

GYMNÁZIUM JANA KEPLERA

Parléřova 2/118, 169 00 Praha 6



Stavba CoreXY FDM 3D tiskárny

Maturitní práce

Autor: Adam Sedláček

Třída: 4.C

Školní rok: 2022/2023

Předmět: Informatika

Vedoucí práce: Bc. Emil Miler

Praha, 2023



GYMNASIUM JANA KEPLERA
Kabinet informatiky

ZADÁNÍ MATURITNÍ PRÁCE

Student: Adam Sedláček
Třída: 4. C
Školní rok: 2022/2023
Vedoucí práce: Emil Miler

Název práce: Stavba CoreXY FDM 3D tiskárny

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout a vytvořit funkční prototyp 3D FDM tiskárny určené pro domácí sestavení z běžně dostupných dílů. Součástí práce je přehled dostupných technologií, návrh prototypu, díly k vytištění, seznam spojovacího materiálu, návod pro sestavení tiskárny a samotný prototyp.

Doporučená literatura:

[1] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-9082748505.

URL repozitáře:

<https://github.com/AdamSedla/FDM-3D-tiskarna>

student

vedoucí práce

V Praze dne 29. 9. 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů. Nemám žádné námitky proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Praze dne 24. března 2023

Adam Sedláček

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu maturitní práce Bc. Emilu Milerovi za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval.

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a sestavením funkčního prototypu FDM 3D tiskárny, určené pro domácí sestavení z běžně dostupných dílů. Součástí je přehled dostupných technologií, návrh prototypu, seznam dílů potřebných k úspěšné stavbě tiskárny, včetně spojovacího materiálu, 3D modely dílů k vytištění na 3D tiskárně, návod pro sestavení tiskárny a prototyp samotný.

Klíčová slova

3D tisk, FDM, XYZ, CoreXY

Abstract

The thesis deals with the design and assembly of a functional prototype of a 3D FDM printer designed for home assembly from commonly available parts. It includes an overview of available technologies, a prototype design, a list of parts needed to successfully assemble the printer including fasteners, 3D models of the parts for printing on the 3D printer, instructions for assembling the printer and the prototype itself.

Keywords

3D printer, FDM, XYZ, CoreXY

Obsah

1	FDM 3D tiskárna	2
1.1	Princip fungování	2
1.2	Typy FDM 3D tiskáren	2
1.2.1	Cartesian	2
1.2.2	Delta	4
1.2.3	SCARA	4
1.2.4	Polar	4
2	Základní komponenty FDM 3D tiskárny	5
2.1	Hardware	5
2.1.1	Rám	5
2.1.2	Vedení jednotlivých os pohybu	5
2.1.3	Pohon jednotlivých os pohybu	5
2.1.4	Extruder	6
2.1.5	Heatbed	8
2.1.6	Krokové motory	9
2.1.7	Drivery	10
2.1.8	Základní deska	10
2.1.9	Ovládání	11
2.1.10	Zdroj	11
2.2	Firmware	12
2.2.1	Marlin	12
2.2.2	Klipper	12
3	návrhový proces tiskárny	14
3.1	Požadavky na navrhovanou tiskárnu	14
3.2	Výběr koncepce FDM 3D tiskárny	14
3.3	výběr vhodných součástí	15
3.3.1	Hardware	15
3.3.2	Software	21
3.4	Tvorba 3D modelů tištěných dílů	22
4	Stavba tiskárny	23
5	Testování	24
5.1	Komplikace při testování	24
6	Možné vylepšení tiskárny	25
7	Závěr	26
	Závěr	26
	Internetové zdroje	27

1. FDM 3D tiskárna

V této části se budu zabývat teorií FDM 3D tiskáren. Popíšu zde základy funkčnosti FDM 3D tiskárny a jejich typy. Pro terminologii používanou v následující části je důležité ujasnit si osy. Osou Z je myšlena osa svislá. Osa X je ze strany na stranu. Osa Y je dopředu, dozadu.

1.1 Princip fungování

3D tiskárna na principu FDM (fused deposition modeling) Za pomoci jednotlivých součástí Extruderu (tiskové hlavy) vytlačuje roztavený plast na předem určené místo na vyhřívané podložce. Plast je posouván podávacími kolečky, umístěnými na krokovém motoru, který udává množství plastu, které je posouváno dále do extruderu. Plast je taven na samém konci tiskové hlavy v hotendu. Extrudovaný materiál je poté ochlazen pomocí přídavného ventilátoru. V případě Polar a XYZ principu je extruder a heatbed posouván po osách pomocí krokových motorů, které jsou s posouvanou součástí tiskárny propojeny nejčastěji pomocí řemene nebo trapézové tyče. V případě SCARA a Delta principu je pohybováno pouze extruderem a vyhřívaná podložka se nepohybuje. Teploty a pohyby součástí jsou řízeny pomocí základní desky. Ovládání funkcí základní desky je řízeno pomocí připojeného počítače nebo pomocí integrovaného displeje. Napájení elektrickou energií všech součástí tiskárny je zařízeno zdrojem elektrického napájení, ze kterého jde proud do základní desky, kde je požadovaná energie dodávána do jednotlivých součástí.

1.2 Typy FDM 3D tiskáren

FDM 3D tiskárny lze rozdělit do 4 základních kategorií, dle principu pohybu tiskové hlavy, vzhledem ke vyhřívané podložce.

1.2.1 Cartesian

První a v současné době nejrozšířenější variantou je Cartesian. Jeho název je odvozen od Kartézské soustavy souřadnic, kdy bod v prostoru je zapsán pomocí souřadnic XYZ, které znázorňují bod na osách, které jsou vzájemně kolmé. Tyto tiskárny pohybují tiskovou hlavou a obdélníkovou vyhřívanou podložkou v osách, stejných jako jsou souřadnice bodu v Kartézské soustavě. Tyto tiskárny se vyznačují jednoduchostí, díky které jsou i relativně levné. Tiskárna je vhodná nejen pro začátečníky v 3D tisku, kteří se na tomto způsobu mohou naučit základy 3D tisku, ale také pro pokročilé tiskaře, kteří plně využívají potenciálu těchto tiskáren. Také jsou přesné, ale oproti jiným druhům 3D tiskáren nejsou tolik rychlé, vzhledem k nutnosti pohybů po osách. Kvůli nutnosti pevného rámu jsou také poměrně těžké.

CoreXY

CoreXY systém má hlavu pohybující se po osách X a Y. Tisková podložka je osou Z. Výhoda je větší rychlost, vzhledem k lehkosti tiskové hlavy oproti podložce. Také zabírá méně místa, protože nejrozměrnější součást, kterou je tisková podložka, se pohybuje po ose Z. Nevýhodou je potřeba komplexnější konstrukce, která ale může být zároveň i výhodou, protože nabízí vyšší pevnost rámu. Typicky je zde využita kombinace 2 motorů pro pohyb po ose XY. Proto při pohybu podél osy X/Y je potřeba kooperace obou motorů. Osu Z obstarává minimálně jeden motor. Motory pro osu X a Y (tzv. motor A a B) může být umístěn na rámu. Nemusí se tedy pohybovat při pohybu celou osou. To je další možnost vyšší rychlosti. Zamezení pohybu tisknutého objektu ze strany na stranu, jako je to nutné například u CoreXZ, zvyšuje kvalitu tisku.

H-bot

H-bot je svým principem prakticky identický s CoreXY. Jediným rozdílem je využití pouze jednoho řemenu pro pohon celé osy XY. Toto na jednu stranu může zajistit mírně jednodušší konstrukci. Nevýhody jsou ale menší přesnost a rychlost, vzhledem k nutnosti využití pouze jednoho řemenu.

Crossed

Dalším principem, který je téměř identický s CoreXY je Crossed. Zde jsou pro osu X a Y využity 3 vedení na každou. Řemen je veden okolo a nezasahuje do prostoru tisku. Výhodou je vyšší přesnost, nevýhodou vyšší váha a tím pádem i rychlost.

CoreXZ

Zde se hlava pohybuje v ose X a Z. Tisková podložka je osou Y. Výhoda je zdánlivě menší prostorová náročnost a menší nároky na komplexní rám. Také je zde lepší přístup k tiskové hlavě v případě servisu. Nevýhodou je potřeba prostoru pro pohyb tiskové podložky, proto ve výsledku zabírá více prostoru. Pohybování tiskovou podložkou, která je poměrně těžká po ose Y, kde je vyžadován rychlejší pohyb, než na ose Z, ukazuje další nevýhodu tohoto systému. Podložku je totiž potřeba rozpohybovat a také brzdit. Zde se projeví váha navíc, se kterou musíme hýbat. Každá osa zde může mít vlastní motor. Na ose Z je použit typicky jeden nebo dva motory, záleží dle potřeby. Využití separátních motorů pro jednotlivé osy znamená, že kupříkladu motor pro osu X je potřeba zvedat společně s celkem po ose Z. Toto je opět nechtěná váha navíc. Vzhledem k pohybu tiskové plochy po relativně dlouhých vzdálenostech, může docházet ke zhoršení kvality tisknutého objektu, vzhledem k jeho otřesům.

Belt

Osa Y je zde nekonečně dlouhá, díky využití pásu, na který je tisknuto typicky pod úhlem 45°. Tisková hlava se pohybuje po ose X a Z. Ve zkratce jde o COREXZ, pouze s rozdílem pásové tiskové plochy a úhlem 45° mezi osou Z a Y.

1.2.2 Delta

FDM 3D tiskárny typu Delta lze také řadit pod Cartesian tiskárny, ale vzhledem k jejich rozdílnosti jsem se rozhodl je zařadit mimo. Tisková hlava je napojená na 3 spojovací tyče, které jsou spojeny každá s jedním posuvným bodem, který je posouván na svislých osách. Při pohybu jedné osy se tisková hlava pohybuje směrem k posouvané ose, ale zároveň nahoru. Synchronizovaným pohybem všech 3 os docílíme schopnosti tisku v osách XYZ. Vyhřívaná podložka je kruhová a nepohyblivá. Hlavní výhodou Delta tiskárny je její rychlost. Hlavní nevýhodou je prostorová náročnost, vzhledem k nutnosti prostoru pro spojovací tyče nad nejvyšším bodem, kterého je tisková hlava dosáhnout. Tiskový prostor je omezen i co se týče podložky, kvůli nutnosti kruhové vyhřívané podložky.

1.2.3 SCARA

Tiskárny SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) sice také používají Kartézskou soustavu souřadnic, ale jsou opět natolik rozdílné, že je lze řadit do vlastní kategorie. Vyhřívaná podložka je zde opět kruhová a nejčastěji statická. Tisková hlava je umístěna na jednom nebo dvou ramenech, každé má dva klouby. Ohybem těchto míst docílíme pohybu po celé oblasti os XY. Pohyb po ose Z může být vykonáván buď pomocí pohybu celého ramena nebo pouze pomocí tiskové podložky. SCARA princip je běžnější u robotických ramen, než u 3D tiskáren, proto se s ním nelze setkat příliš často, ve formě 3D tiskárny. Hlavní výhodou je rychlost, vzhledem k možnosti pohybu mimo kolmé osy. Druhou velkou výhodou je prostorová nenáročnost, díky které je to vhodný princip pro 3D tiskárny uzpůsobené pro velkoformátové tisky z industriálních materiálů, jako je třeba beton. Tiskárna je tímto také jednoduchá na přenos z jednoho místa na druhé. Hlavní nevýhodou je nepřesnost tiskárny a nutnost vyvážení tiskového ramena, které je umístěno na kraji tiskové plochy.

1.2.4 Polar

Kategorie 3D tiskáren Polar jako jediný způsob ze seznamu nevyužívá Kartézskou soustavu souřadnic. Místo toho, jak už název napovídá, využívá Polární zápis souřadnic. Na rozdíl od Kartézské soustavy, je zde pro zápis umístění bodu v prostoru využít i úhel. Tisková hlava se zde pohybuje buď pouze svisle nebo se může i naklápět, od středu tiskové podložky po její kraj. Tisková podložka je zde kruhová a otočná nebo i Pohyblivá, nahrazující pohyb tiskové hlavy od středu ke kraji podložky. Hlavní výhodou je nízká cena a nenáročnost na konstrukci. Hlavní nevýhodou je nízká kvalita, rychlost tisku a z důvodu nerozšířenosti tohoto způsobu i špatně dostupná komunitní podpora.

2. Základní komponenty FDM 3D tiskárny

V této kapitole se budu věnovat všem základním komponentům, ze kterých se FDM 3D tiskárna skládá.

2.1 Hardware

2.1.1 Rám

Nosný rám je možné sestavit téměř z čehokoliv, co bude mít dostatečnou nosnost. Ale obecně platí, že čím pevnější je rám, tím lépe bude poté tiskárna fungovat. Nejběžněji používaným materiálem je hliník, konkrétně profily z něj vyrobené, které mají v sobě zabudované drážky, do kterých je možné upevnit cokoliv, co má požadovaný tvar.

2.1.2 Vedení jednotlivých os pohybu

Vedení os pohybu je nosný díl os, který se skládá ze dvou částí, pevné a pohyblivé. Osa, se kterou je pohybováno je nejčastěji umístěna na pohyblivé části. Opačné využití, kdy by se osa uchytila na část pevnou nemá žádné hlavní výhody.

U většiny FDM 3d tiskáren se můžeme setkat s variantou jednoho ze tří nejčastějších druhů vedení. Prvním druhem je hlazená tyč, po které jezdí kluzné ložisko. Druhé je lineární pojezd s vozíkem. Hlazená tyč je několikanásobně levnější. Tím ale její výhody končí. Na druhou stranu je méně přesná, z důvodu větších vůlí. Také je mnohem více náchylná na špatnou údržbu. Při vynechání pravidelného mazání hlazené tyče může dojít k jejímu nenávratnému poškození vydržením drážek. Je také náročnější její uchycení, protože Lineární vedení má v sobě montážní body, díky kterým je jednoduché spojení s konstrukčním prvkem. U samotného vedení jde o otvory pro M3 šrouby, pomocí kterých je možné upevnění přímo do 2020 profilu pouze pomocí odpovídajících kamenů. Vozík lineárního vedení má integrované závity pro M3 šrouby. Oproti tomu hlazenou tyč a její ložisko je nutné upevnit pomocí dalšího konstrukčního prvku. Třetí variantou je vozík, jezdící po 2020 profilu, takzvaný *V-slot*. Výhodou je možnost pojezdu přímo po 2020 profilu. To může ušetřit mnoho místa. Nevýhodou je nutnost časté výměny ložisek na vozíku. Přesnost může být ze začátku podobná, jako u lineárního vedení, ale časem dochází k opotřebení ložisek a snížení přesnosti. Cenově může tento vozík pro 2020 profil vycházet velmi podobně, jako lineární vedení.

2.1.3 Pohon jednotlivých os pohybu

FDM 3D tiskárna by nemohla fungovat bez pohybu tiskové podložky a tiskové hlavy. K zajištění pohybu je nutné nejenom vedení os, ale také jejich pohon. Respektive převedení otáček motoru na skutečný pohyb osy.

K tomu jsou využity 2 hlavní druhy pohonu, každý vhodný pro jiné využití. Pohon řemenem je

vhodný nejčastěji pro osy X a Y, kde je potřeba vyšší rychlost i za cenu nižší přesnosti. K jeho využití je nutné mít po ose umístěné řemenice a vzhledem k jeho natahování při dlouhodobém napnutí je vhodné mít zde umístěnou napínací kladku nebo řemenici s variabilní pozicí, aby bylo dosaženo správného napnutí, protože příliš povolený nebo napnutý řemen může způsobovat vady tisku nebo poškození součástek. Druhou variantou je trapézová tyč. Jde o závitovou tyč se závity ve tvaru rovnoramenného lichoběžníku. Oproti řemenu jde o přesnější, ale pomalejší způsob. Uchycení je jednodušší, protože zde není nutnost více konstrukčních prvků. Trapézová tyč může držet pouze v motoru a její druhý konec je možné nechat volně. Stejně jako řemen je náchylný na špatné napnutí, trapézová tyč je náchylná na křivost. Deformovaná tyč může při příliš volném vedení osy, například při použití hlazené tyče způsobovat posun vrstvy a nedokonalost tisku.

2.1.4 Extruder

Extruder, neboli tisková hlava je nejdůležitější součást celé FDM 3D tiskárny a jde o komplexní součást, sestavenou z vícero součástek. Skládá se z: hotendu, krokového motoru, hotend větráku, ofuku výtisku.

Hotend

Hotend samotný se vyskytuje v různých variantách od různých výrobců. Zde budu popisovat asi nejrozšířenější variantu, V6 od výrobce E3D. Jde o spojení tří součástek. Heatblocku, heatbreaku a heatsinku.

Heatblock je kovový kvádr, která má otvory pro výhřevné tělísko, termistor, trysku a heatbreak. Nejčastěji je vyroben z hliníku, který je lehký, levný a dobře vede teplo. Druhou možností, se kterou je možné se setkat je měď, která je těžší a dražší, ale lépe vede teplo. Dobrá vodivost tepla je nutný požadavek při tisku na vysoké rychlosti, protože je nutné rychle převádět teplo z topného tělíska na filament.

V heatblocku je umístěná mimo jiné i tryska. Ta může mít různé průměry otvoru, kterým vytéká filament. Nejběžněji používaným je průměr 0.4mm. Obecně ale platí, že čím větší průměr, tím menší detaily a vyšší rychlost a s menším průměrem opačně. Trysky lze rozdělit také na základě materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Těchto materiálů mnoho, proto zde uvedu dva nejběžnější materiály. Nejčastější variantou je mosaz. Tryska z mosazi je levná a dobře vodí teplo, ale rychle se opotřebovuje při tisku z tvrdších materiálů. Tryska z nerezové oceli je méně náchylná na opotřebení, ale zároveň je horším vodičem tepla. Výměna trysky je pro mnoho lidí proces, který neradi provádějí, ale je to proces nutný při změně průměru trysky. Tento zdoluhavý proces se rozhodl vyřešit český výrobce Protoprint, se svým výrobkem Raptor. Jde o celý hotend, u kterého je možné trysku vyměnit pomocí šroubování rukou za studena.

Součástí heatblocku je také termistor, který snímá teplotu heatblocku a tuto informaci předává řídicí desce, která na základě toho vyhřívá topné tělísko v heatblocku tak, aby zde byla požadovaná teplota.

Topné tělísko se rozlišuje na základě jeho velikosti a parametrů. Napětí je určeno dle zdroje tak, aby tělísko mělo stejné napětí, jako zdroj. Výkon tělíska by neměl být příliš malý, aby bylo rychle dosaženo požadované teploty a aby teplota trysky příliš nekolísala, například při zapnutí ofuku tisku, které kromě výtisku neúmyslně chladí částečně i trysku. Zároveň každá základní deska má určen maximální výkon tělíska, který je podporován. Je nutné dbát na výběr kvalitního výrobce topného tělíska, protože při koupi nekvalitního, může být skutečný výkon nižší, než je deklarovaný

výrobce a může docházet k samovolnému ukončení chodu tiskárny, z důvodu příliš nízké teploty trysky.

V heatblocku je dále umístěn heatbreak, který slouží jako uchycení heatblocku a zároveň vede filament. Opět existuje více variant, jak a z jakého materiálu může být vyroben, kdy každý má své výhody a nevýhody. Z tohoto důvodu je výběr heatbreaku nutné udělat na základě využití tiskárny, především co se používáných filamentů týče. Obecně ale platí, že je nežádoucí přenos tepla heatbreakem do výše umístěného heatsinku. Nejběžněji používána je varianta, kdy uvnitř kovového těla heatbreaku je umístěna PTFE trubička. Toto je vhodné pro tisk materiálů s nižší teplotou tavení, jako je PLA. Při nutnosti nahřátí trysky na vyšší teploty může docházet k nežádoucímu tavení této trubičky, protože je to také pouze plast. Již při teplotě 202°C může docházet k uvolňování malého množství nebezpečných toxinů. Toto množství by nemělo být škodlivé pro zdravého dospělého jedince, ale například pro malé ptáky může být nebezpečné, protože jejich kardiovaskulární systém vstřebává mnohem více toxinů, než ten lidský. Při tisku při teplotě 275°C již může docházet k úmrtí těchto malých ptáků. Tisk při teplotách vyšších, než 300°C s PTFE trubičkou by měl být prováděn pouze v dobře větraných prostorách, jinak mohou výpary ohrožovat zdraví i dospělých osob. Při vyšší teplotě tisku také dochází k deformaci PTFE trubičky, která ztrácí svou pevnost a může se zdeformovat. I při tisku o nižší teplotě by se PTFE trubička měla pravidelně měnit. Možným řešením je celokovový heatbreak, vyrobený z nerez. To řeší problém při tisku z materiálů s vyšší teplotou tavení, ale při tisku při nižší teplotě může docházet k tavení filamentu příliš brzy, což může způsobit ucpání heatbreaku. K tomu dochází, protože nerezový heatbreak je dobrý vodič tepla. Problém s příliš vysokou teplotní vodivostí se snaží vyřešit bi-metal heatbreak, který je složený z vícero kovů, které jsou slisovány dohromady. Zde je redukováno riziko příliš vysoké teplotní vodivosti, ale takovýto heatbreak je náchylný na kvalitu výroby a při špatném zpracování při výrobě může časem dojít k oddělení těchto dílčích součástí. Bi-metal heatbreak je složen z měděné části a ocelové části. Ocelová část, umístěna v heatblocku, je špatný vodič tepla, proto nedochází k přenosu příliš velkého množství tepla. Oproti tomu měděná část, umístěná v heatsinku je dobrý vodič tepla a dochází zde k dobrému rozptýlení přenesené teploty do heatsinku. jako další možné řešení se nabízí celokovový heatbreak, který je ale vyroben z titanu. Titan totiž má nízkou tepelnou vodivost. I zde je ale nutné vybrat kvalitního výrobce, protože může docházet k použití méně kvalitního materiálu. Poslední součástí hotendu, která je zde, aby chladila heatbreak, je heatsink. Jde o hliníkový chladič, pomocí kterého je zároveň celý hotend připevněn ke zbytku extruderu. Upevnění pomocí heatsinku je vhodné, protože heatsink pokud pracuje správně by měl být na dotek chladný, tudíž při spojení s plastovým dílem nedojde k deformaci tohoto dílu.

Krokový motor

Aby docházelo k tisku, musí být filament podáván dále do hotendu. K tomu slouží krokový motor extruderu. Může být umístěn přímo na samotném těle extruderu nebo je možné ho umístit stranou a k extruderu vést bowden pomocí PTFE trubičky, která vede přímo do heatbreaku. Při umístění na extruder jde o Direct drive. Varianta, při které je motor umístěný mimo extruder se nazývá Bowden. Pokud je motor umístěný na extruderu, jde o přebytečnou váhu navíc, se kterou je také nutné pohybovat. Na druhou stranu motor umístěný mimo extruder může přinášet problémy, především při tisku z flexibilních filamentů, protože dochází k napínání filamentu v bowdenovém vedení a je zde určitá vůle. Proto je nutné počítat s tím, že jakmile se motor extruderu uvede do pohybu, začne se filament v hotendu pohybovat až s malým zpožděním.

Ventilátory extruderu

Pro svou správnou funkčnost potřebuje extruder dva ventilátory. Prvním je axiální ventilátor, který je určený k chlazení heatsinku. Druhý ventilátor je radiální a říká se mu také ofuk. Je nutné, aby vzduch, který z něj vychází mířil přímo na trysku, aby se vytlačený filament co nejdříve stal pevným. Při nepoužití nebo nedostatečném ofuku může docházet k přehřívání výtisku, což může mít za následek deformace.

Volitelné součásti

Existují i další součásti extruderu, které zde nemusí být, ale jejich přítomnost zlepšuje uživatelskou přívětivost a jednoduchost ovládání.

Tím nejčastějším je senzor filamentu, který má za úkol určit, jestli filament je stále dodáván do hotendu nebo tisková struna došla ke svému konci a tiskárna by se pohybovala, aniž by vytlačovala materiál. V základu jde o velmi jednoduchý princip senzoru, který pouze zjišťuje, jestli extruderem prochází struna. Pokročilé typy těchto senzorů jsou schopné zjistit i zaseklý filament, který se nepohybuje. Senzor musí být umístěn před motor extruderu, protože pokud by byl mezi motorem a hotendem, filament by po svém konci již nebyl podáván dále, ale senzor by ho stále zaznamenával. Dalším velmi užitečným zlepšením je senzor, který je schopný na základě změření výšky několika bodů na heatbedu, určit křivost heatbedu a případně ho kompenzovat pohybem osy Z v průběhu tisku tak, aby byla první osa vždy perfektně rovná. Nejčastěji jde o senzor mechanický nebo indukční. K funkci indukčního je potřeba, aby měřená podložka byla z kovu. Na druhou stranu indukční senzor je přesnější. Tento senzor může také sloužit jako endstop osy Z, ale nedoporučuje se to, protože při selhání senzoru může dojít k nenávratnému poškození tiskové podložky, nebo i dalších součástí tiskárny.

V poslední době se na extruderech začíná objevovat i led osvětlení. Bud' může být osvětlení namířeno přímo na výtisk, aby osoba obsluhující tiskárnu měla přehled o tom, co se děje na výtisku a jestli se vše tiskne tak, jak má. Druhá varianta je signalizační rgb led osvětlení, které je na viditelném místě a ve výsledku nemusí vůbec být umístěna na extruderu. Jde o programovatelné světlo, které může dávat člověku informace například o stavu tisku, podle vyzařované barvy.

2.1.5 Heatbed

Vyhřívání podložky je součástí, která není nezbytná pro funkci tiskárny, ale tisk bez ní je obtížnější. Díky nahřátí podložky na teplotu, při které tisknutý plast začíná ztrácet svou pevnost zajistí, že se lépe uchytí první vrstva na tiskové podložce. I nevyhřívání tiskové plochy je důležitou součástí, protože bez ní by tiskárna nemohla tisknout. Vyhřívání může být samotná podložka nebo může jít o například silikonovou plochu, která je přichycena k hliníkové podložce, kterou vyhřívá.

Vyhřívání podložky lze rozdělit podle napětí a velikosti. Napětí podložky se odvíjí od napětí použitého zdroje. Většinou je používána varianta podporující 12V, 24V nebo obojí. Druhým důležitým faktorem při výběru tiskové podložky je její velikost. Při použití příliš malé podložky není možné tisknout rozměrné objekty a je nutné je rozdělit na menší součásti. Výběr příliš velké tiskové plochy vyústí ve zbytečně velkou spotřebu elektrické energie, vzhledem k velké tiskové ploše, kterou je nutno vyhřívát. Tuto nevýhodu se pokouší vyřešit nově uvedená 3D tiskárna Prusa XL. Tato tiskárna má vyhřívanou plochu rozdělenou na více menších segmentů, které je možné separátně nahřívát. Druhou nevýhodou je větší hmotnost, se kterou je nutné pohybovat. To je omezující pro

rychlost tiskárny. Větší tisková plocha je také náročnější na uchycení a pohon u typů tiskáren, které s vyhřívanou podložkou pohybují po ose Z. Nejběžnějším rozměrem, se kterým se můžeme setkat u většiny FDM 3d tiskáren nabízených na trhu v dnešní době je okolo 200x200mm. V případě typu Belt je tiskovou podložkou pás, který tímto vytvoří možnost tisku neomezeně dlouhého objektu. Tiskový pás zde také může být vyhříváný.

Tisk přímo na vyhřívanou podložku by ji mohl poškodit používáním nebo především při odstraňování hotového výtisku z plochy. Při tisku přímo na podložku může také docházet ke špatnému uchycení první vrstvy. To je možné eliminovat pokrytím plochy kaptonovou páskou. Oba výše zmíněné problémy ale řeší na heatbedu umístěna dodatečná tisková podložka, na kterou je tištěno a která je často odnímatelná. Rozšířené je použití malého kusu zrcadla/skla nebo PEI tiskového plátu. Zrcadlo/sklo je výhodnější z hlediska rovnosti povrchu. Nevýhodou je nemožnost ohybu, proto je nutné nanést vrstvu například tyčinkového lepidla nebo speciální chemie na to určené. Bez tohoto kroku je téměř nemožné odstranit výtisk z této podložky. PEI tiskový plát lze koupit v mnoha variantách. Nejčastější je hladký a zrnitý. Nespornou výhodou je možnost ohybu, díky čemuž výtisk prakticky sám odskočí od podložky. Nevýhodou je nerovnost plochy. Tuto vlastnost lze odstranit pomocí *mesh bed levelling*, které před tiskem zjistí výšku několika bodů a poté v průběhu tisku upravuje výšku osy Z, aby vyrovnal tuto nerovnost. Vyrovnávání probíhá v rámci setin milimetru, tudíž nedochází k deformaci výtisku.

Součástí heatbedu musí být i termistor, pomocí kterého řídící deska určí, jestli je ještě nutné vytápět heatbed nebo již dosáhl požadované teploty. Jediný rozdíl od termistoru použitého u hotendu může být jeho tvar, kdy zde se používá malý termistor tvaru kapky. termistor je nejčastěji přichycen na spodní část heatbedu pomocí kaptonové pásky.

2.1.6 Krokové motory

U krokového motoru je důležitými parametry při výběru jeho velikost a síla.

Velikost je standardně udávána v kombinaci dvou parametrů. První je šířka jeho těla. Tato velikost je psána jako NEMA a za tím odpovídající hodnota. NEMA (National Electrical Manufacturers Association) je obchodní sdružení výrobců elektrických zařízení v USA. Hodnota šířky je udávána v palcích. Nejčastěji se vyskytuje varianta NEMA 17. V případě potřeby malých motorů je často využíváno NEMA 14. Naopak při potřebě velké síly se využívá NEMA 23. Druhou podstatnou hodnotou je délka motoru. V případě NEMA 17 je nejčastěji využívána délka 40 mm nebo 48mm. Pro malé prostory, typicky na pohonu osy Z lze také využít tzv. pancake motor. V tomto případě může být tloušťka i pouhých 20mm.

Druhým parametrem je kroutící moment krokového motoru. NEMA 17 motor má většinou kroutící moment v intervalu 0.2 Nm - 1 Nm. Obecně platí, že čím větší je motor, tím větší je jeho kroutící moment. Pro pohyb těžké součástky je vhodný krokový motor s velkým kroutícím momentem, ale na druhou stranu má vyšší spotřebu elektrické energie. Proto je nutné vybírat krokový motor v odpovídající velikosti. Maximální možné otáčky motoru jsou u všech velikostí většinou stejné, ale vyšší kroutící moment je vhodný pro možnost vyšší akcelerace osy.

Krokový motor může mít také různý úhel kroku. Nejčastější variantou je 0.9° a 1.8°. Krokový motor ve variantě 0.9° musí vykonat 400 kroků na jednu otáčku. Varianta 1.8° polovinu. To znamená, že menší úhel znamená vyšší přesnost tisku, ale zároveň menší rychlost. Zhoršená kvalita tisku u varianty s 1.9° je dnes vyřešena schopností driverů dělat tzv. *micro stepping*, kdy motor umí udělat pohyb o méně, než jeden celý krok. Detailnost tisku, dosažené při micro-steppingu varianty 0.9° je pro běžného uživatele většinou zbytečná a znamená pro něj menší rychlost tisku.

2.1.7 Drivery

Pro ovládání krokových motorů jsou na základní desce umístěné tzv. drivery. Driver vytváří impulsy pro krokové motory v požadovaných intervalech.

Drivery mohou mít i další funkce, jako například detekce přetížení. Tato funkce může být využita pro tzv. homing, kdy se tiskárna snaží najít body $[0,0,0]$. K tomuto se využívají fyzické spínače na začátku, respektive konci každé osy. Druhou možností je využít tzv. *sensorless homing*, kdy se tento počáteční bod u každé osy nalezne pomocí nárazu pojízdné části osy do zarážky. Driver v tu chvíli zjistí zvýšené napětí a tuto informaci řídící deska využije pro určení bodu 0. Druhou možností využití této detekce je funkce, při které tiskárna detekuje náraz do překážky a pokusí se to vyřešit. Drivery běžně vydávají během svého chodu zvuk. To lze vyřešit využitím tichých driverů.

Aby nebylo nutné pohybovat krokovým motorem o celé kroky, je zde možnost *micro steppingu*. Při té driver umí vyvolat pohyb motoru pouze o zlomek celého kroku. *Micro stepping* funguje na principu plynulého přechodu mezi jednotlivými kroky. Driver tedy nikdy neposílá do jednoho okruhu plný proud a do druhého žádný, ale vždy je v každém okruhu odpovídající část proudu. Běžně je možné zakoupit driver s *micro steppingem* $1/256$.

Driver může být napevno integrovaný do základní desky nebo může být v základní desce měnitelný.

2.1.8 Základní deska

Základní deska je řídící počítač, který určuje a řídí každý úkon tiskárny.

Hlavní vlastností, která různé desky rozlišuje je jejich procesor. Typ procesoru je dělen na 8-bit a 32-bit. 32-bit základní deska je schopna vykonat 4x více výpočtů za stejnou dobu, než 8-bit. Tiskárna je tedy nejenom rychlejší, ale také dělá přesnější pohyby a je tišší. 32-bit deska má menší problémy s výpočty komplexních tvarů, kdy musí v g-code zpracovávat mnoho příkazů za krátkou dobu. Tiskárna je díky tomu také schopna fungovat s vyššími akceleracemi. Další výhodou 32-bit je, vzhledem k zvyšující se popularitě těchto základních desek, lepší podpora. Oproti tomu 8-bit základní deska je levnější a spotřebovává méně elektrické energie. Problém s nedostatkem výpočetního výkonu u 8-bit desek je v dnešní době kompenzován ve sliceru nebo firmwaru.

Důležitou vlastností, na kterou bychom se při výběru základní desky měli dívat, je jestli podporuje námi zvolené napětí systému. Běžně používané je napětí 12V a 24V.

Drivery pro ovládání krokových motorů mohou být pevně integrované do desky. V takovém případě není možná jeho výměna, či změna. Druhou možností jsou konektory na desce, do kterých jsou drivery zapojeny. Drivery na základní desce ovlivňují také počet krokových motorů, které lze zapojit. Většina základních desek má konektor pro jeden motor osy X, jeden pro osu Y, jeden pro motor extruder a dva konektory pro osu Z. Množství konektorů je možné zvětšit, ale v tu chvíli je oběma motory pohybováno stejně.

Většina základních desek je stavěna na konstrukci s jedním extruderem, dvěma motory pro osy X a Y a maximálně dvěma motory pro osu Z. S tím souvisí nejenom výše zmiňované konektory pro krokové motory, ale také konektory pro ventilátory a místa pro připojení termistoru a vyhřevného tělíska. V případě potřeby připojení více prvků, je možné vytvořit spojení dvou a více základních desek, které spolu komunikují.

Některé základní desky mohou podporovat i bezdrátové připojení WI-FI. Takto lze tiskárnu dálkově ovládat a řídit, bez nutnosti externího zařízení.

2.1.9 Ovládání

Možnosti ovládání tiskárny se dělí primárně na ovládání přímo na tiskárně a na vzdálenou správu tiskárny. K ovládání tiskárny přímo se využívá displej, který může a nemusí být dotykový. V displeji bývá často integrovaná i čtečka SD karet. Na tuto SD kartu je nahrán G-code s tiskovým souborem. Druhou možností je vzdálený přístup. To lze uskutečnit buď přímo přes základní desku, pokud má možnost připojení k jinému zařízení. To lze provést buď přímo přes USB kabel nebo pomocí připojení k síti. V tomto případě je tisk zadáván přímo pomocí počítače. Výhodou je, že není potřeba externí přenosné úložiště. Nevýhodou je nutnost stálého připojení tiskárny k počítači. Tuto nevýhodu lze vyřešit pomocí externího malého počítače typu Raspberry Pi. Takového zařízení je připojeno k tiskárně permanentně a dovoluje její vzdálenou správu. U firmwaru Klipper je toto ovládání přímo integrované, protože pro funkci Klipperu je nutný externí počítač typu RPi. Octoprint je možné využít i pro Klipper, ale je to nevhodné, protože Octoprint je vytvořen a optimalizován pro Marlin. Nejpoužívanějšími systémy pro práci s Klipperem jsou v dnešní době Mainsail a Fluidd. Nevýhodou takto permanentně připojeného zařízení je jeho vyšší cena, která navíc v dnešních dnech je kvůli nedostatku čipů i několikanásobně vyšší, než byla před touto situací. V případě používání vícero 3D tiskáren, je možné tento počítač využít pro ovládání více tiskáren. Tato možnost funguje v systému Klipper i Marlin.

2.1.10 Zdroj

Výběr správného zdroje je závislý na dvou podstatných parametrech. Jeho napětí a výkon. Zdroje jsou běžně dostupné ve variantě 12V nebo 24V. Napětí zdroje by mělo souhlasit s napětím podporovaným základní deskou, napětím heatbedu, topnému tělísku hotendu a ventilátoru. V případě nutnosti napájení součástky jiným napětím je možné využít konvertor. Nicméně jde o další součástku, kde dochází ke ztrátám energie a může dojít k poruše, proto je nejlepší se jim vyhnout. Například pro napájení Raspberry Pi je nutné napájení o napětí 5V. V takovou chvíli je tedy nutné použít konvertor. Výhoda 12V zdroje je nižší cena. Oproti tomu výhodou 24V zdroje je především vyšší výkon, díky platnosti Ohmova zákona. Jeho znění je $I = \frac{U}{R}$. I je zde elektrický proud (jednotka A). U je zde elektrické napětí (jednotka V). R je zde elektrický odpor (jednotka Ω). Zkráceně znamená, že pokud je ve stejném vodiči vyšší elektrické napětí, je i vyšší elektrický proud. Tím pádem při použití 24V může stejně velkými kabely procházet větší proud. To znamená, že kupříkladu stejně velké topné tělísko je schopné vyššího výkonu. Druhou výhodou je, že lze použít menší průměr vodičů, než by byl potřeba u 12V. Díky tomu menšímu průměru je ve vodičích menší odpor a dochází k menším ztrátám energie. Při použití stejných vodičů, jako je nutné u 12V varianty zde dochází k menšímu zahřívání a je tedy vyšší úroveň bezpečnosti. U 24V systému také pracují krokové motory rychleji, než u 12V.

Druhou hodnotou, na kterou je třeba se dívat při výběru zdroje, je výkon. Při použití příliš slabého může docházet k nedostatku elektrické energie, což se může projevovat výpadky tiskárny. Při použití příliš silného zdroje je spotřeba elektrické energie zbytečně vysoká. Přibližný potřebný výkon lze spočítat. Nejprve je potřeba sečíst odběr elektrické energie všech zařízení, které bude zdroj napájet. Typicky jde o heatbed, topné tělísko hotendu, základní deska, krokové motory a případný druhý řídicí počítač. Odběr ventilátorů je zanedbatelný. Vzhledem k tomu, že zdroj funguje nejlépe při vytížení přibližně 70%, dopočítáme požadovaný přibližný výkon zdroje. Nakonec zbývá si vybrat z možností, které jsou běžně dostupné na trhu. Obecně je lepší vybírat ze zavedených a ověřených výrobců. Zdroj je poté sice dražší, ale měl by vydržet déle. Typickým příkladem zavedeného výrobce je Meanwell.

2.2 Firmware

Firmware je software nahráný na základní desku tiskárny, pomocí které je celá tiskárna ovládána. Volně dostupných možností Firmware je dnes celá řada. Zde se ale budu věnovat dvěma nejznámějším, Marlinu a Klipperu. Jejich nespornou výhodou je velká komunita. Tudíž v případě jakéhokoliv problému není problém se zeptat na jednom z mnoha diskuzních míst.

2.2.1 Marlin

V dnešní době je nejrozšířenějším firmwarem Marlin. Jde o systém vydaný k opensource použití v roce 2011 a je dodnes vyvíjen. Je napsán v jazyce C++ a běží přímo na základní desce. Je jednodušší na konfiguraci, než Klipper. Na druhou stranu při každé úpravě nastavení je třeba systém znovu kompilovat a nahrát na základní desku. Oproti Klipperu je pomalejší, protože veškeré výpočty a práce musí probíhat na použité základní desce.

Ke své funkci potřebuje připojení k počítači nebo displeji. Pomocí tohoto připojeného zařízení je tiskárna ovládána a jsou jí zadávány soubory k tisku. Je zde podpora 8-bit i 32-bit základních desek. Bývá také často využíván i pro jiné domácí CNC stroje, jako například obráběcí stroje. Výhodou Marlinu je jeho podpora jednoduchých, ale účinných příkazů v G-codu. Jde o krátký příkaz, který při načtení vyvolá požadovanou akci. Například příkaz *G29* vyvolá *mesh bed levelling*. Marlin je vhodný pro začátečníky, kvůli nenáročnosti nastavení. Zároveň má nižší náklady na hardware, protože systém může běžet na základní desce. Při požadavku na dálkovou správu tiskárny, lze využít systém Octoprint, mimo možnost dálkového ovládání tiskárny dále dovoluje například živé sledování tisku pomocí kamery, automatická detekce chyby v tisku pomocí kamery nebo ovládání pomocí mobilní aplikace. Při využití Octoprintu je nutné připojení tiskárny k počítači typu Raspberry Pi. V takovém případě se ale již může více vyplatit využít jako firmware systém Klipper.

2.2.2 Klipper

Klipper je mladší systém, vydaný v roce 2016 k opensource použití a stále vycházejí nové verze. Samotný firmware pro tiskárnu je napsán v C. Software, který musí běžet na připojeném RPi, zvaný Klippy je napsán v Pythonu. Klipper byl původně vyvíjen pro funkci s Octoprintem. Později pro něj vznikly systémy nahrazující Octoprint, přímo pro Klipper optimalizované. Nejneužívanějšími jsou Mainsail a Fluidd. Záměrem vývoje jiného firmwaru pro Octoprint bylo vytvořit systém, který by výpočty prováděné na základní desce přesunul na externí počítač a základní deska by zde sloužila pouze pro práci s hardwarem tiskárny. Z tohoto důvodu má Klipper dostupné funkce stejné, jako jsou dostupné v Octoprintu. Díky výše zmiňovanému externímu počítači pro výpočty je tiskárna se systémem Klipper rychlejší a zároveň přesnější při tisku, díky vyššímu počtu kroků krokového motoru za vteřinu. Při správném nastavení a naladění tiskárny může být tisk i několikanásobně rychlejší. Tiskárna je ovládána buď přes připojený displej nebo přes rozhraní, spustitelné ve webovém prohlížeči, které běží na připojeném RPi. Přes toto rozhraní lze také provádět rychlé změny v nastavení tiskárny. Po provedení změny stačí konfigurační soubor uložit a tiskárnu restartovat. Jde o nespornou výhodu oproti Marlinu, protože u něj je potřeba znovu kompilovat celý firmware. Na druhou stranu prvotní nastavení firmwaru je u Klipperu náročné, především protože je nutné správně nastavit Základní desku, i RPi. Klipper podporuje 8-bit i 32-bit základní desky. Při dostatečném výpočetním výkonu RPi je možné zapojit více tiskáren na jeden počítač. Klipper postrádá možnost specializovaných příkazů v g-codu, kterou nabízí Marlin. Jako náhradu toho

zde lze tvořit makra. Jde o definovaný postup práce tiskárny, ke které dojde při spuštění daného makra. Velkou výhodou systému Klipper je možnost tzv. *input-shaping*. Při správném nastavení této funkce, tiskárna na základě informací z akcelerometru umístěného na extruderu je schopna vyrušit nežádoucí vibrace tiskárny. Takovéto vibrace by měly negativní dopad na kvalitu tisku.

3. návrhový proces tiskárny

Návrh celé tiskárny trval přibližně 3 měsíce. Zde budu popisovat tento proces a vysvětlím, jaké součástky a firmware jsem se rozhodl využít a proč. Jako inspiraci a pomoc například při zapojování elektroniky mi posloužila tiskárna Voron Vo.1, především díky tomu, že má koncepci, kterou jsem se rozhodl stavět. Má také velmi kvalitně zpracovaný návod, který mi mohl být nápomocný v případě potřeby.

3.1 Požadavky na navrhovanou tiskárnu

- Běžně dosažitelná rychlost vyšší než 150mm/s, bez redukce kvality tisku
- Možnost dálkové správy tiskárny
- Přesný tisk
- Pevný rám odolný při převozu tiskárny
- Kompaktní velikost
- Osvětlení tiskové plochy
- Dobře přístupná elektronika s možností organizace kabelů

3.2 Výběr koncepce FDM 3D tiskárny

První věc, kterou bylo nutné určit byla koncepce tiskárny. Rozhodl jsem se pro CoreXY, protože splňuje požadavky, které jsem si stanovil. Díky pohybu tiskové podložky po ose Z je tiskárna kompaktnější, než například u principu CoreXZ, který využívá má dosavadní tiskárna, Prusa i3 MK2.5S. Oproti CoreXZ má CoreXY i robustnější rám. Díky Stabilnímu obrysu tiskové plochy v ose Y, jsem si mohl dovolit dát elektroniku ze zadní strany tiskárny. To mi dovoluje mít ji dobře přístupnou, v případě nutnosti oprav.

3.3 výběr vhodných součástí

Výběr správných součástí pro 3D tiskárnu je klíčový pro dobře fungující celek. Výběrem komponentů jsem strávil mnoho hodin, především snahou vyznat se ve všech možných variantách. Nápomocny mi v tu chvíli byly internetové diskuze, kde sice bylo možné nalézt argumenty pro každou variantu, ale dalo mi to přibližný přehled o výhodách a nevýhodách jednotlivých možností. Aby tiskárna fungovala bez nutnosti častých servisních zásahů, považoval jsem za důležité vybrat i kvalitního výrobce. K tomu jsem opět využil internetové diskuze, kde jsem se dočetl o různých zkušenostech s výrobcí. Součástky jsem vybíral i na základě ceny, aby byl co nejlepší poměr ceny a kvality.

3.3.1 Hardware

Rám

Zvolená varianta: Hliníkové profily 2020

Profily 2020 jsem vybral, kvůli jejich malé velikosti, ale zároveň dobré pevnosti. Pro tiskárnu mých rozměrů jsou plně dostačující. Větší profily, například 3030 by již mohly být zbytečně těžké. Menší profily, například 1515 mi přišly až příliš malé.

Vedení jednotlivých os pohybu

Zvolená varianta: Lineární vedení MGN12H 250mm

Lineární vedení má oproti hlazeným tyčím mnoho výhod a jedinou nevýhodou je vyšší cena, za kterou ale člověk získá lepší produkt. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl lineární vedení využít. Nabízí dobrou přesnost a nemá problém s vyšší rychlostí. Jakýmsi bonusem je snadnější připevnění k rámu, tedy profilům 2020. Typ MGN12H jsem vybral, především, protože mnou vybraný extruder je stavěný na tento typ, ale zároveň jde o pro mé využití ideální velikost. Původně jsem zamýšlel použití délky 200mm. Ale kvůli nutnosti použít podložku 180 mm X 180mm místo původně zamýšlené 150 mm X 150 mm jsem byl nucen využít variantu 250mm. Chtěl jsem, aby tisková hlava byla schopna tisku po celé podložce, tudíž minimální velikost je 180mm. Vozík lineárního vedení MGN12H má na délku 45.4mm, což nám dává nutnost délky vedení minimálně 225.4mm. Nejblíže běžně prodávaná délka je použitá 250mm. Prostor okolo tiskové podložky, kterého je tisková hlava schopna dosáhnout je možné do budoucna využít, například automatickým očištěním trysky ocelovým kartáčem před tiskem.

Pohon jednotlivých os pohybu

Zvolená varianta: Řemen a trapézová tyč

Pro pohon osy XY jsem využil řemen, protože v porovnání s trapézovou tyčí jde o mnohem rychlejší variantu a ztráta přesnosti je ve výsledku téměř zanedbatelná. Nutnost dobrého napnutí řemenu jsem vyřešil integrovaným napínákem.

Pro osu Z jsem využil trapézovou tyč, protože je jednodušší na implementaci a má vhodnější vlastnosti pro osu Z.

Extruder

Zvolená varianta: Voron StealthBurner

Návrh nového extruderu je náročný a dlouhý proces. Z tohoto důvodu jsem se souhlasem vedoucího své práce využil již hotový extruder. Ze všech možných variant mě nejvíce zaujal OpenSource projekt Voron StealthBurner, nejdříve svým vzhledem. Vzhledem k tomu, že většina extruderů je stavěna bez ohledu na vzhled, tento mě zaujal. Po bližším zkoumání jsem zjistil, že i splňuje mé požadavky. Je zamýšlený na lineární vedení, které jsem chtěl využít. Také má možnost připojení 3 RGB led světel. Jedno je z přední strany, které slouží jako signalizační. Další dvě jsou poté namířené přímo na extruder, jako osvětlení pracovní plochy, které jsem u předchozí tiskárny postrádal. Výhodou je také podpora hotendu typu E3D Revo, který jsem původně zamýšlel použít. Zprvu jsem se obával, že zvolený extruder je příliš velký. Proto bylo druhou možností použít Voron Mini AfterBurner. Nejen z důvodu absence osvětlení tiskové plochy jsem nakonec rozhodl o StealthBurneru.

Hotend

Zvolená varianta: E3D V6

Původně jsem chtěl využít nově vzniklou variantu hotendu, která má trysky vyměnitelné rukou az studena. Jde ale o několikanásobně dražší variantu nejen na pořízení, ale i samotné trysky jsou dražší. Bohužel je zde také omezený maximální průtok filamentu, tudíž je hotend nevhodný pro vysokorychlostní tisky. Volba nakonec padla na E3D V6. Jde o běžně používaný typ hotendu, který má běžně dostupné i neoriginální díly.

Heatblock

Zvolená varianta: Hliníkový

Hliníkový heatblock jsem využil, protože jde o dostupnou a dostačující variantu. V případě nutnosti není problém v budoucnu vyměnit heatblock za měděný.

Heatbreak

Zvolená varianta: Titanový

Výběr heatbreaku byl velmi náročný. Především, protože většinou využívám materiál PLA. V takovém případě je nejlepší volbou heatbreak, s PTFE trubičkou. Rád bych ale byl schopen využívat i pokročilejší materiály, jako je například polykarbonát. K tomuto je PTFE trubička nevhodná, až nebezpečná, a bylo by ideální využít celokovový heatbreak. Nabízel se proto buď bi-metal nebo Titanový. U bi-metal heatbreaku jsem se bál kvality zpracování. Proto jsem nakonec koupil kvalitní titanový heatbreak.

Heatsink

Zvolená varianta: Hliníkový

Heatsink z hliníku je stejně jako u heatblocku dostupná a dostačující varianta.

Topné tělísko

Zvolená varianta: 24V 40W

Napětí 24V bylo je dané zdrojem. Výkon 40W je dostatečně výkonný, aby tryska rychle dosáhla požadované teploty a zároveň základní deska nebyla přetěžována. V případě potřeby je možné tělísko vyměnit za 50W variantu.

Termistor

Zvolená varianta: NTC100K

Jde o běžně používaný termistor, který má požadované rozměry.

Ventilátory

Zvolená varianta: Radiální 5015 24V a Axiální 4010 24V

Typy ventilátorů jsou dány extruderem a napětí zdrojem, tudíž zde jsem nic nemusel vybírat

Krokový motor extruderu

Zvolená varianta: LDO-36STH20

Varianta krokového motoru je pevně dána typem extruderu. Jedinou věcí, kterou jsem musel rozhodnout byl výrobce. Měl jsem na výběr z neznámého výrobce, který nabízel motor za cca 300 Kč nebo kvalitního a prověřeného výrobce LDO, který ho nabízel na 600 Kč. Nakonec jsem se rozhodl si připlatit a koupit ten kvalitnější, protože jde o důležitou součástku, která by v případě špatné výrobní kvality mohla kazit výtisky.

Volitelné doplňky extruderu

Zvolené možnosti: Indukční *mesh bed levelling* senzor, senzor filamentu, Osvětlení extruderu

Aby byla tiskárna schopna dobře vytisknout první vrstvu, je vhodným nástrojem k tomuto indukční senzor vzdálenosti. Na tiskárně je nyní namontován senzor typu SN-04N. Senzor jsem zatím neprovoznil, z důvodu nedostatku času.

Dalším užitečným doplňkem je senzor filamentu, aby tiskárna byla schopna rozpoznat, když dojde ke konci struny. Voron StealthBurner nemá integrovaný senzor, ale na *Printables.com* jsem našel upravenou část těla extruderu, s prostorem pro jednoduchý spínač. Druhou možností bylo vést filament přes externí senzor filamentu, který by sice fungoval lépe, ale omezovalo by to pohyb filamentu při tisku.

Zvolený extruder má již v základu integrované RGB LED osvětlení, tudíž je to další volitelná součást extruderu, kterou jsem se rozhodl využít. Bohužel v době stavby tiskárny nebyly potřebné LED diody WS2812B dostupné, proto k jejich implementaci prozatím nedošlo.

Heatbed

Zvolená varianta: 180mm x 180mm 24V

Napětí vyhřívané podložky je opět dáno zdrojem, tudíž jsem musel vybrat pouze velikost. Původně jsem chtěl 150mm X 150mm, protože je dostatečně velká, ale zároveň není zbytečně velká. Bohužel ale se tato velikost nenabízí ve 24V variantě. 120mm X 120mm varianta je pro mé využití příliš malá, protože jsem se rozhodl pro 180mm X 180mm. Pokud bych v budoucnu došel ke zjištění, že je příliš malá, je zde dostatek prostoru pro zakomponování podložky o velikosti až cca 300mm X 300mm. V takovém případě by ale již byla nutná lehká změna konstrukce a přidání dalších upevnění osy Z.

Krokové motory

Zvolená varianta: 17HS8401S 1.8°

Vybrané motory jsou velikosti NEMA 17, 48mm. Jde o ideální velikost a tím pádem i sílu motorů. Variantu 1.8° jsem vybral, protože zvýšení přesnosti, ke které by došlo s použitím varianty 0.9°, je téměř nezatelné. Oproti tomu rychlost motorů by pravděpodobně byla znatelně snížena.

Drivery

Zvolená varianta: TMC2209 UART

Mnou vybraná základní deska má již integrované drivery, tudíž zde jsem nemohl vybírat. Ale vlastnosti těchto integrovaných driverů byl jeden z důvodů, proč jsem tento model základní desky zvolil. Jedním z nich je detailní microstepping 1/256, díky čemuž je tiskárna přesná a výtisky kvalitní. Další je nízká hlučnost, protože jde o tiché drivery. V neposlední řadě byla pro mě také důležitá možnost sensorless homing. Díky této vlastnosti, kdy drivery jsou schopny poznat zvýšený odpor v motoru, je možné zprovoznit také funkci detekce nárazu.

Základní deska

Zvolená varianta: BTT SKR MINI E3 V3.0

Tuto desku jsem vybral, protože splňuje mé požadavky. Jde o rychlou tiskárnu s integrovanými drivery, které mají vlastnosti, které jsem požadoval (viz výše). Také podporuje připojení displeje a RGB osvětlení pro signalizaci nebo osvětlení tiskové plochy. V případě potřeby je možné připojit k ní externí senzor filamentu od stejného výrobce, který je schopen odhalit nejenom konec filamentu, ale i zaseklý filament.

Ovládání

Zvolená varianta: RaspBerry Pi4B 1GB RAM

Tiskárna je ovládána připojeným RaspBerry Pi4B. Jde o nutnost, vzhledem k mému výběru firmwaru. Bohužel v současné době kvůli celosvětovému nedostatku čipů je cena RPi i několikanásobně vyšší, než před touto situací. Proto jsem zakoupil téměř nepoužité RPi na portálu *Aukro.cz*. Původně jsem chtěl variantu s více RAM pamětí, ale objevila se nabídka na toto RPi za přiměřenou cenu, proto jsem po krátkém průzkumu, jestli bude 1GB RAM dostačující, RPi zakoupil. Varianta s 1GB RAM je dostačující a v případě potřeby je možné připojit i další tiskárny.

Zdroj

Zvolená varianta: MeanWell LRS-350-24

Výrobce zdroje jsem zvolil MeanWell, protože by mělo jít o kvalitního výrobce zdrojů.

Výběr 24V varianty jsem udělal, protože nabízí možnost vyššího výkonu, při stejné velikosti komponentech, například u topného tělíska.

Potřebný výkon zdroje lze spočítat. Při vypsání si odběru elektrické energie všech zařízení, si lze odvodit, jaký maximální výkon může být potřebný. I při využití lehce slabšího zdroje by neměl nastat problém například se samovolným vypínáním tiskárny. To nastává až při silně přetíženém zdroji. Ideální je využít takový zdroj, aby při běžném využití pracoval přibližně na 70% výkonu. To není problém, protože plné zatížení nastává pouze v případě, že by heatbed a hotend byly plně vyhřívány, RPi a základní deska by pracovaly na plný výkon a zároveň všechny krokové motory plně využívaly svou sílu. Ve skutečném využití se většinou RPi a základní deska nikdy nedostanou do režimu, kdy by pracovaly na plné zatížení. I v případě, že by takováto situace nastala, jejich odběr elektrické energie je stejně jako odběr ventilátorů, oproti ostatním komponentům zanedbatelný. Při spuštění tiskárny se nejdříve tiskárna nahřeje a až poté pohybuje krokovými motory na tisk, během kterého už jen krátce a lehce přidává energii na vyhřev podložky. Odběr elektrické energie krokovými motory také není tak velký, jako může být jejich maximální, protože je softwarově omezen jejich výkon, aby nedocházelo k přehřívání. Tyto chvíle, během kterých je odběr proudu největší, se tedy většinou nedějí zároveň. Při Vyhřívání podložky a hotendu je zatížení zdroje přibližně 65%. K tomu ale musíme započítat i odběr energie základní deskou a RPi. Ve výsledku se tedy tiskárna v takovouto chvíli dostane přibližně právě na chtěných 70% zatížení. Při tisku, jen samotné motory mohou odebírat 25% celkového výkonu zdroje. Při započtení nutnosti slabého vytápění heatbedu a hotendu, by zatížení zdroje mělo být na menší hodnotě, než již zmiňovaných 70%. Nakonec jsem vybral variantu s výkonem 350W.

Přehled jednotlivých součástek a jejich elektrický výkon

Heatbed	190W
Hotend	40W
Krokový motor XYZ	24W
Krokový motor extruderu	19,2W
Základní deska	cca 15W
RaspBerry Pi	15W
Ventilátor (radiální)	3,9W
Ventilátor (axiální)	2,4W
Celkem	357,5W

poznámka k přehledu:

Výkon krokového motoru XYZ je uveden pro jeden motor po softwarovém omezení.

Výkon BTT SKR mini E3 v3.0 se mi bohužel nepodařilo dohledat, budu tedy počítat s tím, že elektrický výkon je stejný jako u RPi.

3.3.2 Software

Firmware

Zvolená varianta: Klipper

Pro Klipper jako firmware použitý na tiskárně jsem se rozhodl, protože jde o pro mě nový systém, který jsem dříve neznal a hned z počátku mi připadal zajímavý a chtěl jsem ho vyzkoušet. Má mnoho výhod a jedinou nevýhodou, kromě obtížnějšího prvotního nastavení nutnost připojení RPi. Vzhledem k tomu, že jsem plánoval integrovat tiskárnu do systému Octoprint, neznamenal to pro mě problém. Klipper splňuje mé podmínky na rychlou a přesnou tiskárnu, k jejímuž ovládání není nutná SD karta.

Ovládací prostředí

Zvolená varianta: Mainsail

Ze systémů, pro ovládání tiskárny s Klipperem jsou nejpoužívanějšími Mainsail a Fluidd. Nakonec jsem se rozhodl pro Mainsail, protože mi byl doporučen spolužákem, který ho již využívá.

3.4 Tvorba 3D modelů tištěných dílů

Zakoupené díly je nutné nějakým způsobem upevnit k sobě nebo na rám. Jsou dvě varianty, jak je to možné provést. První je si zakoupit spojovací materiál určený pro tento účel. Pro profily 2020 je takovéhoho příslušenství mnoho. Výhodou je, že požadovaný díl mám rychle dostupný. Na druhou stranu je poté stavba tiskárna finančně náročnější.

Druhou možností je si požadované díly vymodelovat a vytisknout na jiné 3D tiskárně. Takovouto praxi dělá například velmi rozšířený český výrobce 3D tiskáren, Prusa. Velkou výhodou je, že soubory mohou vzniknout přímo na míru a v případě nutnosti změny, není problém 3D model upravit. Další velkou výhodou, například u zmíněného výrobce Prusa, je možnost vytisknout si díl, v případě jeho poškození a nutnosti náhrady. Problém s tímto přístupem k výrobě vlastních dílů, je nutnost mít 3D model součástí. Pokud není žádný vhodný volně dostupný, je nutné si ho vymodelovat, což je časově velmi náročné. Já jsem se rozhodl pro vymodelování všech součástí, kromě Extruderu. Vše bylo modelováno v programu *Fusion 360*, protože s ním pracuji již dlouho a znám i jeho pokročilé funkce, které jsem během navrhování musel mnohokrát použít.

Nejprve jsem začal vymodelováním všech zakoupených součástí, aby byl schopen je vložit do návrhu tiskárny a pracovat s jejich rozměry. Následoval nosný rám heatbedu, protože heatbed a extruder jsou jedinými pevnými body, na základě kterých jsem mohl vytvářet tiskárnu. Pokračoval jsem Osou Z. Tím je myšleno vedení i pohon. Lineární vedení jsem umístil na vertikální profily 2020, které jsem umístil na horizontální profily. Tyto horizontální profily zároveň slouží, jako nosné body pro umístění elektroniky. Kvůli druhému pevnému elementu, extruderu, jsem si poté do modelovacího prostředí vložil volně dostupný model mnou zvoleného extruderu. Vytvořil jsem si nosník osy X, na které se extruder pohybuje a tento nosník umístil na vedení osy Y. Pokračoval jsem napínacími zařízeními v přední části tiskárny, které zároveň slouží jako nástroj pro správné umístění lineráního vedení osy Y, aby bylo připevněné tak, aby na sebe jednotlivé osy byly kolmé. V zadní části tiskárny jsem dále vytvořil nosník motorů A a B. Nyní jsem mohl vytvořit celou konstrukci rámu. Do zadní části jsem poté přidal důležité prvky elektroniky, jako například nosník zásuvky, RPi a základní desky nebo ochranné mřížky z přední a boční strany. Dále jsem vymodeloval podstavné nohy, které vytváří prostor, nutný pro motor osy Z. Zároveň tlumí vibrace, které by se z tiskárny přenášely do například stolu, na kterém by tiskárna byla umístěna. Toto by mohlo způsobovat příliš vysokou úroveň hlučnosti tiskárny. Nakonec jsem vytvořil držák filamentu, umístěný na horní části rámu tiskárny.

4. Stavba tiskárny

Stavba probíhala podle návodu, který je přiložen v mém repozitáři. Během stavby jsem nenarazil na žádné větší komplikace. Při kompletování rámu se nejdříve zdálo, že je celý křivý a nepevný. Celá konstrukce se ale postupně s přidávanými profily zpevňovala. Na konci stavby rámu se vše ukázalo být v pořádku. Kabely vedoucí z extruderu jsem musel prodlužovat nakrimpováním spojek kabelů. To zároveň znamenalo, že jsem musel vytvořit nové konektory. Mnou zvolená deska, BTT SKR mini E3 v3.0, má konektory typu XH2.54. S vytvářením konektorů jsem měl problém, i přestože jsem využil krimpovací kleště, které jsou pro tento účel určený. Problémem bylo, že konektory jsou velmi malé. Konektor často na kabelu držel špatně a při zapojování do základní desky se kabel ulomil nebo nebylo spojení mezi konektorem a vodičem.

Při zprovoznění softwaru jsem zprvu měl problém, protože s tímto procesem nemám zkušenosti. Po nalezení vhodného návodu na portálu *Youtube.com*, jsem byl schopen dokončit nastavení. U nové tiskárny je nutné vytvořit konfigurační soubor pro Firmware Klipper. Základ konfiguračního souboru má v repozitáři na GitHubu výrobce základní desky. Konfigurační soubor pro tuto tiskárnu je přiložený v mém repozitáři. Je ale nutné ho před použitím projít, jestli je správně nastavený pro konkrétní stavbu tiskárny. Hlavně je nutné správně nastavit hodnotu *driver_SGTHRS* u každého krokového motoru zvlášť. Jde o sílu, jakou může motor vyvinout vůči překážce, než ji zaznamená. toto je důležitá funkce, především pro sensorless homing. Pokud by byla hodnota příliš nízká, tiskárna by náraz nedetekovala a mohlo by dojít k poškození. Při příliš vysoké hodnotě, je dostatečným odporem i ten, který je vytvářen při jakémkoliv pohybu tiskárny. Tiskárna by tedy začátek osy detekovala okamžitě, nehledě na skutečné pozici. Druhou důležitou hodnotou, kterou je nutné nastavit, je PID kalibrace vyhřívání hotendu a heatbedu. Jde o informaci pro tiskárnu, jak se vyhřívání chová a jakou má setrvačnost. Pokud by totiž tiskárna vyhřívala až do chvíle dosažení požadované teploty, termistor by sice věděl, že již bylo dosaženo požadované teploty, ale výhřevné tělísko by mělo příliš vysokou teplotu. Ke stejnému jevu by docházelo i při chladnutí, pro dosažení správné teploty. Proto je třeba, aby se topné tělísko odpojilo chvíli před dosažením cílové teploty. Kalibrace proběhne sama, po zadání příkazu:

`PID_CALIBRATE HEATER=<HEATBED/EXTRUDER> TARGET=<POŽADOVANÁ TEPLOTA>` a hodnota je poté uložena příkazem: `SAVE_CONFIG`.

5. Testování

Tiskárna má za sebou 46h 20m tisku. Během 136 tisků spotřebovala přes 200m filamentu. Nutno říct, že většina tisků byly kalibrační a před koncem jsem je zastavil, protože se projevila chyba nebo jsem byl již schopen z tisku vyčíst, co musím upravit v nastavení tiskárny. Před řádným zkalibrováním tiskárny, se při každém tisku stávalo, že se v průběhu tisku posunula vrstva, tudíž vrstvy na sebe nenavazovaly. Ukázalo se, že to je kvůli příliš vysokému toku filamentu z trysky, který tvoří překážku, do které když tryska narazí, zasekne se na chvíli. Druhým důvodem bylo příliš nízké napětí krokových motorů.

Důkladná kalibrace celé tiskárny je podstatným úkonem, který by neměl být uspěchán. Při nastavování jsem postupoval dle návodu na webové stránce *ellis3dp.com*. Zde je kvalitně zpracovaný postup pro kompletní kalibraci celé tiskárny, včetně návaznosti jednotlivých kroků a dokumentace, jak vypadá správně a špatně nastavený daný aspekt kalibrace. Kompletní kalibrace mi zabrala celý den a šlo o opravdu důkladnou kompletní kalibraci.

FDM 3D tiskárna bez kalibrace nikdy nebude fungovat tak, jak by měla, proto by kalibrace měla být úkon, který udělá každý nový majitel tiskárny.

V průběhu testování se vybraný extruder ukázal být dobrou volbou, protože funguje tak, jak jsem očekával. Během oprav hotendu se ukázalo, že je zde i další nemalá výhoda zvoleného extruderu. Čelní část tiskové hlavy drží na čtyřech šroubech. Po jejich uvolnění je možné vyjmout celý modul hotendu. Samotný hotend je možné vyjmout po uvolnění dalších dvou šroubů. Oproti mé dosavadní tiskárně, Prusa i3 MK2.5S, je to výhoda, protože zde pro zásah do hotendu je nutné demontovat nejdříve celý extruder a ten postupně rozebrat, dle návodu. **Při jakýchkoliv servisních zásazích je nutné být opatrný, aby nedošlo k poškození kabelů nebo jiných komponentů!**

5.1 Komplikace při testování

Od začátku používání této tiskárny jsem musel vyměnit axiální ventilátor hotendu, protože byl příliš hlučný. Druhým důvodem bylo, že při opravě tiskárny jsem ho poškodil tak, že se ulomila jedna z lopatek. Ventilátor byl poté příliš hlučný, kvůli vzniklým vibracím, které vznikly kvůli vzniklému nevyváženému stavu. Dalším nutným zásahem bylo připájení kabelů radiálního ventilátoru, protože se mi bohužel ulomily v místě připojení na ventilátor.

Problémem, který jsem musel dvakrát řešit, je ucpání heatbreaku. Při prvním pravděpodobně šlo o ucpání, kvůli nesprávné manipulaci s tiskárnou z mé strany, při vyjímání filamentu. V druhém případě jsem nezjistil, proč došlo k chybě a jestli nešlo například o vadu filamentu. Jde o jev, který je nutné do budoucna pozorovat, protože se může dít při nekvalitním titanovém heatbreaku. I přes skutečnost, že jsem koupil kvalitní, může jít o nepovedený kus.

V současné době na tiskárně pozoruji lehké prohýbání tiskové podložky při zvýšeném tlaku od trysky, především při špatném tisku. Jde o následek toho, že heatbed je uchycen pouze z jedné strany. Negativní vliv na výtisky zatím nepozoruji.

6. Možné vylepšení tiskárny

Tiskárna je ve plně funkčním stavu, ale jsou zde funkce a možnosti, které tiskárna zatím nemá implementovány, ale je možné je vytvořit. I po ukončení maturitního projektu bych rád do stejného repozitáře přidával případné změny na tiskárně, aby kdokoliv, kdo by se rozhodl stavět tuto tiskárnu, měl nejnovější verzi.

- **Kompletní ochrana elektroniky**

Bohužel jsem již kvůli nedostatku času nestihl implementovat ochranu elektroniky ze zadní části tiskárny. Mělo by jít o plexisklo, umístěné na pantech na rámu tiskárny. v zavřeném stavu budou tyto dvířka držet pomocí magnetů. Půjde o plexisklo s tloušťkou 2mm a mám ho již zakoupené.

- **Konektor pro zapojení ethernetu**

V současné době musí být kabel ethernetu provlečen skrz boční mřížku, aby mohl být zapojen do RPi. Lepším řešením by bylo, udělat ethernetovou spojku někde v oblasti rámu, například vedle zásuvky napájení. Do této spojky by byl přiveden ethernetový kabel vedoucí z RPi. Opět jde o úpravu, kterou jsem bohužel nestihl.

- **Přidat madla pro přenos tiskárny**

Tiskárnu je možné při přenášení držet za nosný rám. Pokud by ale někdo preferoval například plastová madla, není problém je připevnit kamkoliv na rám, pomocí odpovídajících šroubů a kamenů.

- **Displej pro ovládání tiskárny**

Tiskárnu je možné ovládat pomocí rozhraní Mainsail. Pokud by ale někdo preferoval fyzický displej na tiskárně, je možnost jeho dodatečné implementace.

- **Zakrytí tiskové plochy**

Pro tisk z náročnějších materiálů se doporučuje uzavřít tiskovou oblast, aby teplo zde vytvořené neunikalo do okolí. Tato ztráta teploty může například u ABS způsobovat rozlomení modelu při jeho chladnutí. Na druhou stranu zakrytování není vhodné pro tisk z PLA, protože ventilátory nefungují tak účinně, protože mají k dispozici vzduch teplejší, než bez zakrytování.

- **Integrované schránky pro příslušenství k tiskárně**

K provozování tiskárny je často nutné i nářadí. V rámu je dostatek prostoru okolo tiskové plochy, aby zde byly přidány schránky, ve kterých by bylo umístěno příslušenství k tiskárně. Příslušenstvím je myšleno nejenom nářadí, potřebné k pracem na tiskárně, ale například také různé náhradní trysky.

- **Zprovoznění LED diod na extruderu**

- **Zprovoznění indukčního senzoru *mesh bed levellingu***

7. Závěr

Práce na tomto projektu byla časově velmi náročná. Nejenom z hlediska samotného navrhování tisku. V první fázi, ve které jsem zhodnotil většinu dostupných technologií, byla náročná na výzkum, především protože jsem se snažil informace čerpat ze zkušeností jiných uživatelů, a ne každý má stejné zkušenosti s výrobky. Z toho důvodu bylo náročné vytvořit si ucelený přehled o problematice. Druhá fáze samotného návrhu byla opět časově náročná, protože každá navrhovaná součástka je poměrně komplexní součást. A špatně vytvořený model by mohl vyústit v nekvalitně pracující tiskárnu. Proto jsem si dával záležet, aby zkonstruované prvky byly co nejvíce kvalitní. Třetí fází bylo samotné sestavení tiskárny. Nejnáročnější částí zde bylo vytvoření nových konektorů XH2.54, z důvodu popsaného ve kapitole o stavbě tiskárny. Psaní této práce jsem se rozhodl pojímat velmi zešíroka, aby i člověk jen se základními znalostmi, po přečtení této práce získal stejné znalosti, které jsem získal během průzkumu. Bohužel jsem již nestihl zkonstruovat některé prvky, jako například schránky pro příslušenství. Celkově je zde stále prostor pro vylepšení, která mohu na tiskárně provádět. Předem stanovené požadavky se mi podařilo splnit všechny, kromě kompaktní velikosti. Tiskárna je větší, než jsem původně zamýšlel. Je to dáno kombinací jednotlivých vybraných komponentů. Na druhou stranu více prostoru mi dává prostor pro další funkce, které mohu zakomponovat. S výsledkem této práce jsem spokojený. Tiskárna samotná tiskne kvalitně, při zachování pěkné kvality. Zároveň veškeré ovládací prvky tiskárny mi vyhovují a i dostupnost součástek při provádění oprav považuji za dobrou.

Internetové zdroje

- [] <http://user.mendelu.cz/marik/in-mat-web/in-mat-webse21.html>.
- [] <http://user.mendelu.cz/marik/in-mat-web/in-mat-webse21.html>.
- [] <http://www.realisticky.cz/ucebnice/01%20Matematika%20S%C5%A007%20Analytick%C3%A1%20geometri>
- [] <https://3dinsider.com/choosing-firmware-3d-printer/>.
- [] <https://3dprintingspace.com/t/8-bit-vs-32-bit-control-boards-whats-the-advantage/1082>.
- [] <https://all3dp.com/2/3d-printer-firmware-which-to-choose-and-how-to-change-it/>.
- [] <https://all3dp.com/2/3d-printer-nozzle-size-material-what-to-know-which-to-buy/>.
- [] <https://all3dp.com/2/best-stepper-motor-driver/>.
- [] <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>.
- [] <https://all3dp.com/2/klipper-pid-tune-tuning-3d-printer/>.
- [] <https://all3dp.com/2/klipper-vs-marlin-difference/>.
- [] <https://all3dp.com/2/linear-rail-3d-printer-really-better-or-just-a-hype/>.
- [] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Makro_\(software\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Makro_(software)).
- [] <https://dyzedesign.com/2019/04/differences-12v-24v-3d-printer/>.
- [] <https://eshop.sharplayers.cz/p/bi-metal-heatbreak-kratsi>.
- [] <https://eshop.sharplayers.cz/p/btt-skr-mini-e3-v3-zakladni-deska-pro-3d-tiskarny>.
- [] <https://github.com/jschuh/klipper-macros>.
- [] <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>.
- [] <https://printingit3d.com/8-bit-vs-32-bit-control-board-in-3d-printing-which-is-better/>.
- [] https://reprap.org/wiki/List_of_FirmwareMarlin.
- [] <https://sj.news/svetovy-lidr-vsadil-vsechno-na-svou-novou-produktovou-radu-hot-endu-k-3d-tiskarnam-porusuji-nas-patent-tvrdi-cesky-startup-a-mobilizuje-pravniky/>
- [] <https://the3dprinterbee.com/corexy-vs-hbot/>.
- [] <https://www.3dsourced.com/3d-printers/types-of-fdm-3d-printer-cartesian-delta/>.
- [] <https://www.captubes.com/safety.html>.
- [] <https://www.drdflo.com/pages/Guides/How-to-Build-a-3D-Printer/Motherboard.html>.
- [] <https://www.gadgetreview.com/8-bit-vs-32-bit-3d-printer>.
- [] <https://www.kywoo3d.com/blogs/3d-printer-news/v-slot-wheels-vs-linear-rails>.
- [] <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-stepper-drives-and-how-do-they-work/>.
- [] <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-xl-2/>.
- [] <https://www.surpluscenter.com/images/techhelp/nema2.pdf>.
- [] <https://www.zikodrive.com/ufaqs/nema-motor-frame-sizes-mean/>.