného kanálu s mikrokontrolérom riadiacej dosky. Pomocou inštaláčného manuálu pre tlačiareň Voron 2.4 [25] bol vytvorený a skompilovaný firmvér pre tento mikrokontrolér. Riadiaca doska bola prostredníctvom prepojky prepnutá do DFU režimu, kedy sa otvoril komunikačný kanál USB pre nahranie firmvéru, ktorý bol takto nahraný do mikrokontroléra.



Obrázok 5.3 Jednodoskový počítač Raspberry Pi 4 Model B [26]

5.2.3 Napájací zdroj

Riadiaca doska Octopus Pro umožňuje využiť až 24 V napájací zdroj. Pre efektívnejší prenos výkonu do výhrevného telesa v hot-ende je taktiež vyhovujúce použiť čo najvyššie napätie. Z tohto dôvodu bol zvolený napájací zdroj MeanWell LRS-350-24 s výstupným napätím 24 V a maximálnym výkonom 350 W.

Pre kabeláž výstupnej časti zdroja boli použité medené lankové vodiče s priemerom $2,5 \text{ mm}^2$ s PVC izoláciou a krimpovanými konektorovými vidlicami na koncoch. Riadiaca doska Octopus Pro umožňuje jednotlivé napájanie motorov, riadiacej časti a výhrevu tlačovej podložky v prípade využitia rôznych zdrojov pre každý z týchto obvodov. V tomto prípade však boli všetky napájacie vstupy prepojené s jedným 24 V zdrojom, každý zo vstupov separátnou dvojicou vodičov čiernej a červenej farby. Sieťová časť vstupného striedavého napätia 230 V bola vedená lankovými medenými vodičmi typu CYKY-J 3x2,5 s krimpovanými vidlicami. Prepájali vstupné svorky napájacieho zdroja s prírodným konektorom IEC320-C14 kombinovaného s kolískovým vypínačom a sklenenou prístrojovou poistkou 10 A. PE vodič bol pripojený pomocou metrickej skrutky a matice typu T o hliníkový profil tvoriaci rám tlačiarne. O tento bod

bol rovnakým spôsobom pripojený aj zemniaci vodič prírodného konektora a prepojená s ním bola aj tlačová podložka, čím sa vytvoril zemniaci uzol. Zmeraním elektrického odporu medzi ktorýmikoľvek pospojovanými časťami bolo zistené, že odpor nepresiahol hodnotu $0,45\ \Omega$ vrátane vodičov multimetra.



Obrázok 5.4 Napájací zdroj MeanWell LRS-350-24 namontovaný a pripojený v tlačiarňi

5.2.4 Tlačová podložka

Základ tlačovej podložky je tvorený hliníkovou doskou s rozmermi 300 x 300 mm a hrúbkou 6 mm, priskrutkovanou štyrmi skrutkami o hliníkové profily konštrukcie tlačiarne. O ohrev tejto tlačovej podložky sa stará silikónový elektrický ohrievač v podobe hrubej fólie nalepenej na spodnej strane hliníkovej dosky. Ohrievač má rozmery 250 x 250 mm, je napájaný sieťovým napätím 230V AC s príkonom 600W. Napájanie ohrievača je vyriešené pomocou polovodičového relé SSR Cosmo KSD210AC8 s maximálnym prúdom 10A. Ovládacia časť relé je pripojená k výstupu výhrevu podložky na radiacej doske. Pre prípad zlyhania polovodičového relé bola na spodok tlačovej podložky pripevnená tepelná poistka s maximálnym prúdom 15A a teplotou rozopnutia 115 °C. Tlačová podložka disponuje termistorom typu NTC 100K 3950 umiestneným v strede tlačovej podložky na spodnej strane ohrievača. Hliníková doska tlačovej podložky je spojená s uzemnenou kostrou tlačiarne pomocou medeného lankového vodiča s priemerom 1,5 mm².



Obrázok 5.5 Spodná strana tlačovej podložky s ohrievačom a kabelážou

5.3 Tlačová hlava

Projekt Voron 2.4 bol spočiatku navrhnutý s tlačovou hlavou nazývanou Afterburner, avšak vznikol komunitný projekt novej verzie kompatibilnej tlačovej hlavy zvanéj Stealthburner, ktorý má pôvodný Afterburner postupne nahradiť. Oproti pôvodnému modelu má Stealthburner nižšiu hmotnosť, účinnejšie chladenie hot-endu a tlačeneho predmetu, novší model extruderu ClockWork 2, modernejší dizajn a obsahuje tri RGBW LED moduly pre osvetlenie tlačeneho objektu a indikáciu stavu tlačiarne. Kvôli týmto výhodám bola zvolená hlava Stealthburner. Aj napriek tomu, že v čase zostavovania tlačiarne bola táto hlava stále vo verzii beta, takže je vývoj nebol ukončený a jej konštrukcia mohla obsahovať nedostatky, pri jej zostavovaní sa žiadne problémy neukázali.

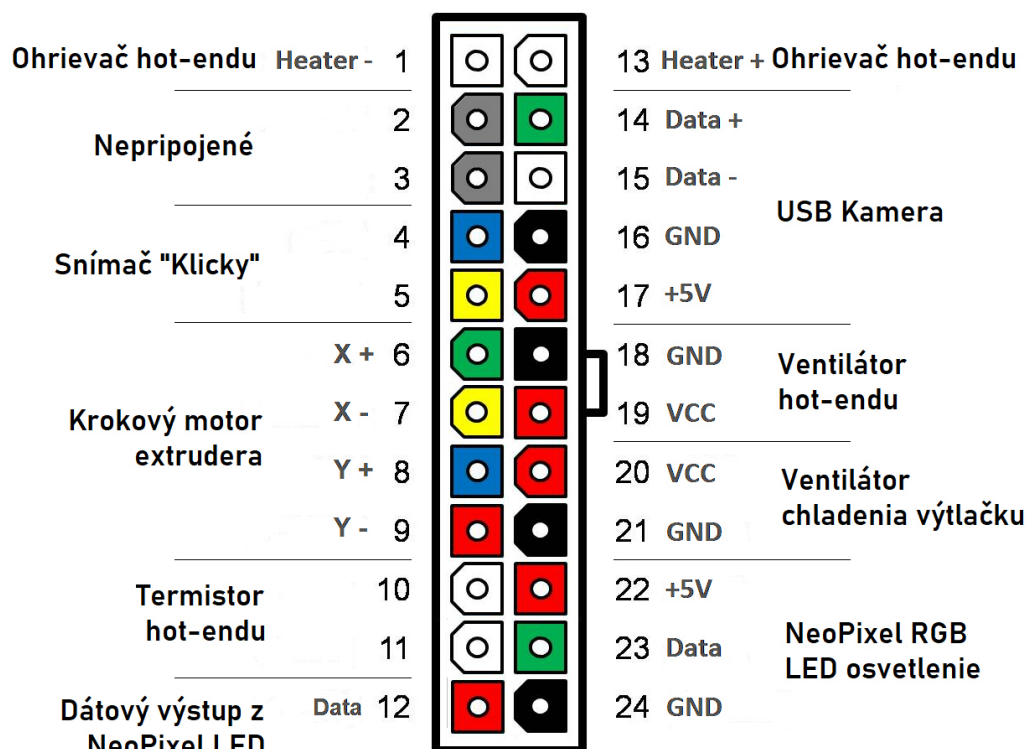
Zvolená tlačová hlava je zostavená z plastových dielov vytlačených na 3D tlačiarňi z materiálov Innovatefil TPU Black a Fiberology Nylon PA12 Blue v čiernej a modrej farbe. Nachádza sa v nej extruder ClockWork 2 obsahujúci krokový motor „Pancake“ NEMA14, tri RGBW LED moduly, radiálny 24V ventilátor typu 5015 určený pre chladenie tlačeneho predmetu, axiálny ventilátor 4010 vytvárajúci prietok vzduchu cez rebrovanie chladiča hot-endu a samotný hot-end. Stealthburner podporuje široký výber modelov hot-endu. Vybraný bol Dragonfly BMS od firmy Phaetus, pretože z podporovaných modelov má pomerne nízku hmotnosť, priaznivý pomer ceny a kvality a je kompatibilný so štandardnými tryskami so závitom M6.

Zostavovanie tlačovej hlavy začalo dôkladnou kontrolou kvality a presnosti jednotlivých dielov. Následne boli do príslušných otvorov zatavené mosadzné matice veľkosti M3, osadené moduly RGBW LED navzájom prepojené trojžilovým plochým káblom a oba ventilátory zasadené do príslušných otvorov. Na ložiská koľajníc osi X bol priskrutkovaný plastový vozík tlačovej hlavy. Hot-end bol osadený do plastového modulu, ktorý bol následne spojený spolu s ostatnými dielmi a vozíkom skrutkami veľkosti M3.



Obrázok 5.6 Zostavená tlačová hlava Voron Stealthburner

Kabeláž všetkých elektronických prvkov tlačovej hlavy bola vyvedená do spoločného zásuvkového konektora typu Molex MicroFit 3.0 s 24 pozlátenými kontaktmi, ktorý bol zasunutý do zástrčkového konektora rovnakého typu. Tento zástrčkový konektor bol vsadený do plastového držiaku vymodelovaného na mieru pre tento účel.



Obrázok 5.7 Náskres zapojenia konektora tlačovej hlavy

5.4 Modifikácie tlačiarne

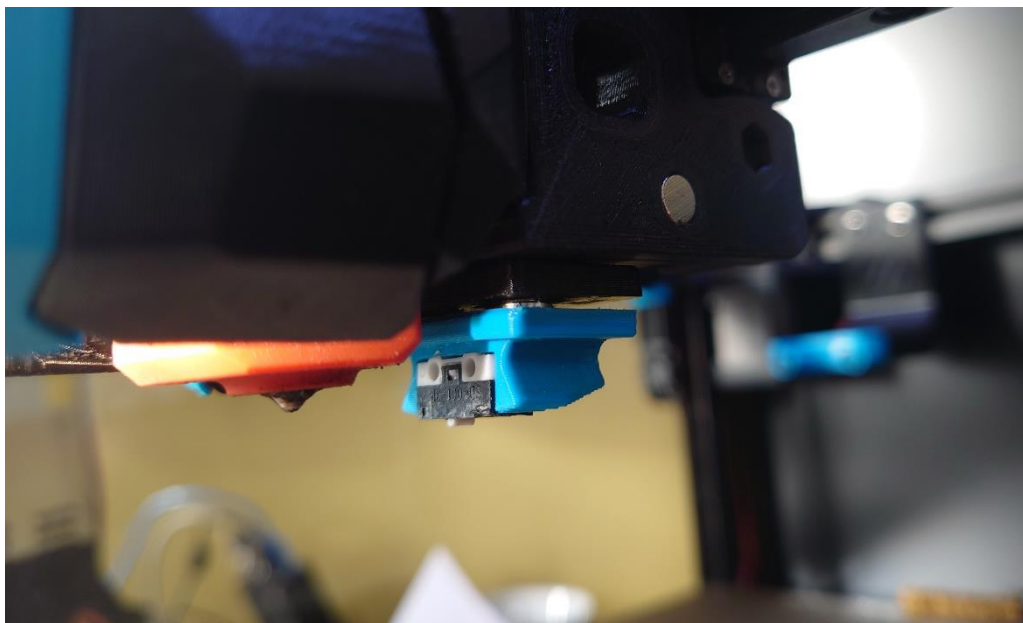
Cieľom modifikácii bolo zlepšenie parametrov a vlastností, respektíve pridanie nových funkcií tlačiarne, zameraných na zvýšenie komfortu pri obsluhu, presnosti rozmerov hotového výtlačku a bezpečnosti.

5.4.1 Sonda Klicky

Nevýhodou pôvodného návrhu projektu Voron 2.4 bolo použitie indukčnej sondy PL-08N2 slúžiacej na snímanie vzdialenosti tlačovej hlavy od rôznych bodov na tlačovej podložke s cieľom paralelného vyrovnania roviny XY voči podložke. Veľkou nevýhodou tejto sondy bola jej presnosť, kedy tolerancia snímanej vzdialenosti činila približne $\pm 10\%$ [27] pre väčšinu kompatibilných modelov od rôznych výrobcov. Nedostatkom bola aj jej životnosť, pretože sa v blízkosti hot-endu prehrievala, čím sa zhoršovala jej presnosť až do úplného znefunkčnenia.

Preto bola pri stavbe tlačiarne použitá sonda Klicky. Jedná sa o komunitný projekt vytvorený pre tlačiarne série Voron, ktorý pre snímanie využíva mikropsínač typu D2F s presnosťou $\pm 5,45\%$ [28]. Snímacia časť sondy obsahujúca tento mikropsínač je

pripevnená na tlačovej hlave pomocou trojice magnetov a je ho možné z tlačovej hlavy odobrať. Snímač totiž presahuje svojou výškou tlačovú trysku, preto je ho pred tlačou potrebné z hlavy odobrať. To je vykonané automaticky, kedy tlačová hlava zájde do ľavého zadného rohu tlačiarne, kde sa snímač pripne do statického držiaku pripevneného na ráme portálu osí XY a tým sa odoberie z tlačovej hlavy. Pri potrebe vyrovnaní portálu voči tlačovej podložke prejde tlačová hlava k tomuto statickému držiaku obsahujúceho snímač, pomocou magnetov ho z držiaku odoberie a môže začať proces kalibrácie.



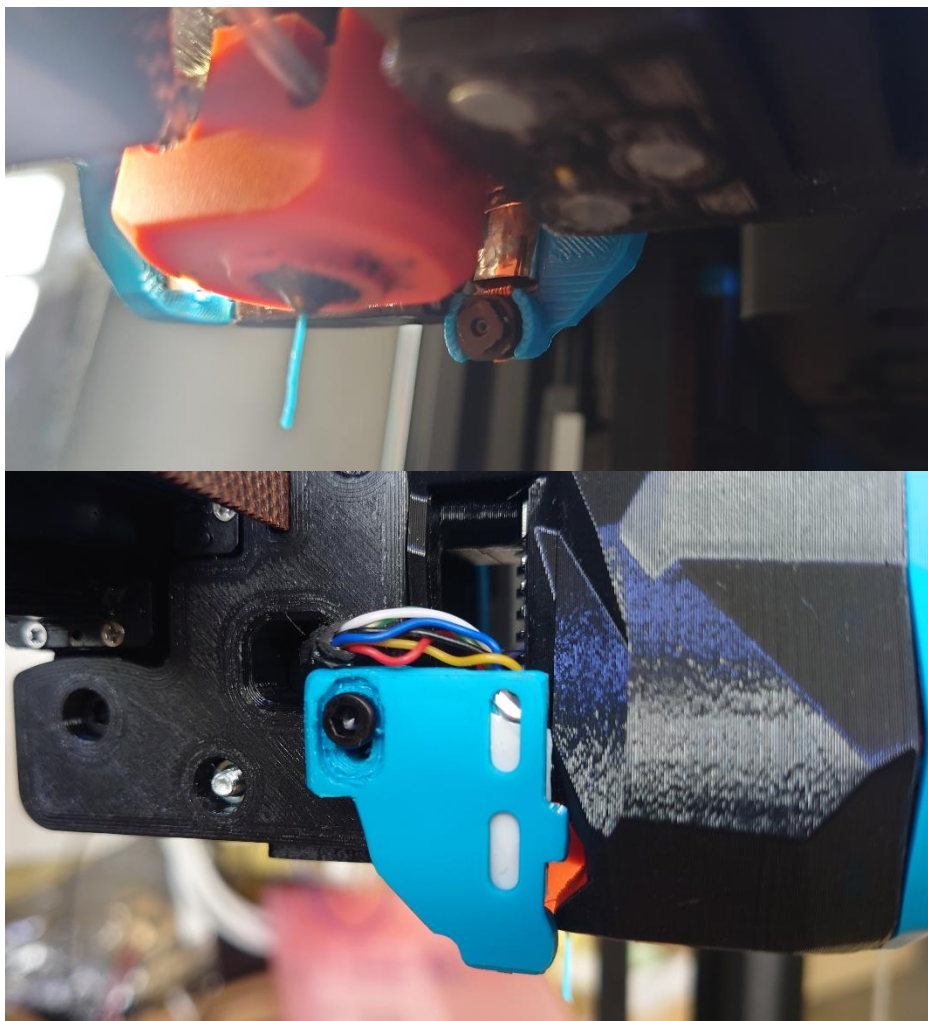
Obrázok 5.8 Snímač Klicky pripevnený na spodnej strane tlačovej hlavy

5.4.2 Kameraný systém

Pre pohodlnejšiu obsluhu tlačiarne a zvýšenie bezpečnosti boli v tlačiarňi inštalované dve kamery. Vrchný pohľad na celú tlačovú plochu poskytuje web-kamera s maximálnym rozlíšením 1600x1200 px a USB pripojením. Pripevnená je pomocou plastového držiaku vlastného návrhu s otočným kĺbom na prednom vrchnom hliníkovom profile konštrukcie tlačiarne.

Detailný pohľad na trysku tlačovej hlavy a práve tlačенú vrstvu výtlaku zabezpečuje mini-kamera v podobe endoskopu s priemerom 5 mm, ktorý bol pre tento účel rozobraný. Využitá časť endoskopu – kamerový snímač a ohybná DPS s procesorom boli pripevnené na tlačovú hlavu v blízkosti tlačovej trysky pomocou plastového držiaku vlastného návrhu. Táto kamera je pripojená k jednodoskovému počítaču Raspberry Pi pomocou USB, avšak z dôvodu rušenia dátového prenosu pri pohybe motorov osí bol dátový kábel

v celej dĺžke obalený hliníkovou fóliou, rovnako ako ohybná DPS kamery. Objektív snímača kamery bol manuálne zaostrený na vzdialenosť špičky tlačovej trysky.



Obrázok 5.9 Kamera trysky tlačovej hlavy

5.4.3 Snímač struny filamentu

V ceste tlačovej struny bol zavedený mechanický snímač, ktorého úlohou je pozastaviť tlač v prípade jej minútia počas tlače. Snímač je umiestnený v upravenom plastovom kryte zadného výfukového filtra.

5.4.4 Čistič tlačovej trysky

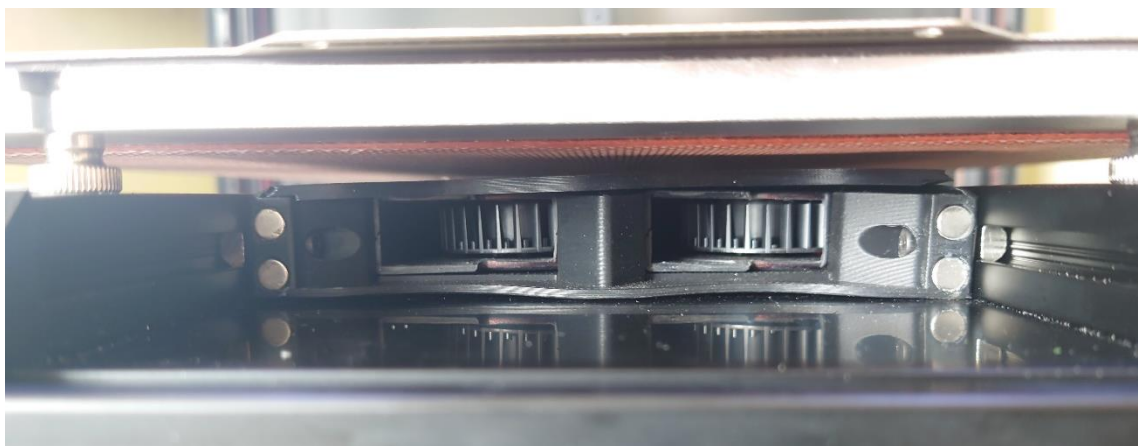
Pri zahájení tlače a zahriatí trysky je gravitáciou a teplotnou rozťažnosťou vytláčané malé množstvo tlačového materiálu, ktorý môže spôsobiť nepresnosť pri pohybe osi Z do domovskej pozície, prípadne zanechať prebytočný materiál vo výtlačku. To je ošetrované

mosadznou kefkou umiestnenou vedľa tlačovej podložky, cez ktorú pred zahájením každej tlače prejde tryska tlačovej hlavy a tým sa očistí.

5.4.5 Systém filtrovania vzduchu

Zdraviu škodlivé zložky unikajúce do ovzdušia pri tlači určitých typov materiálov sú pri prevádzke tlačiarne nežiadúce a bolo potrebné čo najlepšie obmedziť ich únik z uzavretej komory tlačiarne do priestoru. Z toho dôvodu bol použitý aktívny uhlík, schopný zachytiť častice o veľkosti 0,5 nm alebo menšej [29], ktoré vylučujú niektoré typy tlačových materiálov pri zahrievaní na vyššie teploty.

Filtrácia celého objemu vzduchu v uzavretej tlačiarňi počas tlače prebieha v recirkulačnom filtri Nevermore, nachádzajúcom sa pod tlačovou podložkou. Obsahuje dva radiálne ventilátory veľkosti 50 x 15 mm s nominálnym napájacím napätím 12 V, ktoré zaisťujú stály prietok vzduchu cez zásobník s uhlíkovými peletami počas celého priebehu tlače. Všetky plastové časti filtra boli vytlačené z materiálu Innovatefil TPU Black. Zásobník s uhlíkom je pripevnený pomocou ôsmich magnetov s rozmermi 6 x 3 mm zaisťujúce jednoduché odobratie zásobníka a výmenu uhlíka.

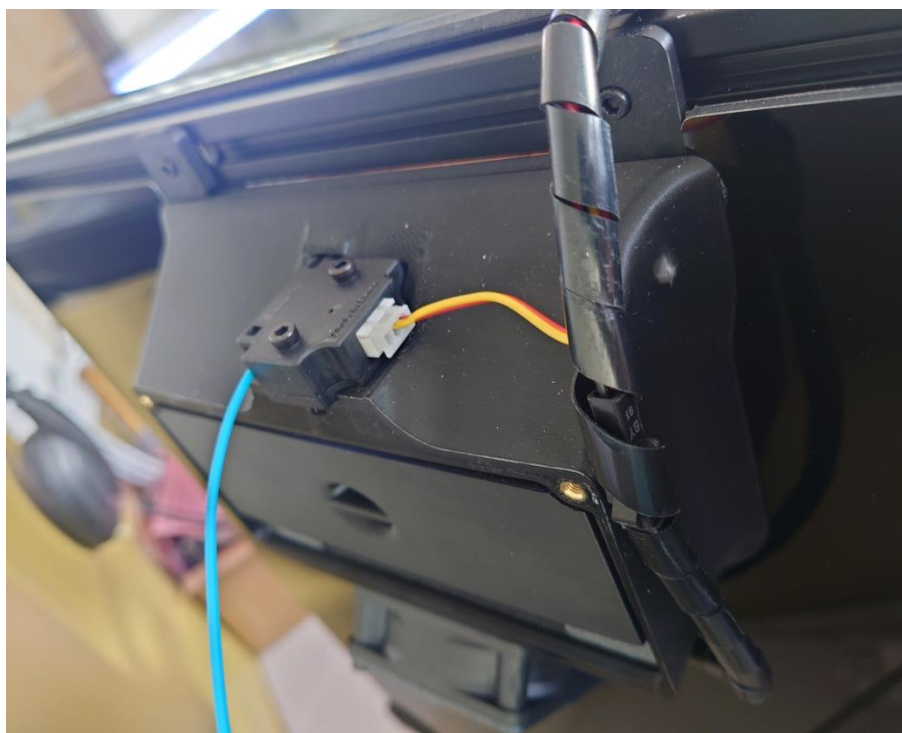


Obrázok 5.10 Ventilátory filtra Nevermore umiestnené pod tlačovou podložkou

Po dokončení tlače je obehový filter Nevermore vypnutý. Obsah vzduchu v komore tlačiarne je z nej vypustený von ventilátorom s rozmermi 40 x 10 mm nachádzajúcim sa v zadnej časti tlačiarne. Pripevnený je na kryte výpustného filtra, ktorý obsahuje ďalší zásobník s uhlíkovými peletami spolu s filtrom HEPA.



Obrázok 5.11 Zásobníky vzduchových filtrov naplnené uhlíkovými peletami



Obrázok 5.12 Výstupný filter vzduchu so snímačom tlačovej struny

6. KALIBRÁCIA A TEST

Po dokončení montáže konštrukcie tlačiarne, zapojenia kabeláže, nahratia firmvéru do riadiacej dosky a operačného systému jednodoskového počítača prebehlo prvotné zapnutie a overenie správnosti funkcií tlačiarne. Riadenie a zmena konfigurácie tlačiarne prebiehala cez grafické rozhranie Mainsail.

6.1 Kontrola zapojenia a základných funkcií tlačiarne

Najprv bola overená funkčnosť a správnosť zapojenia výhrevu hot-endu a tlačovej podložky. V grafickom prostredí Mainsail boli nastavené teploty oboch vyhrievačov na 50 °C. Krivky oboch teplôt snímaných termistormi boli pozorované v živom grafe a po určitom čase dosiahli nastavené teploty. Tým bola overená správnosť zapojenia vyhrievačov a termistorov, korektné zadefinovanie príslušných výstupov mikrokontroléra riadiacej dosky a typu termistorov v konfiguračnom súbore *printer.cfg*.

Následne bol vykonaný príkaz *STEPPER_BUZZ* definovaný postupne pre každý krokový motor. Týmto príkazom boli postupne rozhýbané jednotlivé motory o 1 mm v kladnom smere osi a následne o 1 mm v zápornom smere, čím bola overená správnosť zapojenia motorov a definícia typu driverov motorov, príslušných dátových výstupov mikrokontroléra riadiacej dosky, počtu krokov motora a smeru otáčania v konfiguračnom súbore *printer.cfg*.

Kontrola správnosti konfigurácie a zapojenia koncových spínačov osí bola vykonaná príkazom *QUERY_ENDSTOPS* a ručným stláčaním jednotlivých spínačov, kedy sa v termináli zobrazoval ich stav zopnutia. Nasledovalo presunutie osí X a Y do domovskej pozície pomocou príkazu *G28 X*, respektíve *G28 Y*. Pre zistenie polohy koncového spínača osi Z boli osi X a Y pomocou tlačidiel pre manuálny pohyb osí v grafickom rozhraní Mainsail presunuté do polohy, kedy sa tryska tlačovej hlavy nachádzala priamo nad koncovým spínačom osi Z. Bol vykonaný príkaz *M114*, pomocou ktorého boli získané údaje o aktuálnej pozícii osí X a Y. Tie boli následne zadefinované v časti *[safe_z_home]* v konfigurácii tlačiarne. Po uložení konfigurácie a vykonaní reštartu systému boli všetky osi presunuté do domovskej pozície.

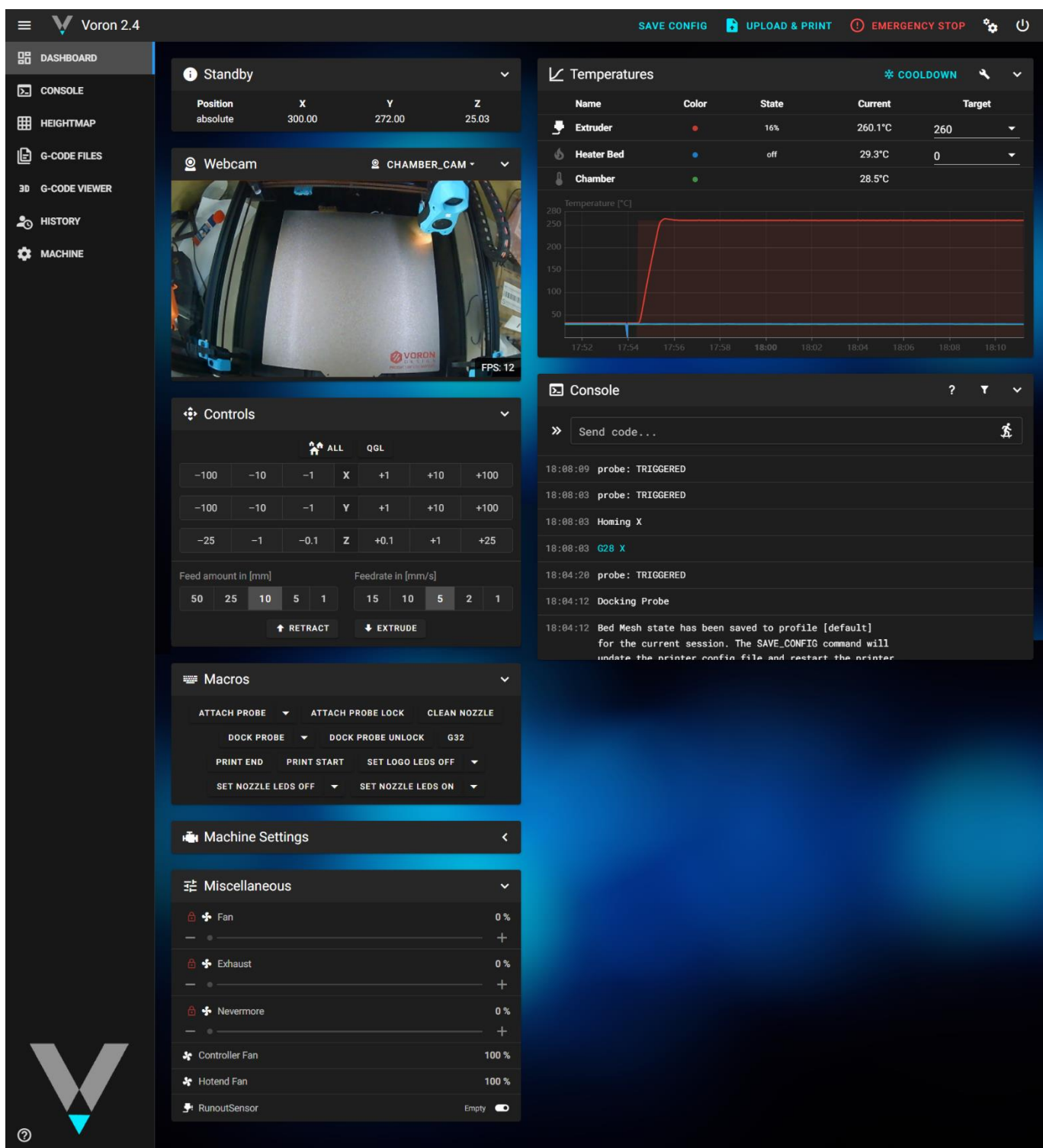
V konfiguračnom súbore *klicky_variables.cfg* boli zadefinované súradnice statického držiaku sondy Klicky získané rovnakým spôsobom ako pri zisťovaní pozície koncového spínača osi Z. Príkazom *QUERY_PROBE* bola overená správnosť zapojenia sondy Klicky a príkazom *PROBE_ACCURACY* overená jej presnosť detekcie výšky tlačovej podložky.

Príkazom *PID_CALIBRATE* bola nastavená presnosť zahrievania tlačovej podložky a hot-endu s cieľom čo najpresnejšieho udržiavania požadovanej teploty po jej dosiahnutí. Nastavenie bolo vykonané pre teplotu podložky 100 °C a hot-endu pri teplote 245 °C, s rýchlosťou ventilátora chladenia výtlaku nastavenou na 25 %. Príkazom *SAVE_CONFIG* bola táto konfigurácia uložená a systém bol reštartovaný.

Vyrovnanie roviny XY voči tlačovej podložke bolo vykonané príkazom *QUAD_GANTRY_LEVELING*, kedy bola pomocou sondy Klicky detegovaná výška každého rohu tlačovej podložky, podľa ktorej bola rovina XY vyrovnaná paralelne s podložkou.

Rozdiel medzi výškou koncového spínača osi Z a povrchu tlačovej podložky bol nastavený príkazom *Z_ENDSTOP_CALIBRATE* pomalým približovaním tlačovej hlavy k podložke príkazom *TESTZ*, až dokiaľ sa tryska hot-endu nedotkla papiera položeného na podložke a pri posúvaní papiera nevytvárala jemný mechanický odpor. Nastavenie bolo potvrdené príkazom *ACCEPT* a uložené pomocou *SAVE_CONFIG*.

Kalibrácia krokov motora extrudera bola vykonaná vytlačením tlačovej struny so zaznačenou dĺžkou 150 mm od vstupného otvoru tlačovej hlavy. Bol zadáný príkaz na extrudovanie 100mm filamentu. Rozdiel vzdialenosti medzi vstupným otvorom tlačovej hlavy a značkou filamentu bol zmeraný a definovaný v konfigurácii tlačiarne tak, aby kroky motora súhlasili s dĺžkou extrudovaného materiálu.



Obrázok 6.1 Grafické rozhranie Mainsail

6.2 Ladenie tlače

Cieľom ladenia funkcie a konštrukcie tlačiarne bolo dosiahnutie čo najvyššej rýchlosti a kvality tlače pri zachovaní a prípadnom zlepšení jej spoľahlivosti a výdrže.

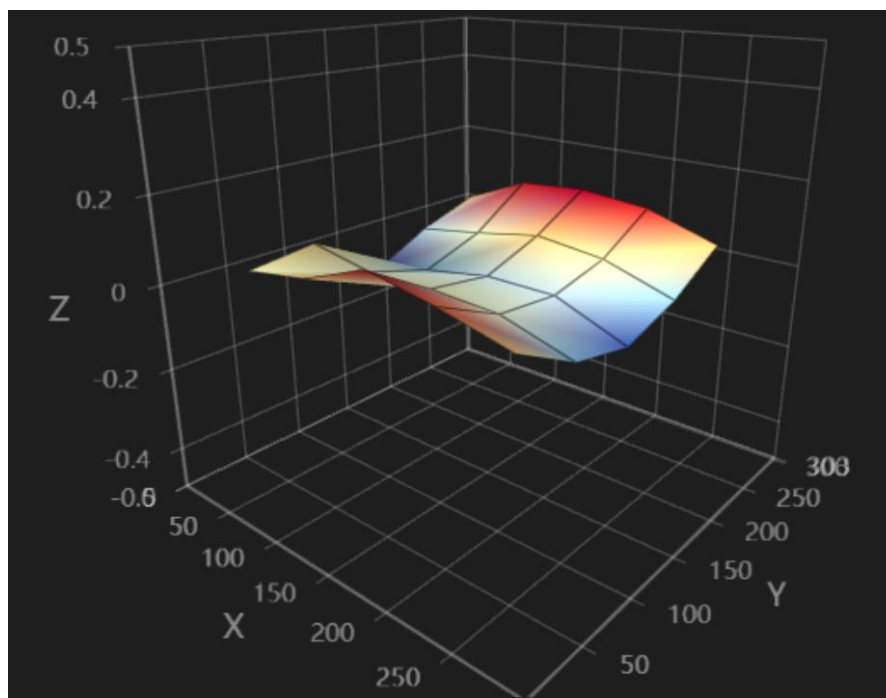
6.2.1 Napínanie remeňov

Remene sústavy osí X a Y boli napínané postupom uvedeným na webovej stránke projektu Voron [30]. Tlačová hlava bola posunutá v osi Y tak, aby hliníkový profil osi X bol vzdialený od predných koncov profilov osi Y presne 150 mm. Oba remene boli v tejto časti použité ako struny hudobného nástroja, rozkmitávané holým prstom. Pomocou smartfónu s nainštalovanou príslušnou aplikáciou bolo merané zvukové spektrum a pnutie oboch remeňov postupne nastavované skrutkami tak, aby vydávali frekvenciu približne 110 Hz.

Pnutie remeňov osí Z bolo nastavované pomocou skrutiek plastových držiakov kladiek vo vrchných rohoch tlačiarne. Ladenie prebiehalo iba za pomoci dotyku prstom tak, aby mali všetky štyri remene na dotyk približne rovnakú tuhosť.

6.2.2 Výšková sieť tlačovej podložky

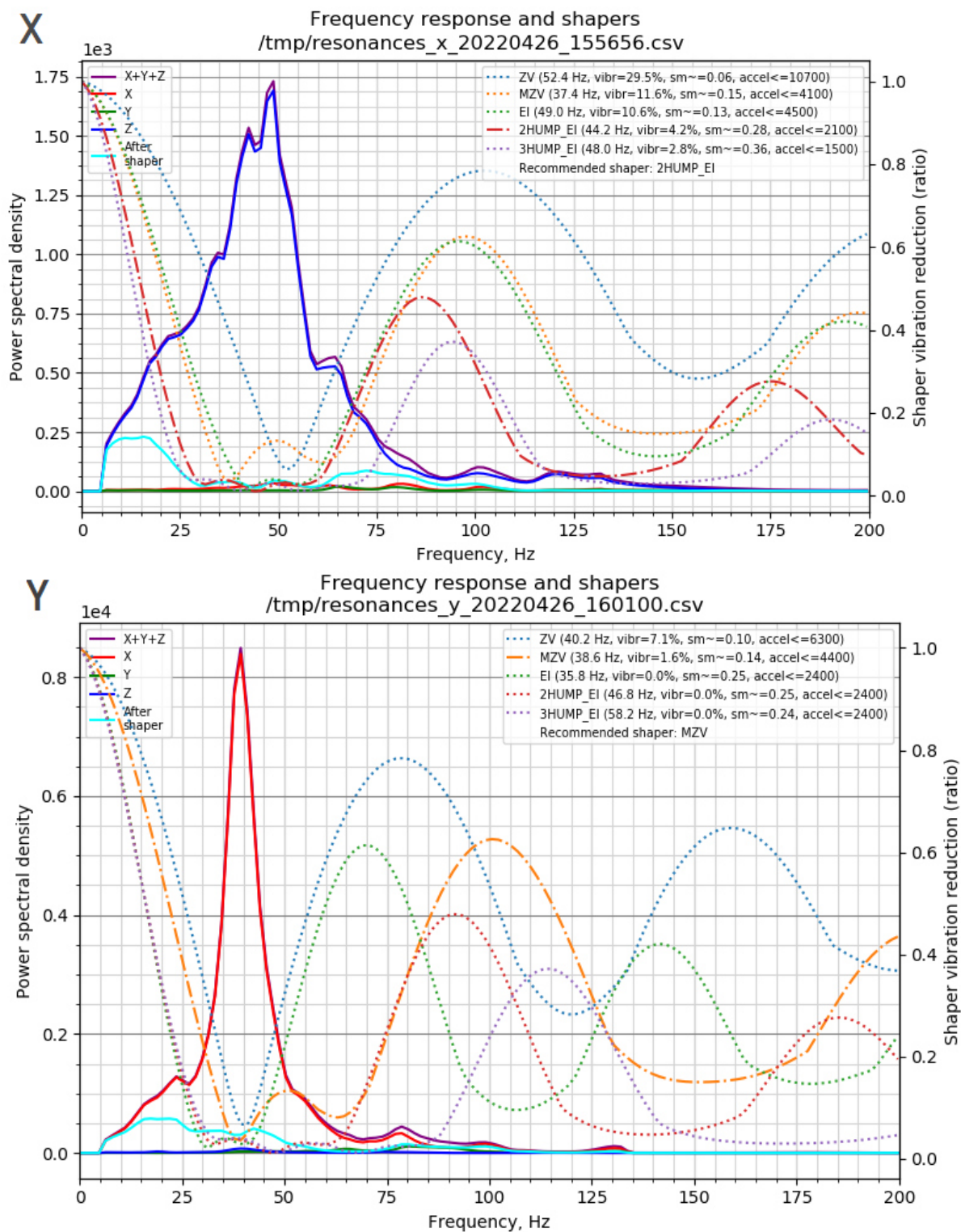
Zakrivenie a nerovnosti povrchu tlačovej podložky zmerané a graficky znázornené pomocou príkazu *BED_MESH_CALIBRATE*. Tlačiareň vykonala rovnaký proces ako pri nastavovaní paralelnosti tlačovej podložky a roviny XY pomocou snímača Klicky, avšak so snímaním viacerých bodov, rovnomerne rozložených na celej ploche tlačovej podložky. V konfiguračnom súbore bola nastavená sieť testovacích bodov o počte 5 x 5. Výsledkom bolo trojrozmerné grafické zobrazenie predstavujúce zakrivenie povrchu tlačovej podložky voči portálu osí X a Y, avšak zahŕňajúce aj zakrivenie samotného portálu a presnosť snímača Klicky. Rozdiel medzi najvyšším a najnižším bodom tlačovej plochy činil 0,15 mm.



Obrázok 6.2 Graficky znázornená výšková sieť tlačovej podložky

6.2.3 Eliminácia nežiadúcich zvlnení stien výtlačku – „ghosting / ringing“

Pri vyšších rýchlostiach tlače sa v okolí ostrých hrán výtlačkov zvyčajne objavujú opakované vlnenia podobného tvaru ako blízka ostrá hrana. To je možné čiastočne eliminovať procesom „input shaping“. Táto metóda vytvára veľmi malé pohyby osí X a Y v protismere rezonancie konštrukcie tlačiarne spôsobenej pri náhlej zmene smeru pohybu osí, čím tieto nežiadúce zákmity čiastočne potlačí. Táto metóda využíva pre detekciu rezonancie osí akcelerometer ADXL345 pevne prichytený na tlačovej hlave. Napájanie a sériová dátová zbernica bola pripojená k príslušným výstupom počítača Raspberry Pi, na ktorom boli nainštalované prídavné softvérové prvky „numpy“ a „matplotlib“. Následne bol procesor počítača Raspberry Pi definovaný vo firmvéri Klipper a v konfiguračnom súbore tlačiarne ako sekundárny mikrokontrolér riadiacej jednotky, čo mu umožnilo komunikáciu s pripojeným akcelerometrom. Po reštarte systému bola príkazom `ACCELEROMETER_QUERY` overená funkčnosť pripojeného akcelerometra a v konfiguračnom súbore tlačiarne nastavená maximálna akcelerácia krokových motorov na 10000 mm/s. Test rezonančných frekvencií bol spustený príkazom `TEST_RESONANCES` pre obe osi individuálne, čím boli postupne rozkmitávané v rozsahu od 0 až 200 Hz. Výsledkom testu bol vygenerovaný graf závislosti výkonovej spektrálnej hustoty na frekvencii pre obe osi X a Y individuálne, z ktorých boli odčítané hodnoty frekvencie špičiek a k nim príslušné typy softvérového tvarovača. Tie boli následne zadefinované v konfiguračnom súbore tlačiarne `printer.cfg`. Tlačiareň tak dokáže vykonávať najpresnejšie pohyby pri akcelerácii nastavenej na 4000 mm/s.



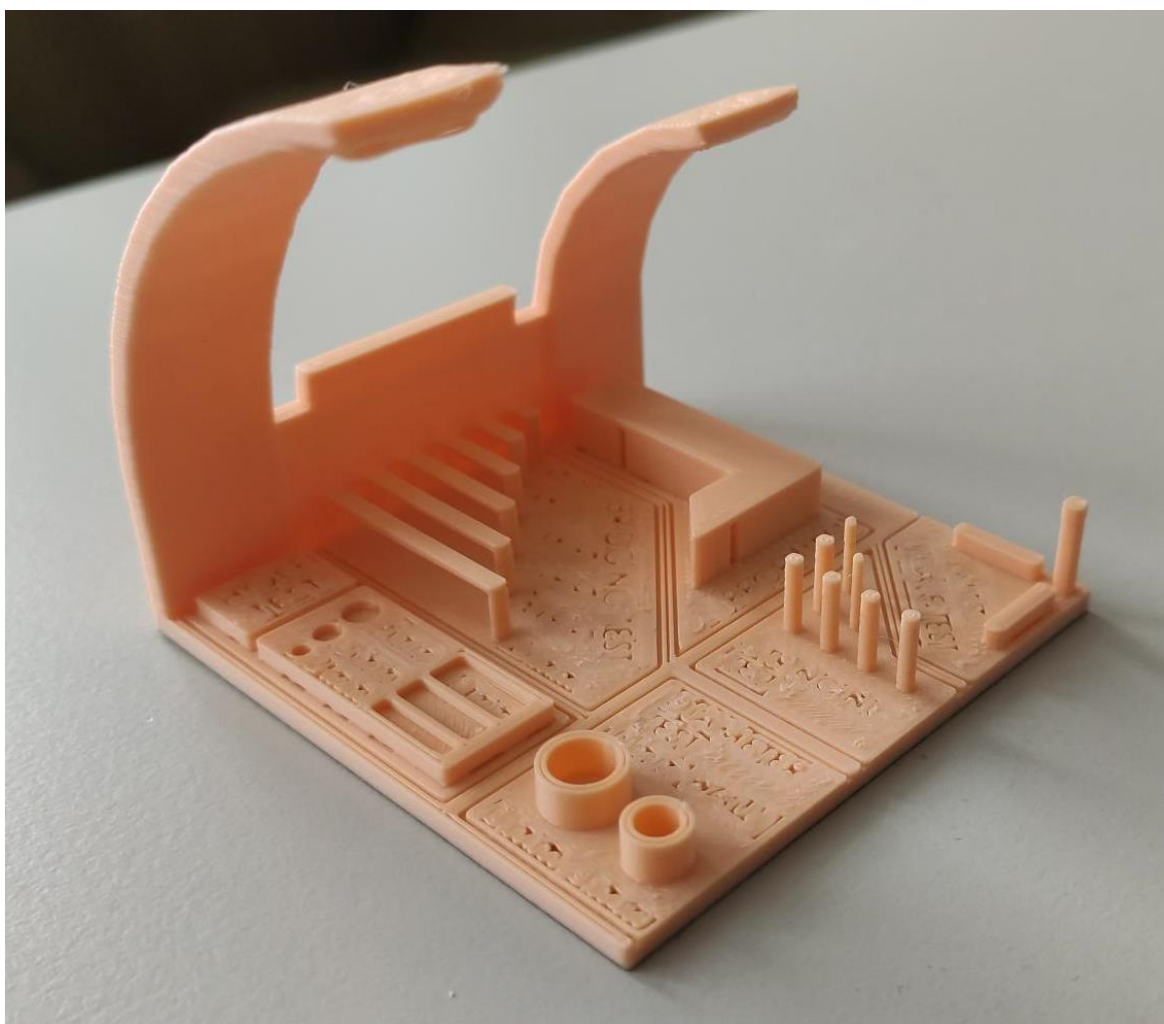
Obrázok 6.3 Závislosť výkonovej spektrálnej hustoty na frekvencii osí X a Y

6.2.4 Testovanie tlače

Kvalita tlače bola testovaná pri rýchlosti pohybu 120 mm/s s použitím tlačového materiálu typu PLA rôznych farieb a výrobcov. Prvotný výtlačok bol model testovacej kocky, tlačený ešte pred nastavovaním eliminácie tieňových zvlnení a ďalšími menšími úpravami nastavenia konfigurácie tlačiarne a sliceru. Všetky modely boli spracovávané slicerom Cura vo verzii 4.13. Po vykonaní eliminácie tieňového zvlnenia a spomínaných menších úprav ladených pomocou rôznych testovacích výtlačkov bol vytlačený rovnaký model kalibračnej kocky, ktorý vykazoval na pohľad ostrejšie hrany, hladšie steny a nebolo viditeľné takmer žiadne zvlnenie povrchu v blízkosti ostrých hrán. Odstránené boli aj náhodné diery o veľkosti desiatín milimetra, pravdepodobne spôsobené nesprávnou teplotou hot-endu, prípadne príliš vysokou vlhkosťou tlačového filamentu. Testované boli aj modely obsahujúce prevísajúce časti tlačené bez podpornej štruktúry, kde bola dosiahnutá vyhovujúca kvalita previsu s uhlom až do približne 80 °. Neskôr boli testované aj iné materiály, akými sú napríklad Innovatefil TPU Black, Fiberology Nylon PA12 Blue alebo ASA Filament PM Black, z ktorého boli vytlačené úchyty priehľadných akrylových panelov konštrukcie tlačiarne.



Obrázok 6.4 Prvé testovacie výtlačky



Obrázok 6.5 Výtlačok testovacieho modelu „3D Printer Test“

7. ZÁVĚR

Cieľom tejto práce bolo teoreticky vyhodnotiť rozdiely a vlastnosti rôznych spôsobov 3D tlače, bližšie rozobrať problematiku FDM 3D tlačiarň a ich základných komponentov a navrhnúť, zostaviť a otestovať riešenie FDM 3D tlačiarne typu CoreXY.

Z prieskumu mnohých tlačových riešení typu CoreXY dostupných na trhu boli vybrané dve dvojice modelov 3D tlačiarň z dvoch rôznych cenových kategórií spĺňajúce aspoň väčšinu stanovených požiadaviek o kvalite, cene a modifikovateľnosti. Z tejto štvorice bol vybraný open-source projekt Voron 2.4, ktorý ponúka najlepší pomer ceny a kvality a je vysoko konfigurovateľný a modifikovateľný.

Základ tlačiarne Voron 2.4 bol zostavený z komponentov odporúčaných v dokumentácii tohto projektu. Tlačová hlava, riadiaca doska a snímač výšky tlačovej podložky boli pri návrhu zoznamu komponentov zamenené za vyhovujúcejšie riešenia. Pridané boli rôzne modifikácie tlačiarne zlepšujúce jej spoľahlivosť, rýchlosť, kvalitu, bezpečnosť a zjednodušujúce obsluhu tlače. Vykonané bolo prvotné spustenie tlačiarne, softvérové nastavenie konfigurácie a kalibrácia. Zakrivenie tlačovej podložky činilo rozdiel 0,15 mm medzi najvyšším a najnižším bodom. Maximálna akcelerácia pohybu osí X a Y nastavená na 4000 mm/s vykazovala najlepšie výsledky vzhľadom vytlačených modelov. Vyhovujúca kvalita výtlačkov bola dosahovaná pri rýchlosti tlače 120 mm/s, avšak vyššie rýchlosti testované neboli.

Zvýšenie rýchlosti tlače a aj akcelerácie osi Y by bolo dosiahnuté zamenou hliníkového profilu osi X za odľahčený profil z uhlíkových vlákien a odstránením jednej lineárnej koľajnice osi X. Bezpečnosť a komfort manipulácie s tlačiarňou by mohla byť zvýšená pridaním zapínacieho tlačidla na predný panel tlačiarne a integrovaním softvérovo ovládaného relé, ktorým by bolo umožnené spínať napájanie na diaľku.

Zostavený model FDM tlačiarne Voron 2.4 ponúka vysokú kvalitu a rýchlosť tlače pri potrebe minimálnej údržby a priebežnej kalibrácie. Výberom primeranej kvality komponentov pri zostavovaní zoznamu súčiastok bola dosiahnutá aj jej vysoká spoľahlivosť s výslednou cenou 38212,74 CZK, ktorá je porovnateľná s cenami bežne ponúkaných stavebníc tohto modelu tlačiarne neobsahujúcich modifikácie použité v tomto projekte. Ovládanie a monitorovanie je možné na externom počítači cez webové rozhranie, prípadne po nainštalovaní príslušného rozšírenia sliceru Cura. Základné monitorovanie a ovládanie taktiež umožňuje LCD displej umiestnený na prednom paneli tlačiarne.

Nevýhodou tohto projektu je zabezpečenie softvérového rozhrania Mainsail, ktoré neumožňuje vytvorenie užívateľského účtu a pre ochranu proti pripojeniu nežiadúcich

zariadení používa zoznam IP adries s povoleným pripojením. To spôsobuje problémy pri snahe pripojenia sa cez sieť WiFi, prípadne z vonkajších sietí MAN a WAN. Rozhranie Mainsail taktiež neumožňuje otočenie individuálnych náhľadov kamier o 90°.

LITERATURA

- [1] *When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing*. BCN3D [online]. May 15, 2020 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [2] About RepRap. *RepRap* [online]. 2020, 6 Jún 2020 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/about>
- [3] *Základy 3D tisku* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-10-27]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [4] Temperatures inside the hotend. *Filament2print* [online]. 2020 [cit. 2021-10-27]. Dostupné z: https://filament2print.com/gb/blog/94_bowden-direct-extrusion.html
- [5] What is SLS 3D printing. *Sinerit* [online]. Kraków [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://www.sinterit.com/what-is-sls-3d-printing/>
- [6] O'CONNELL, Jackson. The Types of FDM 3D Printers (Cartesian, CoreXY & More). *A Whole New FDM World* [online]. 2020, Oct 4, 2020 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
- [7] Theory: Principle of Operation. *CoreXZ* [online]. 2018 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.corexz.com/theory.html>
- [8] O'CONNELL, Jackson. SCARA 3D Printer: All You Need to Know: SCARA Leaves a Mark. *ALL3DP* [online]. May 17, 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/scara-3d-printer-guide/>
- [9] Delta Scara - 3D printer design. *RepRap* [online]. June 26, 2014 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: https://reprap.org/forum/file.php?185,file=35567,filename=Delta_Scara_011.JPG
- [10] Diagram displaying the X, Y, and Z axis of a 3D printer. *Prototype Hubs* [online]. 2019, September 2, 2019 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://prototypehubs.com/3d-printed-lithophanes/>
- [11] LÜTKEMEYER, Martin. Belt 3D Printer: How it Works, Examples, Pros & Cons. *The 3D Printer Bee* [online]. [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://the3dprinterbee.com/belt-3d-printer/>
- [12] WU, Naomi. *Sneak Peek: The 3DPrintMill, Infinite-Z, Belt 3D Printer- Now on Kickstarter!* [online]. 9.9.2020 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=1UwaWLnGmXk>
- [13] Blackbelt 3D Printer: The first prototype. *ColorFabb* [online]. May 30, 2017 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://learn.colorfabb.com/blackbelt/>
- [14] VASQUEZ, Joshua. CoreXY: The Two-Axis Gantry–Part 2. *Double Jump Electric* [online]. 2016 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: http://www.doublejumpelectric.com/projects/core_xy/2014-07-15-core_xy/
- [15] GRAMES, Emmett. CoreXY 3D Printer Design:: Why It Makes a Difference. *All3Dp* [online]. Sep 15, 2021 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/corexy-3d-printer-is-it-worth-buying/>

- [16] HOGE, Greg. *COREXY GANTRY SYSTEM* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://greghoge.com/portfolio/large-format-3d-printer/corexy-gantry-system/>
- [17] The Top 6 Best CoreXY 3D Printers of 2021. *3Dsourced* [online]. 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printers/corexy-3d-printer/>
- [18] *Two Trees Sapphire Pro* [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://imgaz1.staticbg.com/thumb/large/oaupload/banggood/images/7D/12/61eee4ed-6058-45fc-92c7-fc942ed520f6.jpg.webp>
- [19] GEHRKE, Florian. Hard CoreXY: Tronxy X5SA Review: With Kit and Caboodle. *ALL3DP* [online]. Dec 11, 2020 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/2020-tronxy-x5sa-3d-printer-review-the-specs/>
- [20] czTRONXY® X5SA- PRO CoreXY Desktop DIY 3D Printer Kit. *Nakupyzciny* [online]. 4. októbra 2020 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://nakupyzciny.sk/%F0%9F%87%A8%F0%9F%87%BFtronxy-x5sa-pro-corexy-desktop-diy-3d-printer-kit/>
- [21] Rat Rig V-Core 3 - Default configuration. *RatRig* [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.ratrig.com/3d-printing-cnc/3d-printer-kits/complete-kits/v-core3default.html>
- [22] Rat Rig V-Core 3 Announcement - The ultimate DIY CoreXY 3D Printer Kit. In: *Rat Rig* [online]. 22.12.2020 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qGgb42c2IBg>
- [23] Voron 2.4 CoreXY 3D Printer Kit. *3DPrintersBay* [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.3dprintersbay.com/voron-2>
- [24] *SILERGY-SY8368AQQC: High Efficiency Fast Response 8A Continuous, 16A Peak, 28V Input Synchronous Step Down Regulator* [online]. (Rev. 0.9B) [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <http://www.hytic.net/upload/files/2016/11/SILERGY-SY8368AQQC.pdf>
- [25] *Voron Design: Octopus(Pro) Klipper Firmware* [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: https://docs.vorondesign.com/build/software/octopus_klipper.html
- [26] Raspberry Pi® 4 B 4 GB 4 x 1.5 GHz Raspberry Pi®. In: *Conrad* [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.conrad.sk/p/raspberry-pi-4-b-4-gb-4-x-15-ghz-raspberry-pi-2138865>
- [27] *Inductive Proximity Sensor/SwitchDatasheet: CJD-PL-08 Series Angular ColummType ProximitySensor* [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <http://www.cheemi-tech.com/pdf/Cheemi%20Inductive%20Proximity%20Sensor%20Series%20CJD-PL-08.pdf>
- [28] *D2F: Ultra Subminiature Basic Switch* [online]. Omron, 6 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-d2f.pdf

- [29] *Nevermore Activated Carbon Filters - Micro Edition* [online]. 25.4.2022 [cit. 2022-05-29]. Dostupné z:
https://github.com/nevermore3d/Nevermore_Micro#sourcing-the-proper-acid-free-carbon
- [30] Secondary Printer Tuning. *VoronDesign* [online]. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z:
https://docs.vorondesign.com/tuning/secondary_printer_tuning.html

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Skratky:

3D	Three-dimensional	Trojrozmerný
SLA	Stereolithography	Stereolitografia
SLS	Selective Laser Sintering	Selektívne laserové spekanie
FDM	Fused Deposition Modeling	Modelovanie nanášaním taveniny
CAD	Computer-Aided Design	Počítačovo vytvorený dizajn
UV	Ultra Violet	Ultrafialový
DLP	Direct Light Processing	Priame spracovanie svetla
LCD	Liquid Crystal Display	Displej z tekutých kryštálov
LED	Light Emitting Diode	Svetlo emitujúca dióda
	Selective Compliance Assembly Robot	Robotická ruka pre selektívne
SCARA	Arm	zostavovanie
PTFE	Polytetrafluoroethylene	Polytetrafluóretylén
USD	United States Dollar	Americký dolár
HEPA	high efficiency particulate arrestance	vysoko účinný filter vzduchových častíc
TPU	Thermoplastic polyurethane	Termoplastický polyuretán
ASA	Acrylonitrile styrene acrylate	akrylonitrilstyrén akrylát
USB	Universal serial bus	Univerzálny sériový port
RGB	Red green blue	Červená zelená modrá
RGBW	Red green blue white	Červená zelená modrá biela
SSR	Solid state relay	polovodičové relé
DFU	Device firmware upgrade	aktualizácia firmvéru zariadenia
NTC	Negative temperature coefficient	záporný teplotný koefecient
DPS		Doska plošných spojov
IP	Internet protocol	Internetový protokol
MAN	Metropolitan area network	Metropolitná sieť
WAN	Wide area network	Rozsiahla sieť

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - ZOZNAM SÚČIASTOK PRE VORON 2.4.....	57
PŘÍLOHA B - EXTERNÉ ODKAZY	60
PŘÍLOHA C - FOTOGRAFIE ZOSTAVENEJ 3D TLAČIARNE.....	61
PŘÍLOHA D - 3D MODELY VLASTNÝCH MODIFIKÁCIÍ A KONFIGURAČNÉ SÚBORY TLAČIARNE SÚ PRILOŽENÉ V .ZIP SÚBORE	

Příloha A - Zoznam súčiastok pre Voron 2.4

Kategória	Popis	Počet	cena s dopravou [CZK]
Spojovací materiál	M5x40 SHCS	22	1547,86
	M5x30 BHCS	22	
	M3x30 SHCS	25	
	M5x10 BHCS	40	
	M5x16 BHCS	27	
	M5 Hexnut	26	
	M5 T-nut HNTAJ5-5	61	
	M3 T-nut HNTAJ5-3	112	
	M3 Threaded Insert	90	
	M3x12 SHCS	23	
	M5 1mm Spacer	42	
	M2x10 Self-tapping Screw	15	
	M3x40 SHCS	28	
	M3 Washer	2	
	M3x20 SHCS	29	
	M3x16 SHCS	14	
	M3x8 SHCS	209	
	M3 Hexnut	7	
	M4 Knurled Nut (DIN 466-B)	4	
	M3 Hammer Head T-nuts	47	
	M4x6 BHCS	4	
	M3x6 BHCS	6	
Pohyb	GT2 20T Pulley (5mm ID 6mm W)	3	3245,27
	GT2 20T Toothed Idler (5mm ID 9mm W)	4	
	GT2 20T Toothed Idler (5mm ID 6mm W)	2	
	F695 Bearing	20	
	625 Bearing	12	
	5x60mm Shaft	4	
	GT2 16T Pulley (5mm ID 6mm W)	4	
	GT2 80T Pulley (5mm ID 6mm W)	4	
	GT2 20T Pulley (5mm ID 9mm W)	4	
	GT2 Belt Loop (6mm W) - 188mm	4	
	5x30mm Shaft	1	
	GT2 Open Belt LL-2GT-9 (9mm wide) - 1010mm	4	
	GT2 Open belt LL-2GT-6 (6mm wide) - 1800mm	2	
	Linear Rail MGN9H 350mm	8	5332,01
	Stealthburner Extruder Components Kit	1	555,40

Elektronika	NEMA17 Motor 17HS19-2004S	6	2313,63
	SPDT KW10 LIMIT Micro Switch	3	124,76
	Phaetus Dragonfly Hotend Kit (24V)	1	1297,92
	5015 Centrifugal Fan (24V)	1	42,73
	40x40x10 Axial Fan (24V)	1	51,00
	Mini 12864 Display	1	0,00
	Inlet Power Socket IEC320 C14	1	37,50
	60x60x20 Fan (24V)	3	156,00
	Octopus PRO V1.0 446	1	1285,33
	TMC2209 Stepper Motor Driver	6	587,69
	RaspberryPi 4	1	1608,00
	Mean Well LRS-350-24 PSU	1	1059,55
	KSD210AC8 SSR	1	342,09
	DIN Rail double terminal block WAGO862-504	2	206,52
	DIN Rail terminal block	2	111,82
	DIN Rail Mount Bracket MeanWell DRP-02	2	85,65
	Thermal Fuse (115C)	1	50,91
	NEMA14 LDO-36STH20-1004AHG "pancake motor"	1	639,72
	Endoscope camera 8 mm USB	1	333,27
	Web Camera 4K USB	1	205,16
	5015 Centrifugal Fan (12V) - Nevermore	2	508,32
	Filament sensor switch	1	0,00
	Microswitch - Klicky	1	0,00
	Addressable RGB LED strip 5V	1	0,00
Rám	Rubber Compressor Foot	4	124,76
	OpenBuilds Angle Corner Connector	4	89,46
	DIN 3 Rails (35mm W) - 420mm	2	60,56
	Mitsumi HFSB5-2020-380	1	3170,02
	Mitsumi HFSB5-2020-290	1	
	Mitsumi HFSB5-2020-400	2	
	Mitsumi HFSB5-2020-420-TPW	10	
	Mitsumi HFSB5-2020-480-LCP-RCP	4	
Rôzne	Nevermore Activated Carbon Pellets	1	330,94
	Loctite Blue Threadlocker	1	200,00
	Lithium Grease	1	0,00
	6x3mm Neodimium Magnet	24	140,80
	PTFE Tube (4mm OD 3mm ID) - 1m	1	0,00
	RaspberryPi 4 Case	1	243,92
	Brass brush	1	0,00
	Aluminium channel for LED strip 15x5 mm 1m	1	349,00

Kabeláž	Nylon Cable Ties 4"	40	0,00
	Silicone Cable 10 conductors VFL 10x0,35 (5m total)	1	301,55
	Tube Crimp Terminal 4mm ² x10mm	10	14,70
	Tube Crimp Terminal 2,5mm ² x10mm	10	11,40
	Tube Crimp Terminal 1,5mm ² x8mm	10	9,88
	Tube Crimp Terminal 0,75mm ² x8mm	10	9,88
	Tube Crimp Terminal 0,34mm ² x6mm	20	19,51
	Spade Crimp Terminal YF2-4	10	21,29
	Spade Crimp Terminal FLYF1-4	6	23,82
	Cable guide strip 40x60 mm	1	0,00
	10x10 Generic Cable Chain (355mm)	2	425,64
	10x15 Generic Cable Chain (495mm)	1	
Panely	Al kompozit - 420x420x4mm	2	2060,90
	Al kompozit - 434x454x4mm	1	
	Acrylic Sheet Clear - 217x454x2,5mm	2	1643,49
	Acrylic Sheet Clear - 434x454x2,5mm	2	
	Acrylic Sheet Clear - 434x434x2,5mm	1	
Tlačová podložka	3M 468MP Adhesive Sheet - 12"x12"	1	3126,20
	MIC6 5/16" Plate - 12"x12"	1	
	Keenovo Silicone AC Heater w/Thermistor - 250x250mm (450W)	1	
	Voron Double-sided textured PEI buildplate	1	1315,91
Materiál	TPU Innovatefil Hardness+ Black 1,75mm 750g	1	1125
	Nylon Fiberlogy PA12 Blue 1,75mm 750g	1	1007
	ASA Filament PM Black 1,75mm 750g	1	659
Spolu [CZK]			38212,74

Příloha B - Externé odkazy

- Modely súčiastok, konfiguračné profily, firmware a manuál projektu Voron 2.4:

<https://github.com/VoronDesign/Voron-2>

- Model pántov predných dvierok použitých v tomto projekte:

<https://www.teamfdm.com/files/file/50-270%C2%B0-hinge-parametric>

- Snímač výšky tlačovej podložky Klicky:

<https://github.com/jlas1/Klicky-Probe>

- Recirkulačný filter pevných častíc Nevermore:

https://github.com/nevermore3d/Nevermore_Micro

- Svorka remeňov osi Z s výstupom remeňa nahor:

<https://www.printables.com/de/model/84737-z-belt-clip-upper-for-voron-24>

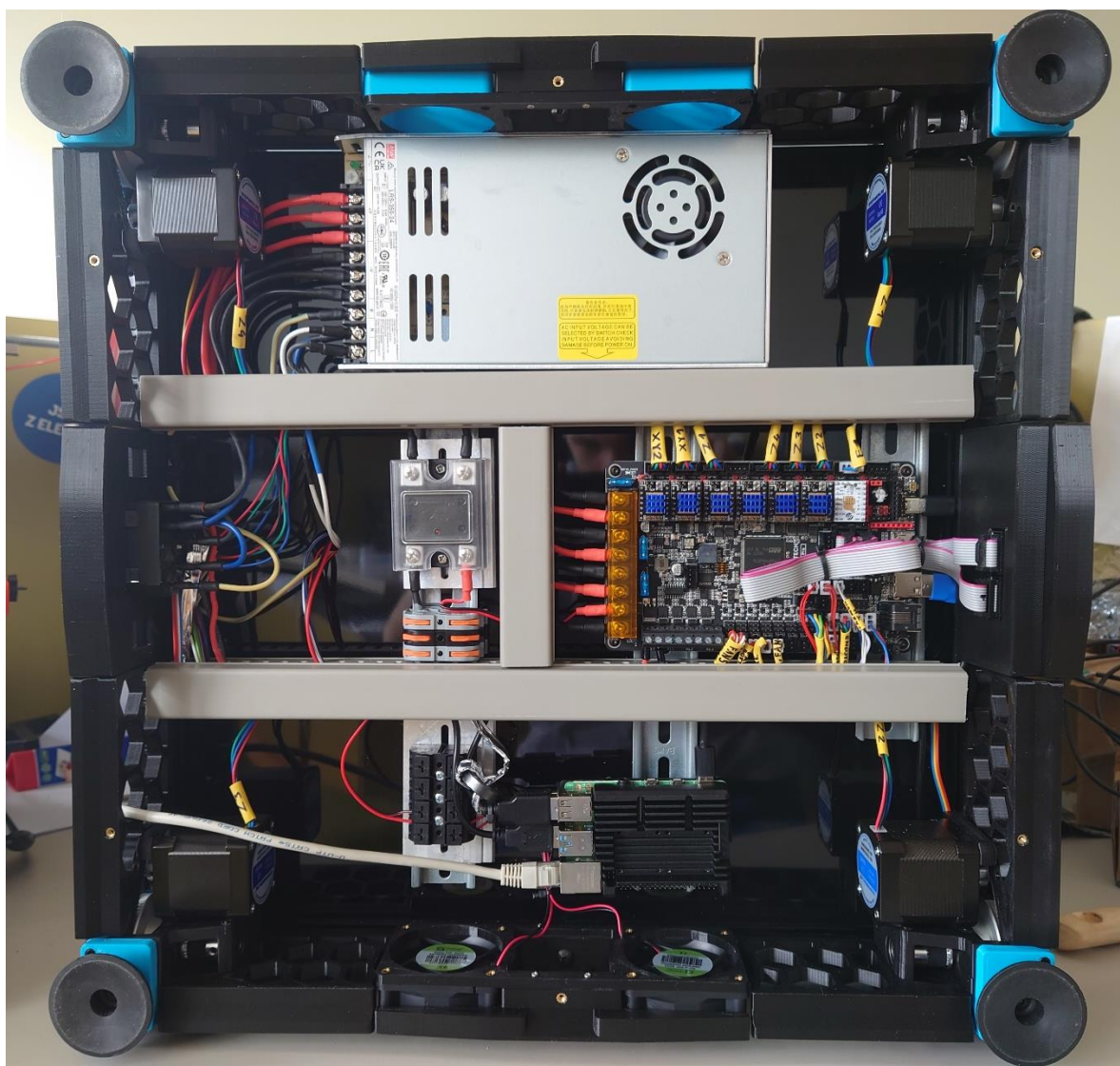
Příloha C - Fotografie zostavenej 3D tlačiarne



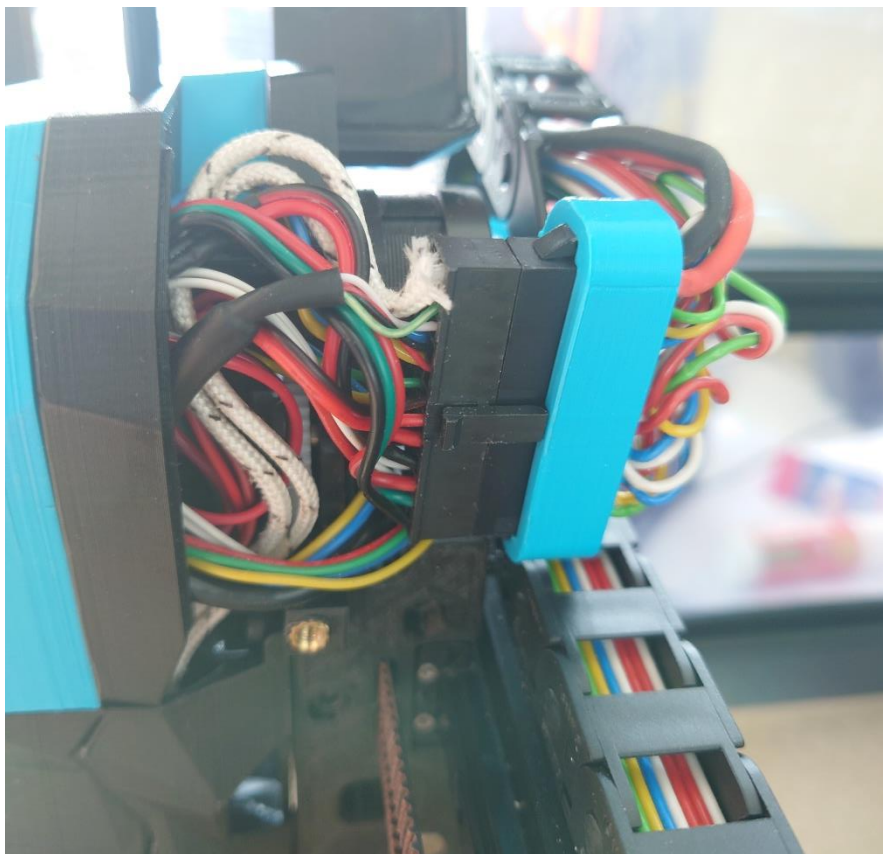
Obrázok 7.1 Tlačová hlava Stealthburner



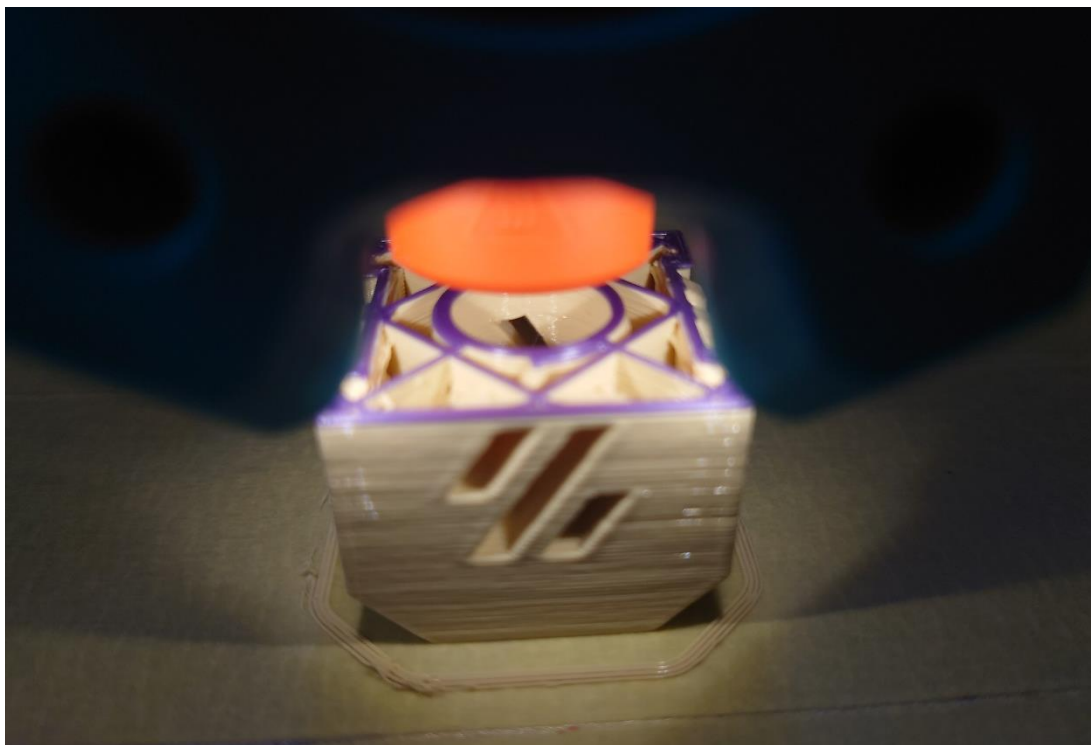
Obrázok 7.2 Ovládací panel tlačiarne



Obrázok 7.3 Pohľad zospodu tlačiarne na elektroniku



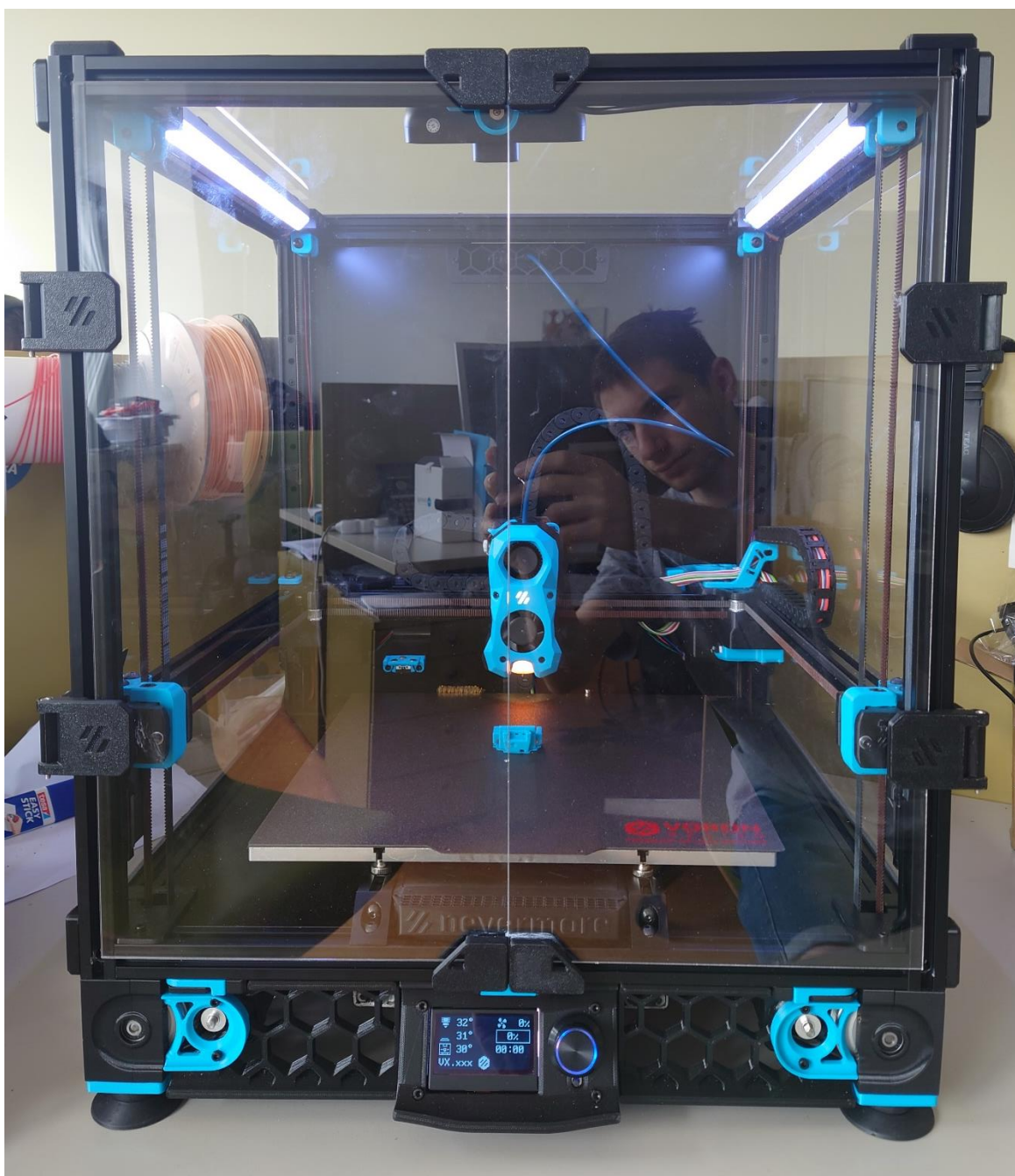
Obrázok 7.4 Konektor s kabelážou tlačovej hlavy Stealthburner



Obrázok 7.5 Tlač prvého modelu – kalibračnej kocky



Obrázok 7.6 Pohľad na vytlačený testovací model „3D Printer Test“



Obrázok 7.7 Zostavená tlačiareň Voron 2.4 so všetkými modifikáciami