

Konstrukce Zařízení pro 3D tisk

Jaroslav Kubánek

Bakalářská práce
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jaroslav Kubánek
Osobní číslo:	T18195
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Konstrukce zařízení pro 3D tisk

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Vypracujte teoretický návrh zařízení.
3. Realizujte výrobu funkčního prototypu.
4. Porovnejte kvalitu tisku na prototypu s komerční 3D tiskárnou.

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

Seznam doporučené literatury:

BRYDEN, Douglas. *CAD and rapid prototyping for product design*. London, [En-gland]: Laurence King Publishing, 2014, 176 p. ISBN 978-1-78067-570-1.

COWARD, Cameron. *Idiot's Guides: 3D Printing*. Penguin, 2015. ISBN 9781615647453.

ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Adam Škrobák, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je seznámení se základním principem 3D tisku a jednotlivými metodami tisku. Práce se zabývá běžně používanými materiály, způsoby konstrukcí zařízení a upřesňuje funkce jednotlivých komponentů. Vysvětluje důvody řídicího firmwaru a také programu pro přípravu modelů pro tisk, který vygeneruje G-kód pro řízení tiskárny. Nechybí použití tisku a zmínka o běžně dostupných tiskárnách. Praktická část se zabývá návrhem a konstrukcí zařízení pro 3D tisk. Základ zařízení tvoří nosná konstrukce ve tvaru krychle, na kterou jsou namontovány jednotlivé pohybové osy. Dle návrhu je zařízení sestaveno, osazeno elektronikou a zprovozněno pomocí navrženého řídicího firmwaru, který se definuje dle použitých komponentů a dle koncepce zařízení. Pro správnou funkci tiskárny a pro umožnění tisku se definují instrukce v programu slicer, jehož výstupem je řídicí G-kód. Tento kód obsahuje informace o tisknutém modelu, řízení pohybů tiskové hlavy a ovládání jednotlivých komponentů. Celé zařízení se nakonec kalibrovalo a přizpůsobily se hodnoty ve firmwaru i sliceru podle chyb na výtisku. Výstup práce obsahuje porovnání tiskárny s komerčními tiskárnami, zhodnocení tisku, cenový návrh a důvody, které vysvětlují vlastní konstrukci.

Klíčová slova: 3D tisk, Rapid Prototyping, RepRap, FDM, FFF, Filament, Firmware, Slicer, G-kód, STL

ABSTRACT

One of the goals of bachelor thesis is to understand basics of 3D print and printer methods. The thesis deal with filament materials, constructions of 3D printers and explains function of individual parts. Thesis explains the seriousness of firmware and solves a slicer program. Slicer prepares 3D model, print settings and generates the G-code for printer control. The bachelor thesis deals with use of 3D printing and mentions commonly available printers. Practical part solves design and construction of 3D print. The basis of 3D printer is cube construction with motion axis. Complete construction was equipped with electronics and then was loaded firmware. The firmware is defined by the used components. G-code from slicer program controls the function of 3D printer and it contains model data and printer settings. After the first print the device was calibrated. Calibration is governed by printing errors. Evaluation of the bachelor thesis is a comparison of the designed printer with commercial printer. Conclusion contains an evaluation of the own printer, a price comparison and reason for the own building.

Keywords: 3D print, Rapid Prototyping, RepRap, FDM, FFF, Filament, Firmware, Slicer, G-code, STL

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Adamu Škrobákovi, Ph.D., za odborné rady, vedení a motivaci při psaní a kompletaci celé této práce. Dále chci poděkovat panu Martinu Slechanovi za zajištění prostorů a podpory při kompletaci zařízení. Další poděkování patří panu Jiřímu Pokornému za odborné rady ohledně řídicího firmwaru a panu Eriku Stachovi za poskytnutí komerční 3D tiskárny a konzultací ohledně metody FDM tisku.

Motto:

„ Každé zbytečné slovo je zbytečné. “

Jára Cimrman

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 HISTORIE 3D TISKU	12
1.1 RAPID PROTOTYPING.....	12
1.2 PROJECT REPRAP	13
2 PRINCIP 3D TISKU	14
3 TECHNOLOGIE 3D TISKU	15
3.1 FDM/FFF	15
3.2 SLA (STEREOGRAFIE).....	16
3.2.1 Fotopolymerizace	17
3.3 SLS (SELECTIVE LASER SINTERING).....	18
3.4 LOM (LAMINATED OBJECT MANUFACTURING).....	20
4 TISKOVÉ MATERIÁLY	21
4.1 FILAMENT	22
4.1.1 Výroba filamentu	22
4.1.2 PLA	22
4.1.3 PETG.....	23
4.1.4 ABS.....	24
4.1.5 ASA.....	25
4.1.6 FLEX.....	25
4.1.7 Kompozitní filamenty	28
5 3D TISKÁRNÝ FDM	29
5.1 KONSTRUKCE	29
5.1.1 Kartézská tiskárna	29
5.1.2 Delta tiskárna	30
5.1.3 Polar tiskárna.....	31
5.2 TISKOVÁ HLAVA.....	32
5.2.1 Extruder.....	33
5.3 VYHŘÍVANÁ PODLOŽKA	33
5.4 POHON TISKÁREN	34
5.5 RÁMY TISKÁREN	35
5.6 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA	36
6 POSTUP TISKU VÝROBKU METODOU FDM	37
6.1 3D MODEL	37
6.2 SLICER.....	38
6.2.1 G-kód.....	39
6.2.2 Nastavení sliceru	40
6.3 PŘÍPRAVA TISKOVÉ PODLOŽKY	43
6.4 TISK SOUČÁSTI	43
6.5 DOKONČOVÁNÍ VÝTISKU	43
7 POUŽITÍ 3D TISKU	44

8	KOMERČNÍ 3D TISKÁRNY	45
8.1	DOMÁCÍ ZAŘÍZENÍ PRO 3D TISK.....	45
8.1.1	Průša MK3s	45
8.1.2	Flashforge Finder 2	46
8.1.3	Creality Ender 3 Pro	46
8.2	PROFESIONÁLNÍ ZAŘÍZENÍ 3D TISKU	47
8.2.1	Big Rep Studio G2	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST	48
9	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	49
10	NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO 3D TISK.....	50
10.1	NÁVRH RÁMU.....	51
10.2	NÁVRH POHYBLIVÝCH OS.....	52
10.2.1	Pohybová osa X.....	52
10.2.2	Pohybová osa Y.....	53
10.2.3	Pohybová osa Z	54
10.2.4	Uchycení motorů osy X a Y	57
10.2.5	Vedení řemenů	58
10.2.6	Upínací deska tiskové hlavy.....	59
10.2.7	Úchyt tiskové hlavy.....	61
10.2.8	Vizualizace zařízení pro 3D tisk	63
11	KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ.....	64
11.1	KOMPLETACE RÁMU.....	64
11.2	MONTÁŽ FUNKČNÍCH DÍLŮ	67
11.2.1	Pohybová osa Y, úchyty motorů X a Y.....	67
11.2.2	Pohybová osa z.....	68
11.2.3	Sestava pro tiskovou podložku.....	69
11.2.4	Pohybová osa X.....	71
11.2.5	Sestava uchycení tiskové hlavy.....	74
11.2.6	Úchyt pro vedení řemenů	75
11.2.7	Úchyt extruderu.....	75
12	ELEKTRONIKA.....	76
12.1	ŘÍDÍCÍ DESKA	77
12.2	DRIVERY PRO KROKOVÉ MOTORY	78
12.3	KROKOVÉ MOTORY	78
12.4	SESTAVA TISKOVÉ HLAVY S EXTRUDEREM	79
12.4.1	Hotend s tryskou	79
12.4.2	Ventilátor trysky.....	80
12.4.3	Indukční snímač (sonda)	80
12.4.4	Extruder.....	82
12.5	TISKOVÁ PODLOŽKA (HOTBED)	83
12.6	KONCOVÉ SPÍNAČE OSY X, Y, Z	84
12.7	NAPÁJECÍ ZDROJ.....	85
12.8	LCD DISPLEJ	86
13	NATAŽENÍ ŘEMENŮ	87
14	FIRMWARE.....	88

14.1	MARLIN 2.0 BUGFIX	89
15	KALIBRACE A NASTAVENÍ TISKU	90
15.1	KALIBRACE KROKŮ MOTORŮ.....	90
15.2	KALIBRACE TISKOVÉ PODLOŽKY	91
15.3	VOLBA A NASTAVENÍ SLICERU	92
15.4	TISK S KONTROLOU ROZMĚRŮ	93
16	TESTOVACÍ VÝTISK	95
17	POROVNÁNÍ TISKU A CENOVÁ KALKULACE	96
17.1	DOBA TISKU A SPOTŘEBA FILAMENTU	97
17.2	HODNOCENÍ VÝTISKŮ	98
17.2.1	Povrch výtisku.....	98
17.2.2	Porovnání rozměrů výtisků	99
17.3	CENOVÁ KALKULACE VLASTNÍ TISKÁRNY	101
ZÁVĚR	103	
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	106	
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	110	
SEZNAM OBRÁZKŮ	112	
SEZNAM TABULEK.....	115	
SEZNAM PŘÍLOH.....	116	

ÚVOD

Neustálý vývoj civilizace vede k vynalézání nových technologií a také nových metod výroby. Za jednu z mladších odvětví výroby lze označit metodu 3D tisku, která se začala objevovat během 90tých let. Jedná se o aditivní metodu, což znamená, že se materiál neubírá, ale přidává nanášením jednotlivých vrstev.

Technologie 3D tisku bývá označována jako rychlá výroba prototypů. Snahou je zjistit, zda může být určitá součást vyrobena tak, jak je navržena a jestli bude splňovat vhodnou ergonomii pro koncového zákazníka. Během let se 3D tisk dostal mezi širokou veřejnost, umožnil se rozvoj jak mezi jednotlivými firmami, tak mezi jednotlivci. Výrobní centra pod sebou mají tisíce lidí po celém světě, kteří pracují na vývoji tiskáren, úpravě jejich řešení, softwarovém programování nebo návrzích modelů. Většina řešení je prezentována jako volně přístupná, takže si každý uživatel může svou tiskárnu upravit dle vlastních požadavků.

Bakalářská práce se zaměřuje v teoretické části na historii 3D tisku, jednotlivé dostupné metody a také používané materiály. Zmiňuje se o funkci jednotlivých komponentů tiskáren a řeší kroky, které jsou nezbytné pro tisk. Závěr teoretické části se zabývá použitím této technologie a ukazuje jednotlivá zařízení nabízená na světovém trhu.

Praktická část je věnována návrhu a stavbě zařízení. Řeší použité komponenty, zapojení elektroniky a celkové odladění tisku, které zahrnuje ovládací firmware a program pro nastavení tisku. Za výstup práce lze považovat funkční zařízení, které je schopné konkurovat běžně dostupným komerčním zařízením. Vzhledem k tomu, že se jedná o prototyp, předpokládá se další úprava funkčnosti zařízení, definování nových funkcí, dotisknutí jednotlivých komponentů a případné zakrytování tiskového prostoru pro zlepšení stálosti výtisku.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE 3D TISKU

Technologie 3D tisku je mezi veřejností poměrně krátkou dobu, protože byly pořizovací náklady těchto zařízení mimo možnosti běžného člověka. Na počátcích byla technologie využívána pouze ve větších firmách, kde byly prostředky pro zakoupení a další vývoj zařízení. 3D tisk způsobil revoluci ve velkých společnostech díky výrobě prototypů, na kterých bylo možné zkoušet, jestli bude výrobek vyhovovat pro velkosériovou výrobu. Díky rozvoji ve velkých firmách mohl být 3D tisk rozšířen mezi veřejnost. [1]

Jako první si žádost o patentování zařízení pro 3D tisk podal Charles W. Hull v roce 1984. Pan Hull využil veškeré poznatky z předchozích let a v roce 1986 založil společnost 3D SYSTEMS, která se stala lídrem v oblasti 3D tisku. Velkým úspěchem firmy bylo vynalezení certifikovaného zařízení pro 3D tisk, které bylo určeno pro domácí použití. Díky této převratné změně obdržela společnost Cenu Cube. [3]

Proces tisku patentovaný panem Hullem byl založen na technologii SLA neboli stereografie. Tato technologie spočívala ve vytvrzování pryskyřice pomocí UV paprsku. K nápadu pro konstrukci zařízení jej přivedla práce, na které pracoval. Šlo o povlakování desek stolů pomocí pryskyřice, čímž se zlepšovala jejich pevnost. Při práci s pryskyřicí vznikl nápad navrhnout zařízení, které by nanášelo pryskyřici postupně po vrstvách a UV-zářením by byla každá tato vrstva vytvrzena. Ve výsledku by vznikl 3D výrobek. Největším problémem před výrobou takového zařízení byl převod 3D modelu na tisková data, pomocí kterých by zařízení pracovalo. Bohužel neexistoval žádný formát pro takovéto zpracování dat, takže jej pan Hull vytvořil sám. Šlo o SLA souborový formát, který předcházel dnešnímu STL formátu. Formát STL je v podstatě převedený 3D model z CAD souboru na tisková data neboli kód. Zajímavé je, že STL formát si pan Hull nepatentoval a ponechal jej volně k dispozici pro další průmyslovou výrobu i pro konkurenční firmy.[1]

1.1 Rapid Prototyping

Pojem Rapid Prototyping znamená rychlou výrobu prototypů a jedná se o výrobu pomocí metod 3D tisku. Název je odvozen tak, že většina dílů je vyrobena mnohem rychleji, než pomocí běžných metod konvenční výroby. Ve velké míře se tato technologie používá pro výrobu prototypů, které slouží jako předvýrobní zkušební součást. Výhodou této technologie je včasné objevení chyb při vývoji, teoretická úspora financí a možnost použít výrobek ihned po vyhotovení, protože jej není u určitých aplikací potřeba dále upravovat. [2]

1.2 Project RepRap

Tento projekt byl založen v roce 2004 panem Adrianem Bowyerem na University of Bath, která se nachází ve Spojeném Království. První práce na projektu začaly roku 2005 a jeho hlavním cílem bylo, aby mohla tiskárna vytisknout velké spektrum nejrozličnějších součástí, od nejjednodušších po ty nejsložitější a zároveň splnit co nejmenší náklady na výrobu. Tento projekt vznikl za účelem globální spolupráce lidí. RepRap využívá technologii aditivního výrobního postupu a tiskárny pracují na principu FFF (Fused Filament Fabrication). Základním principem této metody je tavení materiálu ve formě přiváděného vlákna v tiskové hlavě a jeho následné nanášení v jednotlivých vrstvách na tiskovou plochu. [4]

Celý projekt byl už od založení brán jako otevřený pro všechny bez nutnosti placení. Jednotlivé kódy, součástky i nastavení jsou veřejně přístupné a každý si je může podle svých potřeb upravit. Díky tomuto projektu došlo k poklesu cen tiskáren, takže je lze běžně koupit nebo sestavit bez větších problémů. Základna lidí kolem projektu je dnes rozvětvena do všech koutů světa. Tiskárny RepRap lze zakoupit ve dvou základních provedeních, kterými je buď stavebnice, kterou si doma člověk sám postaví a naprogramuje, nebo již hotová a nastavená tiskárna, se kterou se dá rovnou pracovat. [5]



Obr. 1 - Adrian Bowyer (vlevo) s projektem RepRap [5]

2 PRINCIP 3D TISKU

Fungování 3D tiskárny se v podstatě odvíjí od běžné tiskárny, která je používána denně v domácnostech, jen se jedná o složitější proces. Tisk spočívá v nanesení tenké vrstvy na podkladový materiál, toho je docíleno tak, že je nanesen inkoust na papír. Místo inkoustu jsou používány jiné materiály, nejčastěji plasty a kovy, papír vystřídala tisková podložka a nanášením vrstev je vytvářen trojrozměrný objekt. [6]

3D tisk je aditivní metoda, to znamená, že materiál není odebírán jako při konvenčním obrábění, ale je postupně nanášen v jednotlivých vrstvách. Nejpoužívanější takovou metodou tisku je FDM metoda neboli modelování pomocí depozice taveniny. Tuto metodu lze najít i pod označením FFF (Fused Filament Fabrication), což v překladu znamená výrobu z vlákna, které je taveno teplotou. Takto pracující zařízení obsahuje tenké vlákno (strunu), které směřuje z extruderu do tiskové hlavy. Vlákno je taveno pomocí vysoké teploty, která se obvykle pohybuje kolem 210 °C až 250 °C. Proces výroby se podobá tavící pistoli, která obsahuje směs lepidla v tuhé fázi ve formě tyčinek. Tavná pistole je nahřívána, směs lepidla je tavena a následně vytlačena ve formě struny, která na vzduchu postupně zchladne. Totéž platí u zařízení pro 3D tisk, kde materiál po vytlačení z tiskové hlavy začíná chladnout a vytváří tvar konečného výrobku. [7]

Pro realizaci 3D tisku je nutné převést CAD data z digitální podoby do reálné podoby, kterou bude hotový výrobek. Jednotlivé cesty pro pohyb tiskové hlavy jsou dány G-kódem. Tento kód slouží pro převod 3D dat modelu s nastavením tisku na pracovní instrukce pro zařízení. [5]

3 TECHNOLOGIE 3D TISKU

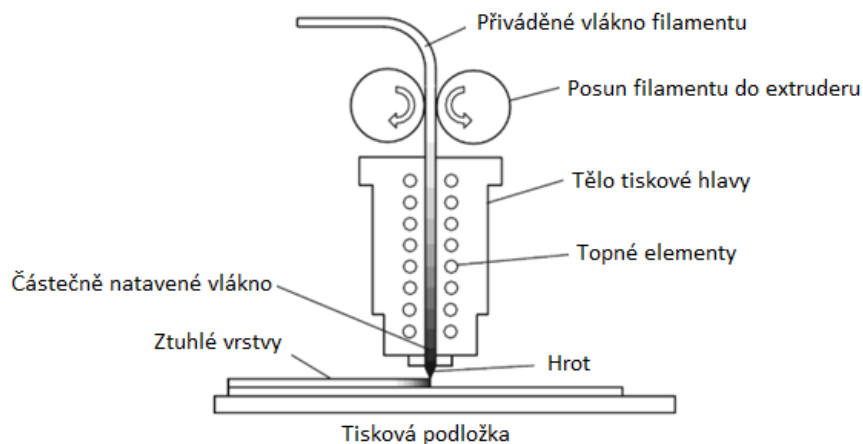
Technologie, které jsou dnes běžně používány v oblasti 3D tisku, se v podstatě principem neliší. Jde o nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Hlavní hledisko, podle kterého metody dělíme, je podoba nanášeného materiálu a způsob jeho zpracování.

- Materiálem je tisková struna, která je tavena v tiskové hlavě a následně vytlačována přes vytlačovací trysku. Typickým zástupcem je technologie tisku s označením FDM.
- Materiál se v tekuté formě vytvrzuje na předem určených souřadnicích a vždy pro každou vrstvu zvlášť. Vytvrzování probíhá pomocí laseru nebo UV záření. Tohoto principu využívá technologie SLA.
- Materiál ve formě prášku, který je následně spékán laserem. Tento postup využívá metoda typu SLS.

Žádná dnes používaná metoda nelze použít univerzálně, a proto se vždy volí nejvhodnější metoda pro vyhotovení navrženého výrobku. [5]

3.1 FDM/FFF

Princip technologie FDM je založen na více faktorech. Hlavní roli zde hraje chemická reakce materiálu při kontaktu s okolním prostředím, dále přenos tepelné energie a také způsob vrstvení materiálu na tiskovou plochu. Materiál ve formě vlákna (filamentu) je odvíjen z cívky, která bývá připevněna k zařízení pro 3D tisk. Toto vlákno putuje do speciálně upravené hlavy, která jej taví a nakonec vytlačuje přes trysku. [8]



Obr. 2 - Technologie FDM/FFF [8]

Při vytlačování je materiál nanášen ve vrstvách, které jsou definovány programem a zároveň dochází k chladnutí a tuhnutí materiálu. Jednotlivé vrstvy nanášené na sebe vytváří hotový model. Na kvalitu modelu má vliv pevnost materiálu, modul pružnosti v ohybu, viskozita, přesnost tisku, tloušťka vytlačovaného vlákna, vytlačovací rychlost, objemový průtok, teplota hotendu a celková geometrie vyráběného modelu. [8]

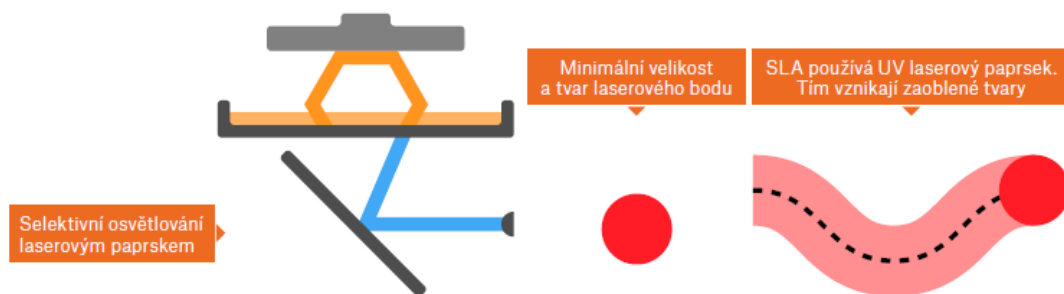
3.2 SLA (Stereografie)

První komerční zařízení pro 3D tisk pracovalo převážně s pryskyřicí. Této metodě se říká stereografie nebo zkráceně jen SLA. Zařízení založené na tomto principu pracuje s tekutou pryskyřicí. Pryskyřice je fotocitlivý polymer, který tvrdne při vystavení UV záření. UV paprsky vychází z laseru a osvěcují místa, která mají být vytisknuta. Prosvěcování je nastaveno na takovou hodnotu, která je dána tloušťkou jedné vrstvy. První vrstva se tiskne přímo na tiskovou plochu, která bývá umístěna těsně pod hladinu pryskyřice. Když je vrstva dokončena posune se podložka o jednu vrstvu výš a dochází k tisknutí další vrstvy. Tento proces se následně opakuje až do konce tisku součásti. [9]

Výrobky z pryskyřice jsou ihned po vytisknutí nepoužitelné, protože je jejich povrch lepkavý a obsahuje zbytky pryskyřice. Nedokonalosti a zbytky pryskyřice se odstraní dodatečným vytvrzováním pomocí UV světla. Lepivý povrch lze odstranit použitím isopropylalkoholu.

U technologie 3D tisku rozeznáváme tyto 3 metody:

SLA laser - pryskyřice je osvětlována pomocí UV laserového paprsku. Paprsek je směřován pomocí dvojice zrcadel



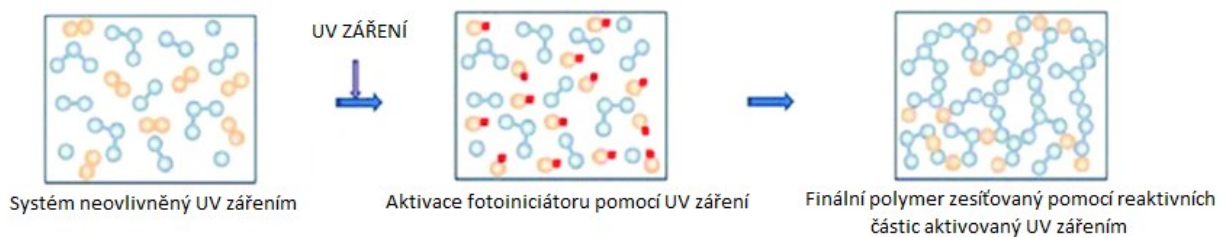
Obr. 3 - 3D tisk pomocí metody SLA laser [5]

DLP neboli Digital Light Processing - celá tisková plocha je osvětlována za pomoci přídatného projektoru. Místa, která mají být osvětlena jsou vytvrzena. Výhodou této technologie je ušetření času při tisku více součástí, protože jsou oba objekty osvětlovány zároveň a nemusí se čekat, až laser vysvítí předchozí součást. [5]

MSLA neboli Mask Stereolithography - použití osvětlení pomocí UV LED světla v kombinaci s LCD displejem, který je pod tiskovou plochou. Světlo prostupuje jen do bodů, které jsou na LCD aktivovány a svítí tedy bílou barvou. V těchto bodech dojde k vytvrzení pryskyřice a zbytek zůstane nevytvrzený. Výhodou je opět rychlejší tisk více kusů součástí. [5]

3.2.1 Fotopolymerizace

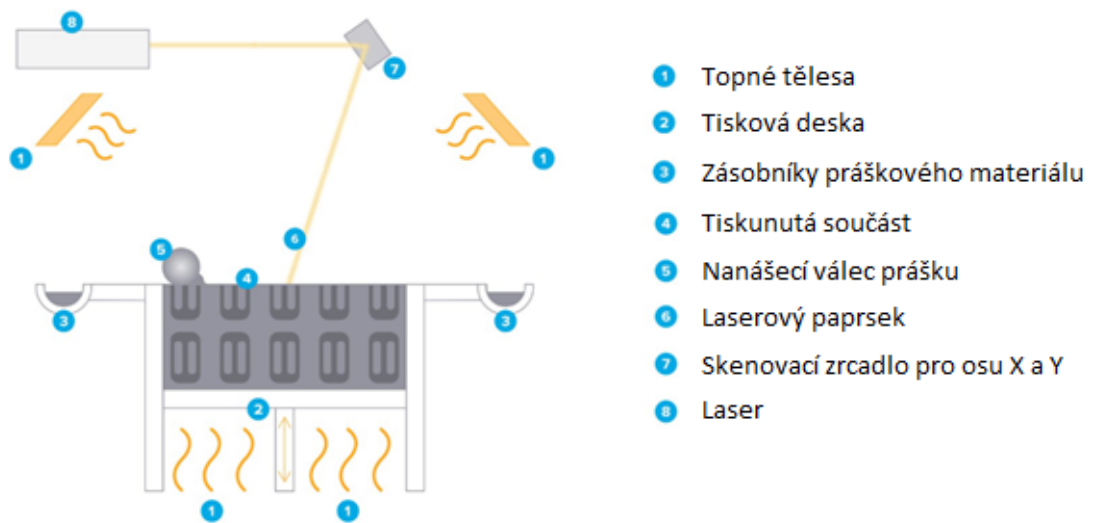
Pro princip 3D tisku pomocí metody SLA je proces fotopolymerizace velmi důležitý. Dochází k reakci polymeru pomocí zdroje záření. Jedná se o propojování monomerů do řetězců, čímž vznikají velké makromolekuly (polymery). Pomocí záření dochází k chemické reakci, díky které se jednotlivé řetězce makromolekul vzájemně spojí a vytvoří prostorové síťování polymeru. Díky procesu síťování získává výsledný polymer požadovaný tvar a vlastnosti. [10]



Obr. 4 - Proces fotopolymerizace [11]

3.3 SLS (Selective Laser Sintering)

Jedná se o technologii, která funguje na bázi zpracování práškových materiálů. Práškový materiál je nanášen na základní tiskovou desku. Velikost jednotlivých částic materiálu se pohybuje od 20 do 100 mikrometrů. Zařízení nahřívá prášek těsně pod slinovací teplotu materiálu, aby laser snadněji dosáhl potřebné teploty v daných oblastech při výrobě. Laser na bázi oxidu uhličitého neustále skenuje teplotu jednotlivých částí výrobku a vyhodnocuje ji. Potřebná slinovací teplota je držena laserem, dokud nedojde ke spojení částic a následnému ztuhnutí místa. Zbytek prášku je ponechán jako podpora pro tisk další vrstvy. Základní tisková deska klesne o hodnotu 50 až 200 mikronů v závislosti na vyráběné součásti a pomocí nanášedce se již hotová vrstva překryje další vrstvou prášku. Laser znovu naskenuje další vrstvu součásti a proces se opakuje až do vyhotovení celé součásti, která je postupně chlazená v boxu, do kterého tisková vrstva klesá. Závěrem práce je vyjmutí součásti z tiskového boxu a její vyčištění od zbytků prášku. [12]

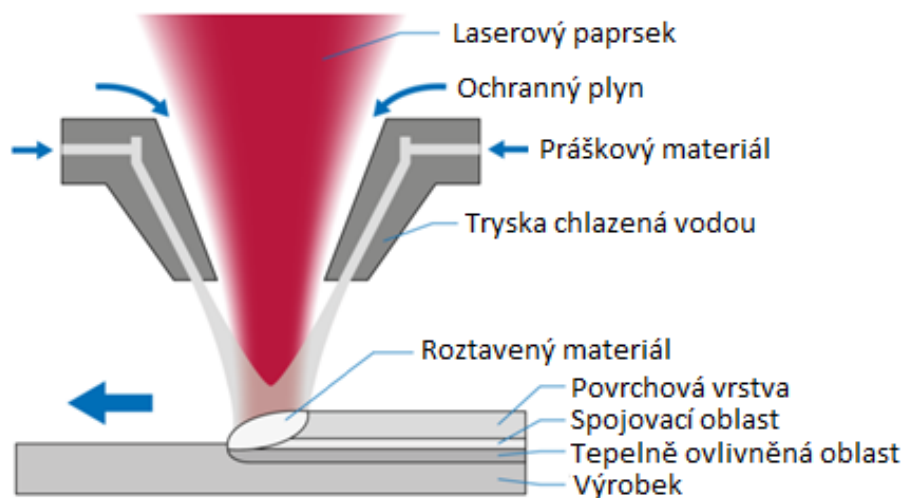


Obr. 5 - Technologie SLS (Selective Laser Sintering) [12]

Technologii výroby typu SLS lze dále rozdělit na 2 oblasti: První metoda s názvem PolyJet je využívána pro tisk velmi tenkých vrstev. Tloušťka vrstvy, které lze dosáhnout, činí 0,016 mm. Díky takto malé hodnotě lze vytvářet výrobky s velmi hladkým a jakostním povrchem s imitací lesku. Další výhodou je možnost vyrábět velmi tenké stěny.

Druhou technologií je metoda DLMS (Direct Metal Laser Sintering). Tato metoda pracuje převážně s kovovými prášky, jejichž spékání probíhá laserem v ochranné atmosféře inertního plynu (plyn, který za daných podmínek nepodléhá chemické reakci). Variantou této metody je technika zvaná 3D Laser Cladding. [13]

Technika Laser Cladding spočívá v principu nanášení kovového prášku přímo do laserového paprsku. Místo prášku může být přidáván i potahový drát. Výhodou této techniky je dodatečné vytvoření kovového povlaku, který se dokonale spojí se základním materiálem. Povlak dosahuje mnohem lepších mechanických vlastností než tepelně stříkané povlaky a je zdravotně nezávadný. Technologie DLMS je používána například pro opravu různých forem, které nelze opravit navařováním pomocí laseru a je potřeba nahradit větší objem. Nejčastěji se jedná o hrany nebo rohy forem poškozené při manipulaci. [14]



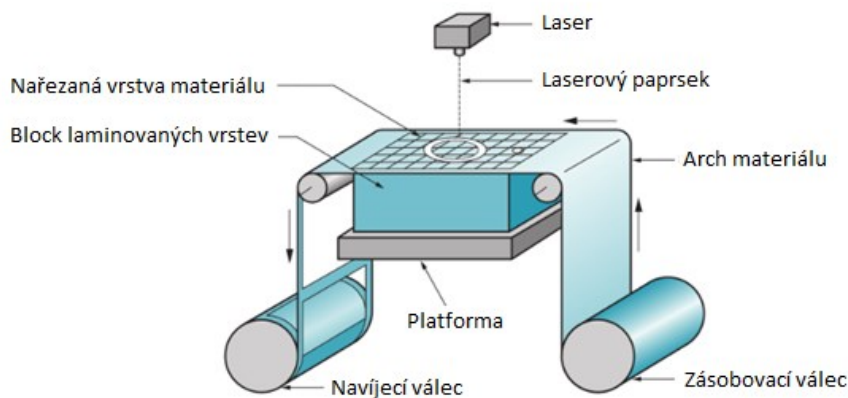
Obr. 6 - Technologie Laser Sintering pomocí
kovového prášku [14]

3.4 LOM (Laminated Object Manufacturing)

Laminated Object Manufacturing neboli výroba laminátových objektů je opět poměrně nová technologie, protože první komerční zařízení bylo nabízeno až v roce 1991. [15]

Technologie LOM je asi nejméně využívanou technologií 3D tisku. Jako primární se pro tisk používá papír, méně zastoupeny jsou plastové materiály, celulóza nebo materiály s vláknovou výztuží. Kovový materiál se používá jen velmi málo. Principem této metody je užití souvislého formátu (listu) materiálu, který je namotán na zásobovací roli. Z této role je materiál tažen přes platformu pomocí odvíjecího válce. Dodávané role materiálu jsou při výrobě potahovány lepidlem z důvodu následného lepení vrstev na sebe. K vytvoření výrobku přejíždí přes nataženou roli nahřívací válec, který je umístěn nad výrobní platformou. Lepidlo se vlivem tepla rozteče a dojde k přilepení první vrstvy k platformě. Nad platformou je umístěn laser na bázi oxidu uhličitého, který řeže požadovaný tvar tak, jak je psáno v pracovním G-kódu pro zařízení. Na přebytečném materiálu jsou vytvořeny nařezané šrafy pro snadnější vyjmutí hotového výrobku. Po vytisknutí první vrstvy se platforma sníží o jednu vrstvu níže, přes ni se přetáhne další vrstva materiálu, která je nahřívána pomocí nahřívacího válce a opět přilepena k předchozí vrstvě. Proces se opakuje, dokud není celý výrobek dokončen. [16]

Výroba součástí spočívá v nařezání 3D modelu pomocí STL souboru, který obsahuje pracovní instrukce pro tiskové zařízení. Pro nařezání vrstev modelu se používá program LOM slicer, který je vytvořen přímo pro tuto technologii. Krájení modelu je provedeno až po vygenerování každé vrstvy a změření celkové výšky součástí. V tomto kroku se zahrnuje i korekce, která zajišťuje kontrolu a zohlednění reálné tloušťky vrstvy materiálu, ze kterého se bude vyrábět. [15]



Obr. 7 - Princip technologie LOM [15]

4 TISKOVÉ MATERIÁLY

Jak je již známo, pro jednotlivé technologie se tiskové materiály liší. Základním rozdílem je forma, v níž je materiál používán. U technologie SLA je výchozím materiálem tekutá pryskyřice, pro technologii SLS se jako výchozí používá práškový materiál. Při výrobě objektů pomocí laminace je materiál namotán jako dlouhý pás na roli a pro nejpoužívanější technologii FDM jsou materiály ve formě filamentu na cívce.

Spolu s rozvojem 3D tisku se do povědomí veřejnosti dostává široké spektrum nových materiálů ve formě strun, které se liší barvou, vlastnostmi, průměrem a spoustou dalších parametrů. Běžně používaný materiál je PLA (Polylactid acid), který je snadno použitelný a hodí se pro většinu aplikací. Nejčastěji využíván je v oblasti 3D tisku materiál PETG (Polyethylen tereftalát). Výhoda PETG spočívá v jeho mechanických vlastnostech, tudíž lze použít pro mechanicky namáhané díly. Dalším velmi využívaným materiálem je ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), který se hodí pro součásti, u kterých vyžadujeme vysokou pevnost a tepelnou odolnost. Mimo zde zmíněné materiály lze použít nejrůznější kompozitní materiály, měkké flexibilní materiály, tekuté pryskyřice a mnoho dalších. [5]

Správný výběr materiálu je velmi důležitý pro splnění nároků na výrobek. Na počátku se vychází ze zařízení, na kterém bude součást vyráběna. Od zařízení se odvíjí forma materiálu (prášek, filament, pás nebo tekutá forma). [17]

Rozhodující vliv je dán i tvarem součásti. Je nutné si rozmyslet, jestli bude výrobek dále upravován nebo bude využit ihned po zhotovení, jestli bude výrobek přicházet do přímého kontaktu s pokožkou (nesmí být toxický). Vždy je potřeba si uvědomit, kde bude výrobek umístěn (odolání změně teplot, rozměrová stálost, odolnost proti pohlcování vlhkosti, smrštitivost, kvalita povrchu aj.). [18]

4.1 Filament

Nejčastěji používanou formou materiálu jsou tiskové struny neboli filamenty. Tato forma materiálu je využívána pro tisk typu FDM, kde je vlákno navíjeno do tiskové hlavy, v níž se taví a následně vytlačuje přes trysku. Hlavním parametrem, podle kterého se filament vybírá, je jeho průměr. Běžně se filament vyrábí ve dvou průměrech, a to 1,75 mm a 3 mm. Tavná teplota filamentu nastavovaná pro tiskovou hlavu se odvíjí od typu použitého filamentu a závisí na jeho vlastnostech. Teplota tavení stejného materiálu se může u jednotlivých výrobců lišit, protože nejsou zajištěny naprosto stejné výrobní podmínky. [19]

FDM tisk se neustále vyvíjí a s ním jsou k dispozici široká spektra filamentů nejrůznějších vlastností. Každý filament vyžaduje specifické nastavení tiskových parametrů a někdy se může stát, že i odlišné zbarvení stejného materiálu od jednoho výrobce může vyžadovat jiné nastavení. Aby bylo dosaženo nejlepších podmínek tisku, je dáno doporučení výrobcem. [5]

4.1.1 Výroba filamentu

Kvalita filamentu je velmi důležitá, protože se od ní odvíjí přesnost a kvalita tisknutého výrobku a pokud nejsou dodrženy zásady pro výrobu a skladování materiálu, nikdy nebude docíleno nejvyšší jakosti výrobku, která je na trhu požadována.

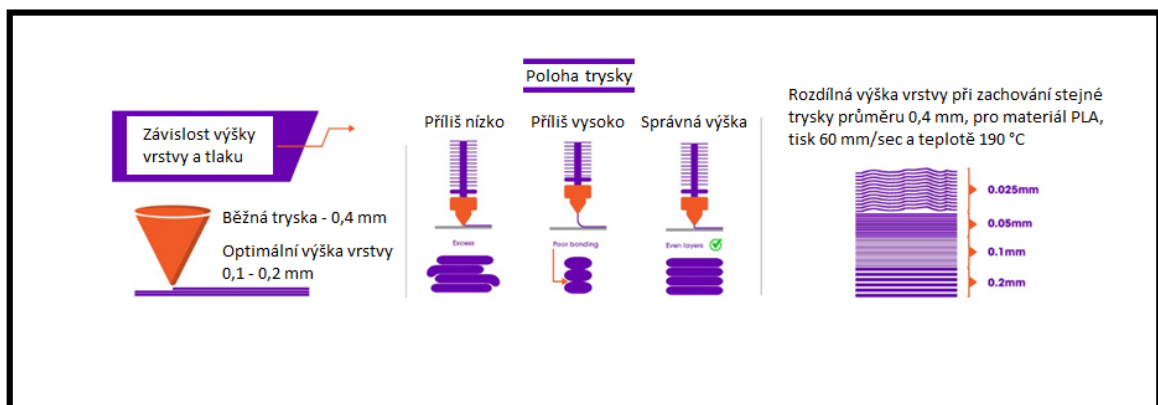
Při výrobě se posuzují fyzické parametry, pod které spadá maximální odchylka průměru od ideální hodnoty. Dochází k vyhodnocování odchylky ve směru X a Y, která je vždy dána maximální i minimální hodnotou. Čím menší odchylky jsou, tím lepší je použití daného filamentu, protože se bude při tisku chovat lépe. Dalším parametrem je udržení co nejvíce kruhového průřezu filamentu. Posuzuje se ovalita, která je měřena pomocí laseru při odtažení struny. Důležitý vliv má i homogenita materiálu, která je požadována na celé délce struny a s ní souvisí i konzistentnost zbarvení struny. Jednotlivé přísady a především kvalita polymeru ovlivňuje vlastnosti při tisku, takže pokud je něco nahrazeno horší variantou, nelze očekávat ty nejlepší výsledky. Zachovat se musí i navíjení struny na jádro tak, aby bylo dosaženo bezproblémového odmotávání. [20]

4.1.2 PLA

Jeden z nejvíce používaných materiálů pro FDM tisk je jednoznačně PLA. V překladu PLA znamená Polylactic acid a jedná se o termoplastický polymer, který je získáván z obnovitelných zdrojů.

Materiál se odlišuje od ostatních používaných materiálů díky biologické rozložitelnosti, protože není vyráběn z ropy. PLA se používá mimo aditivní výroby také v lékařském průmyslu, kde jsou vyráběny lékařské implantáty a v potravinářském průmyslu na jednorázové nádoby nebo obalové materiály. [21]

Jedná se o materiál, který vytváří velmi jakostní povrch a to i v místech, kde jsou převisy a podpěry. Velkou výhodou PLA je nízká cena, proto se mezi tiskaři hojně používá. Hodí se pro tisk velmi malých a detailních objektů a použití je výhodné i z hlediska malé teplotní roztažnosti, díky které se nekrotí, nedeformuje, neodlepjuje od tiskové podložky a hlavně nepraská. Filament z PLA má nejširší barevné spektrum ze všech prodáváných filamentů, protože je snadno pigmentovatelné. Materiál je poměrně křehký, to znamená, že nedojde k ohnutí materiálu, ale k jeho prasknutí. Teplotní odolnost je také velmi nízká, protože měkne již při 60 °C. Aplikace na výrobky určené na venkovní použití se nedoporučuje, protože je materiál málo odolný vůči povětrnostním vlivům. [5]



Obr. 8 - Závislost výšky trysky od tiskové podložky [22]

4.1.3 PETG

Materiál PETG je termoplastický polymer a jedná se o upravenou verzi PET (Polyethylen-tereftalát), kde písmeno G značí, že je materiál modifikovaný (upravený) glykolem. Glykol se přidává do materiálu během polymerace za účelem zlepšení jeho vlastností. Pokud bude výsledný materiál ve formě vlákna, získáme jasnější a méně křehké vlákno, než při použití základního materiálu PET. Přidáním glykolu získáme odolnější materiál, který při vysoké teplotě zabraňuje krystalizaci materiálu a nezpůsobuje tak nežádoucí křehnutí materiálu. [23]

Hlavní výhodou materiálu je možnost částečné deformace bez trvalého poškození, protože jej lze při působení určité síly ohnout tak, aby se vrátil zpět do původního tvaru. Při porovnání PLA a PETG z hlediska obtížnosti tisku, jsou vedle sebe v podstatě totožné materiály. PETG využívá vlastnost snadné tisknutelnosti stejně jako PLA. Obdobné chování materiály vykazují i z hlediska teplotní roztažnosti, která je opět nízká. [5]

Hotový výrobek má lesklý a hladký povrch, který lze dodatečně upravit pomocí broušení. Nevýhodou je náchylnost na poškrábání povrchu a nemožnost vyhlazení pomocí acetonu. PETG neabsorbuje vodu a při tisku je téměř bez zápachu. Materiál není vhodný pro tisk malých součástí a doporučuje se zvýšené opatrnosti při odstraňování výrobku z tiskové podložky, kvůli velmi dobré přilnavosti. PETG má tendenci stringovat (tažení tenkých vláken plastu při přejezdu tiskové hlavy). Stringování lze ovlivnit pomocí nastavování retrakce a teploty hotendu. Materiál je díky jeho vlastnostem možné použít ve všech aplikacích, ať už pro vnitřní nebo vnější použití. [24]



Obr. 9 - Tiskové struny PETG [23]

4.1.4 ABS

ABS neboli Akrylonitril butadien styren je další z často používaných polymerů. Jedná se o amorfní termoplastický kopolymer, což říká, že materiál nemá pravidelně uspořádanou krystalickou mřížku a zároveň jej lze opakovaně zpracovávat za pomoci teplotního ohřevu.

Důvodem použití materiálu je vysoká mechanická odolnost proti nárazům a mechanickému poškození. Materiál vykazuje vysokou houževnatost a odolnost proti nízkým teplotám. Hlavní výhodou je odolnost vůči kyselinám, hydroxidům, olejům a tukům. ABS je málo nasákavé, ale i přes to se tiskové struny pečlivě balí. Materiál není doporučeno vystavovat

přímému slunečnímu záření. V běžném životě lze ABS použít na výrobu namáhaných mechanických součástí, ručních nástrojů a nejrůznějších výrobků denní spotřeby. V základní podobě se nehodí pro vnější aplikace a pro medicínské účely. Doporučeno je kompletní zakrytí pracovního prostoru 3D zařízení. Vzhledem k vysoké náchylnosti materiálu na změnu teploty dochází při tisku ke kroucení a smršťování výtisků a je tedy nutné správné nastavení parametrů tisku. [25]

Dodatečné úpravy výrobků lze provádět pomocí acetonu, který slouží k vyhlazování ploch a k úpravě nedokonalostí jednotlivých tisknutých vrstev. Pomocí acetonu lze jednotlivé části lepit k sobě. [5]

4.1.5 ASA

Akrylonitril styren akryl, ve zkratce ASA, je kvalitní konstrukční termoplast, který vznikl jako alternativní materiál pro ABS. Výhodou je odolnost proti povětrnostním vlivům, takže jej lze využít pro vnější aplikace, dále odolnost proti UV záření a vzdušné vlhkosti. Z hlediska tisknutelnosti je materiál dobře tisknutelný a lze tisknout malé i velké součásti při zachování detailů. Filamenty ASA jsou houževnaté, tuhé a odolné proti mechanickému namáhání. Použití pro výrobky, u kterých se vyžaduje rozměrová a vzhledová stálost. [25]

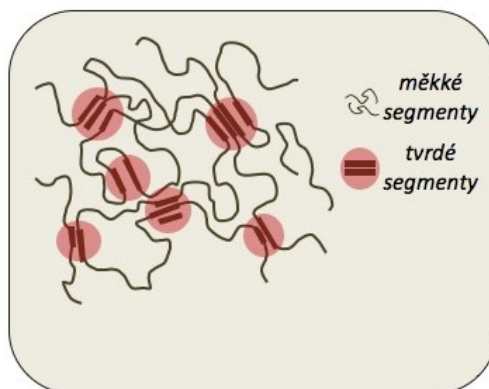
Tisková podložka je předehřívána dle doporučení výrobce. Teplota hotendu je vyšší jako pro filamenty z materiálu ABS. Pokud se tiskové lůžko používá skleněné, lepí se na něj fólie vyrobená z PET materiálu. Tyto fólie jsou používány z důvodu zvýšení adheze první vrstvy a také ke snížení deformací a pnutí ve výtisku. PET fólie zároveň zajišťují hladký a dokonalý povrch výtisku. Při použití fólií je k vycentrování trysky tiskové hlavy nutné připočítat tloušťku této fólie. V G-kódu je upravena souřadnice Z pro výšku trysky. [26]

4.1.6 FLEX

Pokud se u výrobku vyžaduje chování gumy, jsou pro tisk používány materiály, které spadají do skupiny nazývané FLEX. Gumu jako takovou nelze tisknout, proto jsou hledány materiály podobné kaučuku s možností tisku na 3D tiskárně. Materiály typu FLEX jsou kombinací termoplastů (snazší zpracovatelnost) a elastomerů (ohebnost a elasticita). Díky kombinaci vlastností polymerů je získána nová třída materiálů spojující výhody obou. [5]

Materiály FLEX spadají do skupiny materiálu s označením TPE neboli Termoplastické elastomery. Jedná se o polymery, které se chovají jako zesíťovaná pryž. Výsledný materiál může mít různé vlastnosti, které se odvíjí od použitého TPE a chemického složení dané třídy. [27]

Vlastnosti termoplastických elastomerů jsou dány složením z tvrdých a měkkých segmentů ve struktuře polymeru. Tyto segmenty jsou navzájem nemísitelné, takže tvoří oddělené fáze. Měkké segmenty tvoří elastomery (nízká teplota skelného přechodu a snadná deformace) a tvrdé segmenty zase amorfnní nebo semikrystalický termoplast (obtížná deformace a vysoká teplota tání). Tvrdé segmenty vytváří uzly v síťování. [29]



*Obr. 10 - Schéma struktury TPE
připravené kopolymerací [29]*

Výhodou TPE je flexibilita a měkkost, takže je materiál méně náchylnější na porušení vlákna. S touto vlastností souvisí i vynikající tlumení vibrací a odolnost proti rázům. Materiály vykazují vysokou únavovou odolnost. TPE lze používat pro vnitřní i vnější aplikace, protože odolává povětrnostním vlivům, různým druhům chemikálií a také velkým rozdílům teplot. Odolává nízkým teplotám kolem -30°C a zároveň je schopen odolat vysokým teplotám okolo 140°C . Měkkost materiálu může být zároveň nevýhodou, protože může dojít k lámání a špatnému navádění vlákna do tiskové hlavy. S měkkostí materiálu souvisí také nutnost snížení rychlosti tisku. Materiály TPE lze na trhu rozdělit do několika následujících skupin podle chemické struktury a podle tvrdosti. [27]

První skupinu tvoří termoplastické polyuretany TPU. Tyto polyuretany umožňují tisk poloprůhledných výrobků, jejichž plochy lze dodatečně potisknout. Dále mají vynikající oteřuvzdornost a chemickou odolnost proti tukům a olejům. Druhou skupinou jsou termoplastické kopolymery TPC (Kopolyetherové estery), které se hodí spíše pro speciální výrobu. Výsledný materiál má nízkou hustotu, a výhodou je vynikající chemická a teplotní odolnost. Materiál má menší tažnost, takže jej nelze využít pro aplikace, u kterých se vyžaduje vysoká flexibilita, ale naopak vykazuje vyšší tvrdost. Posledním často užívaným materiálem jsou termoplastické polyamidy TPA. Jedná se o kombinaci termoplastického elastomeru spolu s pružným nylonem. Výsledný materiál je vysoce flexibilní a jeho tažnost může dosahovat i 500 %. Velkou výhodou je snadná tisknutelnost materiálu a také dobrá přilnavost první vrstvy k tiskové podložce bez použití dodatečné úpravy povrchu. [27]

U FLEX materiálů je důležitou vlastností jejich tvrdost. Tvrdost říká, jaká je odolnost materiálu proti vniknutí cizího tělesa, které má mnohem vyšší modul pružnosti v tahu, než zkoušený materiál. Pro zjištění hodnoty tvrdosti se nejčastěji používá Shoreho metoda. Pro měkké polymery je zavedena stupnice A nebo B a pro elastomery se tvrdost vyjadřuje mezinárodní stupnicí IRH. U obou metod se používá zařízení, které umožňuje vnikání hrotu tvrdoměru do zkoušeného materiálu. [28]



Obr. 11 - Materiály FLEX pro nejrůznější aplikace [5]

4.1.7 Kompozitní filamenty

Kompozitní materiály jsou založeny na míchání polymeru společně s dalším materiálem, který je nejčastěji přidáván ve formě prášku.

Vlastnosti materiálu ovlivňují dva parametry. Prvním je typ matrice, což je použitý polymer (má spojovací a tvarující účinek) a druhým parametrem je plnidlo. Nejčastější volbou pro používání kompozitních filamentů je požadovaný vzhled finálního výrobku. Při tisku těchto materiálů se projevuje jejich abrazivní chování. Pro častý tisk je nutné přizpůsobit vytlačovací trysku, která by měla být tvrzená. [5]

Při výběru materiálu lze volit z více variant. Běžně se k vybranému polymeru (PLA, PET-G) přidává měděný nebo bronzový prášek. Díky těmto přísadám lze po provedení dokončovacích operací dosáhnout kovového vzhledu výrobku. Pro získání imitace dřeva se přidávají korkové vlákna nebo dřevitý prášek. Jako plnidlo lze dále použít prášky z minerálů na bázi křídly. Vývoj materiálů umožňuje použití filamentů s karbonovými vlákny, která se používají v kombinaci s PET-G nebo nylonem. Výsledný materiál má dobré mechanické vlastnosti, snadno se tiskne a téměř nepohlcuje vzdušnou vlhkost. [30]



Obr. 12 - Výrobek z kompozitního materiálu na bázi bronzového prášku. [5]

5 3D TISKÁRNY FDM

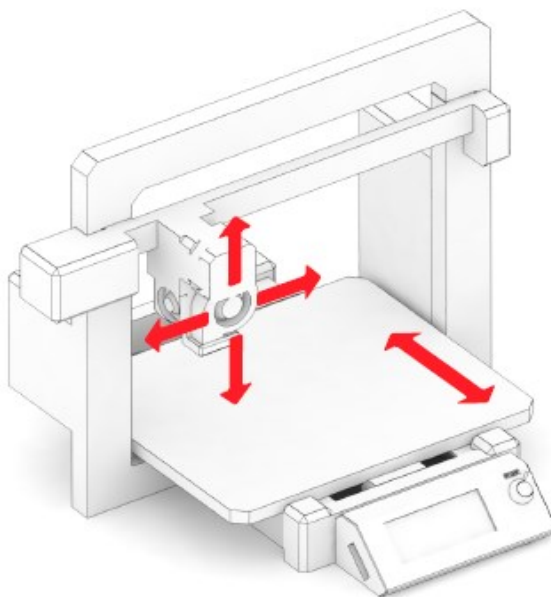
5.1 Konstrukce

Konstrukce 3D tiskáren se odvíjí především od způsobu pohybu tiskové hlavy zařízení. Běžně se na trhu vyskytují tři různé typy řešení. Nejběžnějším typem je Kartézská tiskárna, dále se používá tiskárna typu Delta nebo Polar.

5.1.1 Kartézská tiskárna

Dráhy nástroje (vytlačovací hlavy) pro posouvání v jednotlivých osách jsou dány pomocí instrukcí v programu, které jsou zapsány pomocí kartézských souřadnic. Kartézský systém souřadnic je tedy nutný pro řízení stroje a jednotlivé instrukce jsou vyjádřením polohy nástroje v prostoru. Podle potřeby lze souřadnicový systém posouvat a pootáčet. Každý souřadnicový systém obsahuje nulový bod, který je výchozím bodem pro ostatní souřadnicové systémy a vztažné body na stroji. [31]

Principem této tiskárny je pohyb tiskové hlavy v osách X, Y a Z. Tisková podložka může být pevná, takže plní tisková hlava pohyb všech tří os, dále lze zvolit pohyblivou tiskovou podložku, která řeší pohyb ve směru Y. U tohoto řešení pak tisková hlava koná pouze pohyb ve směru X a Z. Poslední možností je pohyblivá podložka pro směry X a Y, tisková hlava pak vykonává pouze pohyb ve směru osy Z. [5]

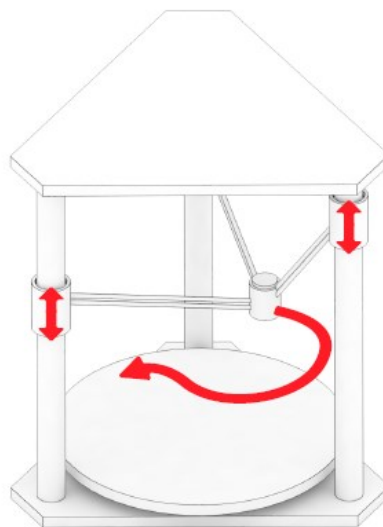


Obr. 13 - Kartézská 3D tiskárna s posuvnou tiskovou podložkou [5]

Základem této konstrukce je obdélníková podstava. Mezi tiskovou podložkou a horním rámem 3D tiskárny je na vodičích tyčích umístěna sestava tiskové hlavy, která pomocí pohybu motorů zajišťuje posuv v ose X (podle způsobu řešení tiskové plochy také pohyb v ose Y po vodičích šroubech). V ose Z jsou opět umístěny vodičí šrouby, které zajišťují pomocí krokových motorů pohyb tiskové hlavy v této ose. Nulový bod pro osy bývá umístěn na předním levém rohu. [32]

5.1.2 Delta tiskárna

Hlavním rozdílem Delta tiskárny proti Kartézské je tvar pracovní plochy. Delta tiskárna vytváří válcový pracovní prostor. Důvodem válcové konstrukce je zvláštní způsob pohybu v ose Z. Cylindrická zařízení pro 3D tisk jsou konstruována podstatně vyšší. U těchto zařízení je výchozí poloha pro tisk v bodě $[0,0,0]$. Tento bod leží ve středu celého zařízení (přímo ve středu cylindrické tiskové plochy). Pro kalibraci osy X a Y odjíždí tisková hlava jak do plusové, tak minusové vzdálenosti od nulového bodu tiskárny. Pro kalibraci osy Z vyjede tisková hlava od nuly do maximální hodnoty a pak se vrátí do původní polohy. Vytlačovací tryska by měla být těsně nad tiskovou plochou na vzdálenost jednoho listu papíru, aby nenarazila do podložky. Při pohybu tiskové hlavy se využívá všech tří os, což je výhodné pro pohyb tiskové hlavy a znamená to tedy, že pokud se změní hodnota v ose Y a Z, při zachování stejné hodnoty X, lze vykonat posun tiskové hlavy v ose X. Každá osa u delta tiskáren se pohybuje pouze ve svislém směru a ovládání je řešeno přes mechanismus dvou ramen připojených ke společně desce. [33]



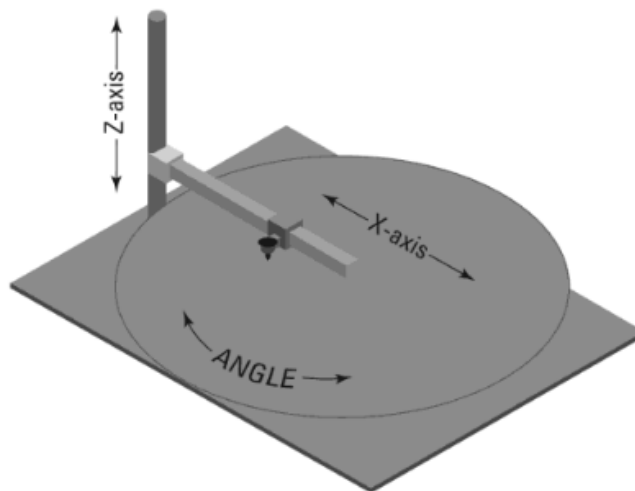
Obr. 14 - Pohyb tiskové hlavy
delta tiskárny [5]

Všechna tato ramena jsou spojena dohromady na vytláčovací hlavě a jejich pohyb musí být vykonáván rovnoměrně a harmonicky. Pro změnu osy Z se všechna ramena posunou ve svislém směru o stejnou hodnotu. Pokud je vyžadován posun v ose X nebo v ose Y , je potřeba každou osu posunout o jinou hodnotu, což je řešeno pomocí výpočtového algoritmu. [33]

5.1.3 Polar tiskárna

Třetím typem zařízení pro 3D tisk je tiskárna polar. U tohoto zařízení je tisk řešen pomocí otáčející se tiskové podložky kolem své vlastní osy. Pohyb tiskové hlavy je řízen pomocí systému polárních souřadnic, který byl popsán řeckými astrology a astronomy a je založen na rotaci kolem pevného bodu jako u Kartézského systému souřadnic. Polární systém souřadnic je dán délkou přímky (poloměrem) od počátku souřadnic a úhlem natočení θ . Pokud je dána poloha pólu (úhel natočení θ a vzdálenost pólu od počátku souřadnicového systému), lze popsat jakýkoliv bod na tiskové ploše. [34]

Běžné zařízení pro 3D tisk pracující se systémem polárních souřadnic je tvořeno rotující tiskovou podložkou nad kterou je umístěna tisková hlava pohybující se podél osy X . Pohyb je umožněn tam i zpět pomocí motorů. Pohyb v ose Z se řeší dvěma způsoby. Jednou z možností je vyrobit pevně připojenou rotující podložku, u které se pohyb osy X řeší zdvihem ramena. Druhou možností je zvolit pevné rameno pro osu X a pohybovat v ose Z pouze rotující podložkou. Nevýhodou zařízení je, že poměrně málo slicerů (program pro ovládání a tisk na 3D zařízení) umí pracovat v polárních souřadnicích. [34]

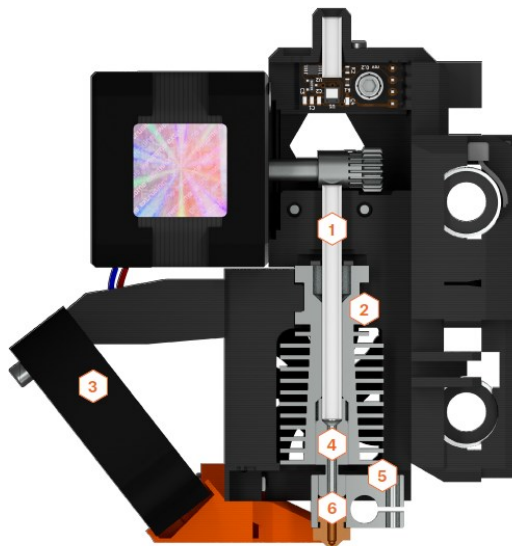


Obr. 15 - Klasické řešení 3D zařízení pracující s polárními souřadnicemi [34]

5.2 Tisková hlava

Jednou z hlavních částí 3D tiskáren je tisková hlava, která slouží k roztavení přiváděného filamentu z cívky a vytváří jednotlivé vrstvy výtisku. Pro správnou funkci tiskové hlavy je důležitý přísun vlákna filamentu pomocí extruderu (krokový motor s podávacím mechanismem). Kalibrace kroků extruderu se provádí vytlačením stanoveného množství materiálu.

Vlákno jde do tiskové hlavy většinou přes trubici vyrobenou z teflonu (podávací část). Aby bylo odváděno teplo produkované Heat breakem (tavná část), je teflonová trubice obklopena chladičem (heat sink). Úkolem chladiče je co nejvíce zmenšit oblast mezi pevným vláknem a již roztaveným materiálem. U 3D tiskáren se chladič upravuje přidáním samostatného ventilátoru. Dále jde materiál přes izolátor (heat break), což je zúžená trubice napojená na teflonovou trubici. Zúžení izolační trubice omezuje zpětný průchod tepla k filamentu, který ještě není extrudovaný. Nejpodstatnější částí celé tiskové hlavy je hotend (tavná část) tvořený heater blockem, který dobře vede teplo. Heater block se nejčastěji vyrábí z hliníku a jsou v něm umístěna elektricky ovládaná topná tělesa, navíc bývá přidán teplotní snímač (termistor). Termistor slouží k zasílání zpětných údajů o aktuální teplotě bloku. Při průchodu materiálu přes vyhřívaný blok (heater block) je materiál již roztavený a je extrudován přes vytlačovací trysku, která se do bloku zašroubuje napevno. [5]



Obr. 16 - Tisková hlava [5]

- 1 – Teflonová trubička, 2 – Chladič (heat sink),
- 3 – Tiskový ventilátor, 4 – Izolátor (heat break),
- 5 – Vyhřívaný blok (heater block), 6 - Tryska

5.2.1 Extruder

U běžných 3D tiskáren lze použít dva způsoby řešení extruderů. První možností je extruder umístěný přímo na tiskové hlavě. Dále jej lze umístit mimo tiskovou hlavu (provedení typu bowden). Vedení filamentu z extruderu do tiskové hlavy pak zajišťuje prodloužená PTFE trubice. Montáž spojovací PTFE trubice zajišťují spojky na tiskové hlavě a na mechanismu extruderu.

Přímo poháněný extruder minimalizuje cestovní vzdálenost filamentu k horkému konci tiskové hlavy. Toto uspořádání umožňuje spolehlivější 3D tisk flexibilních filamentů. Použití přímého pohonu však nutně neznamená, že lze flexibilní materiály vytisknout. Je potřeba dávat pozor na pozici PTFE trubice, která je součástí studené části tiskové hlavy, protože může i zde docházet k lámání flexibilního vlákna. Velkou výhodou použití tohoto typu extruderu je lepší kontrola retrakce materiálu a také kratší dráha filamentu. Díky kratší dráze se snadněji vede filament a eliminuje se lámání vlákna mezi studenou a horkou částí tiskové hlavy. Přímé řešení má však i své nevýhody. Díky krokovému motoru na tiskové hlavě narůstají její rozměry a navíc je zvětšeno zatížení. Pro správný tisk je tedy nutné počítat se správnou hmotností tiskové hlavy. [5]

Extruder označený jako bowden má jednu velkou výhodu proti přímo poháněnému extruderu. Díky menší hmotnosti tiskové hlavy lze tisknout podstatně větší rychlostí při zachování stejné kvality výtisku. Princip uspořádání bowden se ve funkci neliší. Stále zde jako pohon slouží krokový motor, který pohání ozubené kolečko pohybující filamentem a rozšířenou PTFE trubicí, do které směřuje filament. Důvodem většího průměru je možnost mírného ohnutí filamentu. Při tisku je potřeba správné nastavení retrakce tak, aby nedocházelo ke stringování. Bez potřebné korekce zvýšení retrakce dochází ke zpoždění při vytlačování a výsledná vrstva filamentu má chaotický tvar. [35]

5.3 Vyhřívání podložka

Jedná se o tiskovou podložku 3D zařízení, kterou lze předehřívat na potřebnou teplotu pro zvolený materiál. Vyhřívání tiskové podložky se používají z důvodu zlepšení kvality tisknuté součásti a k uchycení výtisku na podložce, aby nedocházelo k jeho posunutí. Díky nastavení teploty podložky nedochází k výrazné deformaci výrobku. Hlavním důvodem zlepšení tiskových podmínek je rovnoměrné chladnutí povrchu i vnitřku součásti, čímž je např. eliminováno pokrivení okrajů vyráběné součásti. [5]

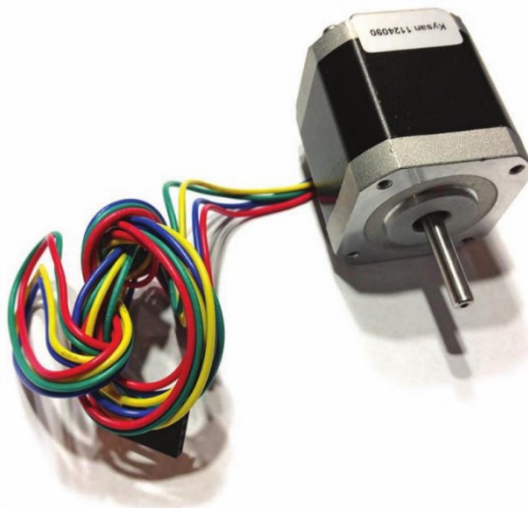
5.4 Pohon tiskáren

Pohon většiny zařízení je zajištěn pomocí motorů, které jsou vyráběny v různých provedeních. Jednotlivé parametry by měly být voleny dle požadavků stroje. Výjimkou není ani zařízení pro 3D tisk. Motor by měl zajistit následující parametry:

- Pohyb v jednotlivých osách
- Otáčení po směru nebo protisměru hodinových ručiček
- Regulace otáček

Tento typ motoru, který je běžně používaný u 3D tiskáren, se nazývá krokový. Výhodou tohoto typu motoru je pootočení o velmi malý přírůstek neboli krok. Smysl otáčení lze měnit podle potřeby ve směru nebo protisměru hodinových ručiček. Jedná se o synchronní motor (rotor se otáčí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole statoru). Točivé pole vzniká díky postupnému zapnutí jednotlivých cívek statoru. [36]

Většina 3D tiskáren má pro pohon jednotlivých částí celkem 4 motory. Každý jeden motor je používán pro pohyb tiskové hlavy nebo pro pohyb tiskové podložky v dané ose. Posledním motorem bývá tzv. extruder, který slouží pro podávání vlákna filamentu do tiskové hlavy. [36]

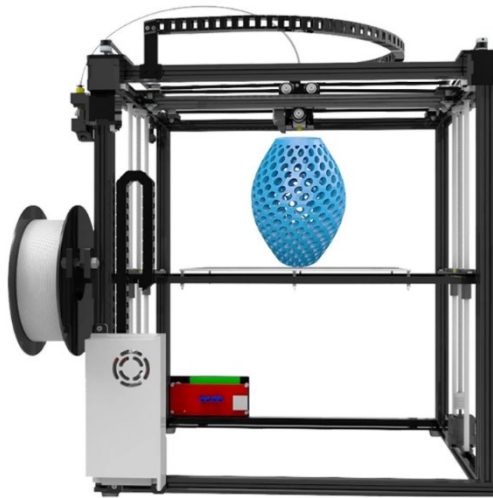


Obr. 17 - Krokový motor 3D tiskáren [36]

Aby mohla tiskárna vykonávat pohyby v jednotlivých osách, je potřeba výkon motoru přenášet, a to pomocí ozubených řemenů, které je nutné správně napnout. [36]

5.5 Rámy tiskáren

Důležitou roli u zařízení pro 3D tisk má rám tiskárny. Je potřeba zvolit správnou konstrukci a také materiál, protože celková tuhost a stabilita konstrukce má vliv na výsledný výrobek. Rám tvoří nosnou konstrukci pro veškeré komponenty 3D tiskárny. Čím větší tuhost bude konstrukce mít, tím nižší budou vibrace při chodu zařízení. Zvolená konstrukce dále určuje celkový pracovní objem zařízení. U běžných domácích tiskáren jsou využívány hliníkové profily různých tvarů nebo profily z konstrukčních ocelí.



Obr. 18 - Tiskárna s kvádrovým tiskovým prostorem [37]



Obr. 19 - Rám pro tiskárnu Prusa [5]

5.6 Řídící jednotka

Řídící jednotka se stará o fungování celého zařízení pro 3D tisk. Hlavní funkcí jednotky je čtení a zpracování textového souboru neboli G-kódu, který slouží jako vstupní informace pro tisk. Pomocí G-kódu jsou řízeny pohyby jednotlivých krokových motorů, dále řízení teploty tiskové podložky a také teplota trysky tiskové hlavy. [5]



Obr. 20 - Řídící jednotka 3D tiskárny [5]

6 POSTUP TISKU VÝROBKU METODOU FDM

Výrobu součásti pomocí 3D tisku lze rozdělit na přesně dané kroky jdoucí za sebou. Primárně je potřebné získat 3D model vyráběné součásti. Model je nutno převádět do programu, který rozdělí součást na tisknutelné vrstvy. Posledním krokem je nastavení parametrů pro tisk.

3D model, který bude vyráběn, se ukládá ve formátu STL. Zařízení pro 3D tisk není schopno s takovým souborem pracovat, a proto je tedy nutné přejít do programu nazývaného slicer, ve kterém bude součást otevřena. Do sliceru jsou dále zadány parametry a nastavení tisku, které určují kvalitu výtisku, teploty, chlazení aj. Výstupní hodnotou sliceru je převedení STL souboru do G-kódu, se kterým již 3D tiskárna dokáže komunikovat. G-kód spočívá v nařezání 3D modelu na tenké tiskové vrstvy a zároveň vytvoření pohybů tiskové hlavy v jednotlivých vrstvách. Nakonec jsou souboru přiřazeny informace o jednotlivých teplotách chlazení aj. [5]

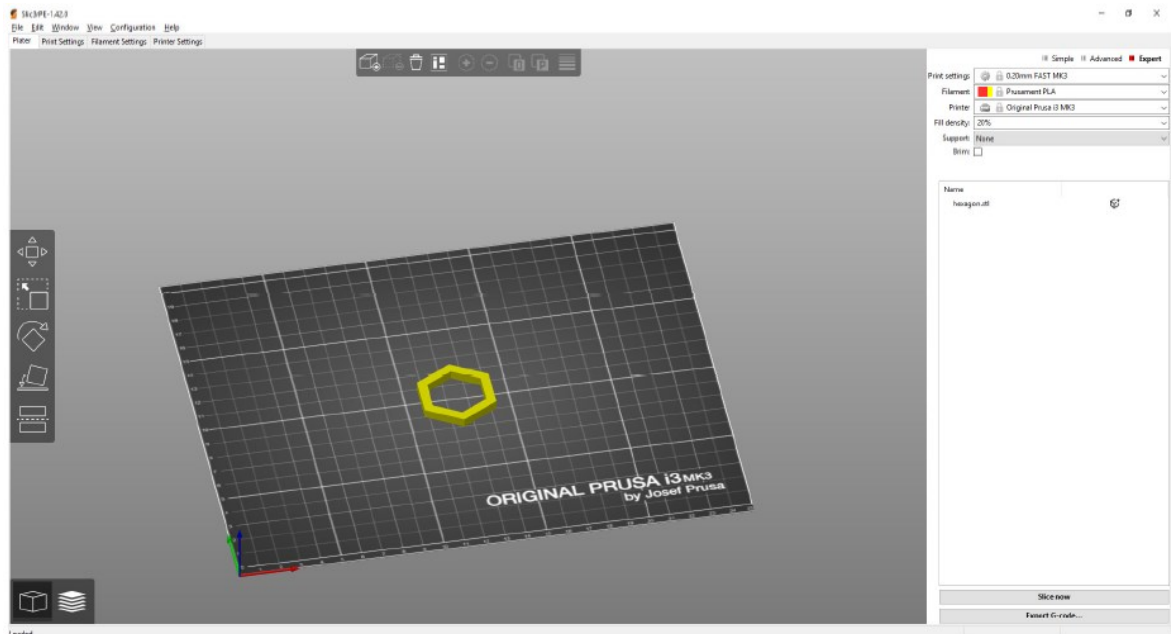
6.1 3D model

3D model lze získat více způsoby. Nejjednodušším způsobem je použití již existujícího modelu. Tyto soubory lze získat na internetových stránkách, kde dnes existují široká spektra nejrůznějších souborů. Aby mohl být model použit, musí být uložen ve formátu STL.

Druhou možností je vytvoření vlastního modelu pomocí CAD programu. Pro začátečníky je doporučen program Tinkercad. Pokud je vyžadována složitější součást, je možné využít pokročilejšího programu s názvem Autodesk Fusion 360. Pro všechny zmíněné programy je možnost převedení 3D modelu do souboru formátu STL. [7]

Dále lze použít i jiné běžně používané programy jako jsou Solidworks, Inventor nebo AutoCAD. Poměrně novou technologií tvoří 3D skenování a fotogrammetrie. Tímto způsobem lze přenést reálný předmět do počítačového modelu. Jednodušším způsobem je fotografování součásti z více stran, kde se série fotek následně převede pomocí programu na 3D model. [5]

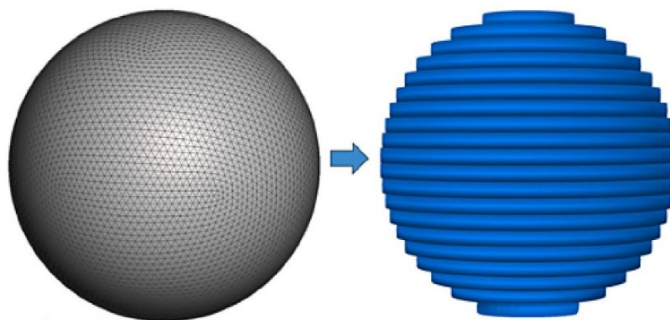
6.2 Slicer



Obr. 21 - Pracovní prostředí Průša Slic3r [5]

Pokud je vytvořen model, musí se rozdělit na jednotlivé vrstvy, které budou tisknuty. Pro vytvoření jednotlivých vrstev modelu slouží program zvaný slicer. Dalším důvodem použití sliceru je nastavení jednotlivých parametrů tisku (perimetr, výplň, výška vrstvy, rychlost tisku, teploty, chlazení aj.). Nastavení sliceru má značný vliv na dobu tisku.

Pro komunikaci 3D zařízení (typu FDM) s požadovaným modelem se doporučuje vhodný software pro přípravu modelů. Programů, které umí převádět STL soubor do požadovaného G kódu, je však na výběr více. Slicer provede rozřezání modelu na potřebný počet plátů tak, aby mohl být výsledný model vyhotoven. Program umožňuje zvětšování či zmenšování modelu, jeho otáčení nebo rozdělování na jednotlivé části. Dále lze libovolně rozmístit modely na tiskové ploše. Výstupem sliceru je G-kód obsahující veškeré informace tisku. [7]



Obr. 22 - Převedení modelu z CAD programu ve sliceru [7]

6.2.1 G-kód

Základem G-kódu jsou instrukce G a M. Příkazy G slouží pro ovládání tiskové hlavy a vyhřívané podložky. Příkazy s označením M pracují se součástmi tiskárny (chlazení, motory aj.). G-kód obsahuje veškeré zadané informace ze sliceru, nastavení kalibrace jednotlivých os, očištění trysky, vypínání a zapínání motorů, chlazení trysky, vyhřívání tiskové hlavy a podložky. [40]

G1 – lineární pohyb

G1 Z0.2 – lineární pohyb po ose Z o 0.2 mm

G1 X8.0 F2000 – lineární pohyb po ose X rychlostí F=2000mm/min

G1 Y60.0 E4.0 F1000.0 – lineární pohyb po ose Y rychlostí F, a zároveň vytlačení 4mm filamentu

G28 – domovská pozice

G28 X – domovská pozice pouze pro osu X

G28 Y – domovská pozice pouze pro osu Y

G28 Z – domovská pozice pouze pro osu Z

G29 – vyrovnání podložky (spuštění autokalibrace heatbed)

G90 – absolutní pozice na osách XYZ

G1 X20 F2400 – posunutí do X=20 na podložce

G1 X40 F2400 – posunutí do X=40 na podložce

G91 – relativní pozice na osách XYZ

G1 X20 F2400 – posunutí o 20mm od aktuální pozice po ose X

G1 X20 F2400 – posunutí o dalších 20mm po ose X

G92 – nastavit aktuální polohu os; nejčastěji se využívá pro osu E (filament)

G92 E0.0 – nastavit aktuální pozici filamentu na E=0

M84 – vypnout motory

M104 – nastavit teplotu hotendu

M104 S0 – vypnout zahřívání hotendu

M107 – vypnout ofuk

M117 – zobrazit zprávu na LCD displeji

M140 – nastavit teplotu podložky

M140 S0 – vypnout vyhřívání podložky

M201 – nastavení maximální akcelerace na jednotlivých osách

M201 X1000 Y1000 E600 – příklad nastavení akcelerací (X=1000mm/min; Y=1000mm/min; E=600mm/min)

Obr. 23 - Zápis G-kódu [40]

6.2.2 Nastavení sliceru

Teplota filamentu a tiskové podložky

Ve sliceru je nutné nastavení teploty filamentu a tiskové podložky. Tyto parametry se liší dle použitého typu materiálu. Běžná teplota filamentu se pohybuje mezi 200 °C až 250 °C. Pro podložku je běžné rozmezí teplot mezi 60 °C až 90 °C. [5]

Výška vrstvy

Výška vrstvy ovlivňuje především kvalitu a vzhled tisknuté plochy. Výška vrstvy je závislá na velikosti vytlačovací trysky tiskové hlavy, proto nelze vytisknout větší vrstvu, než je průměr trysky. [34]

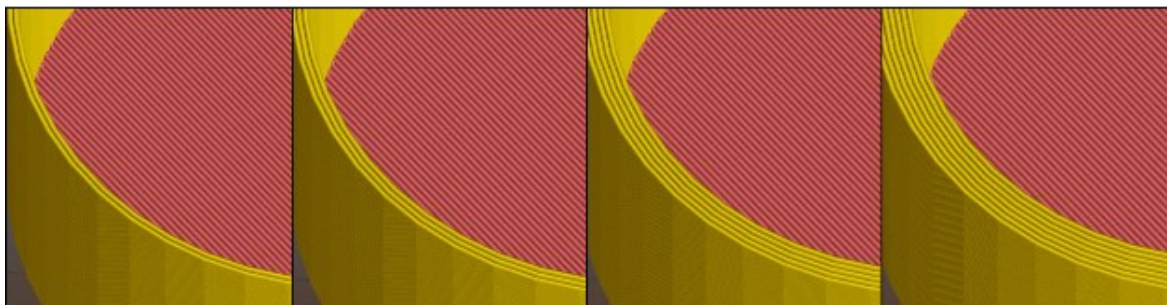
Se vzrůstající výškou vrstvy roste rozeznatelnost jednotlivých vrstev. Nejběžněji se lze setkat s výškou vrstvy 0,15 mm. Nižší vrstvy jsou voleny především kvůli detailnějšímu výtisku. S nižší tloušťkou vrstvy však narůstá čas vyhotovení výtisku. [5]



Obr. 24 - Rozdíl povrchu výtisku při různé výšce vrstvy [5]

Perimetr

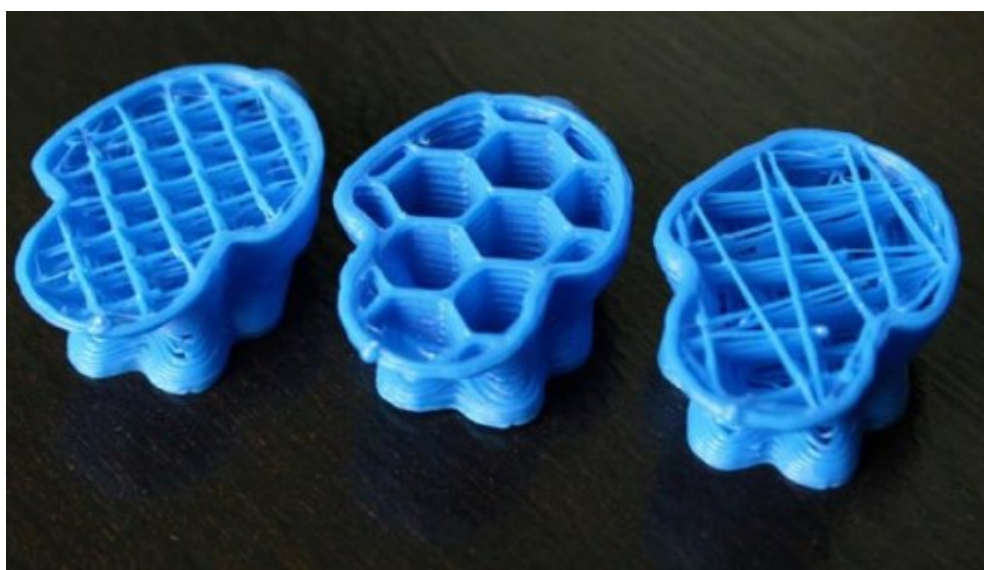
Jedná se o počet vláken, které budou tvořit vytištěný plášť dílu. S vyšším číslem roste tloušťka stěny, spotřeba materiálu a také potřebný čas tisku. Běžně je hodnota perimetru nastavována na dvě vlákna, to však nemusí stačit při tisku šikmých nebo tvarových ploch. Je tedy nutné provést test, jestli nastavení perimetrů stačí na bezchybné zhotovení výtisku. [38]



Obr. 25 - Porovnání perimetrů 2,3,5 a 7 [38]

Výplň (infill)

Jedná se o vyplnění prostoru uvnitř výtisku. Výplň ovlivňuje spotřebu materiálu, pevnost výtisku a také tiskový čas. Kromě výtisků s výplní lze zhotovit i duté výtisky. Hodnota výplně je zadávána v procentech. Pro běžné výtisky se používá hodnota 10 až 20%. Pokud je požadován dutý výrobek, bude hodnota nastavena na 0%. Jednotlivé slicery obsahují mnoho předdefinovaných vzorů výplně, takže záleží na uživateli, jaký vzor výplně bude zvolen. [17]



Obr. 26 - Ukázka jednotlivých typů výplně výtisků [17]

Podpory (supports)

Při vysoké složitosti modelu vznikají vrstvy nacházející se v prostoru, proto je nutné přiřazení tzv. podpor. Podpory slouží pro vytvoření dodatečných vrstev ve směru od tiskové podložky a umožní tisk výrobku, protože ve většině případů nelze tisknout do prázdna bez předchozí vrstvy. Ve sliceru lze tyto podpory vygenerovat automaticky. [7]

Podpory jsou běžně tisknuty ze stejného materiálu jako hotový výtisk a po dokončení je lze odlomit. Tyto prvky jsou generovány minimální, a to kvůli ušetření materiálu a tiskového času. [5]

Ve 3D tisku jsou přiřazeny podpory mřížkové nebo stromové. Běžně jsou využívány mřížkové, protože jsou univerzální. Většina slicerů má tyto podpory nastaveny jako výchozí. Stromové podpory nejsou závislé na tvaru převisu a lze s nimi zhotovit tisk správně. Nevýhodou je delší tiskový čas a větší spotřeba materiálu. U stromových podpor lze získat výhodnější tiskové podmínky (kratší tiskový čas, ušetření materiálu, úprava podpor). Při řešení podpor lze zvolit místo, kde bude umístěna, a navíc lze podporu ručně upravit dle požadavků tisku. [39]



*Obr. 27 - Mřížkové a stromové podpory,
porovnání tiskového času [39]*

Límeč (brim)

Pro zlepšení přilnavosti povrchu k tiskové podložce se nastavuje límeč okolo tisknuté součásti. Po vyhotovení výtisku se límeč odlomí. Prvek je generován podle součásti a umístěn tak, aby se dotýkal výtisku. [5]

6.3 Příprava tiskové podložky

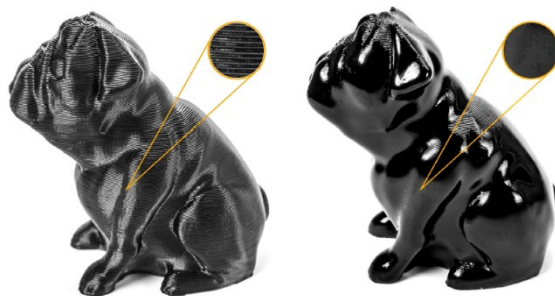
Tiskovou podložku je potřebné očistit, aby bylo možné dosáhnout požadované kvality výtisku. U materiálů s vysokou přilnavostí se na tiskovou podložku nanáší separátor, který umožní lepší odstranění hotového výtisku z podložky. Pro zlepšení adheze jsou používány samolepící podložky, které mohou být přilepeny na tiskovou plochu.

6.4 Tisk součástí

Pro zahájení tisku je potřebný hotový G-kód, podle kterého bude tiskárna pracovat. Předání instrukcí pro zařízení je prováděno více způsoby. Data pro tisk lze vložit přímo do zařízení na paměťovém médiu. Výhodou je nezávislost 3D tiskárny na dalším zařízení. Další možnost tvoří připojení tiskárny k počítači, ze kterého je pomocí programu G-kód čten. Nevýhodou tohoto řešení může být přerušování toku dat vlivem poruchy nebo vypnutí počítače. Pokud dojde k přerušování tisku, nelze se nijak vrátit k poslednímu kroku a je tedy nutné začít tisknout od začátku. Doba tisku součástí závisí na velikosti a složitosti modelu, nastavení jednotlivých parametrů ve sliceru a také na použitém materiálu. Řádově se lze pohybovat v rámci minut, ale také hodin.

6.5 Dokončování výtisku

Dle požadavků mohou být výrobky dále upraveny broušením, tmelením, laminací, barvením, lepením nebo vyhlazováním pomocí chemických látek. Materiály ASA a ABS lze vyhlazovat a lepit pomocí acetonu. Při lepení součástí k sobě se povrch natře a součásti jsou spojeny k sobě. Při vyhlazování lze součást do acetonu ponořit na 5 až 10 sekund nebo vyhladit pomocí výparů v uzavřené nádobě. Vyhlazováním vznikne lesklý povrch s menším množstvím detailů. [5]



Obr. 28 - Vyhlazování výtisku pomocí acetonu [5]

7 POUŽITÍ 3D TISKU

Rozvoj 3D tisku dnes umožňuje tisk ve všech odvětvích výroby. Výtisky lze zhotovit ve velkých firmách pro ověření funkčnosti a vhodnosti dílu před začátkem sériové výroby. Velkou výhodou je snadná úprava modelu, který slouží jako šablona pro tisk součástí, takže lze snadno, rychle a ekonomicky opravit chyby. Důležitým důvodem použití 3D tisku jsou také personalizace.

Personalizovaná výroba

3D tisk lze použít pro kusovou i malosériovou výrobu, která přizpůsobí výrobek dle požadavků zákazníka. Lze tedy vyrábět jeden typ výrobku, který se bude lišit rozměry, tvarem a designem. [5]

Medicína

Široce používán je 3D tisk v medicíně, kde lze vyrábět různé implantáty přesně podle parametrů pacienta.

Stavebnictví

Ve stavebnictví lze tisknout zmenšené modely různých staveb vycházejících z programových vizualizací, díky kterým lze získat lepší představu o reálné podobě stavby. [5]

Ostatní výroba

V průmyslu je využíván 3D tisk v automobilovém i leteckém průmyslu, kde slouží k urychlení a zjednodušení výroby. Běžné se lze setkat s výtisky šperků, které lze různě upravovat. Nedostupnost náhradních dílů lze snadno řešit 3D tiskem. Pokud je možné změřit potřebnou součást, lze vytvořit model, ze kterého se vyrobí nový díl. [5]



Obr. 29 - Personalizovaná výroba [5]

8 KOMERČNÍ 3D TISKÁRNY

Na trhu lze najít velké množství zařízení pro 3D tisk, které se liší technologií výroby, velikostí zařízení, uspořádáním a především cenou. Lze zakoupit zařízení v řádech tisíců, které jsou vhodné pro domácí použití nebo profesionální zařízení pro velké firmy, která se pohybují v řádech statisíců.

8.1 Domácí zařízení pro 3D tisk

8.1.1 Průša MK3s

Jedná se o zařízení pro 3D tisk typu FDM, vyráběné společností Průša Research a určené pro domácí výrobu. 3D tiskárna vyniká vysokou spolehlivostí a konzistentností výtisků. Pro zařízení je dodávána neustálá softwarová podpora. Maximální tiskový objem je 250 x 210 x 200 mm. Tiskové lůžko je vyhříváno a lze jej snadno vyjmout. Ovládání se provádí přes LCD displej a veškerou komunikaci zajišťuje SD karta a USB port. Řízení stroje zajišťuje firmware Marlin a veškeré úpravy tisku lze provádět přes počítač. Celková hmotnost zařízení činí 6,35 kg. Cena stanovená pro sestavenou tiskárnu se pohybuje okolo 25 tisíc korun. [41]



Obr. 30 - Průša MK3s [41]

8.1.2 Flashforge Finder 2

Zařízení pro 3D tisk typu FDM. Výhodou tiskárny má být nízká hlučnost (maximálně 50 dB). Pracovní objem činí 480 x 338 x 385 mm. Zařízení je prodáváno bez vyhřívané desky. Sestavená tiskárna je zakrytována a vyjde na necelých 12 tisíc korun. Zařízení obsahuje modul WiFi. [42]



Obr. 31 - Flashforge Finder 2 [42]

8.1.3 Creality Ender 3 Pro

Běžně dostupná 3D tiskárna, kterou lze pořídit za necelých 6 tisíc korun (stavebnice). Zařízení je typu FDM a svými schopnostmi konkuruje podstatně dražším 3D tiskárnám. Creality Ender 3 Pro vyniká kvalitním zpracováním konstrukce s velkým tiskovým prostorem (220 x 220 x 250 mm). Tisková podložka je vyhřívaná a upevněná magneticky. Výhodou je možnost úpravy konstrukce a také definování řídicího firmwaru dle požadavků tiskaře. [43]



Obr. 32 – Creality Ender 3 Pro [43]

8.2 Profesionální zařízení 3D tisku

8.2.1 Big Rep Studio G2

Tiskárna typu FDM určená pro velkoplošný tisk prototypů ve velkovýrobě. Celkový tisknutelný objem činí 1000 x 500 x 500 mm. Zařízení disponuje tryskou o průměru 0,6 mm. Celý stroj je zakrytován a obsahuje bezpečnostní senzory i kameru. Pro ovládání slouží dotykový displej. Tiskárna umožňuje tisknout vrstvu až 0,5 mm a samozřejmě nechybí vyhřívaná tisková podložka. Celková cena tiskárny je okolo 1,5 milionu korun. [44]



Obr. 33 - Big Rep Studio G2 [44]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

9 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pro bakalářskou práci byly stanoveny následující cíle:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Vypracujte teoretický návrh zařízení
3. Realizujte výrobu funkčního prototypu
4. Porovnejte kvalitu tisku na prototypu s komerční 3D tiskárnou

Praktická část se zabývá konstrukcí zařízení pro 3D tisk. Tiskárna typu FDM bude sloužit především pro domácí použití a získávání nových znalostí v této oblasti výroby. Důvodem vlastní konstrukce je zkoumání, co vše lze na tiskárně definovat a zjistit, jaký důvod hraje cenový rozdíl jednotlivých stolních 3D zařízení. Vlastní návrh umožňuje použití odlišných způsobů koncepce jednotlivých dílů, možnost libovolného umístění nebo způsob uchycení například tiskové podložky. Variabilita zařízení závisí pouze na vlastních požadavcích a není předepsáno jako u stavebnic, kam se součást musí namontovat. Při výběru komponentů je potřeba zachovat vzájemnou kompatibilitu použitých dílů, aby byla zajištěna funkčnost zařízení. Se základní deskou tedy souvisí zvolený LCD displej nebo ovládací drivery motorů a nelze tak vybrat libovolné díly, které se pouze propojí.

Prvním krokem je vypracování teoretického návrhu, aby bylo jasné, jaké díly je potřeba zakoupit a vyrobit. Po vyhotovení návrhu následuje realizace konstrukce rámu, montáž všech mechanických částí, vyřešení statiky celého zařízení a osazení potřebnou elektronikou. Po sestavení se odladí firmware a software.

Stanovený rozpočet deset tisíc korun hraje roli při výběru kvality komponentů a potřebných dílů. Pro ušetření financí se veškeré úchyty vytiskly na komerční 3D tiskárně. Vlastní návrh dílů umožňuje jejich úpravy a při špatném rozměru lze díl snadno vytisknout znovu za minimální náklady.

Zhodnocení vlastního zařízení, kvality tisku dílů a srovnání s konkurenčním zařízením uvádí závěr této práce, stejně jako cenovou kalkulaci celého zařízení pro 3D tisk. Práce ukazuje, jestli se vyplatí tiskárnu koupit již hotovou a naladěnou nebo je vhodnější postavit tiskárnu vlastní.

10 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO 3D TISK

Pro rozpočet zařízení byla zvolena hranice deset tisíc korun. Cílová částka se odvíjela od přibližné kalkulace potřebných dílů a také dle cen běžně dostupných zařízení pro domácí použití. Stanovený rozpočet by měl zajistit konkurenci schopnost zařízení při porovnání s podobnými tiskárnami.

Prvním krokem pro začátek stavby je nutné zhotovení teoretického návrhu zařízení, podle kterého se vyrobí a nakoupí nutné díly. Základem zařízení je krychlová konstrukce z hliníkových profilů ve tvaru „X“. Důvodem volby krychle je zajištění dostatečné stability celého zařízení a především ochrana tiskového prostoru. Dalším důvodem je navržený způsob pohybu tiskové plochy v ose Z. Krychle umožňuje její nejjednodušší realizaci.

Při koupi profilů bylo rozhodováno mezi českou distribucí a čínskou distribucí. Cena pro český trh byla mnohem vyšší, ale výhodou jsou lepší vlastnosti a hlavně přesnost, se kterou je tyč vyrobena. Profily z čínské distribuce nemají dostatečnou tuhost a také se liší přesnost drážek v profilech, do kterých jsou následně vkládány T-matice.

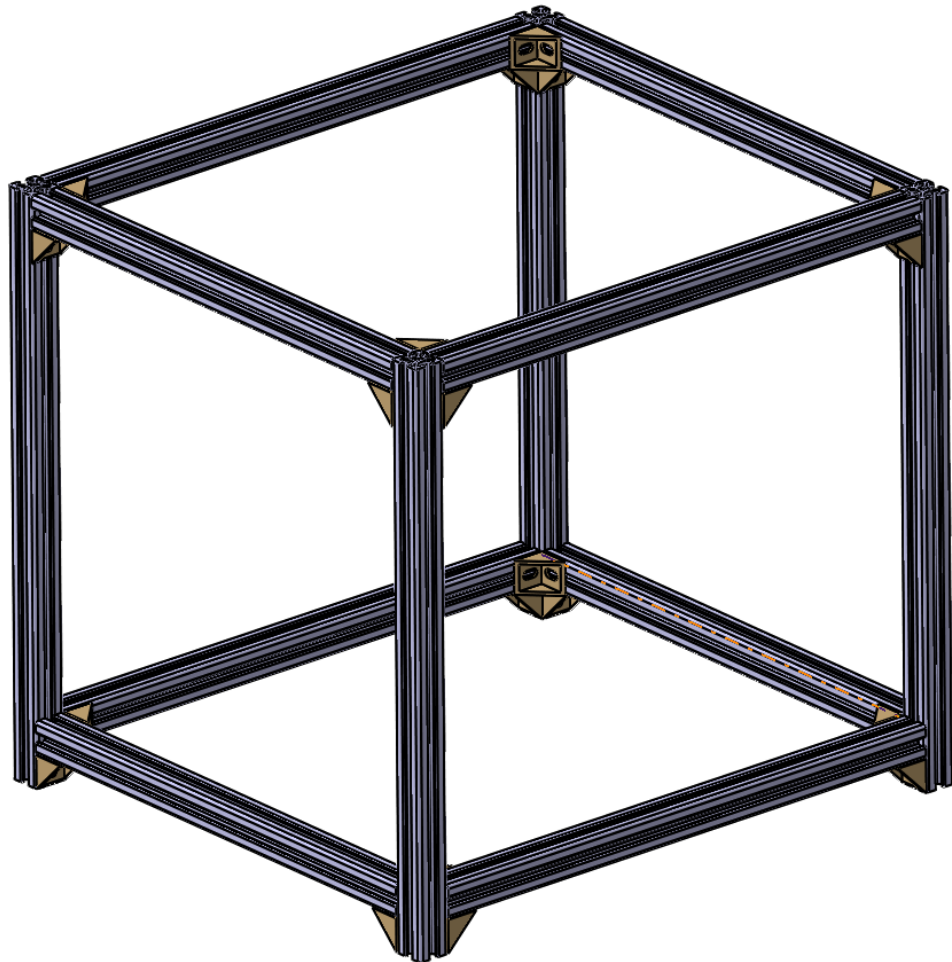
Pohyb tiskové hlavy bude realizován krokovými motory spojenými řemeny a to pro pohyb v ose X a v ose Y. Pohyb v ose Z bude vykonáván rovněž krokovým motorem, jehož výkon bude přenášen na trapézovou tyč, která bude pohybovat tiskovou plochou. Modely jsou propojeny s nakoupenými díly, ze kterých jsou převzaty potřebné rozměry pro další tvorbu.

Veškeré úchyty jsou zhotoveny na vlastní 3D tiskárně z materiálu PETG, čímž se ušetřily finance. Vlastní výroba je vhodnější díky možnostem oprav dílů, u kterých nebudou odpovídat rozměry. Definované vlastnosti tisknutých dílů odpovídají použité aplikaci tak, aby při fungování tiskárny nedošlo k jejich porušení. Namáhané díly jsou použity ocelové.

Zapojení elektroniky bude řešeno až při konstrukci zařízení, jelikož není nutné pro 3D návrh. Totéž se bude týkat natahování řemenů, instalace řemenic, uchycení pro bowden nebo umístění tiskové plochy.

10.1 Návrh rámu

Vzhledem k definovanému rozpočtu je řešena otázka velikosti tiskového prostoru. Tvar krychle zaručuje dostatečnou stabilitu celého zařízení a zároveň umožňuje lehkou manipulaci. Pro základní konstrukci jsou potřebné čtyři délky profilů pro každou osu. Pro osu X byla stanovena délka 340 mm, pro osu Y délka 300 mm a pro osu Z délka 350 mm. Profil tvaru „X“ byl vybrán velikosti 20 x 20 mm. Spojení profilů je realizováno šrouby a maticemi ve tvaru „T“. Pro vzájemné vymezení profilů jsou využity pravoúhlé trojúhelníky s otvory pro šrouby, jejichž rozměr byl převzat z reálného dílu.

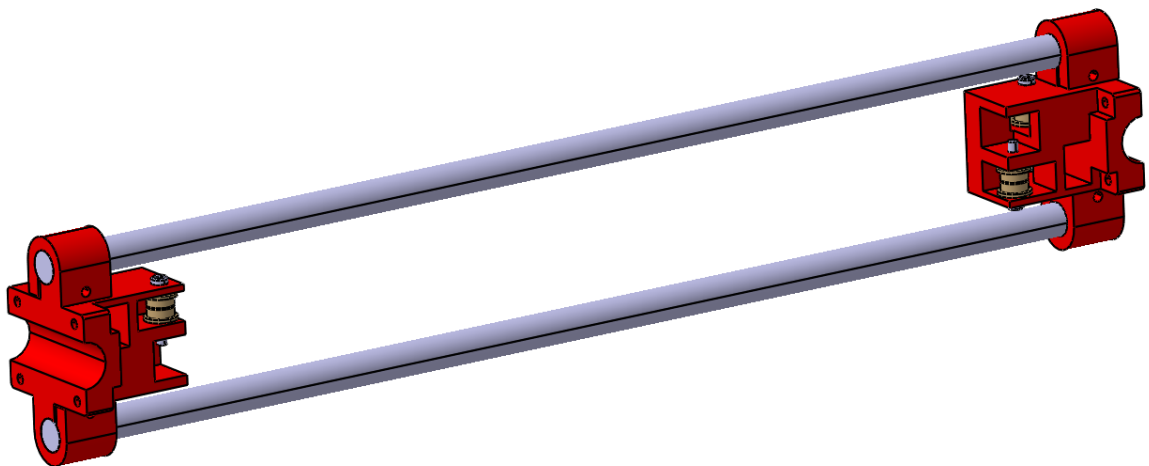


Obr. 34 - Navržená konstrukce

10.2 Návrh pohyblivých os

10.2.1 Pohybová osa X

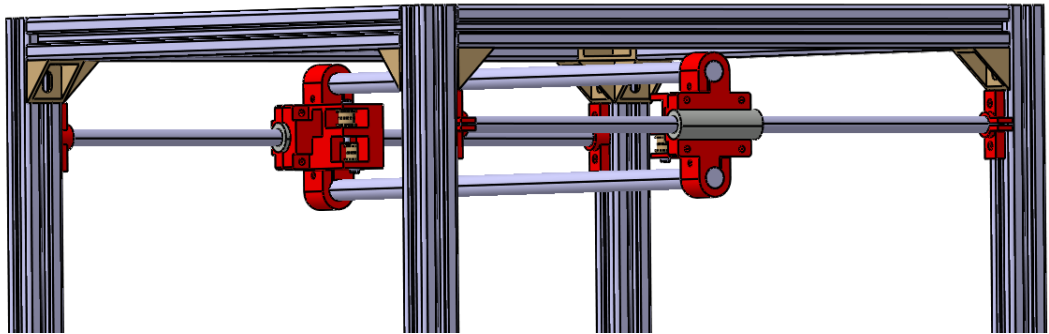
Pohyb tiskové hlavy v ose X je prováděn po dvou hliníkových trubkách o průměru 10 mm, jejichž délka činí 360 mm. Vzhledem k nutnosti pohybu hlavy pomocí ozubeného řemene jsou vytvořena pouzdra, přes která bude řemen procházet. Na Obr. 31 lze vidět sestavu pro zajištění pohybu v ose X s potřebnými pouzdry pro řemeny. Dle rozměru řemenu se koupily vodící prvky. Pro správný pohyb sestavy tiskové hlavy jsou vytvořena dvě patra, jedno pro motor X a druhé pro motor Y (systém CoreXY). Pro zamezení posunu hliníkové trubky z pouzder pro vedení řemenů je vytvořen výřez, který způsobí při dotažení šroubu s maticí sevření dvou stran pouzdra. Pohyb sestavy umožňují kluzná ložiska o vnitřním průměru 8 mm a vnějším průměru 14 mm. Na Obr. 34 lze vidět válcové výřezy v úchytech, do kterých byly ložiska následně vloženy.



Obr. 35 - Sestava pro osu X (tisková hlava bude uchycena na hliníkových tyčích)

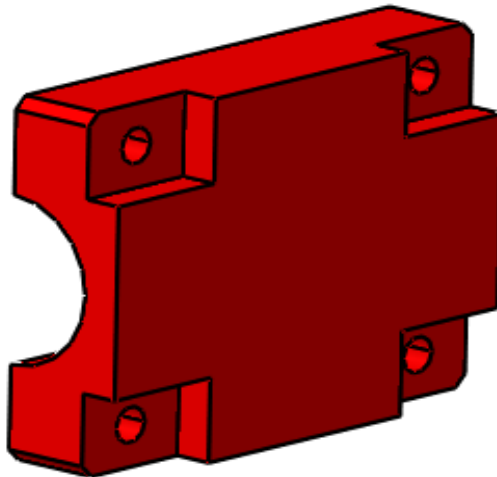
10.2.2 Pohybová osa Y

K pohybu osy Y jsou použity ocelové tyče (2x průměr 8 mm a délka 300 mm), po kterých se přes ložiska pohybuje sestava osy X na Obr. 34. Uchycení zajišťuje dvojice navržených dílů na obou stranách tyče. Každý úchyt drží pomocí dvou šroubů s maticemi tvaru „T“. Zakrytování ložiska zajistil navržený úchyt (viz Obr. 36).



Obr. 36 - Úchyt vodící tyče v ose Y (na tyč je nasunuto ložisko)

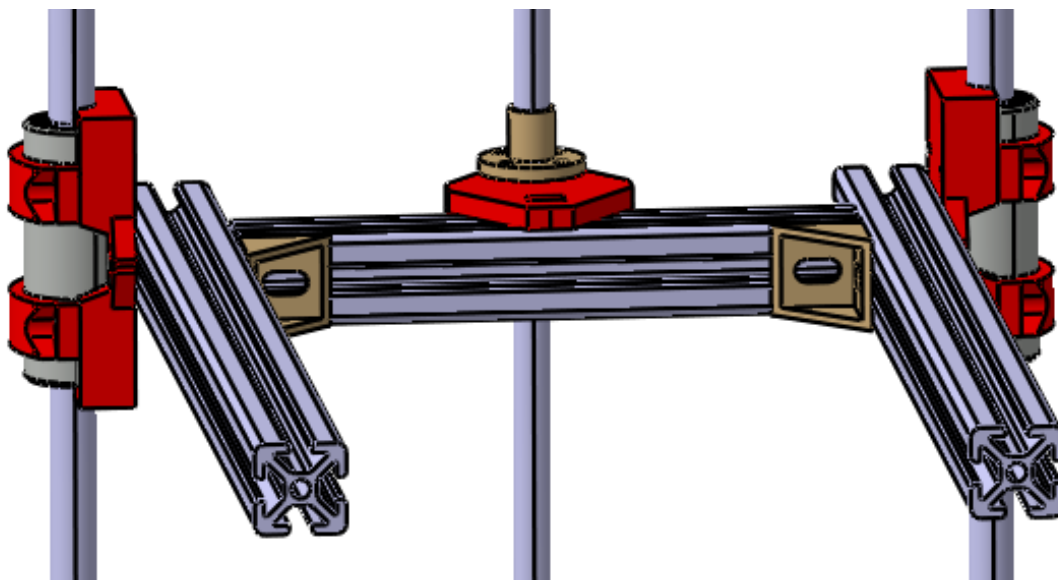
Pro dokončení osy Y byl přišroubován protikus, který vymezuje správnou polohu pohybové osy X.



Obr. 37 - Protikus pro spojení pohybové osy X a vodících tyčí 8 mm

10.2.3 Pohybová osa Z

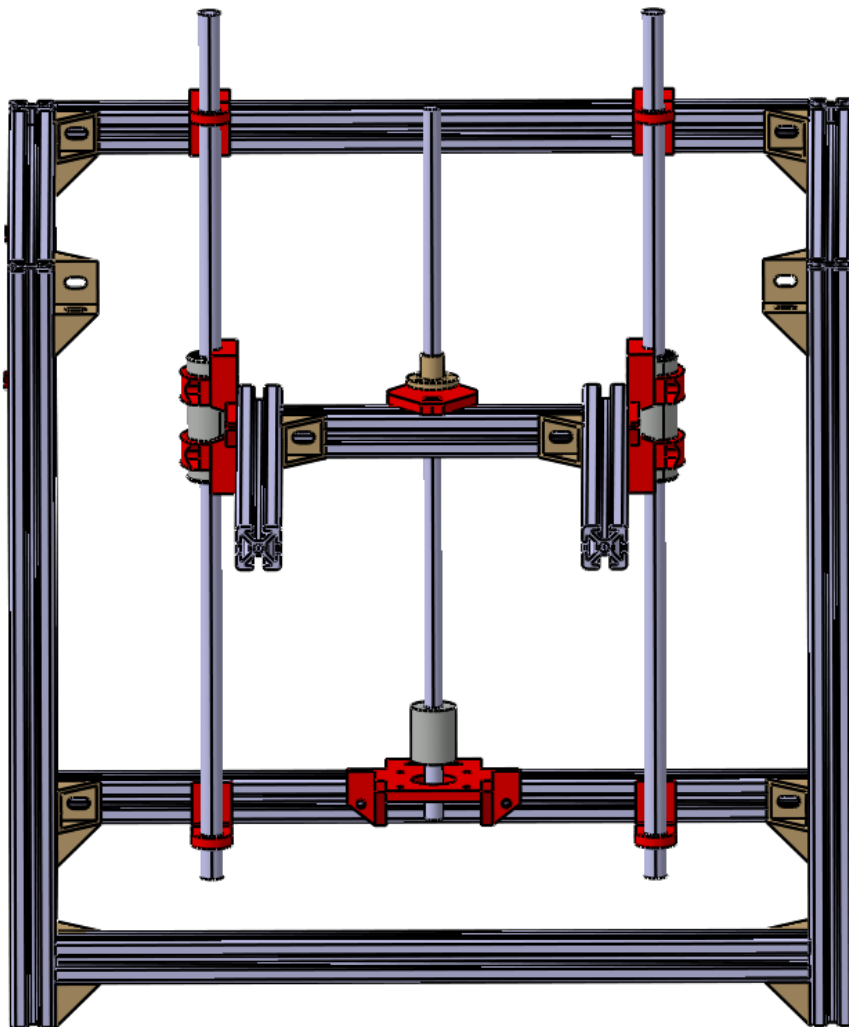
V případě osy Z je nutné přichystat konstrukci pro uchycení tiskové podložky. Vzhledem k menším rozměrům plochy vystačí jednostranné uchycení konstrukce pomocí úchytu pro matici. Deformace a prohnutí jsou na této délce zanedbatelné. Konstrukci tvoří tři profily stejného průřezu jako vnější rám. Střední příčka má délku 185 mm a postranní profily délku 285 mm. Spojení realizují úhelníky. Pro pohyb osy Z slouží trapézová tyč (průměr 8 mm) umístěná ve středu profilu délky 185 mm s maticí, vedení zajišťují ocelové tyče (průměr 12 mm). Kluzné ložiska pro osu Z jsou umístěna ve vytvořených klecích a následně upnuta protikusem pomocí šroubů. Klece byly vymodelovány dle rozměrů objednaných ložisek.



Obr. 38 - Konstrukce pro uchycení tiskové podložky

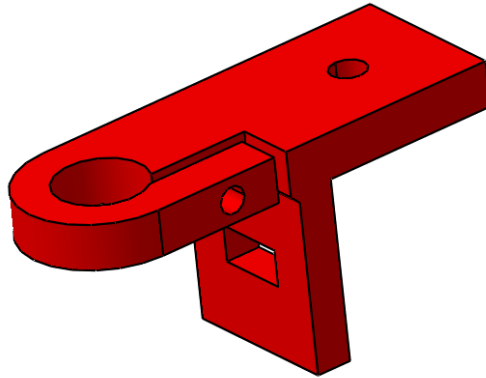
Pro osu Z se dále řešily úchyty ocelových tyčí a také návrh uchycení motoru. Umístění vytvořených úchytů tyčí musí být v ose nad sebou. Úchyt motoru bylo nutné umístit do středu profilu o délce 340 mm. Díl pro připevnění motoru přebírá rozměry od zakoupeného motoru, včetně děr pro šrouby a průměru výstupní hřídele. Spojení výstupní hřídele motoru a trapézové tyče zajišťuje pružná spojka.

Pro úchyty tyčí se vycházelo ze sestavy na Obr. 37, u které je brána vzdálenost od středu matice po střed uchycení ložiska. Program Catia V5 po změření ukázal hodnotu 100 mm. Ve vzdálenosti 50 mm se tedy od úchytu motoru nachází úchyty tyčí. Pro zafixování úchytu a tyče následovala úprava dílu umožňující sešroubování protikusů pro zamezení pootočení.



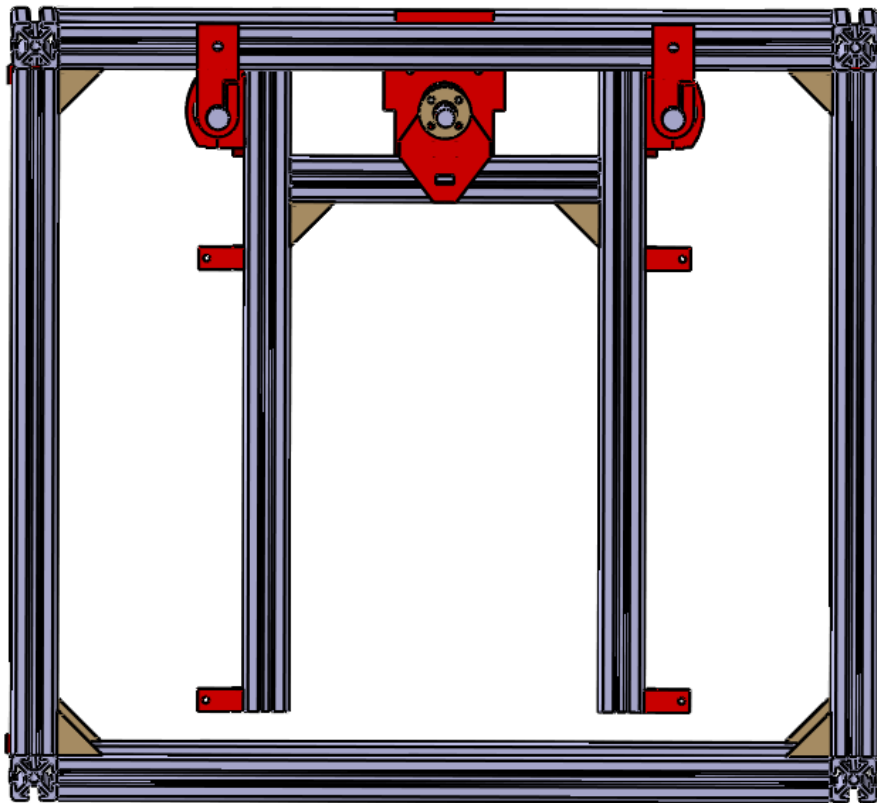
Obr. 39 - Umístění úchytu motoru a ocelových tyčí osy Z

Ukázka úchytu ocelových tyčí v ose Z se systémem proti pootočení.



Obr. 40 - Úchyt Ocelové tyče pro osu Z se systémem proti pootočení

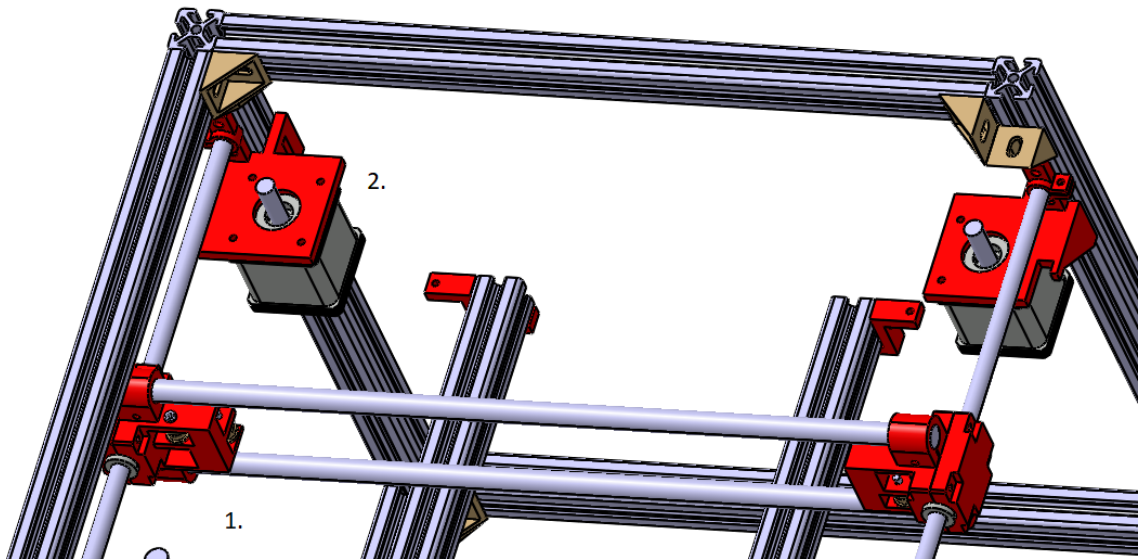
V posledním kroku sestavení osy Z následovalo osazení úchytů tiskové plochy, která je uchycena a vymezena pomocí polohovacích šroubů. Rozměry úchytů přebírají rozměr profilu tvaru „X“ v místě uchycení. Rozměry v rovině rovnoběžné s tiskovou plochou souvisí se zakoupenou vyhřívanou deskou. Deska je čtvercová o rozměrech 214 x 214 mm a díry pro šrouby mají rozteč 210 mm v ose X a 210 mm v ose Y.



Obr. 41 - Řešení úchytů pro připevnění tiskové podložky

10.2.4 Uchycení motorů osy X a Y

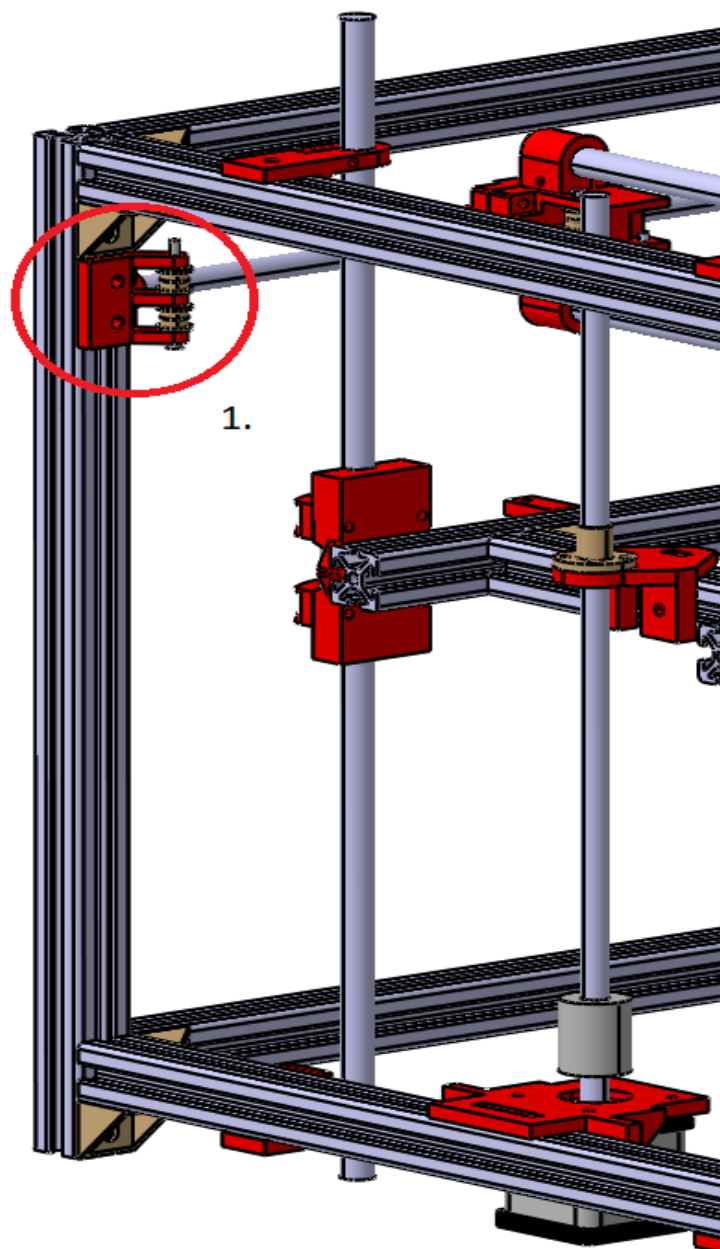
Vzhledem k odlišné poloze motoru osy Z nebylo možné použít úchyt pro motory osy X a osy Y, takže byl navržen jiný úchyt. Úchyty dodržují podmínku vymezení vzájemné polohy spolu s úchyty na Obr. 34. Nutnost správné polohy vyžaduje napínání řemenů, které se nesmí křížit. Důležitou roli hraje vymezení výšky úchytu motoru na konstrukci a dále otvory na šrouby a hnanou hřídel. Případné výškové nepřesnosti se eliminují pomocí řemenic na hnacích hřídelích. Právý úchyt krokového motoru pro osy X má vytvořen výřez, do kterého se umístil koncový spínač osy Y. Dle Obr. 41 je na 1. pozici pohybová osa X a na 2. pozici úchyt krokového motoru osy Y.



Obr. 42 - Úchyty krokových motorů a pohybová osa X

10.2.5 Vedení řemenů

Na straně trapézové tyče jsou nutné pro napnutí řemenů také úchyty s vodícími elementy. Systém úchytů řemenů opět řeší dvě patra, která se liší souřadnicí výšky osy Z. Vodící elementy souvisí se šířkou zakoupeného řemenu a jsou stejné jako u pohybové osy X. Pro konstrukci jsou vytisknuty dva stejné díly, které se pouze otočily dle potřeby (montáž na profily osy Z o délce 350 mm).

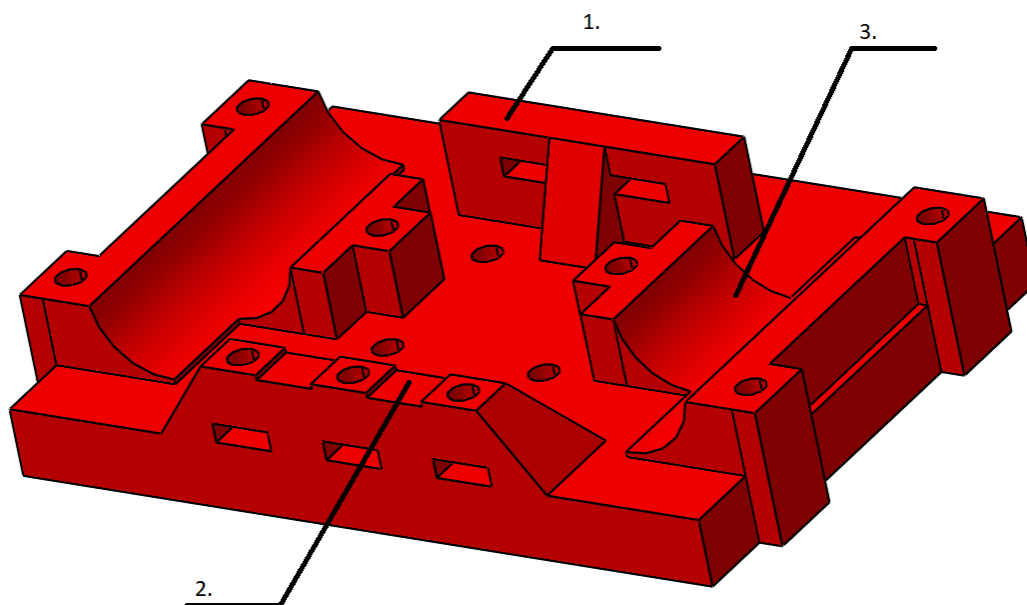


Obr. 43 - Úchyt pro vedení řemenů s vodícími elementy (1.)

10.2.6 Upínací deska tiskové hlavy

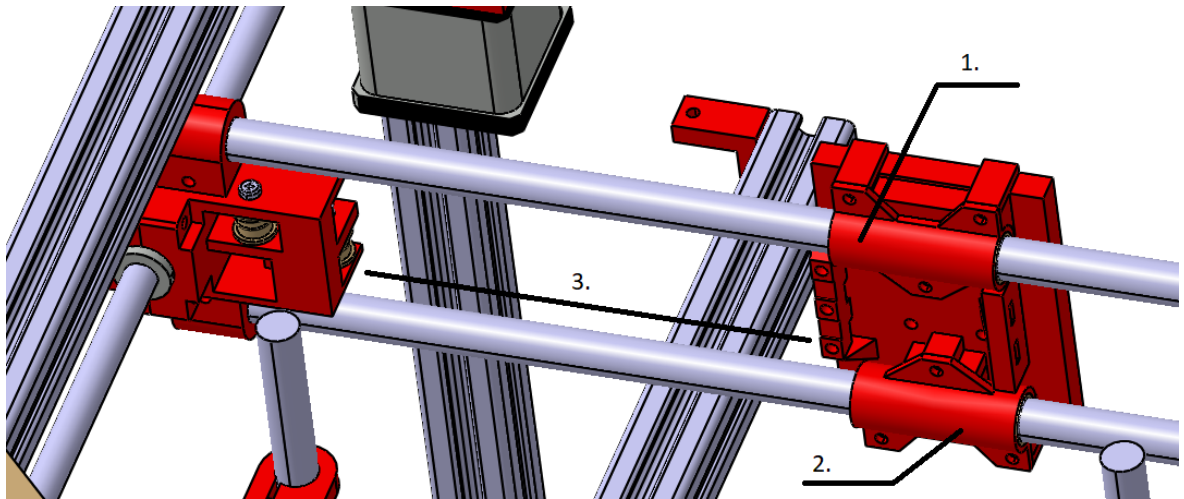
Pro kompletní návrh zbývalo vyřešení uchycení tiskové hlavy na pohybovou osu X spolu s pomocnými částmi jako jsou ventilační tunel a držák sondy. Upínací deska pro pohybovou osu X je opatřena vybráním pro ložiska (rozteč převzata z rozteče hliníkových trubek na Obr. 34 a průměr dle zakoupeného ložiska) a tvarovými prvky pro upnutí řemenů. Upínání řemenů souvisí s pouzdry na Obr. 34. Vzájemná poloha je dána tak, aby průměr vodících prvků pouzder navazoval rovnoběžně na plochy připravené u tvarových prvků uchycení 1 a 2 na Obr. 43. Vymezení polohy lze vidět na Obr. 44.

Řemeny lze upnout na jedné straně pomocí protikusu se šrouby a maticemi s možností dodatečného napínání (pozice 1), na druhé straně pevně pomocí stahovacích pásek (pozice 2) a pozice 3 slouží pro upnutí pouzder s kluznými ložisky.



Obr. 44 - Upínací deska tiskové hlavy

Pohyb upínací desky na Obr. 43 na pohybové ose X na Obr. 34 řeší kluzná ložiska o vnitřním průměru 10 mm (průměr hliníkové tyče) a vnějším průměru 12 mm. Vnější rozměr kluzného ložiska byl převzat pro vytvoření pouzder, která se k úchytové desce řemenů přišroubovala. Na Obr. 44 je zřejmé označení pouzder pro ložiska (pozice 1 a 2) a vymezení polohy mezi vodícími prvky a tvarovými prvky pro uchycení řemenů (pozice 3).

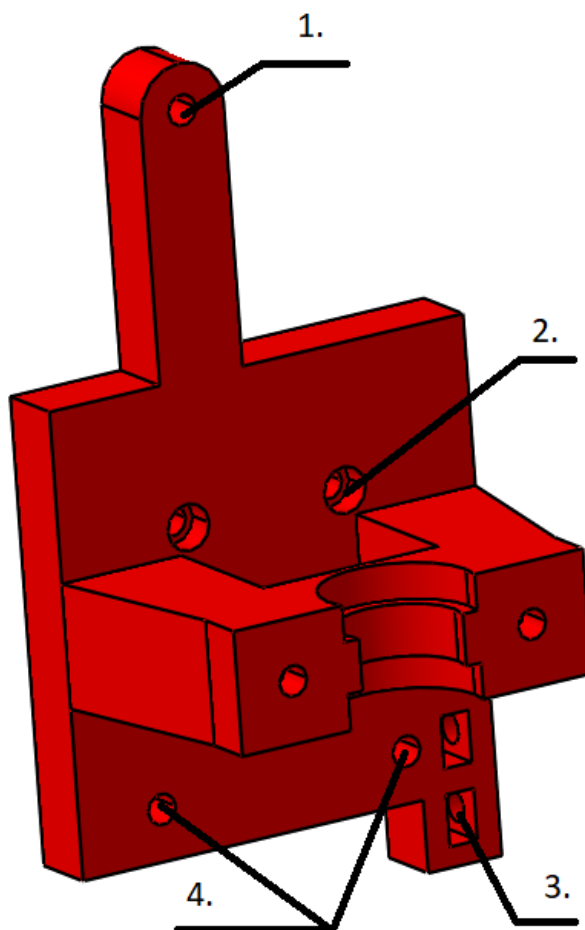


Obr. 45 - Uchycení pouzder ložisek na úchytovou desku

10.2.7 Úchyt tiskové hlavy

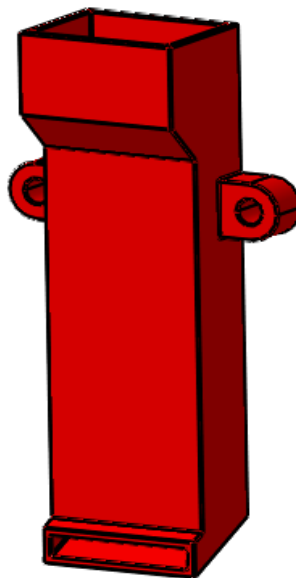
Před modelováním úchytu byla zakoupena vhodná sestava tiskové hlavy, chladicí ventilátory a sonda pro zajištění zastavení tiskové podložky. Dle rozměrů dílů vznikl kruhový otvor s osazením. Ventilátor pro ofuk trysky se uchytil spodní stranou do připraveného čtvercového otvoru a vrchní část se sešroubovala s připraveným otvorem v horní části desky. Ve spodní části dílu na Obr. 45 lze vidět dva otvory pro matice. Otvory mají z pravé strany vytvořeny díry pro šrouby, pomocí kterých je přišroubován úchyt pro sondu. Díl pro uchycení tiskové hlavy na Obr. 45 dosedá na připravenou úchytovou desku na Obr. 43. Upevnění je realizováno pomocí čtveřice šroubů.

Pozice č. 1 na Obr. 45 slouží pro uchycení ventilátoru trysky, č. 2 pro montáž úchytu k upínací desce, pro sondu jsou vyhotoveny otvory na pozici č. 3 a sonda bude přimontována na pozici č. 4.



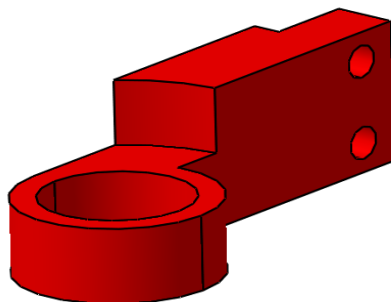
Obr. 46 - Úchyt tiskové hlavy, sondy
a ventilátoru

Pro kompletaci se vyhotovil ventilační tunel a držák sondy. Ústí ventilačního tunelu se umísťuje tak, aby směřovalo na trysku a chladilo vytlačovaný materiál. Nesmí být níže, jelikož by zasahovalo do výtisku a při umístění výše by nedocházelo k dostatečnému chlazení vytlačovaného materiálu. Rozměr horní části tunelu se odvíjí od čtvercového otvoru v úchytu na Obr. 45. Montáž k desce je zajištěna dvojicí šroubů.



*Obr. 47 – Ventilační
tunel trysky*

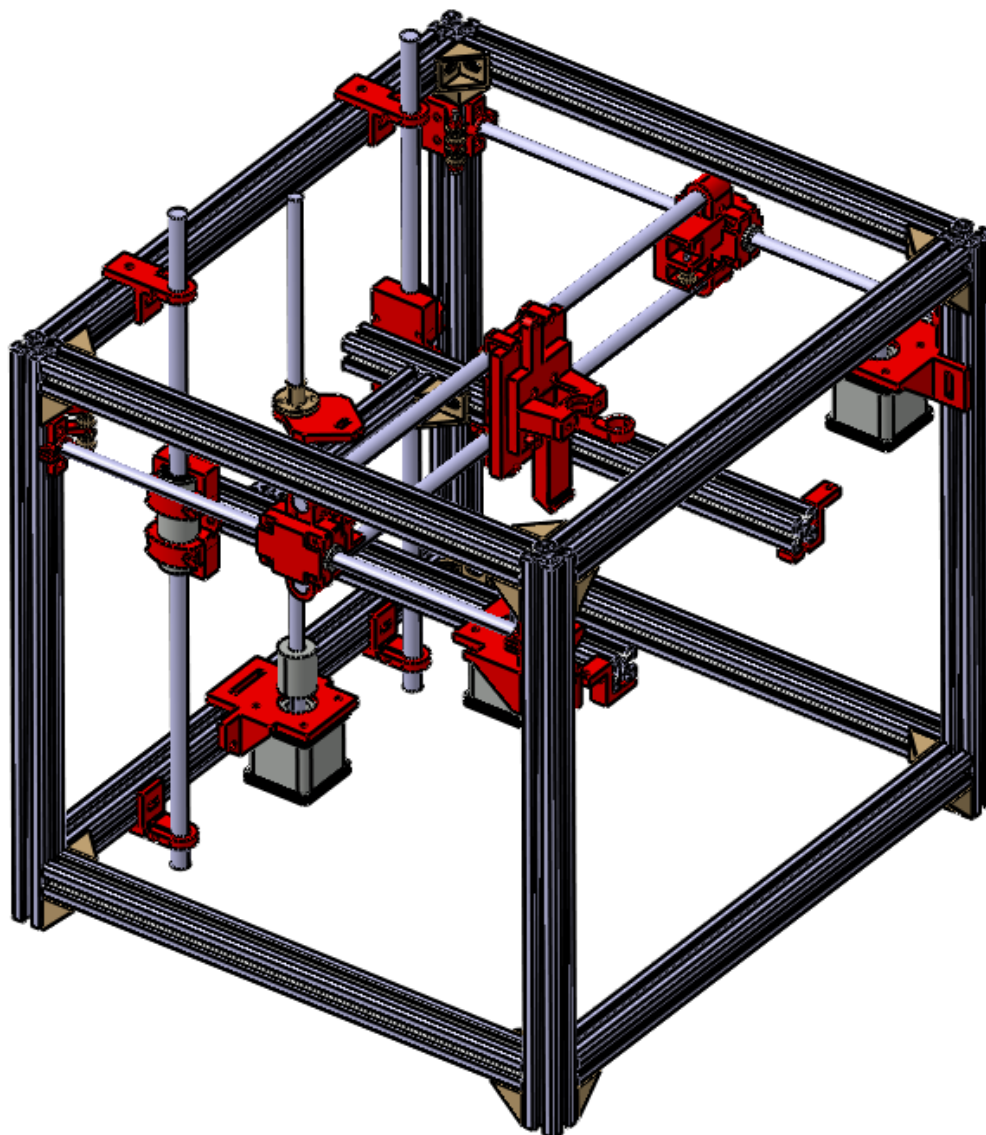
Umístění sondy v ose s tiskovou hlavou definuje délku úchytu sondy. Dvojice otvorů umožňuje přišroubování dílu a vybrání na opačné straně slouží pro dosednutí dílu k úchytu na Obr. 45. Kruhový otvor je vytvořen dle průměru sondy, jejíž polohu vymezují dvě matice z každé strany úchytu. Poloha matic umožňuje nastavení správné výšky sondy.



Obr. 48 - Úchyt sondy

10.2.8 Vizualizace zařízení pro 3D tisk

Při kompletaci jednotlivých sestav se upravilo jednostranné uchycení konstrukce pro tiskovou podložku na Obr. 37, které kvůli špatně navrženému otvoru nebylo v ose s otvorem úchyty pro krokový motor osy Z (spodní motor na Obr. 38). Ostatní díly byly z hlediska návrhu rozměrů a realizace modelů v pořádku.



Obr. 49 - Hotový konstrukční návrh zařízení pro 3D tisk

11 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

Po vyhotovení návrhu sestavy zařízení pro 3D tisk a vyřešení veškerých potřebných rozměrů přechází práce k reálné konstrukci a sestavení zařízení. Základní sestavení obsahuje konstrukci z hliníkových profilů a osazení jednotlivými díly pro zajištění pohybu každé osy. Následně pokračuje osazení motorů, natažení řemenů a připevnění řemenic. Dále se řeší tisková plocha, extruder a kompletace tiskové hlavy se všemi náležitostmi jako jsou koncové spínače, sonda a ventilátory. Veškerá elektronika byla zapojena na základní desku a dle potřeb se upravila kabeláž.

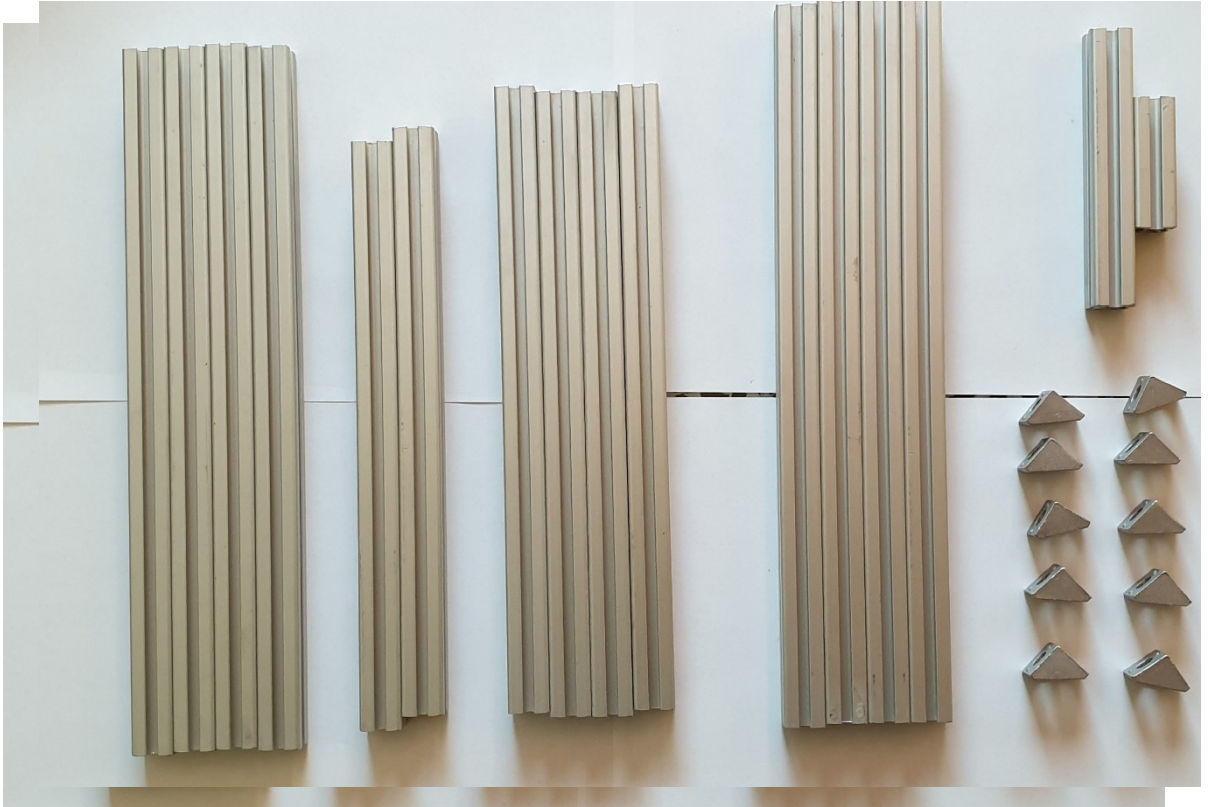
11.1 Kompletace rámu

Při konstrukci rámu se vycházelo ze zkušeností z předchozího projektu, realizovaného pod firmou Emesprint, pro který byly zvoleny hliníkové profily tvaru „X“. Koupěny byly dva totožné profily délky 3 metry.



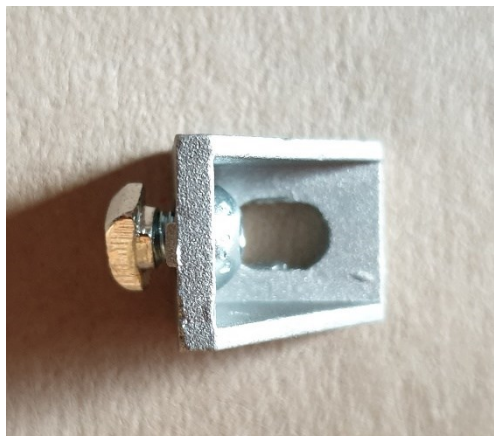
Obr. 50 - Hliníkový profil x-ového průřezu

Ze zakoupeného profilu se nařezalo celkem 15 rozměrů. Pro osu X rozměr 4 x 340 mm. Pro osu Y rozměr 4 x 300 mm a v ose Z rozměr 4 x 350 mm. Další rozměry sloužily pro vytvoření konstrukce ve tvaru „U“ pod tiskovou podložku. Střední příčka má délku 185 mm a postranní profily délku 285 mm. Realizace nařezání profilů proběhla na pásové pile ve firmě Antir s.r.o.



Obr. 51 - Hliníkové profily a trojúhelníkové spojky

Profily se spojily pomocí zvolených trojúhelníkových spojek, šroubů M5 délky 10 mm s půlkulovou hlavou a speciálních matic M5 tvaru „T“.



*Obr. 52 - Trojúhelníková spojka
se šroubem a T-maticí*

Konstrukci tvoří dva pomyslné obdélníky propojené profily ve svislém směru. Každý obdélník obsahuje profily 2 x 340 mm a 2 x 300 mm. Spojení obdélníků řeší trojúhelníkové spojky na Obr. 51. Na jeden obdélník jsou přimontovány pomocí spojek profily 4 x 350 mm tak, že tvoří rovnou plochu bez přesahu profilu v ose Z. Montáž druhého obdélníku proběhla z druhé strany, avšak tento obdélník není rovnoběžně s koncem profilu, ale odsazen o 20 mm. Zvolenou délku 20 mm vymezuje rozměr spojky a slouží pro vytvoření podstavových nožek. Profil ve svislém směru je spojen vždy dvěma spojkami k vodorovným profilům.

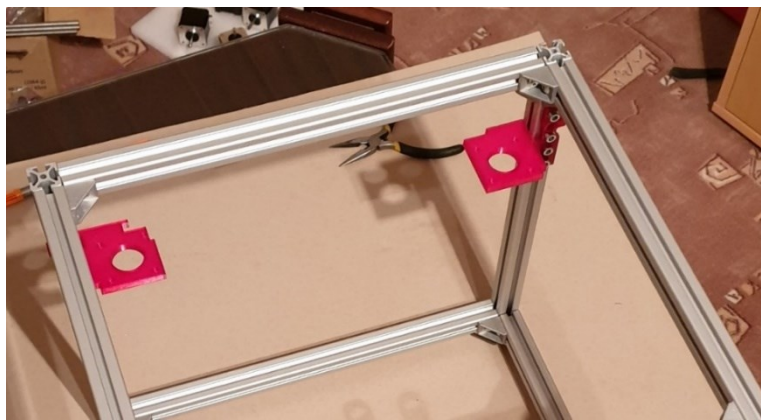


Obr. 53 - Samostatná konstrukce z profilů

11.2 Montáž funkčních dílů

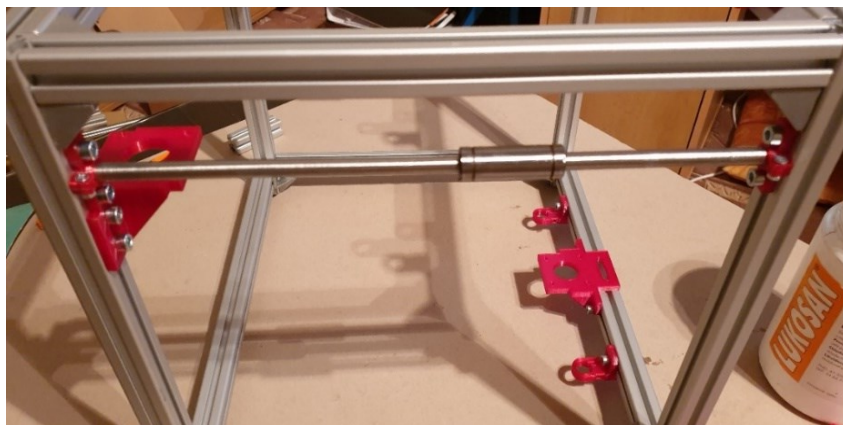
11.2.1 Pohybová osa Y, úchyty motorů X a Y

Po zhotovení konstrukce pokračovala montáž jednotlivých os. Úchyty motorů osy X a Y byly montovány společně s osou Y. Díly uchycení osy Y na obou stranách vymezují polohu úchytů motorů (namontovány přímo pod úchyty osy Y viz Obr. 54). Pro možnost montáže vodící tyče bylo nutné namontovat pouze jednu stranu úchytů osy Y. Úchyt motoru je upevněn čtyřmi imbusovými šrouby (M5 x 10 mm) s maticemi tvaru „T“ a úchyty osy Y upevní dva imbusové šrouby (M5 x 10 mm).



Obr. 54 - Úchyty motorů

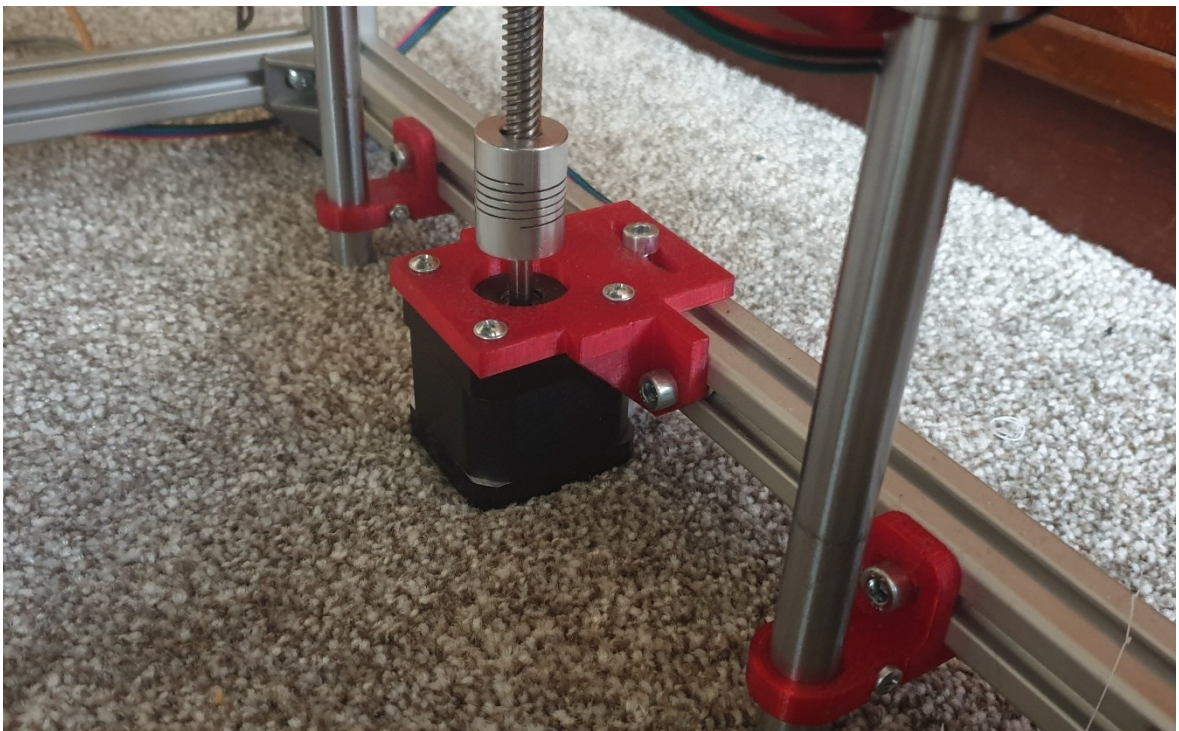
Pro dokončení instalace osy Y slouží dvě ocelové tyče o průměru 8 mm a délky 300 mm, dále dvě kuličková lineární ložiska LM8LUU o vnitřním průměru 8 mm, vnějším průměru 15 mm a délce 45 mm. K uchycení vodící ocelové tyče ke konstrukci slouží zbylé dva kusy připravených úchytů osy Y. Pro zamezení natočení vodící tyče se zašroubovaly šrouby s půlkulatou hlavou (M3 x 10 mm) s maticí. Před instalací vodících tyčí do úchytů se musela nasunout kluzná ložiska.



Obr. 55 - Uchycení vodící tyče pro osu y s ložiskem

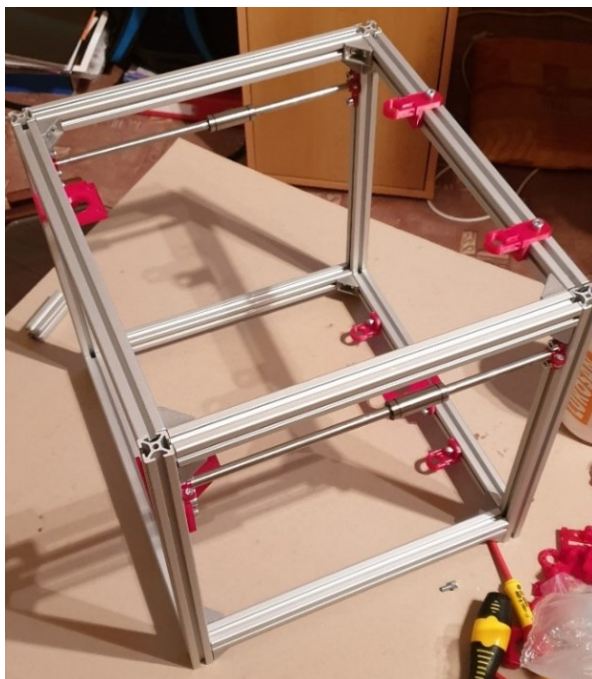
11.2.2 Pohybová osa z

V dalším kroku následovaly úchyty pro krokový motor osy Z a pro vodící tyče osy Z. Úchyt je přišroubován do středu profilu délky 340 mm pomocí 3 imbusových šroubů (M5 x 10 mm) s T-maticemi. Úchyty ocelových tyčí pro osu Z se dle návrhu umístily na každou stranu od úchytu krokového motoru (o 50 mm) a uchytily se dvěma imbusovými šrouby (M5 x 10 mm) s T-maticemi. Následně proběhla montáž krokového motoru (4x šroub M3 x 10 mm s půlkulatou hlavou) do úchytu a na výstupní hřídel se upevnila spojka a trapézová tyč (průměr 8 mm, stoupání 8 mm a délka 360 mm). Pružná spojka (vnitřní průměr 8 mm) je k trapézové tyči upevněna aretačními šrouby.



Obr. 56 - Uchycení krokového motoru a úchyty pro vodící tyče v ose Z

Horní úchyty osy Z jsou umístěny zrcadlově na horním profilu. Každý úchyt drží pomocí dvou imbusových šroubů (M5 x 10 mm) a matic tvaru „T“.



Obr. 57 - Umístění úchytů vodících tyčí

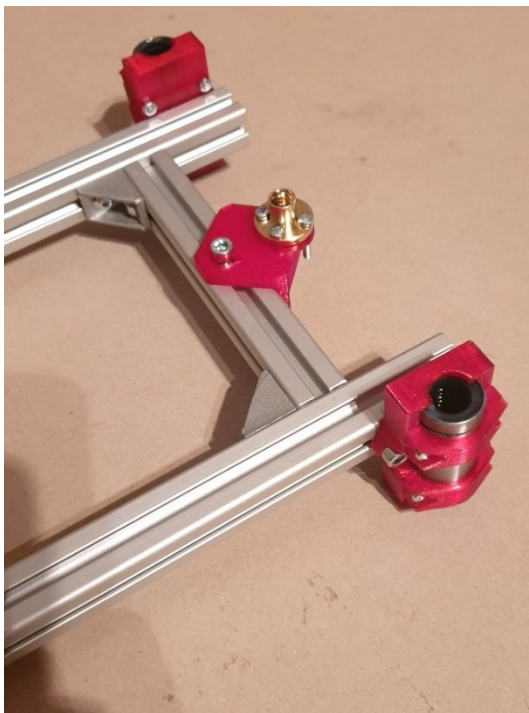
11.2.3 Sestava pro tiskovou podložku

Nachystané úchyty vodících tyčí pro osu Z umožnily komplekaci konstrukce pro tiskovou podložku. Hlavní část tvoří spojení dvou profilů délky 285 mm příčkou 185 mm. Spojení zajišťují trojúhelníkové spojky a imbusové šrouby (M5 x 10 mm). Do středu profilu délky 185 mm se přišrouboval vytisknutý díl s připevněnou pohybovou maticí vyrobenou z mosazi (4x šroub M3 s půlkulatou hlavou).



Obr. 58 - Konstrukce pro uchycení tiskové podložky s hybnou maticí

Na konstrukci z Obr. 57 se namontovala ložisková pouzdra s lineárními kuličkovými ložisky LM12LUU (vnitřní průměr 12 mm, vnější průměr 21 mm, délka 57 mm). Upevnění pouzder ložisek na konstrukci zajišťují vždy dva imbusové šrouby (M5 x 10 mm) s maticemi. Následně se kuličková ložiska vložila do pouzder a upevnila dvěma protikusy pomocí dvojice šroubů (M3 x 10 mm s půlkulatou hlavou).



Obr. 59 - Pouzdra s kluznými ložisky pro pohyb v ose Z

Dokončením sestavy na Obr. 58 bylo připevnění čtyř úchytů tiskové podložky pomocí imbusových šroubů (M5 x 10 mm). Rozmístění úchytů bylo provedeno dle otvorů tiskové podložky (210 x 210 mm)



Obr. 60 - Úchyt tiskové podložky

Hotová sestava pro tiskovou podložku byla namontována na konstrukci 3D tiskárny. Pro možnost nasazení sestavy následovalo odmontování vodící matice. K vedení slouží dvě ocelové tyče (průměr 12 mm a délka 400 mm). Nasunutí tyčí se realizovalo přes připravené horní úchyty na Obr. 56. Sestava tiskové podložky se nasunula přes ložiska na vodící tyče a nakonec upevnila do spodních úchytnů osy Z na Obr. 55. Následovala zpětná montáž matice k vytvořenému úchytu.



Obr. 61 - Upevněná sestava pro uchycení tiskové podložky

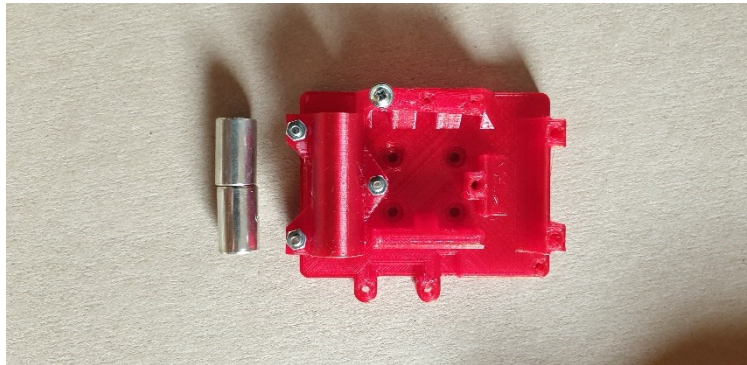
11.2.4 Pohybová osa X

Pohybová osa X vyžaduje dvě pouzdra, do kterých se pomocí šroubů (M3 x 20 mm) umístily vodící prvky pro řemeny. Poloha vodících prvků je zajištěna pomocí matice M3. Vodící prvky mají vymezenou polohu do kříže proti sobě.



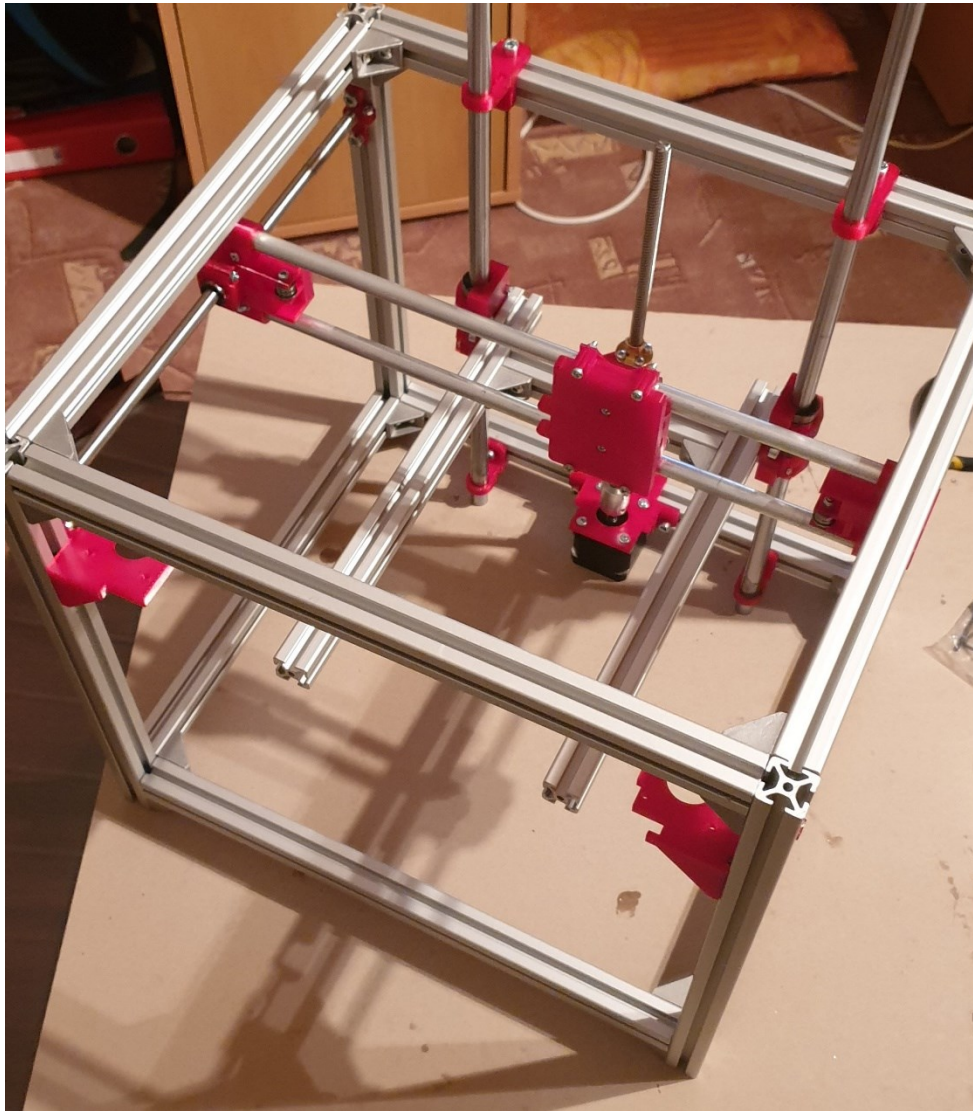
*Obr. 62 - Pouzdro osy
X s vodícími prvky*

Pouzdra jsou spojena pomocí dvou hliníkových trubek (průměr 10 mm a délka 360 mm). Šrouby M3 délky 20 mm zajišťují sevření hliníkových trubek a znemožňují jejich pootočení. Před vložením hliníkových trubek do úchytů (Obr. 34) bylo nutné nasunout upínací desku tiskové hlavy opatřenou kluznými ložisky s pouzdry. Snadný posun úchytové desky zajišťují čtyři kluzná pouzdra KU1020 B10, která jsou ocelová s vnitřní výstelkou z PTFE. Uchycení kluzných ložisek s pouzdry zajišťují tři šrouby (M3 x 20 mm s půlkulatou hlavou) s maticí M3.



Obr. 63 - Úchytová deska pro tiskovou

Připravená sestava pohybové osy X byla namontována na konstrukci pomocí dvou kuličkových ložisek (viz. Obr. 54). Pro dokončení sestavy se připevnila na každou stranu protikusy (Obr. 36) pomocí čtyř šroubů (M3 x 20 mm s půlkulatou hlavou) a matic M3. Umístění ložisek LM8LUU je řešeno jejich vysunutím směrem k trapézové tyči o 7 mm, aby nedošlo k nárazu tiskové hlavy do trapézové tyče.

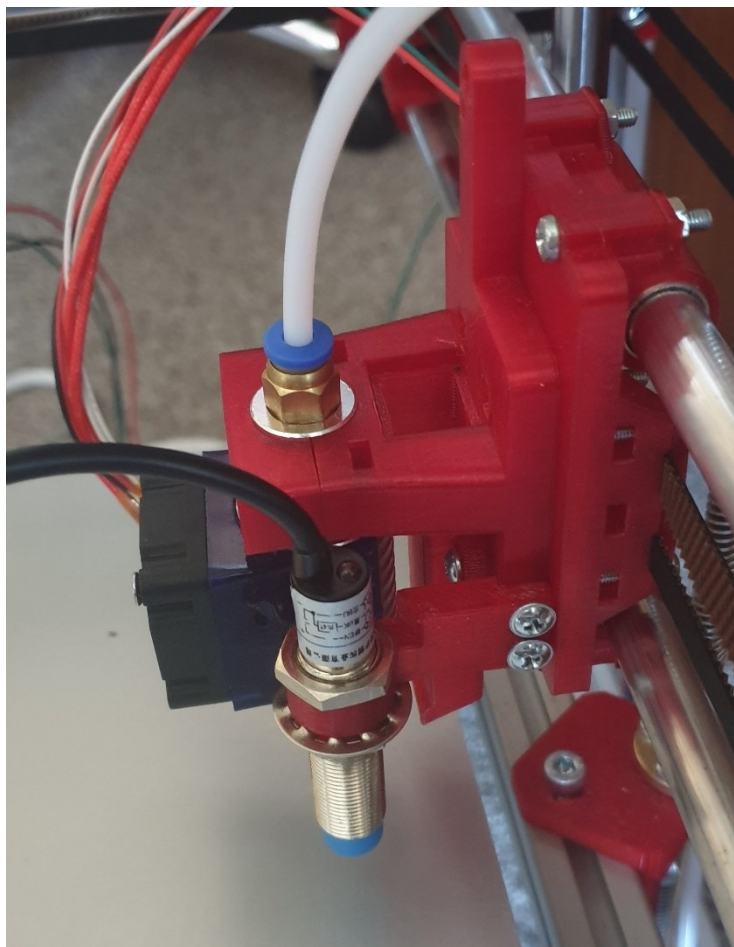


Obr. 64 - Montáž sestavy pohybové osy X na konstrukci

11.2.5 Sestava uchycení tiskové hlavy

Na upínací desku (Obr. 62) byl z pohledové strany přišroubován díl pro uchycení tiskové hlavy (4x šroub M3 x 20 mm s půlkulatou hlavou pojištěný maticemi M3).

Dále sestavu tvoří tunel pro ofuk trysky uchycený dvěma šrouby (M3 x 10 mm s půlkulatou hlavou) a nakonec úchyt indukční sondy umístěný z pravé strany dvojicí šroubů (M3 x 10 mm s půlkulatou hlavou). Pro usazení tiskové hlavy byl vyroben protikus s kruhovým vybráním a osazením. Protikus je zašroubován dvěma šrouby (M3 x 20 mm) do úchytového dílu.



*Obr. 65 - Sestava tiskové hlavy s ukázkou
finálního sestavení*

11.2.6 Úchyt pro vedení řemenů

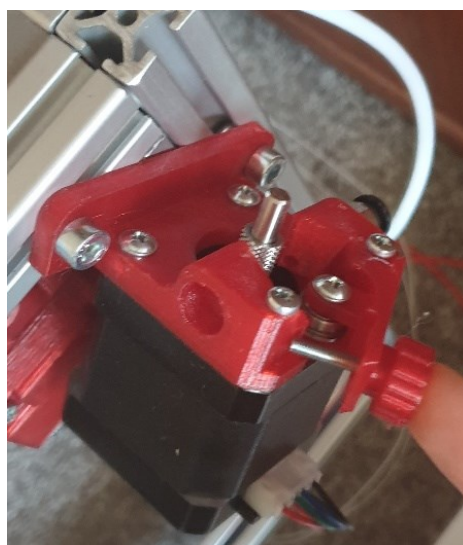
Pro natažení řemenů se přimontovaly dva vodící elementy s úchyty (strana u trapézové tyče). Montáž je provedena dvěma imbusovými šrouby (M5 x 10 mm) s T-maticemi. Dvojici vodících prvků uchycuje šroub (M3 x 30 mm s půlkulatou hlavou) a vysunutí zamezuje matice.



Obr. 66 - Vedení řemenů

11.2.7 Úchyt extruderu

Díl pro uchycení motoru bowdenu byl převzat z předchozího projektu firmy Emesprint. Díl tvoří dvě části. První část umožňuje připevnit motor na konstrukci a druhá část slouží pro snadnou výměnu filamentu pomocí utahovacího šroubu. Čtveřice šroubů (M3 x 10 mm) slouží pro uchycení motorů a dva imbusové šrouby (M5 x 10 mm) pro zajištění polohy na konstrukci zařízení.



*Obr. 67 - Mechanismus
extruderu*

12 ELEKTRONIKA

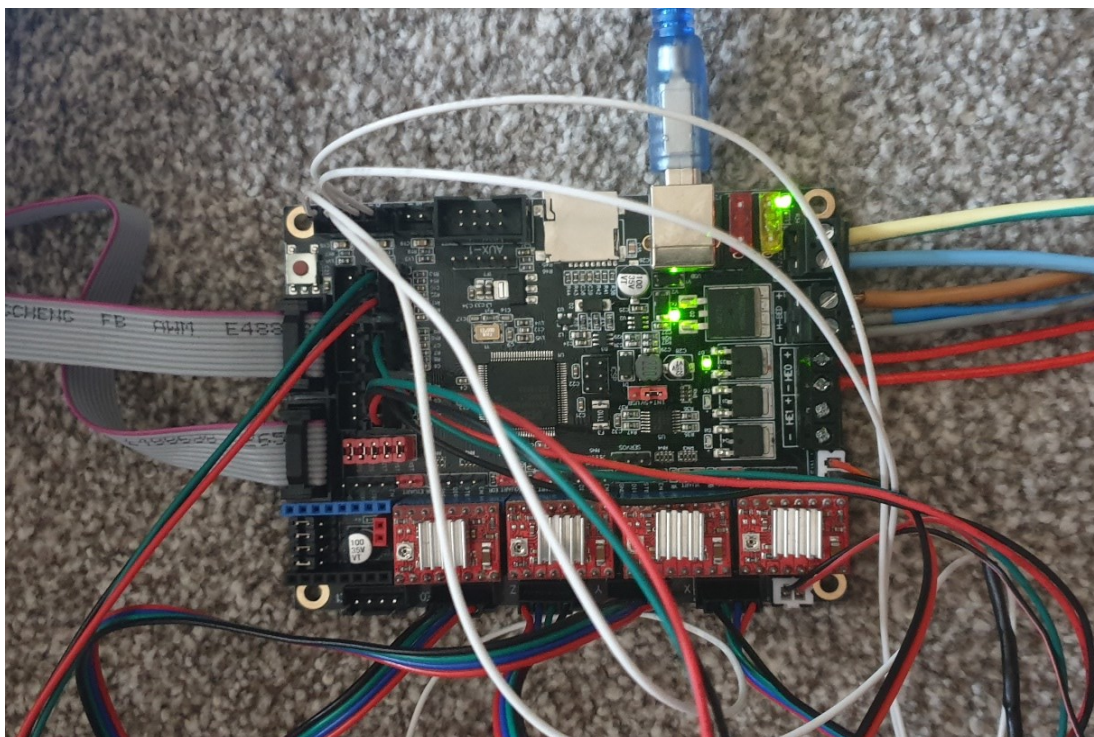
Samotná konstrukce s veškerými úchyty není funkční. Do provozu se 3D tiskárna uvedla pomocí řídicí desky, která řídí veškeré připojené komponenty pomocí firmwaru. Použité komponenty závisí na typu řídicí desky, jelikož ne každá deska zvládne ovládat libovolné zařízení. S řídicí deskou souvisí drivery, které ovládají krokové motory (pro každý motor příslušný driver). Driver může být integrovaný na desce nebo se připojuje samostatný komponent pomocí pinů do konektorů desky. Na trhu lze vybrat různé drivery, které se liší mikro krokováním (např. driver A4988 umí mikro krok 1/16). Pro řízení 3D tiskárny bez počítače lze vybírat nejrůznější LCD displeje, které mohou být ovládány tlačítkem nebo dotykem. Každý displej nemá zaručenou kompatibilitu, a proto záleží na vhodném výběru. Dle koncepce řídicí desky se volí koncové spínače, bezdotykové sondy, topná deska, extruder, ventilátory a jednotlivé motory. Veškeré napájení komponentů zajišťuje zdroj, který je zvolen dle odběrů jednotlivých komponentů. Zřeteli nesmí uniknout zajištění správných konektorů a dostatečná délka kabeláže. Chladicí ventilátory jsou běžně nabízeny s kabelem délky 30 cm, což pro zapojení nedostačuje. Kably pro tiskovou hlavu nejsou opatřeny konektory (lze vzít z počítačových komponentů) a krokové motory lze snadno koupit bez kabelů. Pokud se kabeláž vyskytuje v blízkosti komponentů s vysokou teplotou (ventilátory trysky a tiskové hlavy, termistor pro topnou desku nebo kably pro připojení vytápění tiskové hlavy), měly by se opatřit např. kaptonovou páskou.

12.1 Řídící deska

Kvůli volbě koncepce tiskárny, která požaduje čtyři krokové motory, byla zvolena deska obsahující minimálně čtyři porty pro drivery motorů. Požadavek souvisel s připojením displeje a SD karty pomocí dvou deseti pinových konektorů, dále nesměl chybět slot pro připojení endstopů a indukční sondy. Běžně jsou na těchto deskách vývody pro dva ventilátory a dva termistory. Nechybí připojení pro vodiče od zdroje, topné desky a vytápění hotendu. Standardem je slot na vložení SD karty s firmwarem a COM port pro propojení s počítačem.

Z nabízených možností 32-bitových desek bylo vybíráno mezi deskami od firmy BIQU Bigtreetech, která nabízí verze SKR V1.1, SKR V1.3, SKR V1.4 a SKR mini E3. Volba padla na řídicí desku BTT SKR V1.3, pro kterou lze snadno sehnat přednastavený firmware a návod pro zapojování jednotlivých komponentů. Deska je poměrně spolehlivá a vyzkoušená množstvím uživatelů.

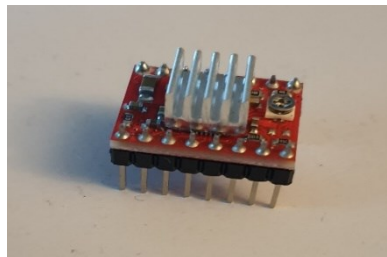
Deska obsahuje mikroprocesor ARM cortex-M3, zvládá vstupní napětí 12 až 24V. Lze připojit běžně dostupné displeje (2004 LCD nebo 12864 LCD) a podporuje velké množství driverů (A4988, TMC2208, TMC 2130,DRV8825). Propojení s počítačem realizuje COM port a nahrání firmwaru lze provést přes SD kartu.



Obr. 68 - Zapojení řídicí desky BIGTREETECH SKR V1.3

12.2 Drivery pro krokové motory

Vzhledem k řídicí desce se volily vhodné drivery, které deska zvládne ovládat. Při rozhodování hrála roli cena a výkon. Díky přijatelné ceně, spolehlivosti a snadné dostupnosti byl zvolen driver A4988, který zvládá ovládat motory s proudem do 2A. Z hlediska mikro krokování zvládá driver 1/16 kroku. Výhodou driveru je ochrana proti přehřátí, podpětí a zkratu. Proud procházející do motoru lze korigovat pomocí trimru (pro zvýšení se otáčí proti směru hodinových ručiček). Korekce byla použita pro motor extruderu, který kvůli nízkému napětí nevládal posouvat filament. Pro odvod tepla od procesoru slouží pasivní chladič. Celkem byly použity pro tuto tiskárnu 4 drivery A4988.



Obr. 69 - Driver A4988 s pasivním chladičem procesoru

12.3 Krokové motory

Volba krokového motoru nepřesahuje dovolený proud, který umožňuje driver. Maximální hodnota driveru činí 2A. Zvoleny byly krokové motory SX17-1005VLQCEF od firmy Microcon, které lze použít pro ovládání libovolné osy. Krouticí moment motoru je 0,52 Nm a pro připojení k řídicí desce slouží konektor NEMA 17 (4 pinový konektor). Jmenovitý proud motoru je 1 A. Přívodní kabely zvoleny délky 1 m (koupěny samostatně). Motory osy X a Y jsou osazeny řemenicemi. Motor extruderu vyžaduje drážkované podávací kolo.



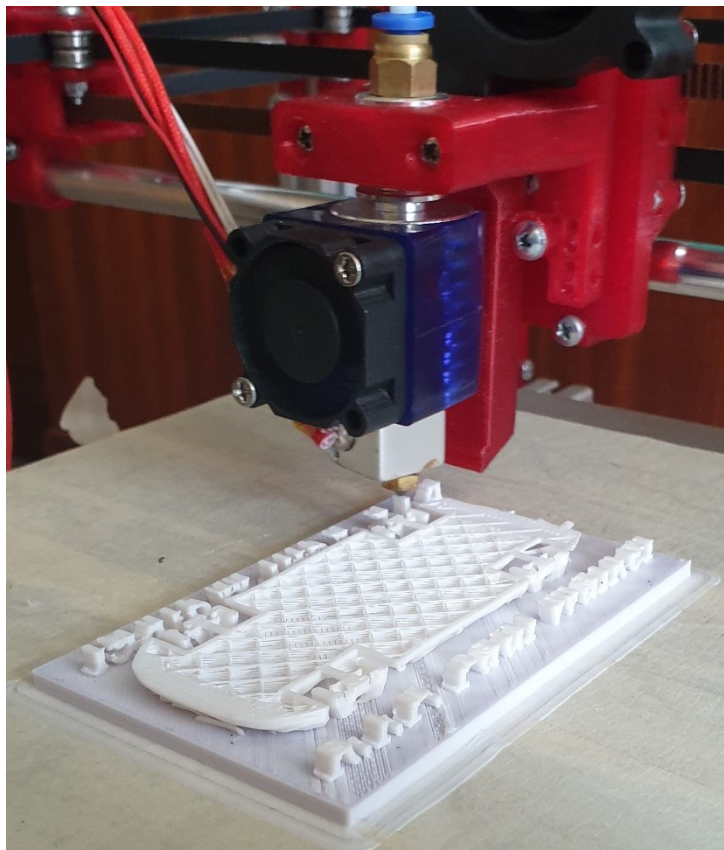
Obr. 70 - Krokový motor SX17 pro osu Y

12.4 Sestava tiskové hlavy s extruderem

Sestava se skládá z jednotlivých částí, které zaručují správný chod tisku. Tavení materiálu probíhá díky sestavenému hotendu s tryskou (zapojené do napájené základní desky). Filament podává krokový motor a vytlačovaný materiál chladí přídavný ventilátor trysky. Pro zamezení nárazu tiskové podložky do trysky slouží indukční snímač (sonda).

12.4.1 Hotend s tryskou

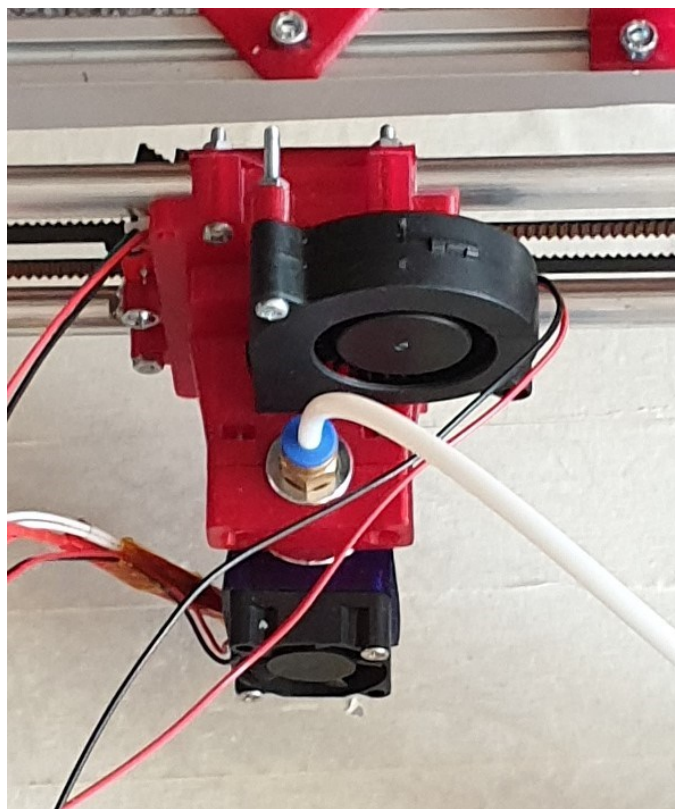
Pro zařízení se zvolil univerzální celokovový hotend V6 od firmy ED3 s teflonovou trubičkou pro filameny 1,75 mm. Důvod volby tohoto hotendu byl kvůli jeho širokému použití pro běžný domácí tisk. Hotend s trubičkou PTFE umožňuje přesný tisk do teplot kolem 300 °C (limit termistoru). Vhodný především pro materiály PLA, ABS, PETG a další běžně používané materiály. Regulace teploty dosahuje vysoké přesnosti s garancí odchylky 0,5 °C od požadované teploty. Sestava hotendu je tvořena heat blockem (vyhříváním blokem), NTC termistorem, keramickým topným tělesem, mosaznou tryskou o průměru 0,4 mm, kovovou plnicí trubičkou, PTFE trubičkou a ventilátorem o průměru 30 mm (s úchytem).



Obr. 71 - Sestavený hot-end s mosaznou tryskou

12.4.2 Ventilátor trysky

K zajištění správného chlazení se používá radiální ventilátor. Pro tiskárnu byl zvolen ventilátor 50 mm pro napětí 12 V. Maximální počet otáček činí 7500 ot./min s hlučností 30 dB. Standardně dodávaná kabeláž délky 27 cm nestačí a je nutné ji prodloužit. Připojení k základní desce realizuje dvou pinový konektor XH2.54.



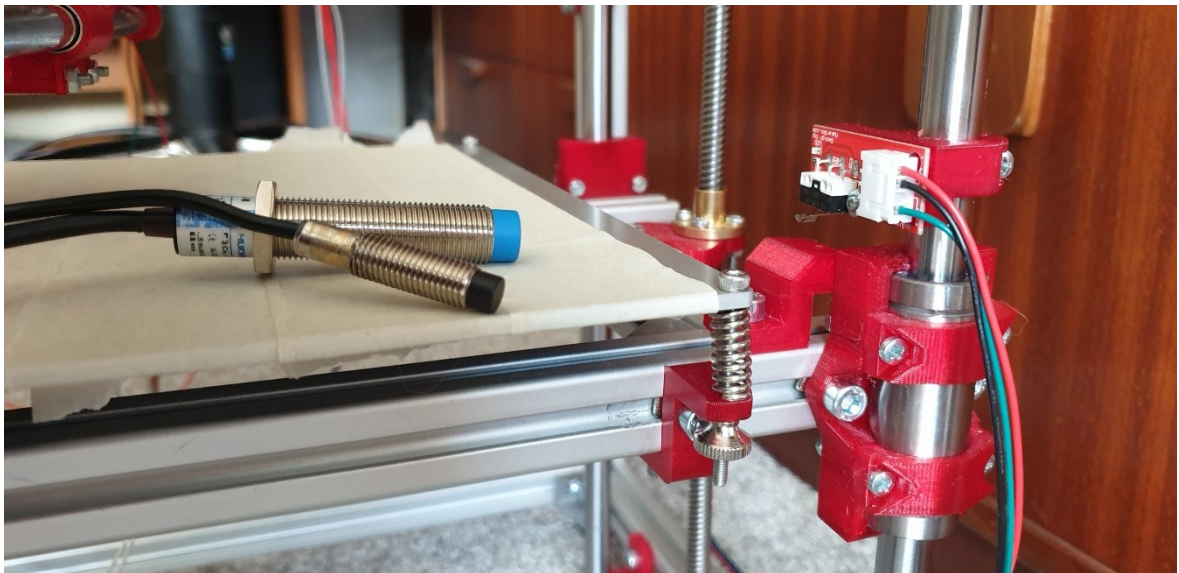
Obr. 72 - Ventilátor pro ofuk trysky (horní)

12.4.3 Indukční snímač (sonda)

Indukční sonda u 3D tiskáren slouží k zamezení nárazu tiskové podložky do trysky. Sondu je nutné umístit nad trysku, aby nedošlo k nárazu sondy do tisknutého dílu. K tiskárně se volil indukční senzor LJ12A3-4-Z/BX, který má detekční vzdálenost 4 mm. Povrch sondy tvoří závit M12 a celková délka činí 60 mm. Připojení sondy realizuje trojice vodičů bez konektoru. Potřebný konektor byl dodán z počítačových dílů. Při zapojení snímače do desky se vodiče nesmí přehodit kvůli přepólování (hnědý, modrý a černý vodič).

Po zapojení sonda nekomunikovala, takže nebyla schopna zastavit pohyb krokového motoru v ose Z (zjištěno, že sonda reaguje při napětí 6 V až 36 V, zatímco řídicí deska poskytuje pouze 5 V). Jako náhrada sloužila P.I.N.D.A sonda od firmy Průša Research. Po zapojení sonda reagovala a krokový motor při spuštění příkazu home pro osu Z (zkoušeno v programu Repetier-host) zastavila. Pro sondu se navrhnul a vyhotovil nový úchyt (průměr sondy 8 mm a délka pouze 30 mm). Po instalaci nového úchytu se sondou však nastala závada a pro příkaz home osy Z motor opět nezastavil (při proměření sonda vykazovala potřebné napětí, ale nekomunikovala). Finálním řešením zůstal záložní mechanický endstop, pro který byly z volně dostupné databáze vytisknuty potřebné úchyty. Snímač se s úchytem nasunul na ocelovou vodící tyč, následně byl na konstrukci přimontován jedním imbusovým šroubem M5 a T-maticí úchyt ve tvaru „L“ a dle krajní polohy vyhřívané podložky s tryskou byla vymezena poloha endstopu. Ve firmware byla odebrána sonda a nastavila se logická hodnota pro osu Z minimální (počáteční souřadnice tisku 0).

Na Obr. 72 se nachází modrá sonda, která požaduje napájecí napětí minimálně 6 V. Dále černá sonda, která měla problém při komunikaci. Poslední možností zůstal záložní mechanický koncový spínač (namontován na ocelové tyči pro osu Z a spínán pomocným úchytem).

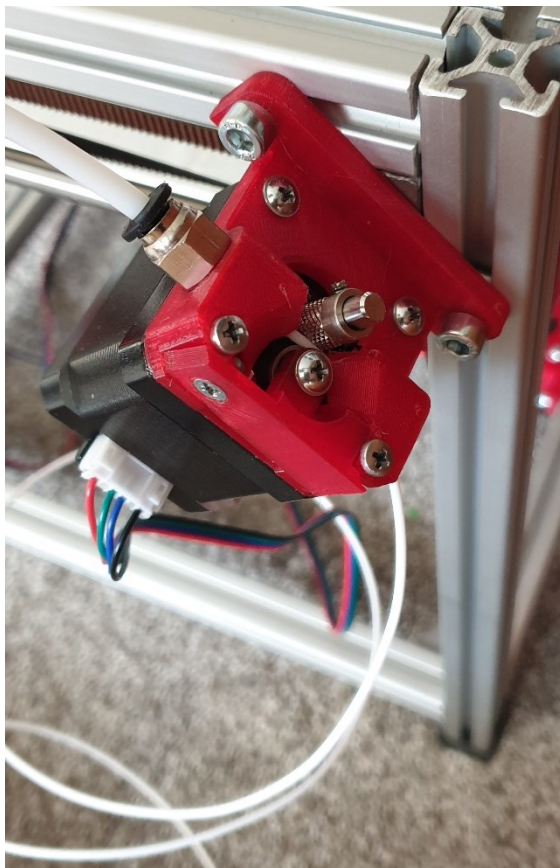


Obr. 73 - Koncové spínače (indukční sondy a mechanický spínač)

12.4.4 Extruder

Pro umožnění tisku je tisková hlava opatřena extruderem, který se skládá z krokového motoru SX17 (připojen do řídicí desky a ovládán driverem A4988) a podávacího mechanismu.

Podávací mechanismus tvoří drážkované hnací kolo přišroubované pevně na výstupní hřídel motoru (nesmí se protáčet) a protikusem je podávací kolečko opatřené pryží. Krokový motor a podávací mechanismus je uchycen v připraveném úchytu. Filament se přitlačuje mezi hnacím a podávacím kolem. Přítlak zde není uskutečněn pružinou, ale dotažením šroubu pevně s maticí. Extruder byl umístěn z pravé strany konstrukce pomocí dvou imbusových šroubů a T-matic.



Obr. 74 - Sestava extruderu (natočení úchytu zamezuje zamotávání filamentu)

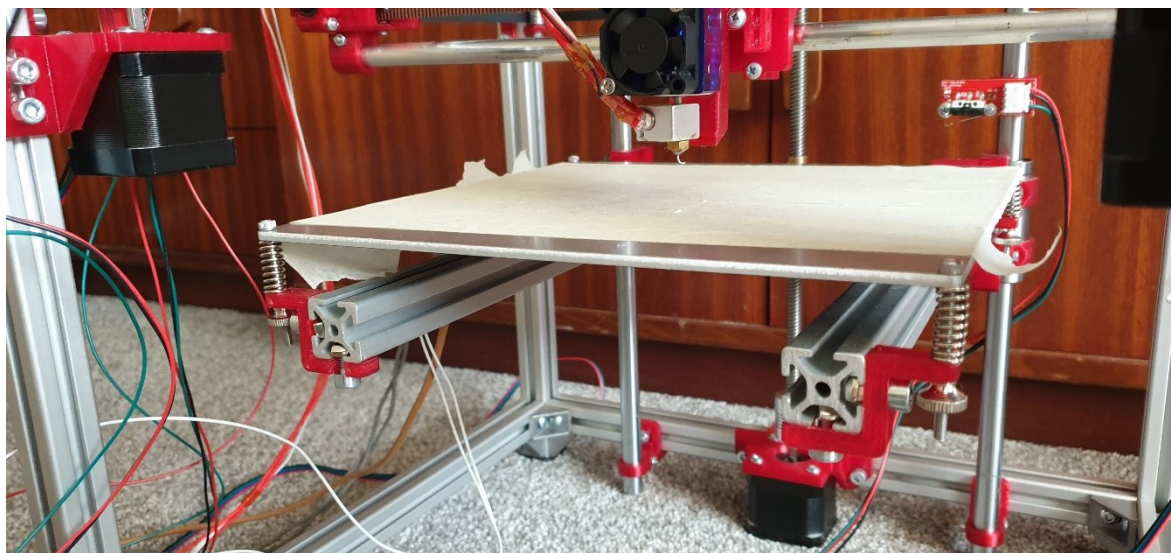
12.5 Tisková podložka (hotbed)

Pro tisk dílů bylo nutné zakoupení tiskové podložky, která se zvolila vyhřívaná pro snadnější uchycení dílů při tisku. Hotbed je vyroben z hliníku a jeho rozměry jsou 214 x 214 mm s tloušťkou 3 mm. Spodní stranu desky kryje polykarbonátová vrstva.

Uchycení desky zajišťuje čtveřice navržených úchyťů (viz Obr. 59) spolu s polohovacími šrouby M3 s pružinou a maticí. Deska se dodává samostatně bez kabeláže. Pro zajištění zapojení vyhřívané desky do řídicí desky bylo nutné napájení kabelů na desku. Pro zapojení do řídicí desky se zvolil režim 12 V. U režimu 12 V je na pozici 1 plus a na pozici 2 a 3 mínus (vodiče 2 a 3 byly svedeny do jednoho).

Teplota podložky je měřena pomocí termistoru NTC, což znamená, že odpor s rostoucí teplotou klesá. Použitelnost senzoru se pohybuje v rozmezí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Montáž termistoru na spodní stranu podložky zajišťuje kaptonová páska a jeho zapojení do řídicí desky umožňuje dvou pinový konektor.

Pro tisk je vhodné desku opatřit oboustrannou papírovou páskou, která udrží výtisk lépe na místě a usnadní čištění hliníkového povrchu hotbedu.



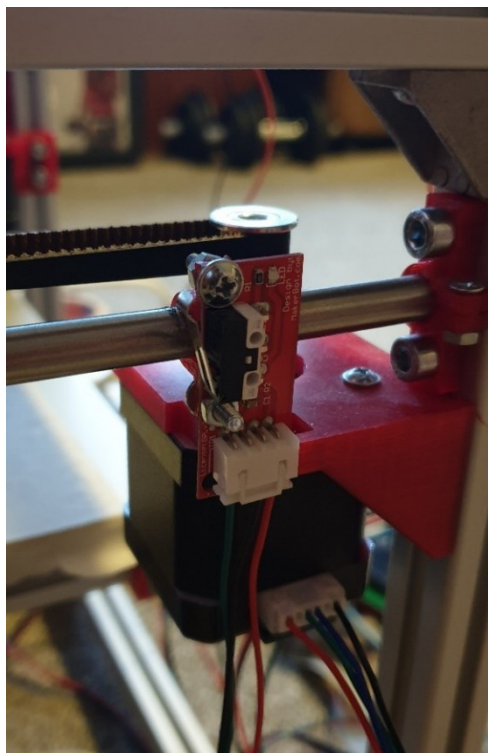
Obr. 75 - Vyhřívaná podložka (hotbed) s oboustrannou páskou

12.6 Koncové spínače osy X, Y, Z

Spínače na zařízení slouží pro vytvoření nulových bodů, od kterých je definován souřadný systém tak, aby byl tisk prováděn na podložku. Ve firmwaru je nastavena velikost tiskové plochy (214 x 214 mm) a logické funkce koncových senzorů (endstopů). Při sepnutí snímače již realizovaný pohyb nepokračuje v daném směru.

Pro osu X a Y jsou zvoleny mechanické koncové snímače s 3 pinovým kabelem délky 70 cm. Maximální proud činí 2 A. Deska spínače je opatřena izolační vrstvou odolávající teplotě 80 °C. Připojení k řídicí desce zajišťuje tří pinový konektor s vybráním (není možné špatné zapojení).

Ve firmwaru jsou spínače ovládány pomocí logické funkce true nebo false, které monitorují změnu při stlačení a uvolnění. Další parametr tvoří umístění endstopů. Pro osu X je spínač umístěn na levé straně tiskové hlavy, pro osu Y se nachází v levém horním předním rohu a v ose Z je umístěn na pravé vodící tyči osy Z. Firmware vyžaduje definování logické funkce pro směry, ve kterých spínače jsou. Dle definice by se měly motory pohybovat směrem k endstopům. Pokud se tisková hlava a podložka pohybuje opačným směrem, je nutné změnit logickou funkci na obrácenou hodnotu.



Obr. 76 - Koncový spínač pohybové osy Y

12.7 Napájecí zdroj

Vhodný napájecí zdroj je brán dle odběru veškerých komponentů. Údaj o výkonu ve wattech není plně vypovídající a je tedy nutné brát proudový odběr. Běžně se odběr pohybuje mezi 12 A až 16 A. Pro tiskárnu bylo vhodné zakoupit silnější zdroj než je odběr. Volba směřovala na průmyslový napájecí spínaný zdroj s výstupním napětím 12 V, proudem do 30 A a výstupním výkonem 360 W. Zdroj má aktivní chlazení, ochranu proti zkratu, přepětí a také přehřátí.



Obr. 77 - Napájecí spínaný zdroj s výstupním napětím 12 V

12.8 LCD displej

Pro zjednodušení ovládání bez použití počítače byl použit LCD displej se slotem na SD kartu. Prvním plánem byl displej LCD 2004, ale po připojení k řídicí desce nebyl funkční. Vzhledem k nabídce místního trhu směřoval výběr na grafický displej LCD 12864. Tento displej má rozlišení 128 x 64 bodů a obsahuje čtečku SD karet. Displej je vybaven voličem, který umožňuje ovládání menu. Propojení s řídicí deskou zajišťuje dvojice kabelů s deseti pinovými konektory na obou stranách. Jeden kabel slouží pro SD kartu a druhý pro LCD displej. Ve firmwaru je požadováno povolení displeje a SD karty.

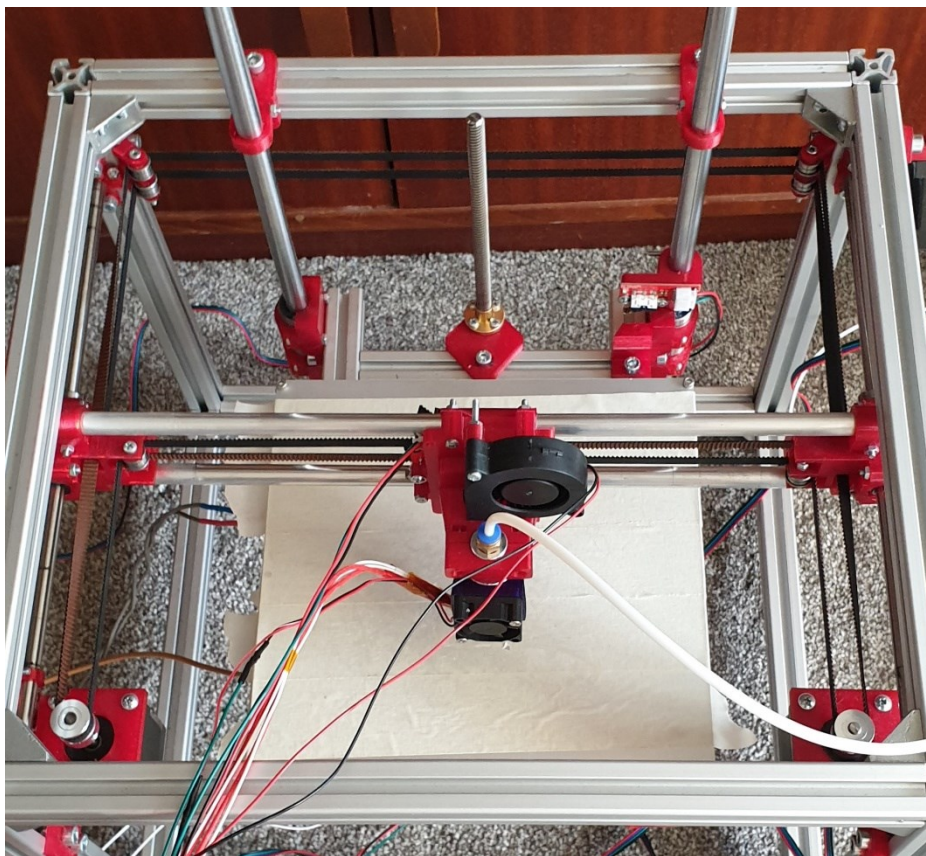


Obr. 78 - Grafický displej LCD 12864

13 NATAŽENÍ ŘEMENŮ

Způsob vedení řemenů vychází z konstrukce typu coreXY, která počítá s pohybem tiskové hlavy ve směru osy X a Y. Osa Z se ovládá krokovým motorem s trapézovou tyčí. Řešení umožňuje uspořádání řemenů na dva stupně, kdy je jeden okruh určen pro první stupeň a druhý okruh pro další stupeň. Pro vlastní zařízení se zvolil nižší okruh pro pravou stranu (osa Y) a vyšší pro levou stranu (osa X). Řemen byl zvolen typu GT2 s protiskluzovou úpravou (šířka 6 mm). Standartní dodávané délky řemenů jsou 2 m.

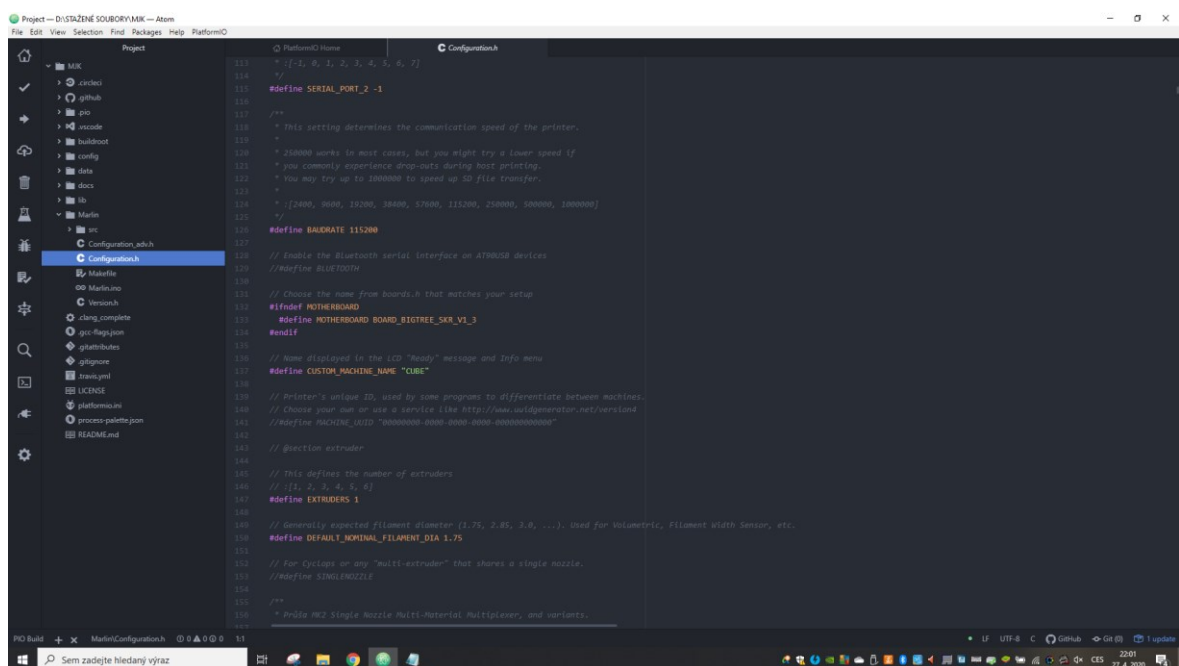
Pro natažení řemenů slouží řemenice hnacích motorů osy X a Y, dále dvě pouzdra pro vedení řemenů s vodícími prvky (Obr. 61) a úchyty pro řemeny (Obr. 65). K upevnění řemenů slouží úchyt na Obr. 62, na kterém je pro spodní stranu řemen uchycen pevně pomocí stahovacích pásků. Pro napínání slouží horní strana úchytu na Obr. 62, kde jsou řemeny upevněny pomocí destičky se třemi šrouby (M3 X 10 mm) a maticemi M3.



Obr. 79 - Vedení řemenů pro pohyb tiskové hlavy

14 FIRMWARE

Řídicí deska ani ostatní elektronické součásti nejsou bez vhodného firmwaru schopny fungovat. Řídicí program tzv. FIRMWARE dává pokyny desce, která řídí funkci jednotlivých komponentů. Dle použitých dílů je nutné upravit řídicí kód. Odpovídající musí být řídicí procesor, použitý displej, drivery motorů, jednotlivé funkce endstopů, ventilátory a mnoho dalších požadovaných funkcí, které uživatel definuje. Pro úpravu řídicího kódu slouží vývojové prostředí Atom nebo VS Studio. Pro tvorbu kódu byl zvolen program Atom doplněný o nadstavbu platform.IO, která umožňuje snadnější práci s kódem a zjednodušené vyhledávání souborů.



```
Project — D:\STAZENÉ SOUBORY\MIK — Atom
File Edit View Selection Find Packages Help PlatformIO

Project
  MIK
  .circleci
  .github
  .pro
  .vscode
  buildroot
  config
  data
  docs
  lib
  Marlin
  src
  Configuration_adv.h
  Configuration.h
  Mabllele
  00_Marlin.h
  01_Marlin.h
  clang_complete
  gcc_flags.json
  gitattributes
  gitignore
  travis.yml
  LICENSE
  platformio.ini
  process_palette.json
  README.md

PlatformIO Home
  # [2, 3, 4, 5, 6, 7]
  //
  #define SERIAL_PORT 2
  #define SERIAL_PORT_2 -1
  //
  // This setting determines the communication speed of the printer.
  //
  // 250000 works in most cases, but you might try a lower speed if
  // you commonly experience drop-outs during host printing.
  // You may try up to 1000000 to speed up SD file transfer.
  //
  // [2500, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200, 230400, 460800, 920000]
  //
  #define BAUDRATE 115200
  //
  // Enable the Bluetooth serial interface on AT91SAM devices
  // #define BLUETOOTH
  //
  // Choose the name from boards.h that matches your setup
  //
  #ifndef MOTHERBOARD
  #define MOTHERBOARD BOARD_BIGTREE_SKR_V1_3
  #endif
  //
  // Name displayed in the LCD "Ready" message and Info menu
  #define CUSTOM_MACHINE_NAME "CUBE"
  //
  // Printer's unique ID, used by some programs to differentiate between machines.
  // Choose your own or use a service like http://www.uuidgenerator.net/version4
  // #define MACHINE_UUID "00000000-0000-0000-0000-000000000000"
  //
  // @section extruder
  //
  // This defines the number of extruders
  //
  // [1, 2, 3, 4, 5, 6]
  #define EXTRUDERS 1
  //
  // Generally expected filament diameter (1.75, 2.85, 3.0, ...). Used for Volumetric, Filament Width Sensor, etc.
  #define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 1.75
  //
  // For cyclaps or any "multi-extruder" that shares a single nozzle.
  // #define SINGLENOZZLE
  //
  // Průběh M2 Single Nozzle Multi-Material Multiplexer, and variants.
```

Obr. 80 - Vývojové prostředí programu Atom (spuštěný konfigurační soubor)

14.1 Marlin 2.0 bugfix

Pro zařízení byl zvolen firmware Marlin, který má neustálou podporu ze strany uživatelů a lze jej snadno konfigurovat a upravovat. Použita byla verze Marlin 2.0 bugfix, která už má opravenou velkou část chyb a je doplněna o nové funkce. Jelikož se jedná o open source projekt, který je volně dostupný a upravitelný, lze najít velké množství přednastavení. Pro zvolenou desku SKR v1.3 je dostupná přednastavená konfigurace, která byla využita pro další tvorbu. V programu Atom se nadeřinoval v souboru platofmio.ini pracovní čip řídicí desky LPC1768. Následné úpravy probíhaly v konfiguračním souboru configuration.h. Nastaveny byly komunikační porty a přenosové rychlosti, použitá řídicí deska, filament, kroky motorů, koncové spínače, LCD displej, SD karta, tisková plocha nebo způsob pohybu motorů. Ve firmwaru je definován i způsob nulování os (bed se sníží o 5 mm, vynuluje se osa X, Y a pak se tisková hlava přesune do středu vyhříváné podložky a vynuluje se osa Z).

```
KONFIGURAČNÍ SOUBOR|
#define SERIAL_PORT 0 - definování komunikace
#define BAUDRATE 115200 - komunikační rychlost tiskárny (shodná s programem Repetier-host pro zkoušení funkce jednotlivých komponentů)
#define MOTHERBOARD BOARD_BIGTREE_SKR_V1_3 - zadání použité řídicí desky
#define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 1.75 - průměr filamentu
#define HEATER_0_MAXTEMP 250 - maximální teplota teploty hotendu
#define BED_MAXTEMP 90 - maximální hodnota teploty topné desky
#define THERMAL_PROTECTION_HOTENDS - ochrana hotendu při poruše nahřívání
#define COREXY - způsob pohybu krokových motorů osy x a y dle zvolené konstrukce

#define USE_XMIN_PLUG
#define USE_YMIN_PLUG
#define USE_ZMIN_PLUG - endstopy se nachází v minimální poloze (tisk začíná v poloze [0,0,0])

#define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING true
#define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING true
#define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING true - nastavení směru pohybu motorů směrem k endstopům

#define X_DRIVER_TYPE A4988
#define Y_DRIVER_TYPE A4988
#define Z_DRIVER_TYPE A4988
#define E0_DRIVER_TYPE A4988 - přiřazení použitých driverů pro motory

#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 80, 80, 400, 157.2 } - nastavení kroků motorů x,y,z a extruderu
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 3000, 3000, 100, 10000 } - nastavení maximální hodnoty rychlosti krokových motorů

#define INVERT_X_DIR true
#define INVERT_Y_DIR true
#define INVERT_Z_DIR false - definování směru otáčení motorů

#define X_BED_SIZE 214
#define Y_BED_SIZE 170 - rozměry tiskové plochy

#define PREHEAT_1_LABEL "PLA" - definování nastavení pro výchozí materiál
#define PREHEAT_1_TEMP_HOTEND 210 - teplota hotendu
#define PREHEAT_1_TEMP_BED 50 - teplota vyhříváné podložky
#define PREHEAT_1_FAN_SPEED 00 - rychlost ventilátoru pro přehřev

#define SDSUPPORT - povolení SD karty displeje
#define SPEAKER - umožnění zvukové odezvy displeje
#define INDIVIDUAL_AXIS_HOMING_MENU - nastavení ovládání os z displeje
#define REPRAP_DISCOUNT_FULL_GRAPHIC_SMART_CONTROLLER - povolení použitého displeje
```

Obr. 81 - Nejdůležitější příkazy v konfiguračním souboru Marlinu

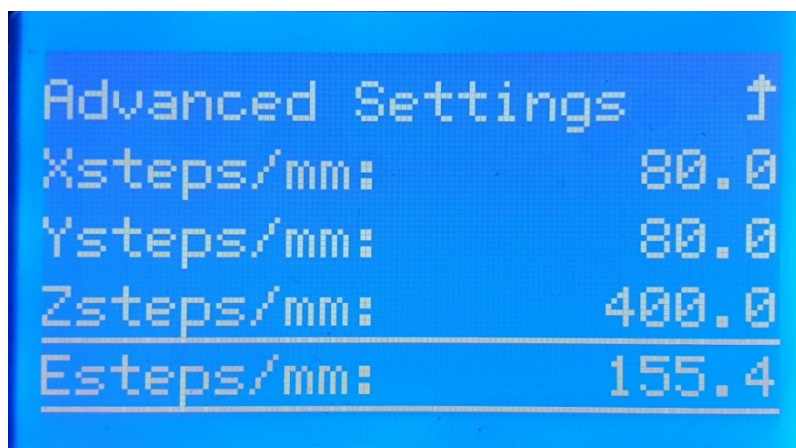
Po úpravě souboru Marlin následuje použití příkazu build, který soubor zkontroluje a vyhodnotí správnost. Po úspěšné kontrole se vytvoří soubor firmware.bin, který přepisuje původní nastavení desky pomocí SD karty. Na SD kartě se vyskytuje soubor firmware.CUR, ke kterému se přepokopíruje soubor .bin. Po vložení karty do řídicí desky a připojení zdroje do sítě se soubor .CUR přepíše souborem .bin (zůstane jen .CUR soubor) a nastaví desku dle parametrů Marlinu.

15 KALIBRACE A NASTAVENÍ TISKU

Pro nastavení byl využit program Repetier-host, který umožňuje zkoušet jednotlivé komponenty, jako jsou krokové motory, extrudér filamentu, ventilátory, koncové spínače (příkaz M119) nebo vyhřívání hotendu a vyhřívané podložky. Díky programu Repetier-host byl také upravován řídicí firmware (nastavení spínání endstopů, směry pohybů motorů aj.). Nastavení přenosové rychlosti firmwaru musí odpovídat programu Repetier-host (baudrate 115 200)

15.1 Kalibrace kroků motorů

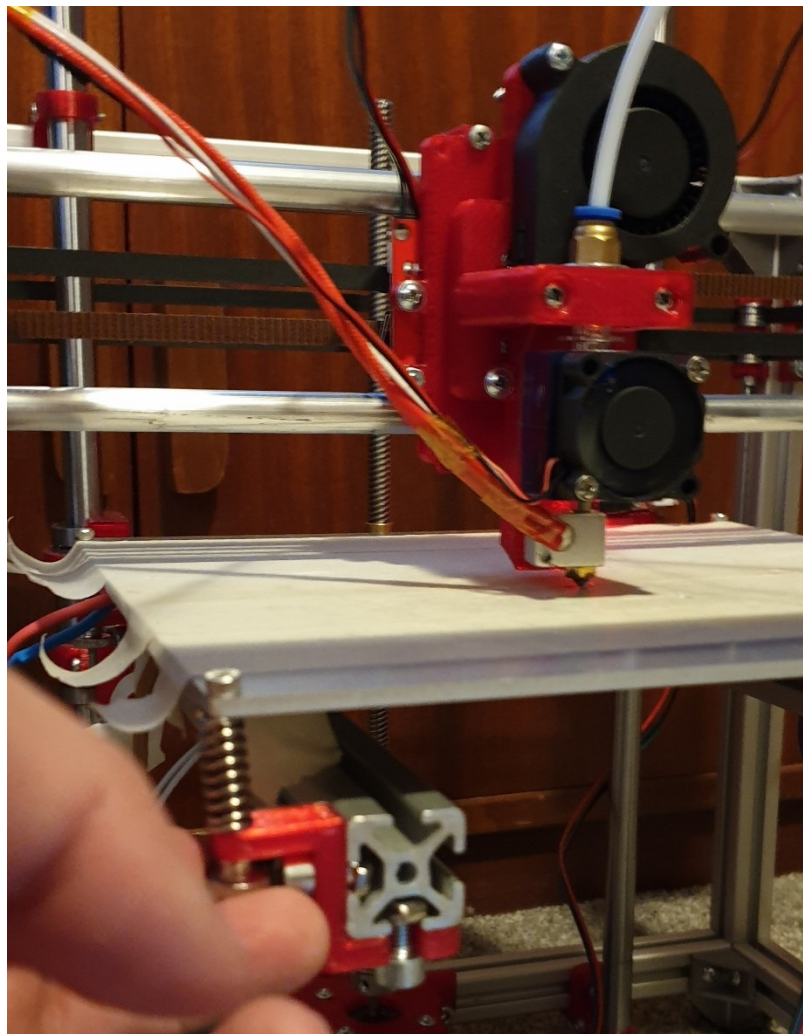
Pro správnost kroků motorů je vyžadována jejich kalibrace. Pro krokové motory SX17 byla po konzultaci s ostatními tiskaři zvolena pro osy X a Y hodnota 80 kroků na milimetr a pro osu Z 400 kroků na milimetr. Pro kalibraci kroků extruderu byl použit jednoduchý test (uvažováno pro zavedený filament v tiskové hlavě). Od vstupu do extruderu se na filamentu naměřila hodnota 120 mm. Po vytlačení vlákna by mělo zůstat od extruderu 20 mm filamentu. Tento test je doporučeno provést třikrát po sobě. Tiskárna se připojila ke zdroji napájení a dále k počítači pomocí USB. Pomocí LCD displeje je nutné vybrat nahřátí hotendu na teplotu tavení filamentu (PLA 210 °C). V programu Repetier-host musí být zadán příkaz M83 (relativní režim) a po nahřátí extruderu příkaz G1 E100 F100, který vytlačí 100 mm filamentu. Při kalibraci zbylo před extruderem 18,9 mm, 18,8 mm a 18,85 mm (průměrná hodnota 18,85 mm). Přepočet lze provést pomocí vzorce, kde se původní hodnota kroků vynásobí hodnotou 100 a následně vydělí hodnotou 120 mm minus zbylá délka filamentu před extruderem. Po kalibraci vyšla hodnota 155,4 kroků/mm. Po dalším vytlačení filamentu činil zbytek přesně 20 mm.



Obr. 82 - Kalibrace krokových motorů přes LCD displej

15.2 Kalibrace tiskové podložky

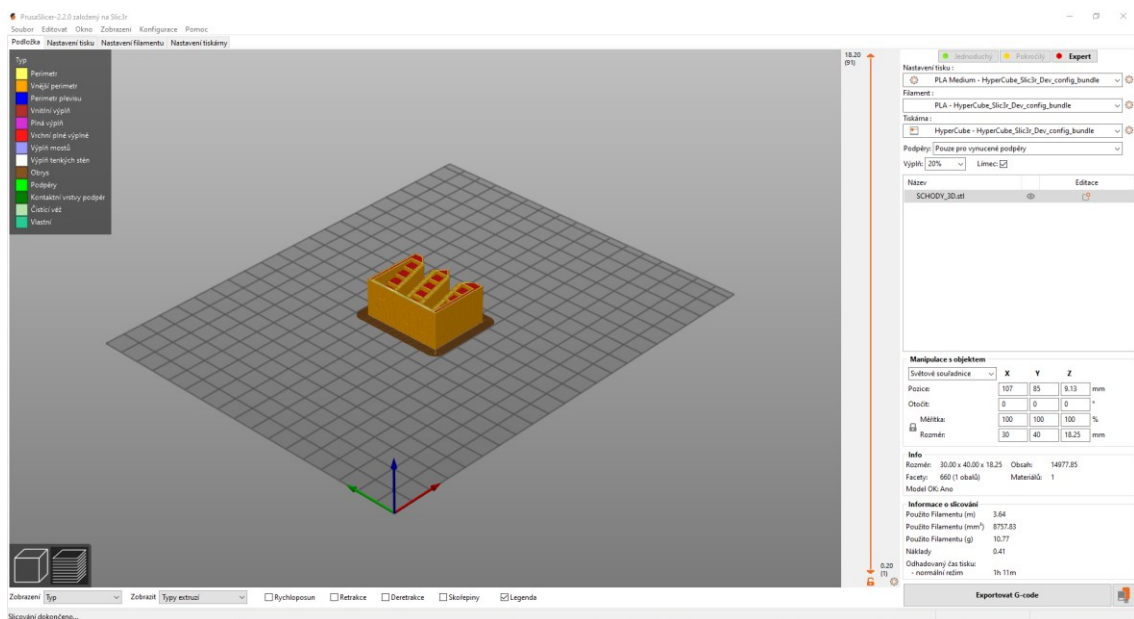
Vzhledem k problémům s indukčními snímači a následnou instalací koncového snímače pro osu Z bylo nutné provést kalibraci ručně (uvažováno při zapnuté 3D tiskárně). Přes menu na LCD displeji se nahřála tisková podložka (na 40 °C), spustil se home příkaz pro všechny osy (nastaveno tak, že se vynuluje osa X, následně osa Y a pak se tisková hlava přesune do středu tiskové podložky a vynuluje se osa Z) a nakonec se uvolní krokové motory. Tisková hlava se ručně přesouvala do všech rohů tiskové podložky a pomocí listu papíru A4 se upravila výška tiskové podložky pomocí levelovacích šroubů (papír by měl jemně přejíždět mezi tiskovou podložkou a tryskou, nesmí se krčit). Po kontrole a úpravě všech určených bodů je kalibrace dokončena.



Obr. 83 - Kalibrace tiskové podložky vůči trysce

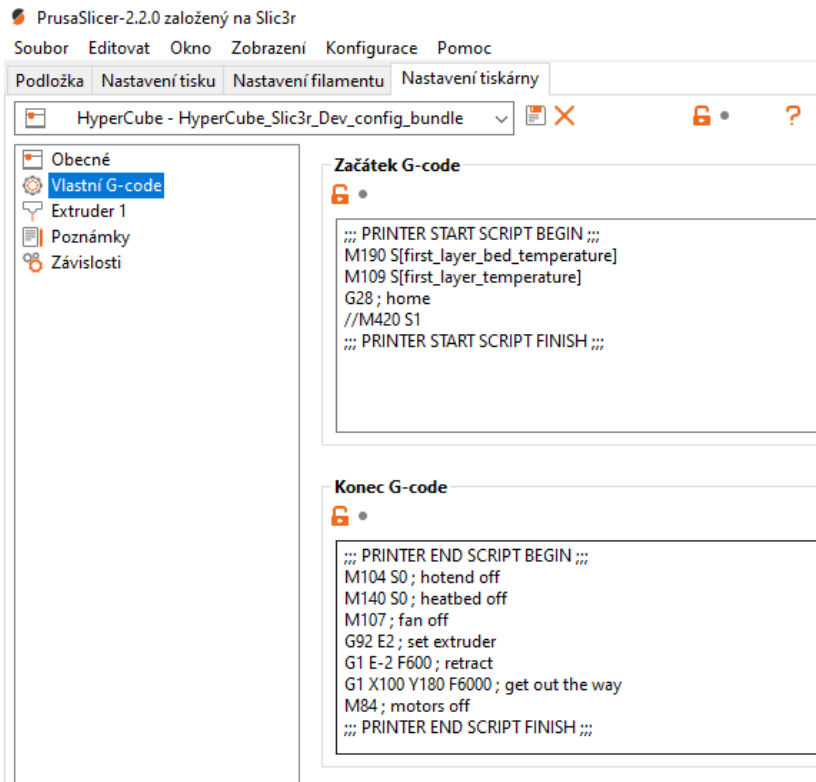
15.3 Volba a nastavení sliceru

Doporučeným slicerem pro nastavení parametrů tisku a úpravy modelů je Slic3r od firmy Průša Research. Software má neustálou podporu a veškeré aktualizace jsou dostupné zdarma. Nastavení sliceru bylo řešeno pro materiál PLA. Díky konzultacím s ostatními tiskaři, studiu informací na internetu a především zkušebními tiskům bylo vyhotoveno předběžné nastavení profilu sliceru. Tyto profily jsou odlišné pro každou tiskárnu, a proto se kvalita výtisků neustále upravuje, dokud není dosaženo ideálního výtisku. Nastavení se týká tiskárny (tiskový prostor 214 mm x 170 mm x 150 mm, příkazy provedené před tiskem a po tisku). Dále nastavení filamentu (průměr vlákna, trysky, násobič extruze, teploty jednotlivých vrstev a především retrakce) a chlazení. Poslední sekci tvoří nastavení tisku (vrstvy, typ výplně, límec, podpěry a tiskové rychlosti). Program obsahuje vizualizaci modelu, který lze dle potřeby libovolně umístit na tiskovou plochu. Lze nastavit charakter výplně, podpěry a možnost límce. Model s veškerým nastavením je převeden do G-kódu, který lze uložit na SD kartu a vložit přímo do LCD displeje, ze kterého lze tisk ovládat bez připojení počítače.



Obr. 84 - Prostředí Slic3ru s připravenou součástí

Pro začátek tisku má G-kód přednastavené parametry ze sliceru (nahřátí tiskové podložky a hotendu, po nahřátí se vynulují všechny osy) následuje tisk dílu a po dokončení tisku se vypne nahřívání, ventilátor trysky, zaparkuje se tisková hlava a vypnou se motory.



Obr. 85 - Nastavení úkolů před a po tisku

15.4 Tisk s kontrolou rozměrů

Pro první tisk byly zvoleny modely pro kontrolu rozměrů v jednotlivých osách, ověření tloušťky perimetru a účinnost chlazení. Zásadní roli tisku hraje kvalita a přesnost sestavení tiskárny (kontrola a dotažení všech šroubů, úchyťů, dotažení řemenů), dále nastavení firmwaru (pohybové rychlosti, kroky motorů), parametry sliceru (tiskové rychlosti, chlazení, parametry filamentu, tloušťka vrstvy), přesnost provedených kalibrací, prostředí, ve kterém probíhá tisk a nakonec i typ použitého materiálu ve formě filamentu.

Pro zjištění přesnosti rozměrů slouží tisková kostka, která byla zvolena bez výplně horní vrstvy (tloušťka stěny jeden perimetr). Výška vrstvy nastavena na 0,2 mm, výplň 0%, bez podpory a bez límce. Tisková podložka byla nahřata na 45 °C a hotend na 210 °C (zvolený materiál PLA). Používaná trysky 0,4 mm. Předepsané rozměry byly 20 x 20 x 15 mm. Tisk trval 6 minut, následovalo ověření rozměrů pomocí posuvného měřítka. Reálné rozměry byly 19,96 x 19,98 x 14,99 mm. Tloušťka jednoho perimetru odpovídala 0,44 mm.

Jednotlivé vrstvy na sebe navazují, povrch dosahuje potřebné jakosti a celkové nastavení tisku umožňuje používat navržené zařízení pro 3D tisk. Dno výtisku tvořené dvěma perimetry bylo jednoduší, vlákna byla hladká a nepřerušovaná.



Obr. 86 - Měření výšky kalibrační kostky

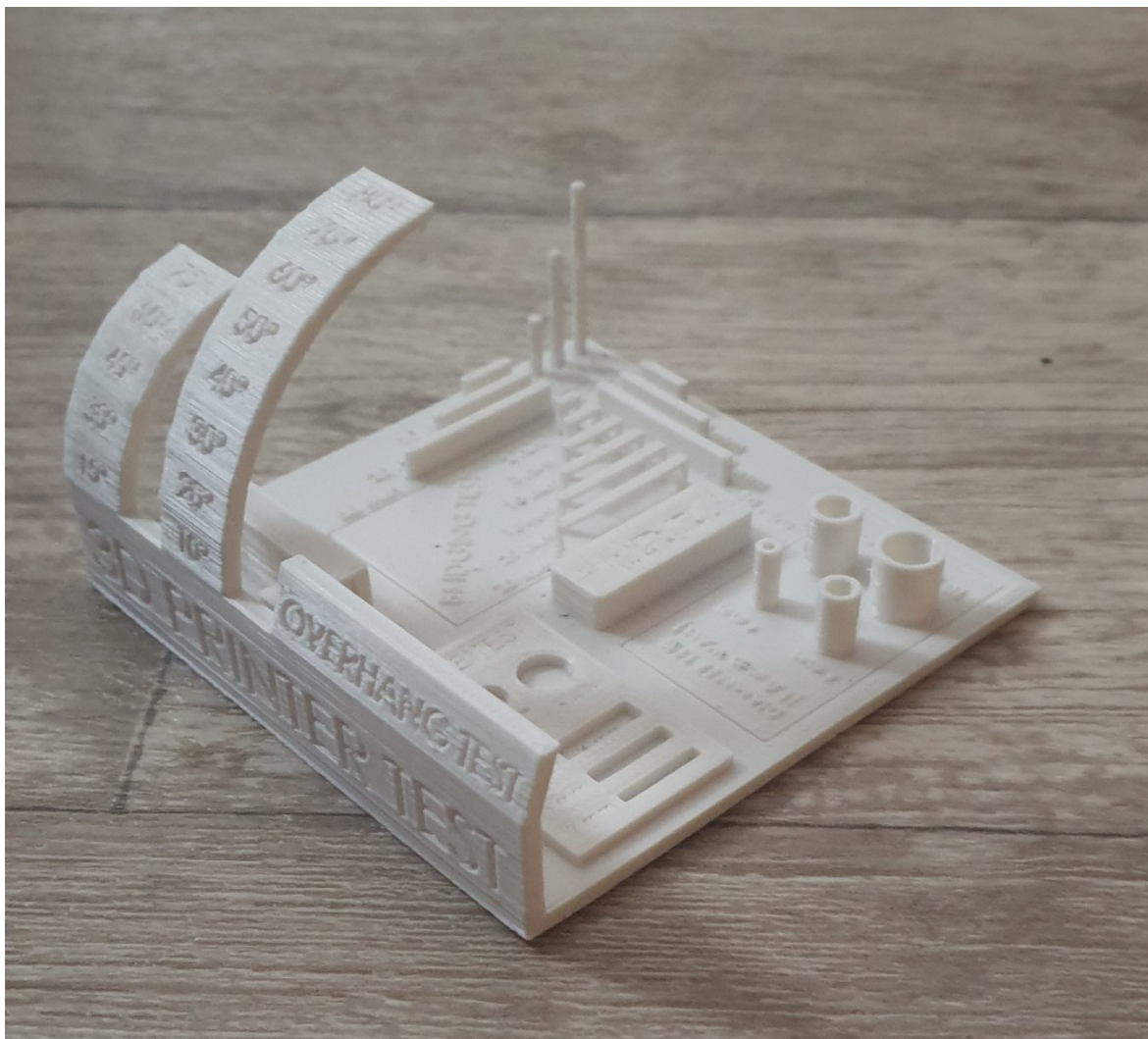
Jedinou vadou bylo lehké stlačení první vrstvy tryskou, proto byla následně provedena opakovaná kalibrace tiskové podložky. Správnost kalibrace byla demonstrována na výtisku lodi. Tento model se tiskne 4,5 hodiny a ukazuje správnost nastavení retrakce a chlazení, protože u něj nejsou nastaveny podpory. Na modelu se neprojevila chyba nastavení tiskové podložky, ale byla spatně vytištěna jedna vrstva. Chyba byla eliminována vyšším přitlakem extruderu a přidáním proudu pro motor na driveru (pootočeno trimrem). Kajuta lodi se bez podpěr vytiskla bez problémů (tiskové rychlosti a chlazení vyhovuje), stringování bylo nepatrné, avšak u složitějších výtisků se může projevat i při správném nastavení parametrů. Odstranění přebytků lze vyřešit například tavnou pistolí.



Obr. 87 - Výtisk bez využití podpor

16 TESTOVACÍ VÝTISK

Veškeré předchozí problémy byly odstraněny úpravou sliceru. Na následujícím výtisku se prokazují schopnosti a správnost nastavení. Model ověřuje schopnost tvorby přemostění (nastavení tiskových rychlostí a chlazení), dodržení délkových a výškových rozměrů. Dále posuzuje tvorbu průměrů a správnost výplně. Poslední parametr kontroluje tisk bez podpor pro úhel až 80°. Celková doba tisku činila 8 h a 34 min.



Obr. 88 – Kompletní test správnosti sestavení tiskárny

Výtisk byl vyhotoven bez potíží a veškeré tvary i rozměry odpovídají rozměrům 3D modelu. Nastavení firmwaru i sliceru se ukázalo jako vhodné. Po zvládnutí tohoto výtisku lze tiskárnu používat pro tisk libovolných součástí.

17 POROVNÁNÍ TISKU A CENOVÁ KALKULACE

Pro otestování nastavení tisku a kvality konstrukce vlastní tiskárny byly zvoleny běžně dostupné komerční zařízení. Dražším zástupcem bylo zařízení od firmy Průša Research, a to v poslední možné konfiguraci I3 MK3s. Tato tiskárna se na trhu nabízí za jednotnou cenu 26 tisíc korun (sestavená) a k dispozici je nejnovější firmware a také nastavení sliceru pro jednotlivé druhy materiálů. Pro objektivnější hodnocení bylo do porovnání zařazeno také levnější zařízení, kterým byla tiskárna Creality Ender 3 Pro, jehož cena se pohybuje kolem 6 tisíc korun.

Pro tisk byl vyroben 3D model schodiště s iniciály fakulty na zadní straně. Hlavní rozměry dílu jsou podle 3D modelu 40 x 30 x 18,25 mm. Tvar výtisku kontroluje správnost rychlosti ventilátoru u šikmých ploch, nastavení kroků jednotlivých motorů (ná vaznost vrstev a hotové rozměry) a dále např. správnost nastavení retrakcí filamentu nebo rychlost tisku jednotlivých oblastí (rychlost se liší pro podpěry, límec, výplň aj.).

Definování tiskových profilů sliceru se u jednotlivých zařízení liší, viz Tab. 1. Shodná byla volba výplně a tisk bez podpěr. Na vlastním sliceru byl modelu přiřazen límec. U komerčních tiskáren se odlišuje způsob koncepce zařízení. Tisková podložka vykonává pohyb v ose Y, zatímco tisková hlava zajišťuje pohyb v ose X a Z. Nevýhodou u tohoto řešení může být zvýšení vibrací a ztráta stability u vyšších výtisků. Dále mají komerční tiskárny navíc indukční snímač pro automatickou kalibraci tiskové podložky. Nejvybavenější Průša MK3s obsahuje také senzor filamentu, ventilátorů, posunutí vrstev výtisku a zaseknutí extruderu. Zařízení se odlišují i velikostí tiskového prostoru.

Tab. 1 shrnuje hlavní nastavení profilů slicovacích programů. Zařízení od firmy Průša Research běžně pracuje s vlastním programem Slic3r. Tento program byl využit i pro nastavení vlastního zařízení. Levná tiskárna Creality Ender pracuje s programem Cura. Principy těchto programů jsou pro přípravu tisku shodné.

Tab. 1 – Nastavení profilů sliceru pro tisk

	Vlastní 3D tiskárna	Průša I3 MK3s	Ender 3 Pro
Materiál	PLA (Creality)	PLA (Gembird)	PLA (Gembird)
Filament	1,75 mm	1,75 mm	1,75 mm
Výška vrstvy	0,2 mm	0,2 mm (quality)	0,2 mm
Tryska	0,4 mm (mosaz)	0,4 mm	0,4 mm
Hustota výplně	20 %	20 %	20 %
Výplň	mřížka (45 °)	mřížka (45 °)	mřížka (45 °)
Podpěry	/	/	/
Svislé stěny (perimetry)	3	3	2
Vodorovné stěny (perimetry)	4	3	4
Limit vrstvy min/max	0,10 mm / 0,3 mm	0,07 mm/0,25 mm	0,12 mm/ 0,32mm
Rychlost tisku - perimetr	45 mm/s	60 mm/s	25 mm/s
Rychlost tisku - plná výplň	50%	80 mm/s	50 mm/s
Rychlost tisku - výplň tenkých stěn	40 mm/s	40 mm/s	50 mm/s
Násobič extruze	1	1	1
Teplota extruderu - 1. vrstva	210 °C	208 °C	210 °C
Teplota extruderu - ostatní vrstvy	205 °C	205 °C	210 °C
Teplota tiskové podložky - 1. vrstva	45 °C	30 °C	50 °C
Teplota tiskové podložky - další vrstvy	45 °C	30 °C	50 °C
Ventilátor - hotend	Vždy zapnutý	Automaticky zapnuto	Vždy zapnutý
Rychlost ventilátoru - tryska (min/max)	38 % / 100 %	35 % / 100 %	35 % / 100 %
Objem tisku	214 x 170 x 150 mm	250 x 210 x 210 mm	230 x 230 x 250 mm
Retrakce - vzdálenost	2 mm	0,8 mm	5 mm
Retrakce - rychlost	45 mm/s	35 mm/s	45 mm/s
Šířka extruze	0,4 mm	0,45 mm	0,4 mm

17.1 Doba tisku a spotřeba filamentu

Odlíšné nastavení slicerů mění hmotnost výtisku, délku použitého filamentu i pracovní čas. Nepatrný vliv může mít i odlišná hustota materiálu, případně použitá barviva.

Tab. 2 – Základní informace tisku týkající materiálu a času

	Vlastní 3D tiskárna	Průša I3 MK3s	Ender 3 Pro
Použito filamentu [m]	3,64	3,83	3,74
Hmotnost použitého filamentu [g]	10,77	11,42	11,00
Čas tisku [h/min]	1 h 11 min	1 h 07 min	1 h 14 min

17.2 Hodnocení výtisků

17.2.1 Povrch výtisku

Z hlediska kvality povrchu není u jednotlivých zařízení žádný výrazný rozdíl. Vlastní tiskárna i tiskárna MK3s mají při finálním odjezdu trysky zanechanou stopu na povrchu, což lze eliminovat přesnější kalibrací polohy tiskové podložky a trysky. Nejjemnějšího povrchu bylo dosaženo na levném Enderu 3 Pro. Hlavní rozdíly jsou patrné především v horní části výtisku, kde je Ender 3 Pro bezchybný a vytvořený povrch je jednolitý. Levná tiskárna pracovala s novým hotendem, takže lze na výtisku vidět znatelný přechod, který je způsoben úpravou vlastností. Odpovídajících rozměrů bylo dosaženo v horní třetině výtisku.

U nápisu na vlastním výtisku lze vidět oproti komerčním tiskárnám přechody mezi jednotlivými písmeny. Viditelné přechody by mohly být odstraněny snížením rychlosti tisku, přesnější kalibrací extruderu nebo úpravou modelu. Tloušťka přechodové stěny mezi písmeny má hodnotu pouze 0,6 mm (nejnižší možná tloušťka tisku je nastavena na 0,5 mm, což může způsobit nepřesnost). Na vlastní součásti se dále projevuje pozůstatek límce ve spodní části dílu. Ze všech porovnávaných tiskáren má vlastní tiskárna písmo nejpřesnější a nedochází ke hromadění materiálu v přechodech mezi plochou a písmem.

Na výtisku ze zařízení MK3s lze v rozích součástí ve svislém směru vidět odskočení vrstev, což způsobuje efekt zvlnění. Stejný jev se projevuje také u vytvořených písmen.

Z hlediska kvality povrchu je jasným vítězem levná tiskárna Creality Ender 3 Pro. Dodržení tvarů nejlépe řeší vlastní tiskárna.



Obr. 89 - Porovnání – pohled zezadu (z leva – vlastní tisk, Průša, Ender)

17.2.2 Porovnání rozměrů výtisků

Pro měření přesnosti rozměrů bylo použito mechanické posuvné měřidlo. Přesnost vlastního prototypu se pohybuje v řádech jedné desetiny mm, což odpovídá i komerčním 3D tiskárnám. Navržený model má rozměry 40 x 30 x 18,25 mm.

Tab. 3 - Vyhodnocení rozměrů výtisku

	Vlastní 3D tiskárna	Průša I3 MK3s	Ender 3 Pro
rozměr v ose x [mm]	39,98	40,06	39,90
rozměr v ose y [mm]	30,00	30,00	30,00
rozměr v ose z [mm]	18,24	18,40	18,20

Podle naměřených hodnot odpovídá nejvyšší přesnosti vlastní prototyp 3D tiskárny. Veškeré hodnoty jsou však závislé na nastavení firmwaru, sliceru a schopnostech celého zařízení. Při dalším testování a nastavování jednotlivých zařízení by bylo možné dosáhnout vyšších přesností rozměrů a také lepší jakosti povrchů.



Obr. 90 - Porovnání - přední pohled (zleva – vlastní tisk, Průša, Ender)

17.3 Cenová kalkulace vlastní tiskárny

Cenový rozpočet stanovený na 10 tisíc korun byl překročen a to vzhledem k nefunkčnosti objednaných dílů, které se musely objednat z místního trhu, kde jsou ceny mnohem vyšší.

Tab. 4 - Kalkulace vlastního zařízení pro 3D tisk

POLOŽKA	NÁZEV	KUS	CENA s DPH [Kč]
1	Hliníkový profil - Kombi stojka 20 x 20 - 3 m	2	1564
2	Spojky na profily	24	225
3	Imbusový šroub M5 x 10 mm	120	68
4	T-matice M5	200	127
5	Hlazená tyč 8 mm x 300 mm	2	100
6	Lineární kuličkové ložisko LM8LUU	2	138
7	Hliníková trubka 10 mm x 360 mm	2	13
8	Kluzné pouzdro ocel-PTFE KU 1020 B10	4	80
9	Šroub M3 x 10 mm	50	25
10	Šroub M3 x 20 mm	50	30
11	Šroub M3 x 35 mm	10	6
12	Matice M3	120	78
13	Hlazená tyč 10 mm x 400 mm	2	278
14	Lineární kuličkové ložisko LM12LUU	2	198
15	Pružná spojka 5/8 mm	1	120
16	Trapézová tyč d8 T8 300 mm	1	139
17	Krokové motory SX17	4	1420
18	Propojovací kabely motorů NEMA17	4	200
19	Mosazná trapézová matice d8 T8	1	29
20	Vyhřívaná podložka MK3 214 x 214 x 3 mm	1	519
21	Termistor pro hotbed NTC100K	1	29
22	Kaptonová páska 10 mm (30 m)	1	79
23	Polohovací šrouby pod bed	4	104
24	Ozubený řemen GT2 (2 m)	1	375
25	Vodící ložisko s přírubou F623ZZ	10	150
26	Ozubená řemenice GT2 20 zubů	2	150
27	Pneufit průchozí spojka (PC4-01)	3	225
28	Podávací kolečko 8 x 12 mm	1	79
29	Hotend E3DV6 pro bowden s PTFE trubičkou	1	510
30	Ventilátor tisku 50 x 50 x 15 mm	1	89
31	Indukční snímač LJ12A3-4-Z/BY	1	100
32	Teflonová hadička PTFE pro vedení filamentu	1	105
33	Řídící deska SKR V 1.3	1	1350
34	Driver motoru - A4988	4	256
35	Mechanický koncový spínač pro 3D tiskárnu	3	87
36	LCD displej 12864	1	499
37	Zdroj 12V 30A 360W	1	698
CELKOVÉ NÁKLADY NA ZAŘÍZENÍ PRO 3D TISK			10 242

Například řídicí deska SKR v1.3 ze zahraničí vyšla na necelých 500 Kč, zatímco tuzemská distribuce se pohybovala s cenou kolem 1300 Kč. Dalším problémem byl nefunkční LCD displej typu 2004, který se po připojení ke zdroji napětí nerozsvítil, nefunkční ventilátor pro chlazení trysky nebo problém s komunikací indukčního snímače s programem. S reklamací dílů jsou problémy, vše vyžaduje dlouhý časový interval a navíc není jistota, že bude díl reklamován.

V kalkulaci nejsou zahrnuty ceny vadných dílů. Součet neobsahuje ani tisk vlastních komponentů, který byl proveden zdarma.

ZÁVĚR

Teoretická část pojednává o základech 3D tisku a stručně historii této technologie, následuje rozdělení technologií 3D tisku, používané materiály a jednotlivé komponenty, ze kterých jsou tiskárny složeny. Kapitola se věnovala i tvorbě 3D modelů, zpracování dat pro tisk a nastavení potřebných parametrů tiskáren. Zaměření práce zahrnovalo především oblast FDM tisku, na jehož principu byla postavena navrhovaná 3D tiskárna.

Na počátku praktického řešení byl proveden návrh zařízení v programu CATIA V5. Složená sestava v 3D programu vymezila rozměry pro umístění upínacích dílů. Při modelaci lze odladit souososti navazujících dílů, což eliminuje chyby před tisknutím potřebných dílů. Díky Catii byl upraven ventilační tunel pro ventilátor trysky, vymezila se vzájemná poloha pro vodící díly řemenů a změnil rozměr uchycení mosazné vodící matice. Po vyhotovení a úpravě modelu následovala stavba reálné konstrukce.

Kompletace konstrukce zahrnovala sestavení rámu, pohybových os a osazení elektronikou. Vodiče byly doplněny potřebnými konektory a prodlouženy pomocí pájení. Veškeré díly se následně zapojily do řídicí desky. Zařízení pracuje s nižším vstupním napětím 12 V. Nevýhoda nižšího napětí oproti koncepci používající 24 V, spočívá primárně v delším nahřívání komponentů a horším udržení vysokých teplot. Vzhledem k nedostupnosti dílů pro vyšší napětí projekt zůstal u verze s napětím 12 V.

Samostatná konstrukce není schopná funkce, a proto byl vyhotoven ovládací firmware. Zvolen byl firmware Marlin 2.0 bugfix, který používá nejvíce tiskařů, umožňuje nastavení češtiny a díky otevřenosti projektu se neustále upravuje a má odstraněnu většinu chyb. Základ firmwaru spočívá v definování komunikace s použitou elektronikou a dále sjednocení příkazů s použitou konstrukcí. Parametry se definovaly zkoušením nebo radami již zkušenějších tiskařů. Pomocí programu Repetier-host se seřídila správnost Marlinu s konstrukcí tiskárny, změnil se směr otáčení krokových motorů, oprava směřovala také k logickým funkcím koncových spínačů a upravilo se nulování os

S připraveným firmwarem souvisela volba slicovacího programu, který převede 3D model do požadovaného G-kódu, který obsahuje veškeré podmínky tisku a dráhu pohybů tiskové hlavy. Pro práci se zvolil program od českého vývojového střediska Průša Research, který je volně k dispozici a obsahuje nejnovější aktualizace. V tiskovém profilu sliceru se nastavily pohybové rychlosti tisku, ventilátory, teploty pro zvolený materiál PLA, použitá tryska, průměr filamentu, výplně, tisková plocha, retrakce materiálu nebo počáteční a finální instrukce zařízení.

Pro správný tisk se kalibrovala tisková podložka a kroky motorů pro každou osu. Seřídilo se dávkování filamentu extruderu pomocí vytlačení předepsaného množství materiálu. Na zkušebních výtiscích se odladila kvalita tisku, po němž následovala úprava nastavení firmwaru i profilu sliceru.

Výstupem zařízení bylo porovnání s běžně dostupnými tiskárnami. Pro porovnání tisku sloužila 3D tiskárna I3 MK3s od firmy Průša Research a dále levná tiskárna Creality Ender 3 Pro. Kvalitu tisku lze porovnat se zařízením, které stojí více než dvojnásobnou sumu. Důležitým zjištěním je i fakt, že se tisk vyrovná zařízením, které stojí necelých 7 tisíc korun. Vlastní zařízení navíc disponuje menším tiskovým prostorem a neobsahuje veškeré senzory. Pro domácí využití je však 3D tiskárna plně dostačující a vzhledem k tomu, že se jedná o prototyp, bude zařízení dále nastavováno a upravováno, čímž lze docílit dalšího zlepšení vlastností výtisků.

Od původního návrhu zařízení bylo pozměněno řešení nulování osy Z. Původně se uvažovalo s bezdotykovou indukční sondou, ta ale nekomunikovala s řídicí deskou kvůli nízkému napětí. Náhradu měla zajistit sonda P.I.N.D.A od Průša Research, ta však vypověděla komunikaci, a tak zbyl na výběr mechanický endstop, u kterého se nastavování polohy trysky a vyhřívané podložky provádí ručně. Při ověřování funkčnosti elektroniky pomocí programu Repetier-host nedošlo k rozsvícení displeje LCD 2004, proto by objednána nový LCD 12864. Ventilátor trysky byl vadný z výroby a při proměření neposkytoval žádné napětí. Hlavním problémem při sestavení zařízení byl vadný COM port řídicí desky SKR v1.3, díky kterému nebylo možné provést nastavení 3D tiskárny, čímž si situace vyžádala zakoupení nové desky. Cenový rozpočet by bez těchto komplikací nebylo problém dodržet.

Zařízení je plánováno v dalších letech upravit. Místo mechanického koncového spínače bude instalován BL-touch snímač, který vyniká vysokou přesností nastavení trysky a vyhřívané podložky. Pro displej, zdroj, desku a filament budou vytisknuty úchyty, které umožní montáž

těchto dílů přímo na konstrukci, čímž se usnadní manipulace. Úpravě se nevyhne vedení kabelů, volba větší tiskové podložky a přidání krokového motoru s trapézovou tyčí pro oboustranné vedení tiskové podložky. Tiskárna umožňuje svou krychlovou koncepcí zvýšení tiskového prostoru v ose Z a také zakrytování pomocí plexiskla.

Vlastní konstrukce zařízení obnáší velké množství problémů, hodiny vyhledávání a konzultací ohledně správnosti a nastavení. Při konstrukci zařízení z náhodných dílů není zaručena jejich funkce a vzájemná kompatibilita. Stavba se vyplatí pouze tehdy, pokud je vyžadán atypický rozměr konstrukce. Standardně nabízené rozměry končí u tiskového prostoru 500 x 500 x 500 mm, dále se provádí pouze zakázková výroba. Na trhu lze najít sestavené zařízení kolem 6 tisíc korun, které jsou kompletní a lze je dále upravit. Porovnání se zařízením Creality Ender 3 Pro dokazuje, že při správném odladění lze tisknout kvalitní součásti, které překovávají kvalitu mnohonásobně dražšího zařízení. Tato varianta se vyplatí mnohem více, protože odpadají problémy s řešením funkčnosti a s problémy konstrukce. Pro sestavené zařízení si uživatel naprogramuje vlastní firmware a nastaví profil ve sliceru.

Při nákupu vlastních dílů člověk není schopen ovlivnit situaci trhu, takže většina dílů nemusí být k dispozici. Pokud je lze koupit, tak pouze za velmi vysokou částku jako v případě stavby tohoto zařízení.

V době realizace vlastního zařízení se ve světě rozšířila pandemie nemoci COVID-19, v jejímž důsledku byl zvýšen nejen zájem o samotný 3D tisk (výroba bezpečnostních prostředků), ale také o veškeré náhradní díly. Ty bylo těžké v brzké dodací lhůtě sehnat.

Výhoda vlastní stavby obnáší poznání velkého množství problému ohledně 3D tisku a lepší rozhled při dalších úpravách. Každý se může rozhodnout, jestli zařízení postavit nebo raději koupit. Veškerá konstrukce se však odvíjí především od požadavků vyráběného dílu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] COWARD, Cameron. *Idiot's Guides: 3D printing*. New York, USA: Penguin, 2015. ISBN 9781615647453
- [2] BRYDEN, Douglas. *CAD and rapid prototyping for product design*. London, [En-gland]: Laurence King Publishing, 2014, 176 p. ISBN 978-1-78067-570-1.
- [3] Charles W. Hull Co-Founder and Chief Technology Officer. *3dsystems.com* [online]. [cit. 2019-10-06]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/downloads/3D-Systems-Charles-W-Hull-Executive-Bio.pdf>
- [4] The Official History of the RepRap Project. *All3dp.com* [online]. [cit. 2019-10-06]. Dostupné z: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>
- [5] STŘÍTESKÝ, Ondřej a Josef PRŮŠA. *Základy 3d tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2019-10-07]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/e-book-stahnuti/>
- [6] BRYNJOLFSSON, Erik a Erik BRYNJOLFSSON. *Druhý věk stroju: práce, pokrok a prosperita v éře špičkových technologií*. V Brně: Jan Melvil Publishing, 2015. Pod povrchem. ISBN 978-80-87270-71-4.
- [7] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [8] CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3rd. New Jersey: World Scientific, 2010. ISBN 978-981-2778-970.
- [9] GIBSON, Ian. *Advanced manufacturing technology for medical applications: reverse engineering, software conversion, and rapid prototyping*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2006. ISBN 04-700-1688-4.
- [10] CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, 2003. ISBN 978-981-2381-200.
- [11] OLIVEIRA, Juliana. Schematic representation of the photopolymerization process. *Researchgate.net* [online]. 2019 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-photopolymerization-process_fig1_330319902

- [12] What-is-selective-laser-sintering. *Formlabs.com* [online]. Somerville, Massachusetts, USA, 2019 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [13] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-802-7106-141.
- [14] Laser cladding. *Laserline.com* [online]. Mülheim-Kärlich/Germany [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/laser-cladding/>
- [15] GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2010. ISBN 978-047-0467-008.
- [16] PALERMO, Elizabeth. Laminated-object-manufacturing. *Livescience.com* [online]. New York: Future US, 2013 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
- [17] EVANS, Brian. *Practical 3D printers*. New York: Apress, 2012. Technology in action. ISBN 978-143-0243-922.
- [18] Jak vybrat filament. *3dguide.cz* [online]. 2018 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://3dguide.cz/jak-vybrat-filament/>
- [19] RUSSELL GONZALEZ, Sara Ann a Denise Beaubien BENNETT. *3D printing: a practical guide for librarians*. Lanham: Rowman & Littlefield, 2016. ISBN 978-144-2255-494.
- [20] PRŮŠA, Josef. Prusament-je-tady-spickovy-filament-jehoz-kvalitu-si-muzete-sami-overit. *Josefprusa.cz* [online]. 2019 [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/prusament-je-tady-spickovy-filament-jehoz-kvalitu-si-muzete-sami-overit/>
- [21] Pla-filament-3d-printing. *All3dp.com* [online]. 2019 [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/pla-filament-3d-printing/#section-pla-filament-explained>
- [22] TYSON, Ed. 3d-printing-basics-how-to-get-the-best-results-with-pla-filament. *Rigid.ink* [online]. Wetherby, 2017 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <https://rigid.ink/blogs/news/3d-printing-basics-how-to-get-the-best-results-with-pla-filament>
- [23] LOCKER, Anatol. Petg-filament-3d-printing. *All3dp.com* [online]. 2019 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <https://m.all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/>

- [24] PRŮŠA, Josef. Prusament-petg. *Prusament.com* [online]. Prusa Research, 2019 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- [25] Materiálový slovník. *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2019-10-22]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [26] Materials guide: ASA. *Simplify3d.com* [online]. 2019 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/asa/>
- [27] RENGANATHAN, Sriram. Flexible-3d-printing-filament-which-should-you-chose. *All3dp.com* [online]. 2019 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/flexible-3d-printing-filament-which-should-you-chose/>
- [28] MASCIA, Leno. *Polymers in Industry from A to Z: A Concise Encyclopedia*. John Wiley, 2012. ISBN 9783527644049.
- [29] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: Code Creator, 2015 [cit. 2019-10-28]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [30] Composite. *3dprintcz.cz* [online]. 3DprintCZ, 2019 [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.3dprintcz.cz/composite/>
- [31] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [32] HORVATH, Joan C. *Mastering 3D printing*. Berkeley, California: Apress, 2014. Technology in action series. ISBN 978-148-4200-254.
- [33] BELL, Charles A. *3D printing with Delta printers*. New York: Apress, 2015. Technology in action series. ISBN 978-1-4842-1174-8.
- [34] HORNE, Richard a Kalani Kirk HAUSMAN. *3D printing for dummies*. 2nd edition. Hoboken, NJ: John Wiley, 2017. ISBN 978-111-9386-315.
- [35] MANSLEY, Matthew. Bowden extruders. *All3dp.com* [online]. 2019 [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printer-extruder-nozzle-guide/#bowden-extruders>
- [36] KELLY, James F. *3D printing: build your own 3D printer and print your own 3D objects*. Indianapolis, Indiana, USA: Que Publishing, 2014. ISBN 978-078-9752-352.

- [37] 3D Printer Frame: What to Consider and Which to Buy. All3dp.com [online]. 2019, 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-frame-what-to-consider-and-which-to-buy/>
- [38] CÍSAŘ, Dominik. K čemu slouží nastavení perimeters. Josefprusa [online]. 2015, 2015 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/k-cemu-slouzi-nastaveni-perimeters/>
- [39] ZUZA, Mikolas. Jak na upravitelné podpory v Meshmixeru. Josefprusa [online]. 2018, 2018 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-na-upravitelne-podpory-v-meshmixeru/>
- [40] G-kód, jádro 3D tisku. Vsepro3dtisk [online]. Siran 3D Evolution, 2016, 2016 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/s/gcode1>
- [41] Original-prusa-i3-mk3-review. All3dp.com [online]. 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/original-prusa-i3-mk3-review/#final-thoughts>
- [42] Flashforge-finder-review-3d-printer. All3dp.com [online]. 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/flashforge-finder-review-3d-printer/#final-thoughts>
- [43] LOCKER, Anatol. Creality Ender 3 Pro. All3dp.com [online]. 2020, 4. 3. 2020 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/creality-ender-3-pro-3d-printer-review/#tech-specs>
- [44] GEHRKE, Florian. Bigrep-studio-g2. All3dp.com [online]. 2019, 2019 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/bigrep-studio-g2-review-3d-printer-specs/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	Procento
°C	Stupeň celsia
3D	Trojrozměrný prostor
A	Ampér
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
ARM	Architektura procesorů používaných v informatice
ASA	Akrylonitril-styren-akryl
CAD	Computer aided design (počítačem podporované projektování)
COM	Comunication port (komunikační port)
DLP	Digital Light Processing (digitální zpracování světla)
FDM	Fused deposition modeling (modelování roztaveného materiálu)
FFF	Fused Filament Fabrication (výroba pomocí roztaveného vlákna)
FLEX	Flexible (pružný)
LCD	Liquid crystal displej (displej z tekutých krystalů)
LOM	Laminated Object Manufacturing (výroba vrstev laminováním)
Nm	Newtonmetr
NTC	Negative temperature coefficient (negativní teplotní koeficient)
PETG	Polyethylentereftalát-glykol
PLA	Polylactid acid (Polymléčná kyselina)
PTFE	Polytetrafluoretylen
RepRap	Replicating rapid prototyper (rychlá výroba prototypů)
SD	Secure digital (digitální paměťová karta)
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering (selektivní spékání laserem)

STL	Standart template library (standardní knihovna šablon)
TPA	Thermoplastic polyamid (termoplastický polyamid)
TPC	Thermoplastic copolymer (kopolyetherový ester)
TPE	Thermoplastic elastomer (termoplastický elastomer)
TPU	Thermoplastic polyuretan (termoplastický polyuretan)
USB	Universal serial bus (Univerzální sériová sběrnice)
UV	Ultraviolet (ultrafialové)
V	Volt
WiFi	Wireless fidelity (bezdrátová věrnost)

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 - Adrian Bowyer (vlevo) s projektem RepRap [5]</i>	13
<i>Obr. 2 - Technologie FDM/FFF [8]</i>	15
<i>Obr. 3 - 3D tisk pomocí metody SLA laser [5]</i>	16
<i>Obr. 4 - Proces fotopolymerizace [11]</i>	17
<i>Obr. 5 - Technologie SLS (Selective Laser Sintering) [12]</i>	18
<i>Obr. 6 - Technologie Laser Sintering pomocí kovového prášku [14]</i>	19
<i>Obr. 7 - Princip technologie LOM [15]</i>	20
<i>Obr. 8 - Závislost výšky trysky od tiskové podložky [22]</i>	23
<i>Obr. 9 - Tiskové struny PETG [23]</i>	24
<i>Obr. 10 - Schéma struktury TPE připravené kopolymerací [29]</i>	26
<i>Obr. 11 - Materiály FLEX pro nejrůznější aplikace [5]</i>	27
<i>Obr. 12 - Výrobek z kompozitního materiálu na bázi bronzového prášku. [5]</i>	28
<i>Obr. 13 - Kartézská 3D tiskárna s posuvnou tiskovou podložkou [5]</i>	29
<i>Obr. 14 - Pohyb tiskové hlavy delta tiskárny [5]</i>	30
<i>Obr. 15 - Klasické řešení 3D zařízení pracující s polárními souřadnicemi [34]</i>	31
<i>Obr. 16 - Tisková hlava [5]</i>	32
<i>Obr. 17 - Krokový motor 3D tiskáren [36]</i>	34
<i>Obr. 18 - Tiskárna s kvádrovým tiskovým prostorem [37]</i>	35
<i>Obr. 19 - Rám pro tiskárnu Prusa [5]</i>	35
<i>Obr. 20 - Řídící jednotka 3D tiskárny [5]</i>	36
<i>Obr. 21 - Pracovní prostředí Průša Slic3r [5]</i>	38
<i>Obr. 22 - Převedení modelu z CAD programu ve sliceru [7]</i>	38
<i>Obr. 23 - Zápis G-kódu [40]</i>	39
<i>Obr. 24 - Rozdíl povrchu výtisku při různé výšce vrstvy [5]</i>	40
<i>Obr. 25 - Porovnání perimetrů 2,3,5 a 7 [38]</i>	41
<i>Obr. 26 - Ukázka jednotlivých typů výplně výtisků [17]</i>	41
<i>Obr. 27 - Mřížkové a stromové podpory, porovnání tiskového času [39]</i>	42
<i>Obr. 28 - Vyhlazování výtisku pomocí acetonu [5]</i>	43
<i>Obr. 29 - Personalizovaná výroba [5]</i>	44
<i>Obr. 30 - Průša MK3s [41]</i>	45
<i>Obr. 31 - Flashforge Finder 2 [42]</i>	46
<i>Obr. 32 - Creality Ender 3 Pro [43]</i>	46

<i>Obr. 33 - Big Rep Studio G2 [44]</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 34 - Navržená konstrukce</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 35 - Sestava pro osu X (tisková hlava bude uchycena na hliníkových tyčích) ..</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 36 - Úchyt vodící tyče v ose Y (na tyč je nasunuto ložisko).....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 37 - Protikus pro spojení pohybové osy X a vodících tyčí 8 mm</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 38 - Konstrukce pro uchycení tiskové podložky</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 39 - Umístění úchytu motoru a ocelových tyčí osy Z.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 40 - Úchyt Ocelové tyče pro osu Z se systémem proti pootočení</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 41 - Řešení úchytů pro připevnění tiskové podložky</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 42 - Úchyty krokových motorů a pohybová osa X.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 43 - Úchyt pro vedení řemenů s vodícími elementy (1.)</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 44 - Upínací deska tiskové hlavy</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 45 - Uchycení pouzder ložisek na úchytovou desku</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 46 - Úchyt tiskové hlavy, sondy a ventilátoru</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 47 - Ventilální tunel trysky</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 48 - Úchyt sondy.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 49 - Hotový konstrukční návrh zařízení pro 3D tisk</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 50 - Hliníkový profil x-ového průřezu</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 51 - Hliníkové profily a trojúhelníkové spojky</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 52 - Trojúhelníková spojka se šroubem a T-maticí</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 53 - Samostatná konstrukce z profilů</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 54 - Úchyty motorů.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 55 - Uchycení vodící tyče pro osu y s ložiskem</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 56 - Uchycení krokového motoru a úchyty pro vodící tyče v ose Z.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 57 - Umístění úchytů vodících tyčí</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 58 - Konstrukce pro uchycení tiskové podložky s hybnou maticí</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 59 - Pouzdra s kluznými ložisky pro pohyb v ose Z.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 60 - Úchyt tiskové podložky.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 61 - Upevněná sestava pro uchycení tiskové podložky.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 62 - Pouzdro osy X s vodícími prvky</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 63 - Úchytová deska pro tiskovou</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 64 - Montáž sestavy pohybové osy X na konstrukci</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 65 - Sestava tiskové hlavy s ukázkou finálního sestavení.....</i>	<i>74</i>

<i>Obr. 66 - Vedení řemenů.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 67 - Mechanismus extruderu</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 68 - Zapojení řídicí desky BIGTREETECH SKR V1.3</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 69 - Driver A4988 s pasivním chladičem procesoru</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 70 - Krokový motor SX17 pro osu Y.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 71 - Sestavený hot-end s mosaznou tryskou</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 72 - Ventilátor pro ofuk trysky (horní)</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 73 - Koncové spínače (indukční sondy a mechanický spínač)</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 74 - Sestava extruderu (natočení úchytu zamezuje zamotávání filamentu).....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 75 - Vyhřívaná podložka (hotbed) s oboustrannou páskou</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 76 - Koncový spínač pohybové osy Y</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 77 - Napájecí spínaný zdroj s výstupním napětím 12 V</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 78 - Grafický displej LCD 12864</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 79 - Vedení řemenů pro pohyb tiskové hlavy</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 80 - Vývojové prostředí programu Atom (spuštěný konfigurační soubor).....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 81 - Nejdůležitější příkazy v konfiguračním souboru Marlinu.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 82 - Kalibrace krokových motorů přes LCD displej</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 83 - Kalibrace tiskové podložky vůči trysce</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 84 - Prostedí Slic3ru s připravenou součástí.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 85 - Nastavení úkolů před a po tisku</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 86 - Měření výšky kalibrační kostky</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 87 - Výtisk bez využití podpor.....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 88 – Kompletní test správnosti sestavení tiskárny.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 89 - Porovnání – pohled zezadu (z leva – vlastní tisk, Průša, Ender).....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 90 - Porovnání - přední pohled (z leva – vlastní tisk, Průša, Ender).....</i>	<i>100</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Nastavení profilů sliceru pro tisk</i>	<i>97</i>
<i>Tab. 2 – Základní informace tisku týkající materiálu a času.....</i>	<i>98</i>
<i>Tab. 3 - Vyhodnocení rozměrů výtisku.....</i>	<i>99</i>
<i>Tab. 4 - Kalkulace vlastního zařízení pro 3D tisk</i>	<i>101</i>

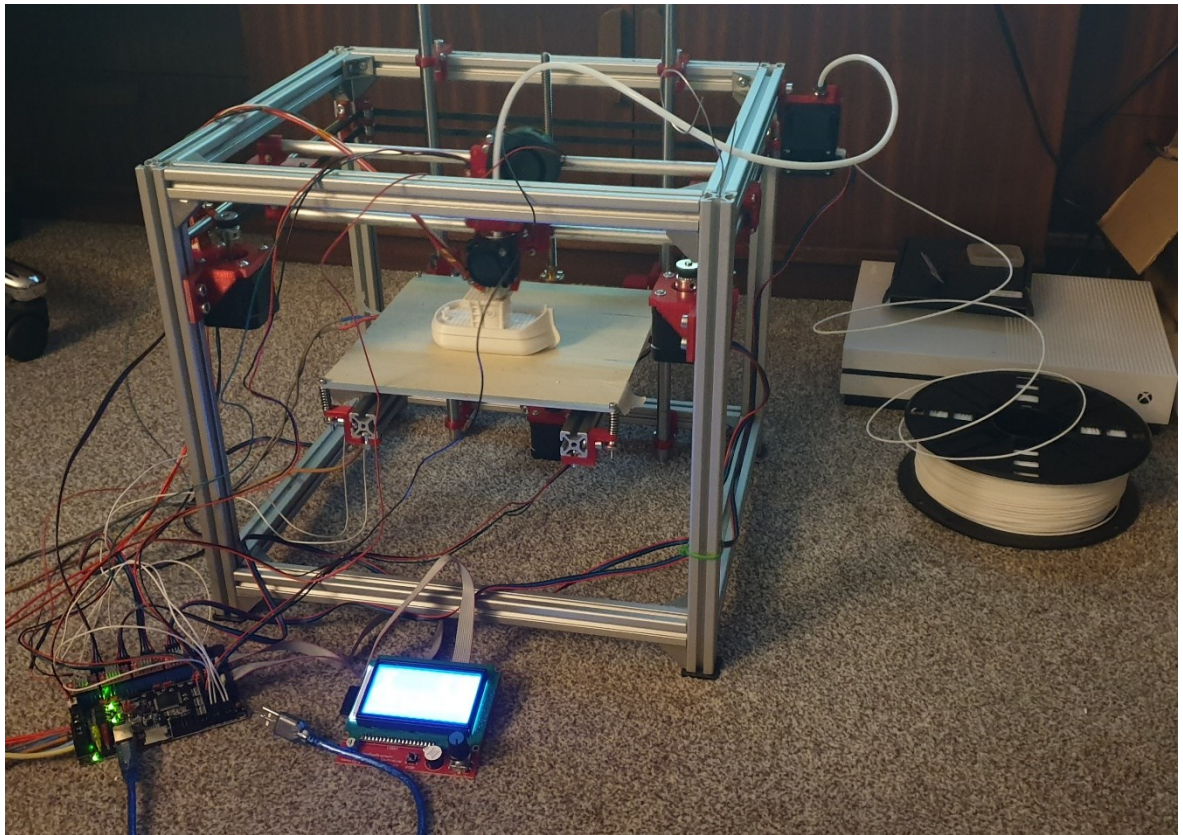
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Kompletní zařízení pro 3D tisk

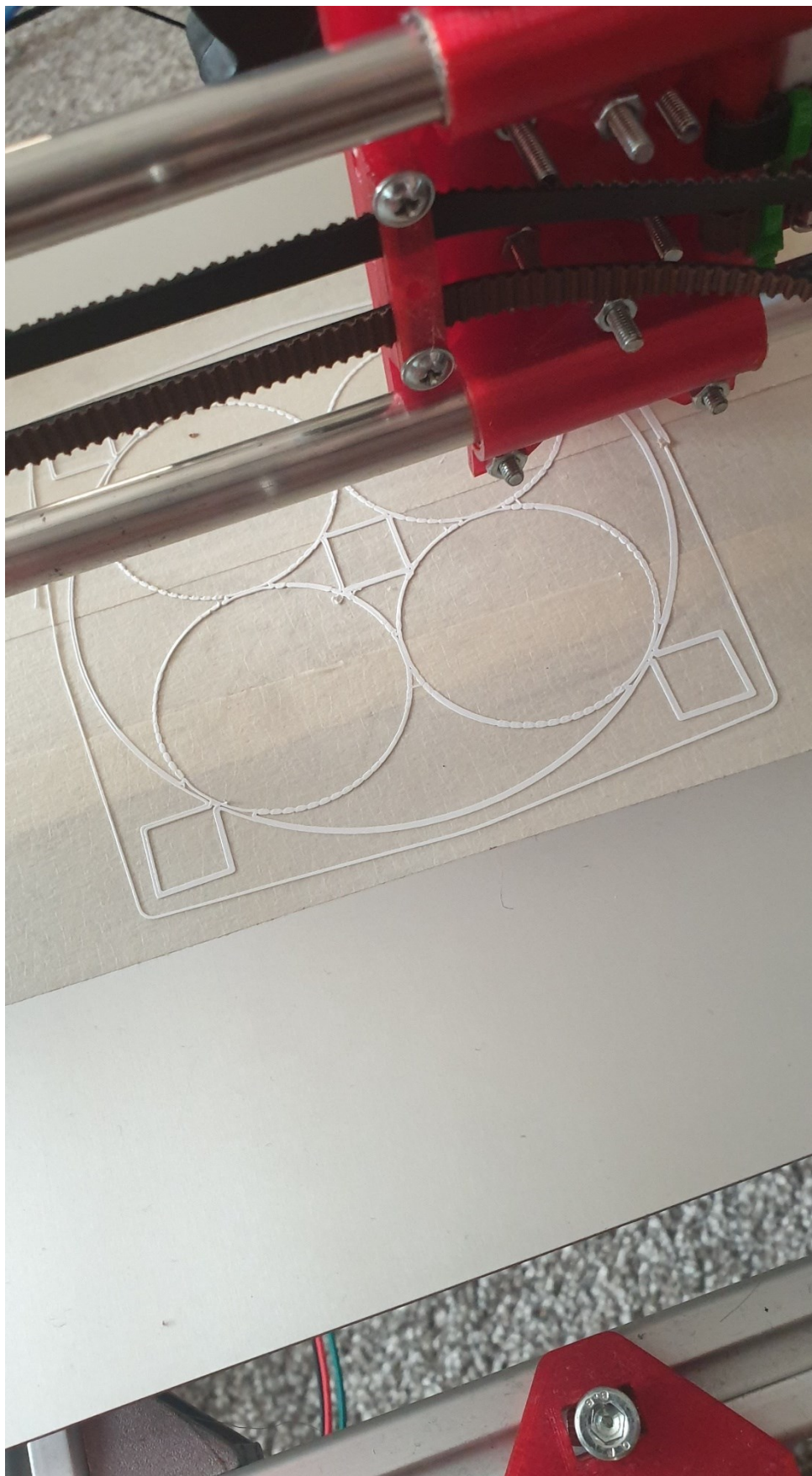
Příloha P II: Tisk pro kalibraci první vrstvy

Příloha P III: Tisk pro kalibraci kroků motoru

PŘÍLOHA P I: KOMPLETNÍ ZAŘÍZENÍ PRO 3D TISK



PŘÍLOHA P II: TISK PRO KALIBRACI PRVNÍ VRSTVY



PŘÍLOHA P III: TISK PRO KALIBRACI KROKŮ MOTORU

