

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**PATRIK
DOLEŽAL**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Doležal** Jméno: **Patrik** Osobní číslo: **457665**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

3D tiskárna - koncepční návrh - fotopolymer

Název bakalářské práce anglicky:

Concept design - 3D printer - photopolymer

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše technologie, konstrukce a parametrů zařízení (dostupnost polymeru, DLP projektor - rozlišení, mechanika, teploty v zařízení, ...)
- 2) Návrh demonstrátoru a dílů
- 3) Návrh funkční konstrukce tiskárny.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kelly, James F.: 3D printing : build your own 3D printer and print your own 3D objects
[2] Joan Horvath: Mastering 3D Printing.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


doc. Ing. Martin Novák, Ph.D., odbor elektrotechniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:


doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

18.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Souhlasím s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce doc. Ing. Martina Nováka, Ph.D. jako jejího spoluautora. V případě publikace si přeji být uveden jako spoluautor.

V Praze dne.

Podpis.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi jakkoliv pomohli během vytváření této práce. Zejména děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D. za věnovaný čas, rady a připomínky a Ing. Bc. Šárce Němcové, Ph.D. za pomoc při výrobě některých komponent.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je sestavit funkční konstrukci DLP 3D tiskárny.

Práce nejprve vysvětluje pojem 3D tisk, stručně popisuje jeho historii, naznačuje vývojové trendy a seznamuje s technologiemi, které se v tomto způsobu výroby momentálně nejvíce používají.

Následující části jsou již věnovány pouze technologii DLP tisku.

Začíná vysvětlením obecného principu této technologie, ukazuje jednotlivé provedení tiskáren tohoto typu, popisuje proces tisku a uvádí nezbytné požadavky na klíčové komponenty tiskáren.

Následně se práce zabývá návrhem jednotlivých komponent pro stavbu vlastní DLP 3D tiskárny, za využití poznatků z předchozím kapitol této práce a sestavení počítačového modelu tiskárny.

Dále je popsána výroba některých dílců, samotné sestavení konstrukce, včetně vyřešení problémů, které při této činnosti vznikly, zapojení elektrického obvodu, který slouží k uvedení tiskárny do pohybu, a nakonec nastavení toho pohybu za použití vhodně vybraného a nastaveného firmwaru a softwaru.

Výsledkem této práce je konstrukce tiskárny, která splňuje všechny nezbytné podmínky pro proces tisku.

Na základě zjištěných údajů jsme zjistili, že je možné tiskárnu tohoto typu sestavit v domácích podmínkách a tato práce může sloužit jako návod k tomuto účelu.

Klíčová slova

3D tiskárna, DLP technologie, fotopolymer

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to build a functional DLP 3D printer construction.

The thesis first explain the concept of 3D printing, briefly describes its history, indicates development trends and shows technologies that are currently the most used in this production process.

The following chapters are dedicated only to DLP printing technology.

It begins with an explanation of general principle of this technology, illustrates individual printer versions, describes the printing process and identifies the necessary requirements for printer components.

Subsequently, this thesis deals with the design of individual components for construction of DLP 3D printer using knowledge from the previous chapters of this thesis and compiling a computer model of the printer.

It also describes the production of some parts, the construction of the structure itself, including solving the problems that have arisen in this activity, the connection of the electrical circuit that is used to put the printer in motion and, finally, the adjustment of the movement, using properly selected and set firmware and software.

The result of this work is the construction of a printer that meets all the necessary conditions for the printing process.

On the basis of the data we have found, we can say that a printer of this type can be assembled in domestic conditions and this work can serve as a guide for this purpose.

Keywords

3D printer, DLP technology, photopolymer

Obsah

1. Úvod do 3D tisku	9
1.1. Co je to 3D tisk?	9
1.2. Stručná historie 3D tisku	9
1.3. Současné vývojové trendy 3D tisku	10
2. Technologie 3D tisku	10
3. DLP tiskárny	11
4. Provedení tiskáren a proces tisku	13
5. Důležité komponenty DLP tiskárny	14
5.1. Projektor	14
5.2. Fotopolymer	17
5.3. Čočka	19
5.4. Kád'	21
5.5. Zrcadlo	22
5.6. Pohyblivá soustava s platformou	23
6. Sestavovaná tiskárna	24
6.1. Model	24
6.2. Kusovník	25
6.3. Jednotlivé komponenty	26
6.3.1. Tělo tiskárny	26
6.3.2. Spodní deska	26
6.3.2.1. Deska	26
6.3.2.2. Projektor	27
6.3.2.3. Čočka	27
6.3.2.4. Zrcadlo	29
6.3.3. Horní deska	31
6.3.3.1. Deska	31
6.3.3.2. Kád'	31

6.3.4.	Osa Z	31
6.3.4.1.	Deska	32
6.3.4.2.	Vodící tyče	32
6.3.4.3.	Nosná aparatura	32
6.3.4.4.	Motor.....	34
6.3.4.5.	Skříň na elektroniku.....	34
6.3.5.	Spojovací materiál	34
6.3.6.	Kryt	35
6.3.7.	Elektronika.....	35
6.3.8.	Software a firmware.....	35
7.	Sestavení.....	36
8.	Sestavená tiskárna.....	42
9.	Zhodnocení.....	47
10.	Použité zdroje	48

1. Úvod do 3D tisku

1.1. Co je to 3D tisk?

Než se dostaneme k samotné stavbě tiskárny, musíme si říci, co je vlastně 3D tisk.

Aditivní výroba neboli 3D tisk je proces výroby trojrozměrného, pevného objektu z digitálního modelu. 3D tisk je dosažen užitím aditivní výroby, kde je objekt tvořen pokládáním jednotlivých vrstev materiálu. 3D tisk je odlišný od tradičních výrobních procesů, které se většinou zakládají na odebrání materiálu. (7)

3D tiskárna přijme trojrozměrný počítačový model a vytvoří sérii průřezů, které se tisknou jeden na druhý, aby vytvořily výsledný 3D objekt. (7)

1.2. Stručná historie 3D tisku

Výraz 3D tisk byl poprvé použit v roce 1993 doktorandy Jimem Brendtem a Timem Andersonem z Massachusetts Institute of Technology (MIT), kteří přetvořili obyčejnou tiskárnu na zařízení, které hmotu natavilo a tvořilo jednotlivé vrstvy, díky čemuž vznikl 3D objekt. (8)

Za samotnou technologii stojí United States Department of Defense a Defense Advanced Research Projects Agency (DERPA). R. F. Housholder nechal v roce 1979 patentovat systém na tisk pevných objektů, vývoj byl ale předčasně ukončen. (8)

Roku 1980 vynalezl Hideo Kodama dvě technologie 3D tisku fotopolymerů. Do roku 1990 přidal dalších 50 patentů Bill Masters. Svým dílem přispěl také Carl Deckard, který ve spolupráci s DERPA vyvinul a patentoval systém pro tisk pevných objektů a následně založil společnost Desk Top Manufacturing. (8)

Opravdový průlom ale přišel v roce 1984, kdy si Charles W. Hull patentoval jednu z nejvyužívanějších a nejdůležitějších metod tisku, stereolitografii. O pár let později založil jednu z největších firem v tomto odvětví, 3D Systems. V roce 2014 držel již přes 60 patentů a byl zvolen do National Inventors Hall of Fame. (8)

Nejrozšířenější způsob 3D tisku nese název Fused Deposition Modeling (FDM), který si patentoval roku 1988 Scott Crump a jeho společnost Stratasys. (8)

V 90. letech začaly společnosti experimentovat s novými materiály, mezi které patří například kov, nebo i biologický materiál, jako buňky, tkán, nebo kosti. Největší rozšíření se ale odehrává až v současnosti, díky vypršení původních patentů. (8)

1.3. Současné vývojové trendy 3D tisku

Technologie 3D tisku je stále ještě mladá, což logicky vede k experimentování vedoucím maximálnímu využití této výrobní metody.

Největší úsilí je stále vyvíjeno na zvýšení přesnosti výroby a snížení nákladů, a to jak pořizovacích, tak i provozních. Technologie se stále hlouběji usazuje v průmyslu, kde některé firmy již vyrábí jednotlivé dílce pouze touto technologií a lze očekávat, že takové případy budou v budoucnosti přibývat.

Někteří odborníci, jdou ve svých očekáváním ještě mnohem dál. Například Bill Fane, bývalý produktový inženýr Weiser Lock, dokonce očekává, že se jednoho dne budou tisknout lidské orgány přímo z buněk pacientů, díky čemuž se nebudou muset podávat silné léky, které brání odmítnutí orgánu a domy se budou tisknout přímo z modelů, které si zákazník nechá sestavit na míru. (9)

2. Technologie 3D tisku

U všech druhů 3D tisku se vychází z počítačového modelu objektu, který software rozdělí na jednotlivé vrstvy, které se začínou jedna po druhé tisknout dle dané technologie.

Některé z používaných metod 3D tisku:

- SLS – Selective Laser Sintering

Zapékání práškového materiálu laserovým paprskem, při tloušťce vrstvy okolo 0,1 mm. Pořizovací cena je poměrně vysoká, což je kompenzováno nízkou cenou stavebního materiálu.

- SLA – Stereolithography Apparatus

Jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole, jedná se o nejstarší technologii 3D tisku, funguje na principu vytvrzování tekutého kompozitu laserovým paprskem.

- ZCORP

Prášek se nanáší v tenké vrstvě a je spojován pojivem vytlačovaným z tiskových hlav. Výsledný objekt je křehký a jeho povrch nerovný, proto vyžaduje další povrchovou úpravu. Jedná se o metodu, která dovoluje vytvoření barevných objektů.

- LOM – Laminated Object Manufacturing

Jednotlivé vrstvy jsou vyříznuty z plastu o tloušťce 0,165 mm a následně plošně přilepeny k vrstvě předchozí. Materiál potřebný pro tuto metodu je velice levný a výsledný objekt má vysoce kvalitní povrch vodorovných ploch. Objekt je po vytisknutí umístěn v kvádru velikosti jeho maximálních rozměrů, je zde tedy mnoho odpadního materiálu, který se musí odebrat mechanicky.

- FDM – Fused Deposition Modeling

Materiál je nataven a nanesen v tenké vrstvě o tloušťce zhruba 0,25 mm. Tato, téměř bezodpadová, metoda využívá materiál modelovací a podpůrný. Vyprodukovaný předmět má, po manuálním či vodním odstranění podpůrného materiálu, velmi hrubou strukturu ve srovnání s některými ostatními technologiemi.

- POLYJET MATRIX

Fotopolymer je, po vytlačení tiskovými hlavami, vytvrzován zářením UV lampy. I zde je používán, vedle materiálu modelovacího, také materiál podpůrný, jež se odstraňuje tlakovým vodním proudem. Výtisk má velice kvalitní povrch, ale jeho životnost je pouze 1 rok.

- MULTI JET MODELING

Tiskové hlavy vytlačují vosk modelovací a podpůrný, s různou teplotou tání. Výsledný objekt vzniká nahřátím.

- THERMOPLASTIC INKJET WITH MILLING

Vosk je vytlačován a následně horizontálně frézován. Tato forma tisku je velice přesná.

- DLP – Digital Light Processing

Technologie bezodpadová technologie spočívá v nasvícení modelované vrstvy UV zářením z projektoru. Vytištěný předmět má omezenou životnost.

3. DLP tiskárny

Jak již bylo řečeno, metoda Digital Light Processing je založena na nasvícení tekutého fotopolymeru UV zářením z projektoru, díky čemuž jsou nižší nároky na tiskárnu-nemusí mít tiskové hlavy, ani regulovat teplotu apod. Výhodou této metody je také její bezodpadovost, výjimkou jsou podpory pro tvarově náročnější objekty, které mají proměnlivou šířku, a proto musí být některé jejich části podepřené, abychom je mohli vytisknout.

Tiskárny tedy musí být složeny z projektoru, kádi na fotopolymer a pohyblivé soustavy s platformou. Pohyblivá soustava se posouvá po ose z, směr tisku záleží na provedení, které je popsáno v následující kapitole. Jako platforma slouží hliníková deska, na kterou se během procesu tisknutý objekt samovolně přichytí. Jelikož projekční vzdálenosti (vzdálenost, kdy je obraz z projektoru ostrý) většiny projektorů

jsou pro tyto potřeby příliš velké, používá se zrcadlo (případně více zrcadel), které se umístí mezi káď a projektor, díky čemuž tuto vzdálenost můžeme rozdělit do horizontálního i vertikálního směru a výsledné rozměry tiskárny jsou mnohem menší. Spodní strana kádi zpravidla nepřekračuje rozměry 200 x 200 mm, z čehož plyne nutnost zmenšit obraz přenášený z projektoru spojnou čočkou, která se umístí kamkoliv do dráhy paprsku, nejčastěji před čočku projektoru. Pokud není k tiskárně speciální software a čočka změní velikost obrazu, tak je třeba tuto modifikaci zohlednit při modelování. Pokud se při stavbě tiskárny použije projektor, který byl pro tuto věc vyroben, nemusí tiskárna obsahovat zrcadlo, ani čočku, avšak tyto projektory bývají řádově dražší. Při tisku projektor vyzařuje UV záření, proto je dobré tiskárnu opatřit průsvitným, nebo neprůhledným krytem.

Objekty vytisknuté touto metodou mají hladký povrch, na kterém není vidět členitost jednotlivých vrstev, mechanické vlastnosti jsou závislé na výběru fotopolymeru, na kterém je závislá i jejich omezená životnost (obvykle okolo 1 roku).

V tomto okamžiku se na trhu vyskytuje mnoho DLP tiskáren. Cena začíná zhruba na 10 000 Kč, tyto tiskárny jsou malé a nejsou příliš přesné, a dosahuje až k částce 200 000 Kč, takové tiskárny již dovolují tisknout větší předměty a jsou velmi přesné a rychlé. Mezi distributory DLP tiskáren patří například firma Autodesk, nebo FlashForge.

Pro příklad jsme zvolili tiskárnu FlashForge Hunter, která byla na trh uvedena v roce 2017, nyní se její cena pohybuje okolo 70 000 Kč.

Umožňuje tisk objektů o rozměrech maximálně 120 x 67,5 x 150 mm s rozlišením vrstvy 25–50 mikronů.



Obrázek 1 - Tiskárna FlashForge Hunter (10)

4. Provedení tiskáren a proces tisku

Momentálně se využívají 2 základní provedení zvaná Top Down a Bottom Up.

- Top Down – Shora dolů

V tomto provedení dopadá UV záření na vrchní stranu kádi, ve které se nachází platforma. Projektor začne vyzařovat první vrstvu, v této době je vrchní plocha platformy ponořena pod hladinou fotopolymery v hloubce jedné vrstvy, po daném čase, když je vrstva dostatečně nasvícena, se platforma posune směrem dolů, kde se opět na daný čas zastaví, fotopolymer zatvrdne, platforma se posune do hloubky 2 vrstev pod hladinu a celý proces se opakuje, dokud není vytvořen celý objekt.

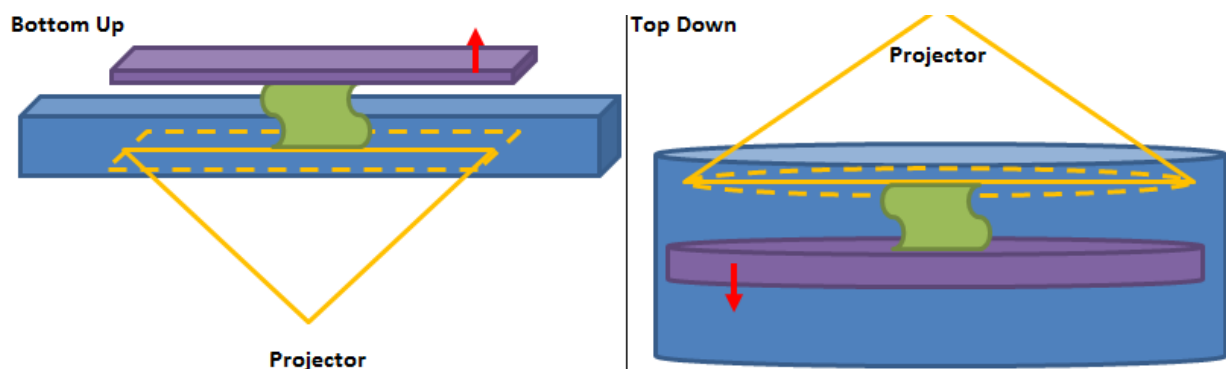
Toto provedení se dnes u průmyslově vyráběných tiskáren prakticky nevyskytuje, protože vytištěný předmět nedosahuje takové přesnosti, jako u provedení Bottom Up, výšku předmětu limituje hloubka kádě a je nutné mnohem větší množství fotopolymery v kádi.

- Bottom Up – Zdola nahoru

V tomto případě přichází záření ze spodní strany a platforma zajíždí ke dnu kádi.

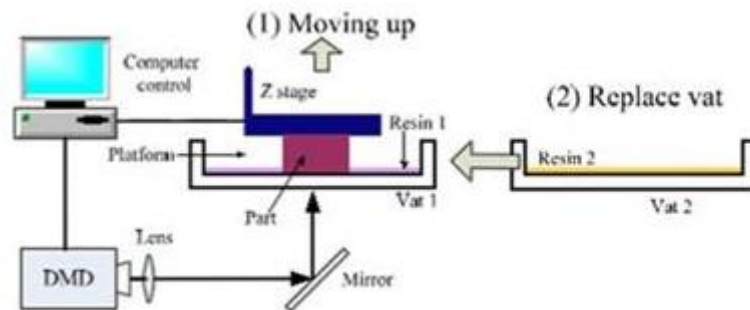
V momentu, kdy začne projektor vyzařovat první vrstvu, se spodní plocha platformy nachází ve vzdálenosti jedné vrstvy ode dna kádi, stejně jako u předchozí metody v tomto stavu zůstává, dokud není první vrstva dostatečně nasvícena a následně se posune, ale tentokrát směrem nahoru. Po uplynutí časového intervalu pro zatvrdnutí fotopolymery se přesune do vzdálenosti 2 vrstev ode dna a stejným způsobem postupuje, dokud se předmět nevytiskne.

Díky vyšší přesnosti se dnes používá výhradně toto provedení. Výška tištěného objektu je limitována pouze rozměry tiskárny, přesněji maximální výškou, kam může platforma dojet. Toto provedení je také ekonomičtější, jelikož v kádi stačí udržovat mnohem menší množství fotopolymery.



Obrázek 2 - rozdíl mezi provedením Bottom Up a Top Down (2)

Výše zmiňované časy pro nasvícení a zatvrdnutí fotopolymery i tloušťka vrstvy jsou parametry, které musíme zvolit podle používaného projektoru, zvoleného fotopolymery a požadované přesnosti.



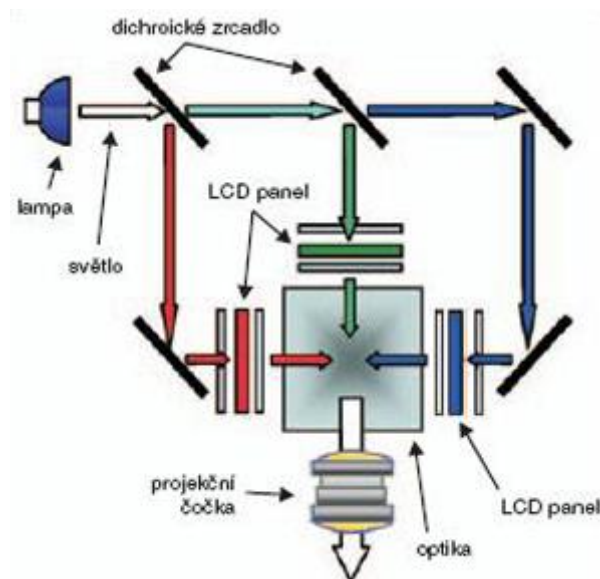
Obrázek 3 – příklad schéma DLP tiskárny-provedení Bottom Up (6)

5. Důležité komponenty DLP tiskárny

5.1. Projektor

Nejdůležitější součástí DLP 3D tiskárny je projektor. Na trhu se nejvíce objevují LCD (Liquid Crystal Display) a DLP (Digital Light Processing) projektory.

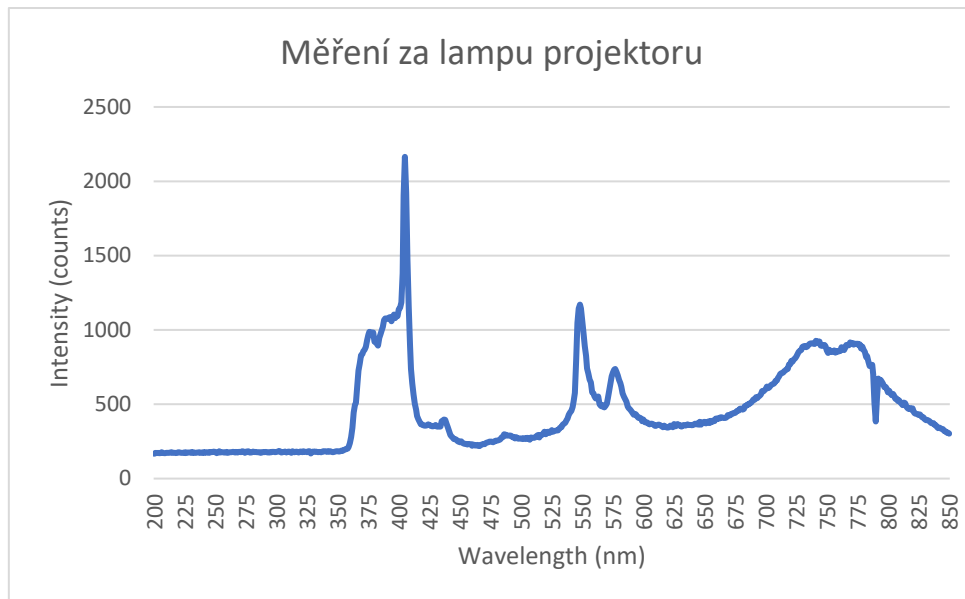
LCD projektory nejsou pro tento účel vhodné. Důvodem je LCD panel, kterým prochází světlo před promítnutím daného obrazu. Tento LCD panel obsahuje několik různých filtrů, přes které se nedostane dostatek UV záření, které je potřeba k zatvrdnutí fotopolymery. (3)



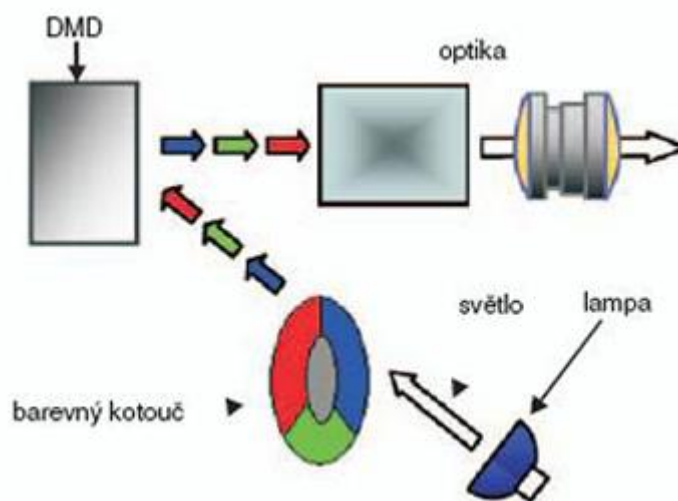
Obrázek 4 - schéma LCD projektoru (4)

O tom jsme se sami přesvědčili, když jsme pomocí spektrometru otestovali LCD projektor HITACHI CPX1. Nejprve jsme změřili rozsah záření na zdi, kam jsme promítali modrou obrazovku (která se používá při tisku). Zde jsme prakticky žádné UV záření (200 – 400 nm) nenašli, tak jsme zkusili změřit záření přímo u čočky, kde měření dopadlo stejně. Nakonec jsme z projektoru odmontovali kryt a zkusili změřit záření přímo za lampou projektoru, kde je intenzita UV záření dostatečná.





Zbývají tedy DLP projektory, které fungují na úplně jiném principu. Uvnitř projektoru se nachází čip DMD – Digital Micromirror Device. Čip (velký asi jako současné procesory) obsahuje tisíce zrcátek mikroskopických rozměrů, každé ze zrcátek zastupuje jeden odrazový bod (pixel). V DLP projektorech ve vyšší cenové relaci jsou takové čipy umístěny tři, takže každý pracuje pouze s jednou barevnou složkou. Mikroskopická zrcátka na čipech DMD se dokáží naklánět o přibližně 10°. Na čip se zrcátka nepřetržitě svítí projekční lampa, a naklánění zrcátek je řízeno elektronikou projektoru. Jakmile dostanou pokyn, nakloní se na jednu nebo na druhou stranu. Zrcátka otočená jedním směrem odrážejí dopadající paprsky na objektiv projektoru a přes něj světlo prochází na projekční plátno. Protože je zbylá část zrcátek nakloněna na druhou stranu, jsou paprsky na ně dopadající odraženy úplně jiným směrem – do pohlcovače světla. Tím je ovlivňován jas v jednotlivých bodech obrazu. Tímto způsobem promítání ale u projektorů s DMD čipem dostanete pouze černobílý obraz. Barvy vytváří rotující průsvitný kotouč umístěný mezi projekční lampou a čipem. Kotouč je nejčastěji rozdělen do čtyř výsečí – tři se základními barvami a jednou čírou. Velikost výsečí může být různá, ve většině případů je čirá výseč menší než zbývající tři. Díky otáčení kotouče dopadá přes výseč na čip v jednom okamžiku pouze světlo jedné barvy. Otáčením kotouče a současně natáčením zrcátek na čipu se na plátně objevuje obraz střídavě po jednotlivých barevných složkách v rychlosti, díky které je obraz lidským okem vnímán najednou a jako barevný. Aby výrobci dosáhli projektoru s co nejlepšími barvami, používají se v lepších projektorech tyto kotouče dva. Na jednom jsou výseče rozděleny přibližně po čtvrtinách, takže čirá část zabírá dostatečnou plochu a může zobrazit jasnou bílou. Druhý terč má na sobě výsečí šest a v nich se postupně střídají všechny tři základní barvy (každá je tam tedy dvakrát), proto se také terč označuje jako RGBRGB. Protože se výrobci snaží dovést barvy promítané projektory k dokonalosti, vytvořili i barevný terč rozdělený do tenkých barevných proužků, jež jsou spirálovitě zatočeny. (5)



Obrázek 5 – schéma DLP projektoru (4)

Když už víme, jaký typ projektoru vybrat, je nejdůležitějším parametrem rozlišení. Stručně řečeno rozlišení je počet pixelů, kterými je obraz promítán. Obvyklá nabídka rozlišení je 800x600, 1024x768, 1280x800, 1280x1024, nebo 1600x1200. Samozřejmě platí, že čím vyšší rozlišení, tím přesnější bude výsledný objekt. Důležité je také rozlišovat mezi nativním a podporovaným rozlišením. Podporované rozlišení je maximální rozlišení obrazu, který projektor dokáže promítnout, zatímco nativní je vlastní rozlišení projektoru, proto je třeba vybírat dle nativního rozlišení. Projektor, který má sloužit v 3D tiskárně musí mít rozlišení minimálně 1024x768, pokud potřebujeme objekty opravdu přesné, tak alespoň 1280x1024. (3)

Dalším důležitým faktorem je světelný tok projektoru. Světelný tok určuje, jak jasně projektor obraz zobrazí. Čím vyšší světelný tok bude, tím rychleji fotopolymer zatvrdne a bude moct pokračovat k tisku další vrstvy. Zde se nám nepodařilo dohledat minimální hodnotu, ale zjistili jsme, že při světelném toku 2300 lumen potřebuje každá vrstva na zatvrdnutí 10 sekund (jedná se spíše o příklad, záleží také na fotopolymeru). (3)

5.2. Fotopolymer

Výběr fotopolymeru je samozřejmě velice důležitý, protože z velké části určuje mechanické vlastnosti tištěných objektů. Na trhu se, stejně jako tiskáren, objevuje mnoho druhů ve velkém cenovém rozpětí, proto je ještě před nákupem zvážit, jaké vlastnosti (tvrdost apod.) má výsledný objekt mít.

Fotopolymer výrazně ovlivňuje přesnost 3D tisku. U tohoto typu tiskáren je vodorovná plocha (osy X a Y) kvalitativně a rozměrově ovlivněna rozlišením projektoru a plocha svislá (osa Z) nastavenou šířkou vrstvy. Klíčovým údajem fotopolymeru je koncentrace pigmentu, případně barviva. Pokud například budeme chtít tisknout s vysokým rozlišením ve vodorovné ploše (35-40 um), musíme

tomu přizpůsobit i tloušťku vrstvy (50 um a méně) a zároveň použít fotopolymer s vyšší koncentrací pigmentu, protože nižší by způsobil rozptyl světla. Naopak pokud budeme chtít tisknout rychle, nastavíme šířku vrstvy na vyšší hodnoty (75-100 um) a použijeme fotopolymer s nižším obsahem pigmentu. (11)

Dalším důležitým parametrem je vlnová délka. DLP projektory obvykle vyzařují světlo o vlnových délkách v rozmezí 400–680 nm a této hodnotě musíme přizpůsobit výběr fotopolymeru. Čím menší je vlnová délka, tím více energie foton přenáší. Výrobci fotopolymerů vybírají vhodné katalyzátory, které iniciují přechod z kapaliny na látku pevnou, na základě vlnové délky zdroje záření. V ideálním případě tedy změříme pomocí spektrometru rozsah vlnových délek, které projektor vyzařuje, poté se podíváme na web výrobce fotopolymeru, kde většinou lze dohledat údaje, ve kterých je uvedeno, při jakých vlnových délkách daný fotopolymer nejlépe zatvrdne. Zde je dobré hledat opravdu důkladně, protože pokud fotopolymer reaguje dobře například s vlnovou délkou 390 nm a použijeme ho s vlnovou délkou 405 nm, tak se výsledek může lišit. Pokud bude rozdíl vlnových délek větší, tak se to velmi výrazně podepíše na kvalitě vytištěného objektu, dokonce je možné, že nebude fungovat vůbec a fotopolymer vůbec nezatvrdne. Bohužel i pokud toto vše provedeme správně, nemusí výsledek vypadat podle našich představ, proto všichni větší výrobci nabízí asistenci, kdy pošleme mail s parametry své tiskárny a projektoru, oni na základě svých, samozřejmě mnohem přesnějších, metod dané parametry zpracují a doporučí vhodný výrobek ze své nabídky. Někteří dokonce nabízejí v případě nefunkčnosti vrácení peněz, nebo výměnu za jiný. (11)

Posledním kritériem, kterým se při výběru musíme řídit, je intenzita světla. Zde je to naštěstí mnohem jednodušší než u předchozích kritérií. V technologiích 3D tisku, kde se jako materiál využívá fotopolymer, se jako zdroj záření, vedle DLP projektorů, používá také laser a LCD/LED systémy. DLP projektory obecně produkují zhruba 20 mW/cm², což je řadí mezi tyto technologie (laser je silnější, LCD/LED systémy naopak slabší). Fotopolymery jsou speciálně navrženy pro každou technologii, proto je nutné kontrolovat, zda je daný produkt pro naši technologii vhodný. (11)

Pro příklad je přiložen obrázek se základními informacemi o fotopolymeru AMD-6 DLP od firmy Ameralabs, která patří k největším dodavatelům fotopolymerů pro 3D tisk na světě. Cena tohoto polymeru se pohybuje okolo 1000 Kč za balení o objemu 0,5 litru.

V České Republice jsou nejdostupnější fotopolymery od společnosti Fun To Do. Na jejich webu není příliš mnoho informací, ale mají pro tyto účely zřízenou mailovou adresu, kde odpovídají na dotazy, případně doporučují, který z jejich produktů je pro danou tiskárnu nejvhodnější.

Resin properties

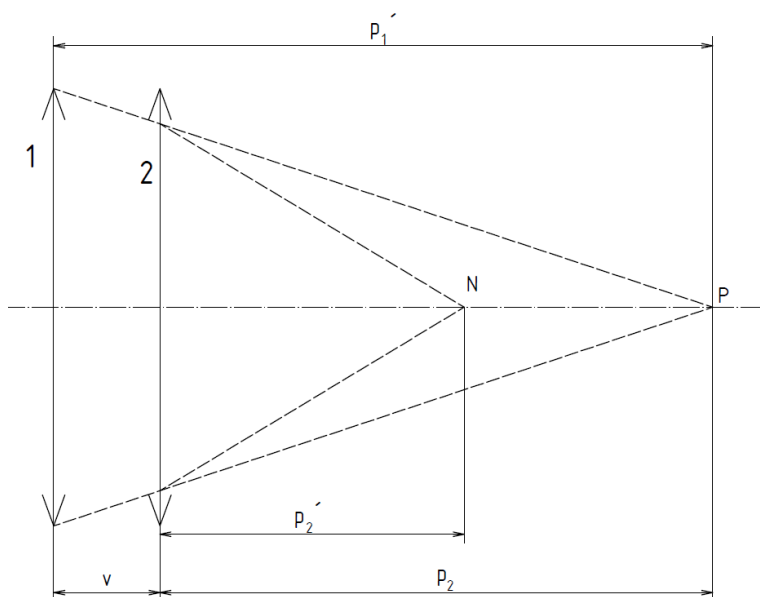
Viscosity at 25° C	180 – 200 cPs
Hardness ISO 868	85 Shore D
UV Lightsource Wavelength	365 – 420 nm
Shrinkage	less than 0,75%
Color	Crystal Black or Red Dye

Obrázek 6 - informační tabulka k fotopolymeru AMD6-DLP (12)

5.3. Čočka

Čočku je nutné použít, pokud je minimální projekční vzdálenost příliš velká. Pokud bychom čočku nepoužili, museli bychom vést světlo pomocí zrcadel celou projekční vzdálenost, což by podstatně zvětšilo rozměry celé tiskárny, případně bychom tuto vzdálenost nedodrželi, čímž bychom výrazně snížili přesnost tisku.

Protože chceme vzdálenost zmenšit, je nutné použít spojnou čočku, zkráceně spojku. Pro výběr správné si budeme muset spočítat potřebnou optickou mohutnost.



Obrázek 7 – Zjednodušené schéma použití spojné čočky

Ve schématu je čočka projektoru (1), spojná čočka (2), poloha obrazu před přidáním čočky (P), poloha obrazu po přidání čočky (N) a okótované důležité vzdálenosti.

Rozměry naznačené ve schématu využijeme pro výpočet polohy, kde čočku upevníme a potřebnou optickou mohutnost. Jelikož má tato veličina jednotu D, tedy dioptrie, což je vlastně m^{-1} , budeme dosazovat vzdálenosti v metrech.

$$\frac{1}{p_2'} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{f} = \varphi [D] \quad R1$$

Vzdálenost p_1' je minimální projekční vzdálenost a je pevně dána použitým projektorem, ostatní vzdálenosti můžeme měnit. Pro první výpočet je nejlepší zvolit v (například $v = 0,15 \text{ m}$), díky čemuž můžeme spočítat vzdálenost p_2 pomocí rovnice, kterou lze odvodit ze schématu.

$$p_2 = p_1' - v \quad R2$$

Hodnotu p_2' zvolíme podle konstrukčních možností tiskárny, tedy podle zbývajícího prostoru určenému k tomuto účelu.

Nyní máme všechny potřebné rozměry, které potřebujeme ke spočítání potřebné optické mohutnosti podle rovnice R1, takže do ní dosadíme. Výsledný počet potřebných dioptrií použijeme jako orientační výsledek. Podíváme se, jaké čočky máme k dispozici, popřípadě do nabídky obchodů a vybereme ty, které se k naší hodnotě nejvíce blíží. Poté provedeme výpočty znovu, s tím rozdílem, že začneme dosazením optické mohutnosti těchto čoček a budeme upravovat vzdálenosti tak, aby nám vyšly hodnoty, které jsme schopni realizovat.

Dále musíme zohlednit, jak se promítaný obraz zvětší, případně zmenší.

$$Z = -\frac{p_2'}{v} \quad R3$$

Na této rovnici vidíme, že velikost promítané vrstvy se nezmění, pokud je spojná čočka umístěna přesně mezi čočku projektoru a dno kádi, tedy $p_2' = v$. Pokud budeme chtít čočku umístit takto daleko od projektoru, tak je třeba počítat i s tím, že obraz už bude poměrně velký a budeme potřebovat čočku větších rozměrů.

Jelikož pro naše účely není podstatné, zda je obraz přímý, nebo převrácený, tak můžeme znaménko zanedbat. Při modelování budeme tedy muset veškeré rozměry vynásobit absolutní hodnotou zvětšení, tedy $|Z|$.

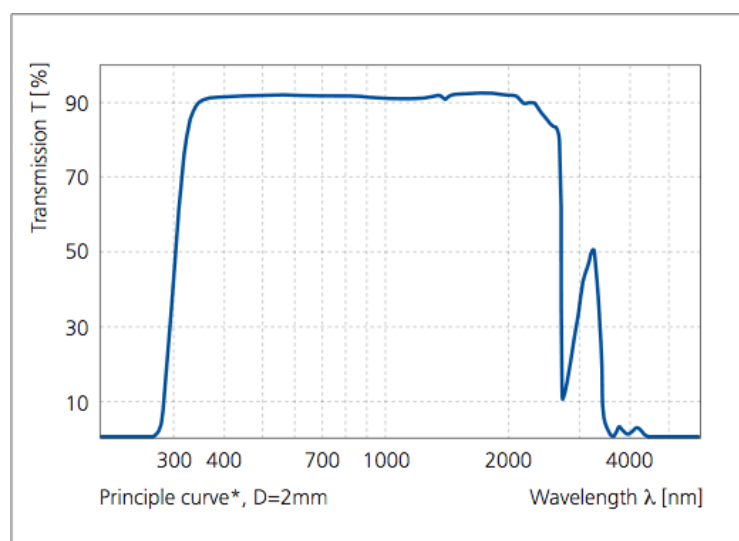
Technologie DLP tisknu funguje na principu UV záření, proto musíme vybrat čočku, která toto záření propouští v takové míře, aby nebyla ovlivněna kvalita tisku.

5.4. Kád'

Pokud bychom zvolili Top Down provedení, tak se kád'í prakticky nemusíme zabývat. V tomto provedení se může použít jakýkoliv materiál, který s fotopolymerem nereaguje, to znamená kov, či sklo. (3)

U Bottom Up verzi tiskárny je třeba vybírat materiál opatrněji. Zde musí světlo pojit přes dno a nepřilnavou vrstvu, a až poté se dostane k fotopolymeru. Bohužel většina materiálů absorbuje velké množství UV záření. V mnoha návodech na internetu lidé uvádějí jako ideální materiál na dno kád'í plexisklo. Využit plexisklo pro tento účel není dobrý nápad, protože může obsahovat změkčovadla, rozpouštědla, nebo jiné chemikálie, které se mohou začít uvolňovat při kontaktu s fotopolymerem, což způsobí změnu složení fotopolymeru v kád'í. S novým složením se mohou změnit vlastnosti látky, následkem čehož se změní i vlastnosti objektu, nebo dokonce nemusí vůbec dojít k vytvoření.

Nejvhodnějším dostupným materiálem je borosilikátové sklo, ideálně o tloušťce 0,7 milimetru. Bohužel se tento typ skla v požadované tloušťce se velice špatně shání, nicméně by měla vyhovovat i lépe dostupná tloušťka skla, tedy 2 až 3 milimetry. V případě, že není borosilikátové sklo k dispozici, se dá použít i obyčejné sklo o tloušťce 1 až 2 milimetry. (3)



Obrázek 8 - Propustnost borosilikátového skla o tloušťce 2 mm (13)

Na vrchní stranu dna kádi se také musí přidat nepřilnavá vrstva, aby během tisku nedocházelo k lepení vytvrzované vrstvy na skleněnou desku. V takovém případě by se vrstva mohla poškodit a tištěný objekt by byl znehodnocen. V DLP tiskárnách se nejčastěji vyskytuje Sylgard 184, díky dobré propustnosti UV záření. Vrstva tohoto elastomeru není trvalá, takže se po několika cyklech musí znovu nanášet, proto je dobré nanášet větší vrstvy (až 5 milimetrů). (3)

U bočních stěn není třeba dbát na propustnost UV záření, takže mohou být z libovolného, s fotopolymerem nereagujícího, materiálu. (3)

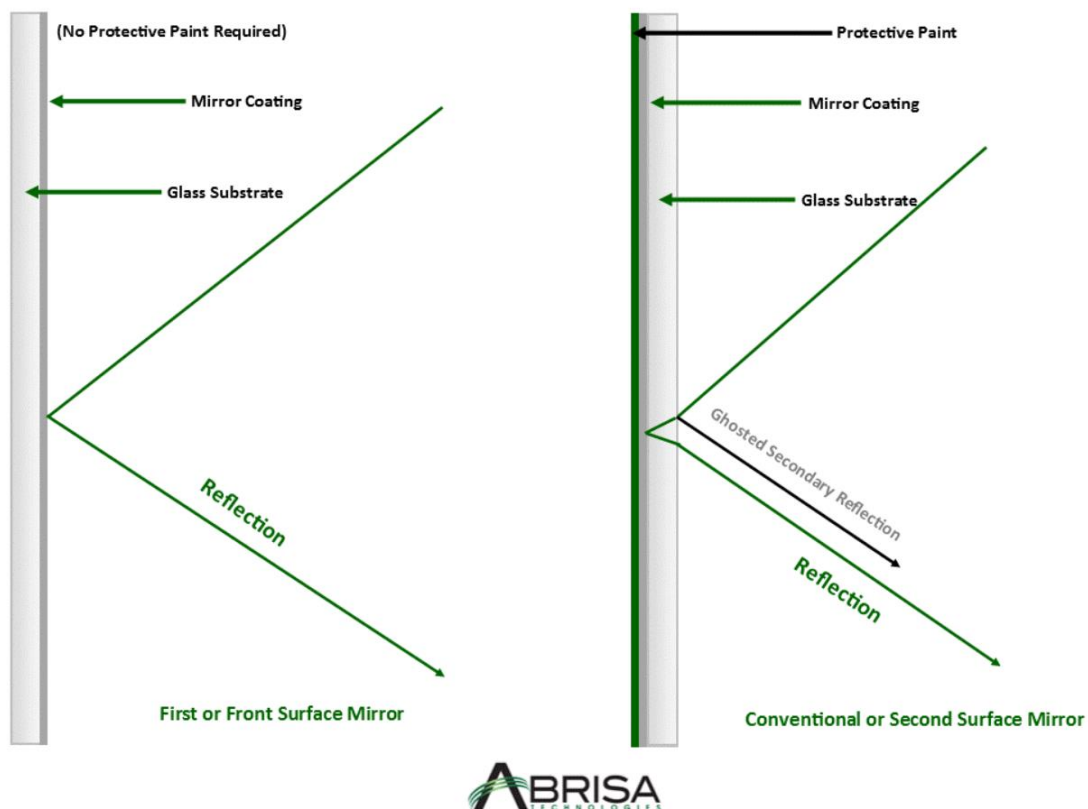
Jednotlivé stěny kádi poté slepíme, je třeba dbát na to, aby spojovací materiál vydržel namáhání a dobře těsnil.

5.5. Zrcadlo

Zrcadlo nemusíme použít, pokud umístíme projektor přímo pod/nad kád' (v závislosti na provedení), to ale většinou způsobí příliš velké rozměry tiskárny, zejména u Bottom Up provedení. (3)

Běžná zrcadla odráží světlo svojí druhou vrstvou a nazývají se second surface mirrors. Protože chceme zachovat co nejvyšší kvalitu obrazu, budeme muset použít first surface mirror, tedy zrcadlo, které odráží světlo první plochou.

V operacích požadujících vysokou přesnost mají second surface mirrors velkou nevýhodu. Přestože mají tyto zrcadla materiál odrážející světlo až na své druhé vrstvě, tak dochází k částečnému odrazu již od vrstvy první. Tomuto jevu se říká "ghosting effect". Kromě tohoto nežádaného jevu ztrácí světlo při průchodu sklem energii a vytváří lomený odraz, což zkresluje obraz. Abychom se tomuto jevu vyhnuli, použijeme first surface mirror, které odráží veškeré světlo již od své první vrstvy. Pro srovnání je dobré říci, že second surface mirrors běžně odráží 80 až 85 % světla, zatímco first surface mirrors 90 až 94 %. (14)



Obrázek 9 - Odraz světla pomocí first a second surface mirrors (14)

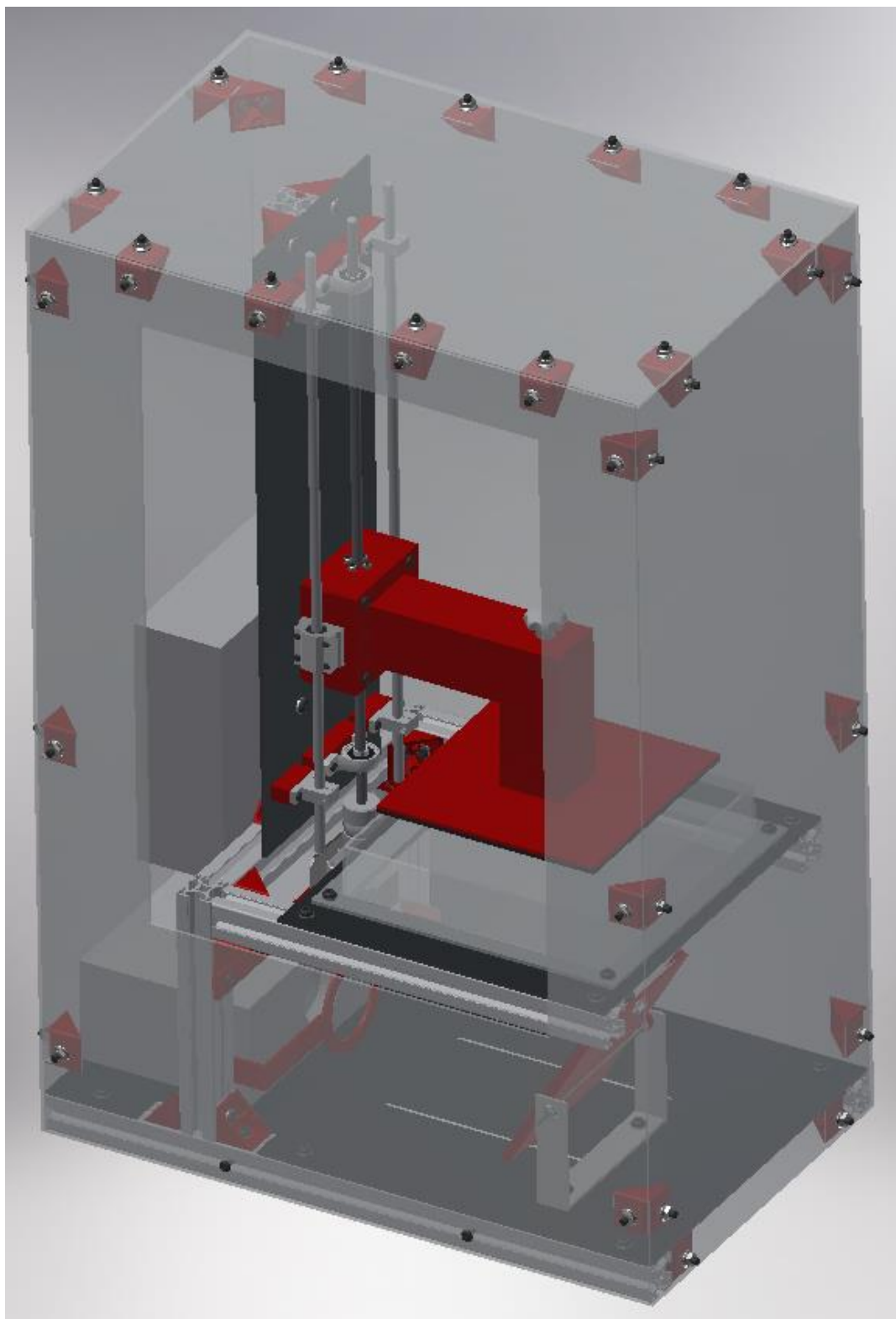
5.6. Pohyblivá soustava s platformou

Pohyblivá soustava u DLP tiskáren slouží k posunu platformy a prakticky určuje, jak přesný bude tisk ve svislém směru. Jako pohon se běžně užívá krokový motor s kroutícím momentem 0,2 až 0,5 Nm. Motor bývá spojen s trapézovou tyčí pomocí pružné spojky, na tyči je přes trapézovou matici přidělán domek, který propojuje tuto soustavu s platformou. Často bývají k domku připojeny hlazené tyče, které zajišťují, že se domek nebude samovolně otáčet. Propojení domku s hlazenými tyčemi a trapézové tyče s deskou se realizuje přes ložiskové domky. Samozřejmě lze zvolit i jiné provedení, důležité je, aby se platforma nechvěla a dokázala držet pevnou polohu.

Platforma slouží k přichycení tištěného objektu. Objekt se na platformu musí přichytit samovolně během tisku a musí na ní držet celou dobu, nicméně ho také musí být možné bez poškození sundat, proto je velice důležité zvolit správný materiál. Jednodušší je to opět při provedení Top Down, kde platformě výrazně pomáhá gravitační síla, u metody Bottom Up je naopak potřeba, aby se objekt na platformě udržel i přes gravitační sílu. Každý fotopolymer reaguje s každým materiálem trochu jiným způsobem, některé se ideálně přichycují k polykarbonátu, jiné k PVC. Obecně je nejbezpečnější použít hliník, který by měl být kompatibilní s většinou fotopolymerů.

6. Sestavovaná tiskárna

6.1. Model



Obrázek 10 – model sestavované tiskárny

6.2. Kusovník

SOUČÁST	POČET KUSŮ	CENA ZA KUS
hliníkový profil	1	360,00 Kč
spodní deska	1	265 Kč
horní deska	1	188 Kč
platforma	1	93 Kč
osa z	1	161 Kč
trapezový vodící šroub + matice + pružná spojka + 2x ložisko + krokový motor	1	600 Kč
projektor	1	3 000 Kč
čočka	1	0 Kč
držák čočky	1	0 Kč
úchyt zrcadla	1	0 Kč
stojan zrcadla	1	0 Kč
sklo	1	0 Kč
borosilikátové sklo	1	400 Kč
držák motoru	1	80 Kč
skříň na elektroniku	1	0 Kč
držáky hlazených tyčí	4	35 Kč
ložiskové domky	2	140 Kč
hlazené tyče	2	65 Kč
fotopolymer	1	1 820 Kč
sylgard184	1	0 Kč
nanesení 500nm Al na sklo 130x130	1	0 Kč
závitová tyč k zrcadlu	1	52 Kč
Arduino	1	0 Kč
Software	1	0 Kč
úhelník	30	0 Kč
různé podložky pro korekci	7	0 Kč
krabička na ose Z	1	0 Kč
šrouby ISO 7380 M6x16	60	0,90 Kč
šrouby ISO 7380 M6x12	60	0,80 Kč
šrouby ISO 7380 M4x30	15	1,10 Kč
šrouby ISO 7380 M3x12	10	0,30 Kč
šrouby ISO 7380 M3x30	10	1,80 Kč
matice DIN 6923 M6	130	0,35 Kč
matice DIN 6923 M4	15	0,25 Kč
matice DIN 6923 M3	22	0,25 Kč
podložka DIN EN ISO 7089 M6	60	0,15 Kč
podložka DIN EN ISO 7089 M3	20	0,15 Kč
matice DIN 934 M3	2	0,50 Kč
šroub s hvězdicovou hlavou	2	50 Kč
matice DIN 934 M6	2	0,70 Kč
SOUČET		7 877,65 Kč

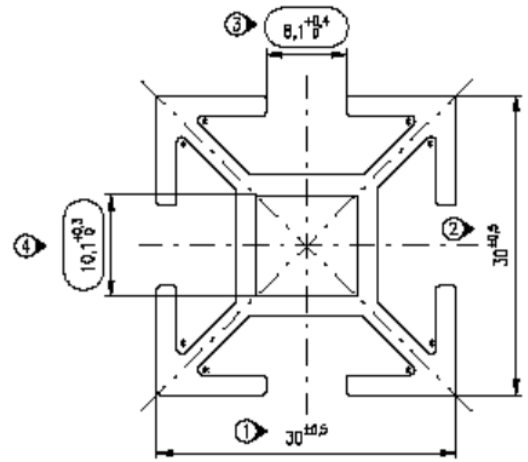
Obrázek 11- seznam potřebných součástí

Jedná se o předběžný návrh, tudíž lze předpokládat, že konečný seznam použitých komponent se bude mírně lišit. Součásti, u kterých je uvedena cena 0 Kč máme buďto k dispozici, nebo si je vytiskneme na jiné 3D tiskárně. Po vyčíslení nákladů jsme se rozhodli postavit pouze funkční konstrukci.

6.3. Jednotlivé komponenty

6.3.1. Tělo tiskárny

Původní plán byl sestavit tělo z hliníkových desek, které by byly spojeny šrouby. Nevýhody tohoto provedení ale převažují nad výhodami. Tato konstrukce by byla náročná jak konstrukčně, tak finančně, měla by vysokou hmotnost a její výroba by zabrala více času. Z těchto důvodů jsme nakonec zvolili konstrukci z hliníkových kombi stojek. Tato konstrukce má nízkou hmotnost, je méně náročná na finance a největší výhodou je snadná montáž a demontáž. Navíc díky možnosti upevnění šroubu kdekoliv po celé délce je snadnější upevnit různé držáky a stojany.



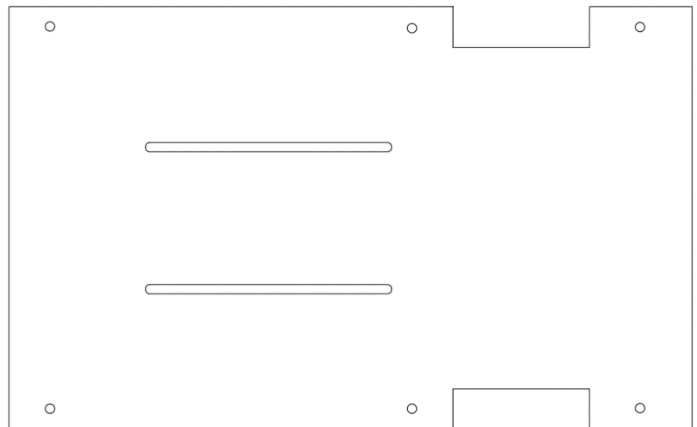
Obrázek 12 - výrobní výkres hliníkových kombi stojek

6.3.2. Spodní deska

Tato část tiskárny obsahuje spodní desku a na ní připevněné komponenty – projektor, čočku a zrcadlo.

6.3.2.1. Deska

I přesto, že tato deska drží důležité komponenty tiskárny – projektor a zrcadlo, tak na ni nejsou žádné speciální požadavky, protože na ni nebudou působit žádné velké síly. Z toho důvodu jsme nakonec zvolili místo dražšího hliníku levnější železo o šířce 3 milimetry. V desce je 6 děr pro šrouby, k připevnění k hliníkovým profilům, 2 výřezy pro umístění hliníkových profilů k ose Z a 2 drážky pro stojan zrcadla, díky nimž se dá měnit poloha zrcadla a 6 děr pro šrouby, přes které upevníme desku k hliníkovým profilům. Deska má rozměry 310 x 500 milimetrů.



Obrázek 13 - výkres spodní desky

6.3.2.2. Projektor

Při výběru je, vedle již zmíněných kritérií, dobré vybrat projektor, který má čočku uprostřed stěny. Pokud bychom vybrali projektor s čočkou na okraji, museli bychom tomu přizpůsobit stavbu těla tiskárny, což může vést ke zbytečnému zvětšování celé spodní desky, případně lze projektor upevnit ve svislé poloze. Takové provedení by však vyžadovalo vytvořit sofistikovaný systém uložení.

Projektor s čočkou uprostřed naproti tomu lze upevnit díky hliníkovým profilům snadno.

Při průzkumu trhu s DLP projektory jsme zjistili, že pokud budeme chtít zakoupit nový projektor, který splňuje veškeré nutné podmínky pro tisk, budeme muset investovat více než 10 000 Kč. Pokud bychom se rozhodli koupit projektor použitý, tak se při troše štěstí dokážeme vejít pod 3000 Kč, nicméně jsme se rozhodli, že jako prototyp sestavíme pouze konstrukci tiskárny a pro demonstraci funkčnosti použijeme projektor, který máme k dispozici – LCD projektor HITACHI CPX1.

6.3.2.3. Čočka

Jak bylo již zmíněno, tak je třeba koupit speciální čočku, která propouští UV záření. Pro naše demonstrační účely však stačí obyčejná spojná čočka, jejíž optickou mohutnost je třeba dopočítat.

Z tohoto důvodu jsme si změřili minimální projekční vzdálenost použitého projektoru, která činí 400 milimetrů. Vzdálenost mezi čočkou projektoru a čočkou spojnou volíme 20 mm. Projekční vzdálenost chceme zmenšit na hodnotu 200 mm.

Tedy:

$$p_1' = 0,4 \text{ m}$$
$$v = 0,02 \text{ m}$$
$$p_2' = 0,2 \text{ m}$$

Nyní dosadíme do R2 a spočítáme vzdálenost spojné čočky od vrchní plochy kádi.

$$p_2 = p_1' - v$$
$$p_2 = 0,4 - 0,02 = 0,38 \text{ m}$$

Tyto hodnoty můžeme dosadit do R1 a získáme orientační hodnotu optické mohutnosti.

$$\frac{1}{p_2'} - \frac{1}{p_2} = \varphi [D]$$
$$\varphi = \frac{1}{0,2} - \frac{1}{0,38} = 2,37 \text{ D}$$

Pro demonstrační účely je zbytečné kupovat novou spojnou čočku, proto jsme vybrali z čoček, které máme k dispozici. Nejblíže k této hodnotě byla nalezena čočka s optickou mohutností rovné 2 dioptriím.

Potřebujeme tedy pomocí R1 nalézt novou hodnotu vzdálenosti spojné čočky od vrchní strany kádě.

$$\frac{1}{p_2'} - \frac{1}{p_2} = \varphi$$

$$p_2 = \frac{1}{\frac{1}{p_2'} - \varphi} = p_2$$

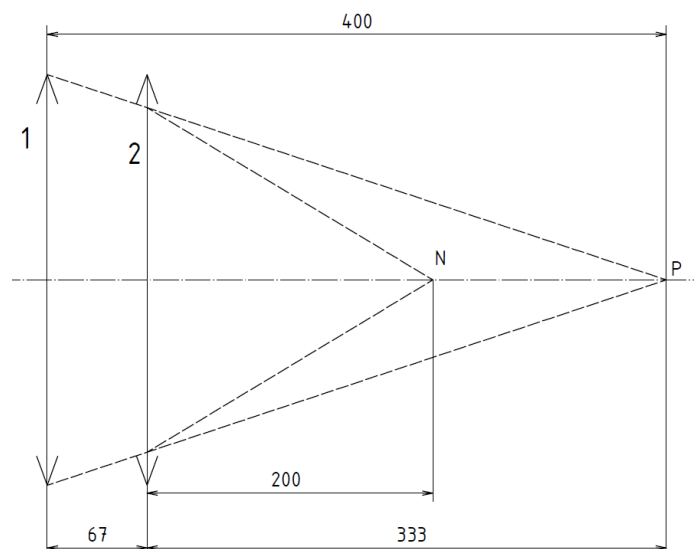
$$p_2 = \frac{1}{\frac{1}{0,2} - 2} = 0,333 \text{ m}$$

Výslednou hodnotu dosadíme do R2 a dopočítáme vzdálenost spojné čočky a čočky projektoru.

$$p_2 = p_1' - v$$

$$v = p_1' - p_2$$

$$v = 0,4 - 0,333 = 0,067 \text{ m}$$



Obrázek 14 - Vypočtené a naměřené vzdálenosti čoček

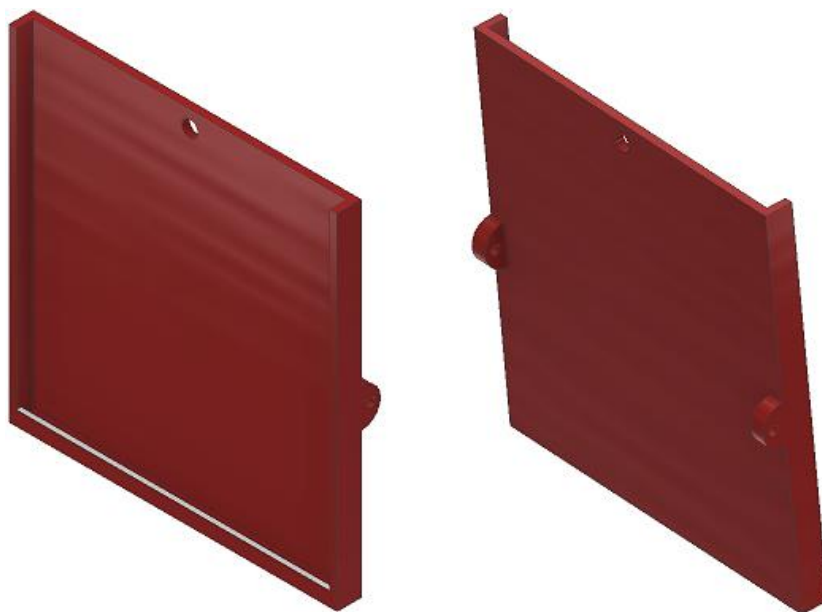
Upevnění čočky lze řešit držákem vytištěným na 3D tiskárně a uchycením mezi hliníkové profily, jak je naznačeno v modelu tiskárny. V tomto držáku může být uchycena například samotvrdnoucí modelovací hmotou, případně přilepena lepidlem. Samozřejmě lze stojan čočky připevnit i ke spodní desce, ale nevýhodou je nemožnost změny výšky, ve které je čočka umístěna. V případě stojanu s regulovatelnou výškou musíme počítat se složitější konstrukcí. Našem případě zvolíme pouze stojan ze samotvrdnoucí modelovací hmoty, který připevníme ke spodní desce, protože neznáme rozměry čočky, která se zde umístí, až bude tiskárna připravena k tisku.

6.3.2.4. Zrcadlo

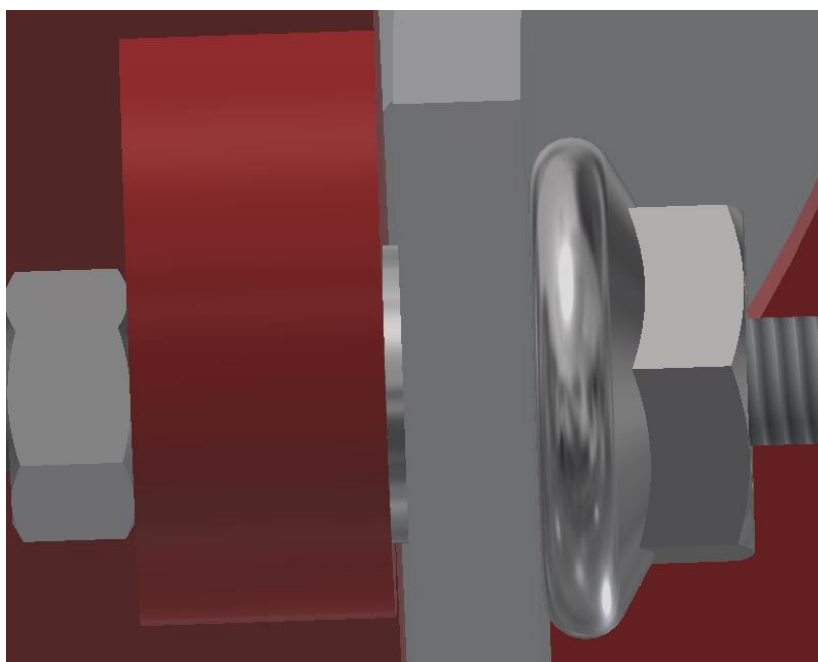
Stojan zrcadla bude tvořen z úzkého kovového pásku, který ohneme do tvaru hranatého U a vyvrtáme díry dole, kde bude stojan spojen s drážkami spodní desky pomocí šroubů a další 2 díry na okrajích pásku pro připevnění rámu.

Původní návrh byl vytisknout vymodelovaný rám zrcadla, do kterého bychom umístili z obou stran kovové závitové tyče do plastu, do kterých bychom dali závitové tyče, aby mohlo být zrcadlo upevněno pomocí matic v pevné poloze. Toto řešení se ukázalo zbytečně komplikované, zejména kvůli montáži závitové části do plastu. Místo toho jsme navrhli řešení, ve kterém jsou na rámu úchyty, ve kterých jsou díry o stejném průměru, jako ve stojanu. Do těchto děr vložíme na obou stranách šrouby a pomocí matic dotáhneme do pevné polohy. Zrcadlo se vloží do rámu, kde jsou připraveny drážky a následně se vrchní strana zajistí šroubem, který zabrání vypadnutí zrcadla.

Zrcadlo samotné musí být, jak bylo již popsáno, first surface mirror. Rozhodli jsme se použít zrcadlo rozměrech 130 x 130 mm. First surface mirrors jsou obecně dražší než obyčejná zrcadla, navíc námi navržený rozměr je poměrně velký a ještě hůře dostupný, proto si zrcadlo vyrobíme na přístroji, který máme k dispozici.



Obrázek 15 - Pohled na přední a zadní stranu vymodelovaného rámu



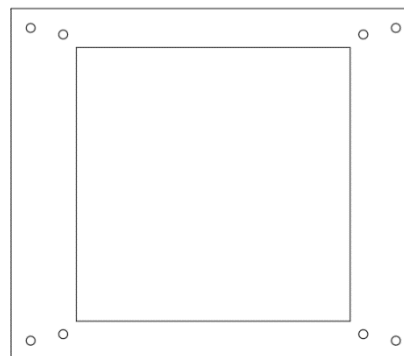
Obrázek 16 - Uložení rámu ve stojanu

6.3.3. Horní deska

V této části tiskárny se nachází deska, na které je připevněná kád'.

6.3.3.1. Deska

Na tuto desku nebude, stejně jako na tu ve spodní části, působit žádná síla, která by byla natolik velká, abychom s ní museli počítat při dimenzování desky, proto jsme, po rozhodnutí upustit od hliníku, zvolili jako materiál železo o tloušťce 3 milimetry. Uprostřed této desky je díra o velikosti a tvaru zvolené kád'. Dále se tu nachází 4 díry pro šrouby, které slouží k připevnění kád' k desce a další 4 díry pro šrouby, které připojí desku k hliníkovým profilům. Rozměry desky jsou 310 x 270 milimetrů



Obrázek 17 - Výkres horní desky

6.3.3.2. Kád'

Na spodní desku kád' použijeme z výše uvedených důvodů borosilikátové sklo. Protože v naší zvolených rozměrech, 250 x 250 milimetrů, jsme nedokázali najít finančně přívětivou na sklo o tloušťce menší než 1 milimetr, zvolili jsme tloušťku 3 milimetry. Boky kád' budou z obyčejného skla, které bude mít stejnou tloušťku, tedy 3 milimetry. Tyto desky k sobě připevníme vhodným silikonovým tmelem. Nepřilnavá vrstva se přidá, až bude tiskárna připravena na tisk.

6.3.4. Osa Z

I na této části se nachází deska, připevněná na hliníkový profil, a k ní upevněné komponenty – nosná aparatura, motor, vodící tyče a skříň na elektroniku.

6.3.4.1. Deska

Deska na ose Z nese větší množství součástí a také platformu s tištěným objektem, proto je třeba, aby měla deska dostatečnou nosnost a neprohýbala se. I přesto bude opět postačovat použít 3 milimetrovou desku ze železa. Na desce se nachází celkem 16 děr pro šrouby, z toho 4 slouží pro připevnění k hliníkovým profilům, 4 k připevnění ložiskových domků, ve kterých se bude nacházet trapézová tyč, pomocí zbylých 8 děr budou přidělané držáky hlazených tyčí. Deska má rozměry 164 x 500 milimetrů.



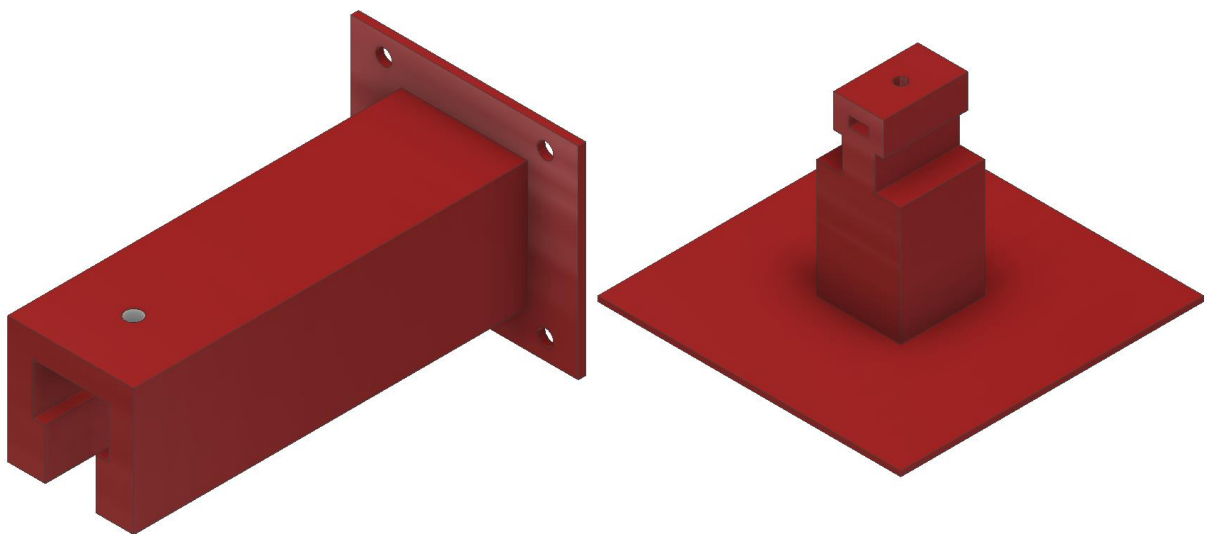
Obrázek 18 - Výkres desky na ose Z

6.3.4.2. Vodící tyče

Vodící tyče zajistí, že se krabíčka, ke které je připevněna platforma, nebude svévolně otáčet. Tyto tyče jsou k desce připevněny pomocí držáků hlazených tyčí a ke krabíčce pomocí lineárních vozíků, je třeba dbát na přesnost uložení, aby při upevnění do úchyty a vozíků nedocházelo k průhybu tyče, což by mohlo výrazně znesnadnit proces tisku. Délku tyče volíme stejnou, jako výšku desky, v našem případě tedy 500 milimetrů. Při vytváření modelu jsme zjistili, že normalizované držáky pro vodící tyče jsou pro naše potřeby příliš nízké, proto jsme vytvořili komponentu, kterou vložíme mezi držák a desku a tím dosáhneme požadované vzdálenosti.

6.3.4.3. Nosná aparatura

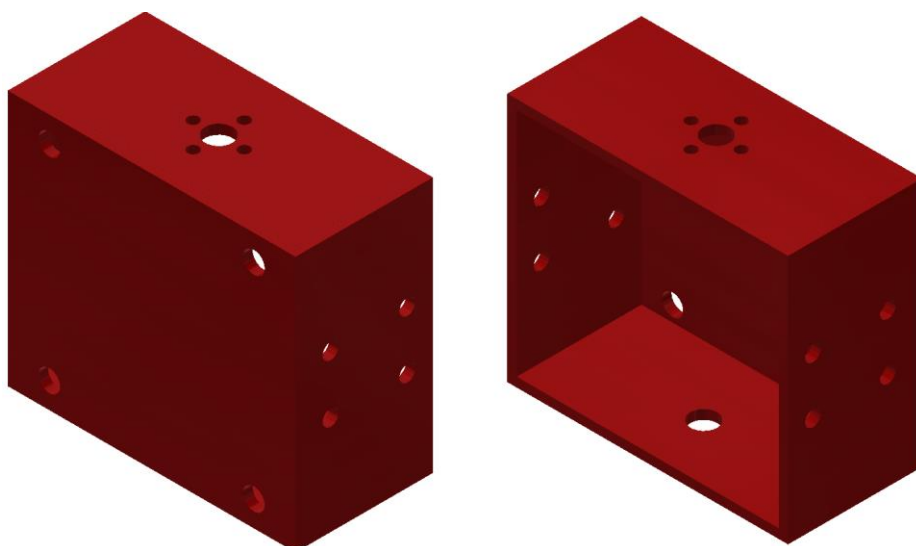
Nosná aparatura se skládá z ložiskových domků, které jsou přišroubovány k desce, do nichž vložíme trapézovou tyč, na které se nachází trapézová matice. K této matici je připevněna krabíčka, která má na bocích lineární vozíky, které ji spojují s vodícími tyčemi. Na přední stranu krabíčky je přišroubován díl, který spojuje krabíčku s platformou. Stejně jako u vodících tyčí jsme museli vytvořit komponentu, díky které dosáhneme potřebné vzdálenosti mezi ložiskovými domky a deskou. Abychom mohli vytisknutý předmět snadněji sundat z platformy, tak jsme tento díl rozdělili na dva, navzájem spojené T drážkou, ve spodní části jsme vytvořili díru pro vložení matice a v horním díru pro šroub. Důvodem je snaha dosažení co možná nejlepšího spojení, které zabrání nežádoucímu chvění během tisku. Spodní díl je zakončen deskou, na kterou bude přilepena platforma.



Obrázek 19 - Vrchní a spodní část spojovací součásti

Délku tyče jsme zvolili dle výšky desky na ose Z, tedy 500 milimetrů, a průměr 8 milimetrů.

Do krabičky, která nemá z konstrukčních důvodů zadní desku, je třeba udělat na vrchní a spodní straně díry pro trapézovou tyč, zejména je třeba si dát pozor, aby se hrana krabičky tyče nedotýkala tyče a nevytvářela tím odpor během tisku. Okolo horní díry pro trapézovou tyč je také třeba udělat díry pro šrouby, které spojí krabičku s trapézovou maticí. Na bocích jsou díry potřebné pro šrouby sloužící k připojení lineárních vozíků.



Obrázek 20 - Krabička

6.3.4.4. Motor

DLP tiskárny obecně nevyžadují od motoru nijak velký kroutící moment, proto jsme vybrali motor s kroutícím momentem 0,3Nm. Tento motor má přírubu NEMA17, podle čehož jsme vybrali držák, do kterého se motor pomocí 4 šroubů připevní. Tento držák připevníme na pruh z polykarbonátu o tloušťce 5 milimetrů, který bude připevněn k hliníkovým profilům. Hřídel krokového motoru bude s trapézovou tyčí spojena pomocí pružné spojky.



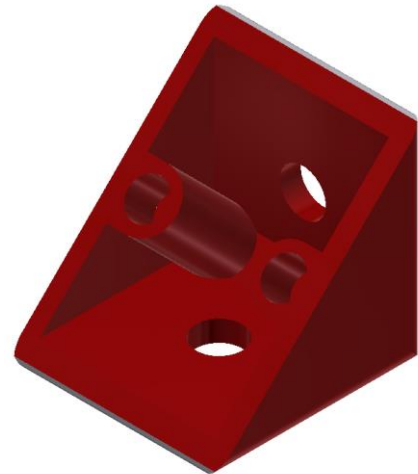
Obrázek 21 – Výkres polykarbonátového pruhu

6.3.4.5. Skříň na elektroniku

Skříň na elektroniku máme k dispozici, pouze je potřeba udělat díru do spodní strany, kam se umístí šroub, jehož pomocí ji připevníme k hliníkovému profilu, ze druhé strany, než je deska os Z.

6.3.5. Spojovací materiál

Ke spojení hliníkových profilů použijeme úhelníky, které si pro snížení nákladů vytiskneme. Tyto úhelníky umístíme do všech míst, kde se hliníkové profily připevňují k sobě v navzájem kolmé pozici a připevníme pomocí šroubů M6, podložky a matice s přírubou. K připojení desek k profilům použijeme totožné komponenty. Ostatní komponenty připevníme pomocí šroubů a matic o maximálních rozměrech, jaké nám dané díly dovolí.



Obrázek 22 - Úhelník

6.3.6. Kryt

Přesto, že kryt tiskárny vyrábět nebudeme, protože je to část spíše doplňková a k našemu prozatímnímu účelu nepotřebná, uvedeme zde několik druhů provedení, protože během tisku tiskárna vyzařuje pro oči nepříjemné UV záření.

Pokud bychom chtěli elegantní řešení a nevadily nám vyšší náklady, zvolili bychom kompletně celý kryt z oranžového nebo červeného plexiskla, kde by jednotlivé desky byly spojeny, stejně jako profily, pomocí úhelníků, a nakonec by byl celý kryt připevněn ke spodním hliníkovým profilům pomocí šroubů. Pokud bychom chtěli stejně funkční, ale levnější kryt, můžeme zvolit jako materiál na jednotlivé stěny desky z dřevotřísky, nebo prakticky jakéhokoliv neprůsvitného, nebo neprůhledného materiálu.

Ať už bude kryt z čehokoliv, tak se v desce naproti T drážce musí vyhotovit díra, do které se pomocí pantů přidělají dveře, které mohou být také z jakéhokoliv neprůsvitného, nebo neprůhledného materiálu, protože stav tisku uvidíme na počítači, takže není nutné vidět skrz. Na opačnou stranu dveří umístíme rukojeť a pomocí magnetů zajistíme, aby dveře držely v zavřené poloze.

6.3.7. Elektronika

Ke správnému fungování tiskárny je nezbytné správné zapojení elektronických součástí, které, s pomocí firmwaru a softwaru, budou posouvat platformou. K počítači připojíme pomocí USB kabelu desku Arduino Mega 2560, ke které připojíme ovladač krokového motoru, do kterého následně připojíme ještě laboratorní zdroj a samotný krokový motor. Ovladačů krokového motoru máme k dispozici několik, proto se pro přesný typ rozhodneme až během konstrukce, kde budeme moci vybrat ten, který bude fungovat nejlépe.

6.3.8. Software a firmware

Když je elektronika zapojena správně, je čas přidat firmware a software, aby mezi jednotlivými komponentami mohla probíhat komunikace.

Jelikož se na internetu objevuje osvědčený firmware pro ovládání krokových motorů, tak je zbytečné vytvářet další, stačí současný poupravit pro naše potřeby. Jedná se o open source firmware Marlin, který se pro potřeby 3D tiskáren používá nejčastěji. Tento firmware ovládá krokový motor za použití G-kódu.

Mnohem více možností se otevírá při výběru softwaru. Zapotřebí je tzv. slicer, který vymodelovaný objekt rozdělí na jednotlivé vrstvy a následně program, který posílá pokyny přímo ke krokovému motoru. Nám se podařilo najít software, který zvládne obojí. Jedná se také o open source projekt, nazývá se CreationWorkshop a je dostupný v několika verzích, my použijeme verzi 1.0.0.75. Tento program jsme zvolili z několika důvodů, je přehledný, veškeré parametry se dají snadno změnit

a navíc je zde extrémně jednoduché přidat k tvarově složitějším objektům podpory, které zajistí bezproblémový tisk.

7. Sestavení

Po návrhu, výrobě a zakoupení všech potřebných komponent se můžeme konečně pustit do samotné konstrukce tiskárny.

Začali jsme s tělem tiskárny a postupovali dle vypracovaného počítačového modelu. Nejprve jsme se pokusili přidělat spodní desku k hliníkovým profilům. Zde se objevil první problém, a to že se bohužel nevešli matice s límcem do hliníkových profilů, protože se jejich rozměry mírně lišily od CAD modelů, které byly použity v modelu. Naštěstí jsme zjistili, že lze použít i matice obyčejné. Poté již postupovalo sestavování těla tiskárny bez problému.

Následně jsme se rozhodli slepit jednotlivé desky kádi k sobě. Jako spodní desku kádi jsme museli použít obyčejné sklo, protože borosilikátové sklo dorazilo zničené a bylo nutné požádat o reklamaci, která se sice zdařila, nicméně sklo by nepřišlo včas. Z tohoto důvodu jsme k sobě slepili pouze stěny kádi, za použití silikonového tmelu, který lze dle výrobce použít i na sklo a dobře těsní. Následně jsme spodní stranu kádi přišroubovali k horní desce, slepené stěny jsme nechali několik dní zatvrdnout a následně je položili na spodní stěnu.

Poté jsme chtěli připevnit rám zrcadla ke spodní desce. Nejprve jsme našli tenký hliníkový proužek, do kterého jsme vyvrtali potřebné díry a všechny nutné komponenty spojili. Tento proužek není v konečné verzi tiskárny nejlepší řešení, nicméně zatím neznáme přesnou výšku, ve které bude muset zrcadlo být, protože nemáme k dispozici projektor pro tisk, proto nemá význam v této fázi vytvářet nic složitějšího. Ukázalo se, že navržená tloušťka připevňovací části rámu byla navržena příliš tenká a po dotažení šroubů, aby zrcadlo drželo ve stálé poloze se odlomila, proto jsme v modelu rámu změnili tuto tloušťku z původních 3 milimetrů na 6 a díl znovu vytiskli.

Nyní přišel čas přidělat příslušné komponenty na osu Z. Zde jsme si hned všimli, že držáky hlazených tyčí neodpovídají rozměrům CAD modelů, šrouby v jiných polohách, než jsme předpokládali, a tak jsme zvolili nejrychlejší cestu k nápravě a tyto držáky si vytiskli z plastu na 3D tiskárně. Dále jsme museli nechat osoustružit trapézovou tyč, jelikož měla závit po celé délce a ačkoliv byla zakoupena v setu i pružná spojka, tak jsme ji museli vyměnit za jinou, kvůli nevyhovujícím rozměrům. Po těchto úpravách byly již všechny komponenty v pořádku a byly připevněny dle modelu.

Před připevněním T drážky ke skříňce jsme se pokusili vložit do spodní části matice, nicméně se nám nepodařilo oddělit veškerý přídavný materiál, který zde byl vytvořen během tisku, a proto zde nebyl dostatečný prostor. Nicméně se podařilo vytvořit závit přímo v plastu, tudíž matice není potřeba. Nakonec jsme přilepili platformu na spodní část T drážky pomocí stejného silikonového tmelu, který jsme použili pro slepení kádi.

V této fázi jsme zjistili, že vytištěné plastové úhelníky neudrží horní desku ve vodorovné poloze a dochází zde k poměrně velkému naklonění, proto jsme úhelníky držící tuto část tiskárny museli odmontovat a nainstalovat místo nich úhelníky kovové. Podobně jsme byli nuceni postupovat i u úhelníku držících desku na ose Z, kde úhelníky nedokázaly udržet desku tentokrát ve svislé poloze, a tak byly nahrazeny úhelníky kovovými. Abychom měli jistotu, že horní deska bude ve vodorovné poloze, tak jsme mezi profily, které drží horní desku, a spodní desku vložili další hliníkové profily.

Poslední komponentou, kterou bylo třeba připevnit k ose Z byla krabička na elektroniku, do které jsme pomocí pájky vytvořili otvor pro šroub a připevnili na spodní část hliníkového profilu, naproti desce osy Z.

Nyní nastal čas vytvoření first surface zrcadla, pomocí vakuové napařovačky.

Před zahájením procesu je třeba sklo důkladně očistit, jelikož případné nečistoty by způsobily znehodnocení výsledného zrcadla.

Poté se sklo umístí do disku, který má pro tyto účely několik šablon, protože vrstva se napařuje na spodní plochu objektu. Pro námi zvolené rozměry zrcadla zde však šablona není, proto jsme museli sklo připevnit na spodní stranu disku pomocí oboustranné lepicí pásky. U toho kroku je třeba zvýšená opatrnost, aby se sklo na disku udrželo, protože v případě pádu nehrozí pouze zkažený proces, ale také zničení skla.

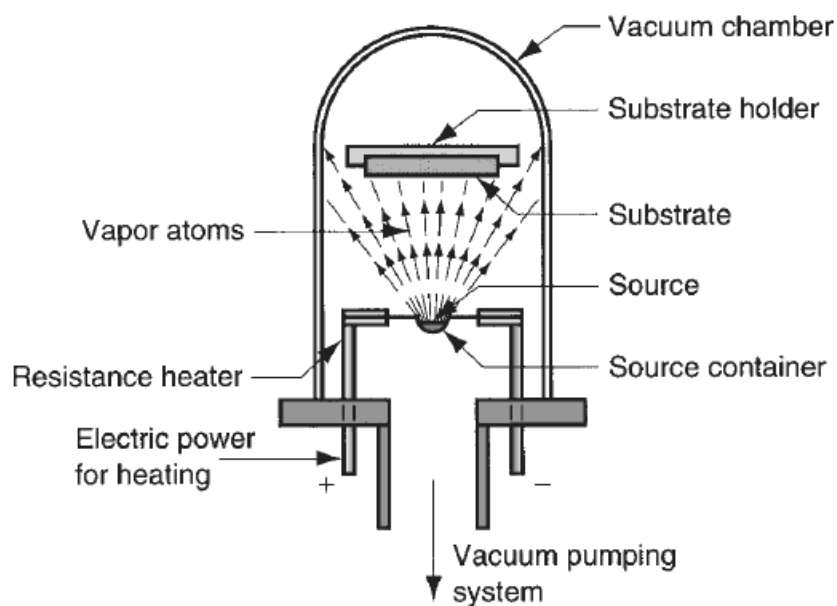
Po vložení disku do příslušného stojanu v horní části napařovací komory je třeba připravit materiál, který bude na sklo napařen, v našem případě tedy hliník. Pro vytvoření tenké vrstvy zrcadla jsme použili 4 kusy hliníkového drátu o průměru 2 milimetry a délce 25 milimetrů. Po očištění se dráty nejdříve přeloží napůl a následně se ohnou do tvaru U. Takto ohnuté dráty jsme zavěsili na tyče, které se během procesu nahřejí a způsobí jejich vypařování.

Následně jsme na tuto komoru nasadili kopuli a zkontrolovali, zda je ve všech místech řádně utěsněna. Následně jsme pomocí přístrojové desky vytvořili v komoře vakuum, které umožňuje rovnoměrné napařování hliníku v rámci celé kopule. Po vytvoření vakua jsme provedli ozáření plazmou pro lepší přilnutí vrstev. Poté konečně došlo na samotné napařování, během které se hliník začal tavit

a rovnoměrně rozlézat po celé kopuli. Když byl hliník již kompletně nanesen a tento proces byl úspěšně dokončen, tak jsme zdroj tepla vypnuli a několik dalších minut jsme čekali, než dojde k vyrovnání tlaku a teploty s okolím, protože náhlá změna by mohla vést k porušení nanesené vrstvy a znehodnocení vytvořeného zrcadla.

Vyrobené zrcadlo jsme očistili a zabalili do papíru, aby nedošlo k jeho poškrábání.

Obvykle se na vrstvu hliníku nanáší ještě ochranná vrstva ve formě tenké vrstvy MgF_2 , ale protože se nám bohužel nepodařilo zjistit potřebné technické parametry, které jsou nezbytné pro uskutečnění procesu, tak použijeme zrcadlo bez této vrstvy.

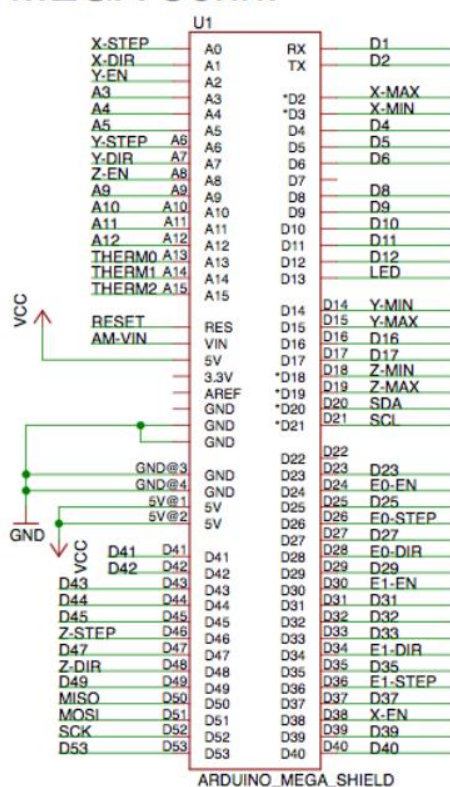


Obrázek 23 - Schéma výroby zrcadla (15)

Následně jsme se začali zabývat zapojením a zprovozněním elektroniky tiskárny. K zajištění správné funkce bylo nutné firmware Marlin trochu poupravit. Jelikož tento firmware slouží i k ovládnání více motorů na více osách, je nutné tuto část upravit pro náš případ, tedy jeden motor na ose Z, dále je třeba přizpůsobit maximální a minimální dojezd motoru, tedy minimální a maximální výšku, do které se dostane platforma. Takto upravený program následně přes software Arduino vložíme do desky Arduino Mega 2560.

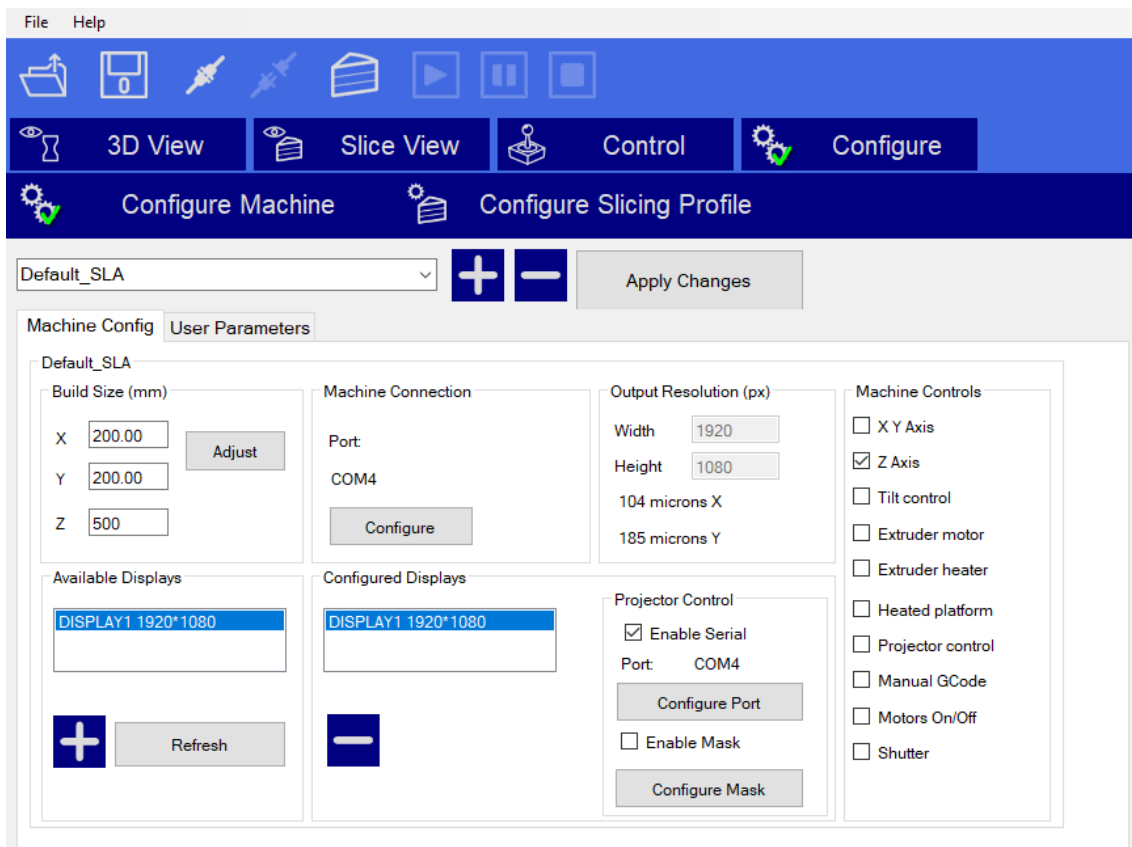
Abychom si ověřili, že firmware funguje tak, jak má, bylo nutné připojit přes ovladač krokového motoru také motor. Jako ovladač jsme nakonec zvolili DRV8825 a pomocí nalezených schémat jsme ho zapojili.

MEGA Conn.

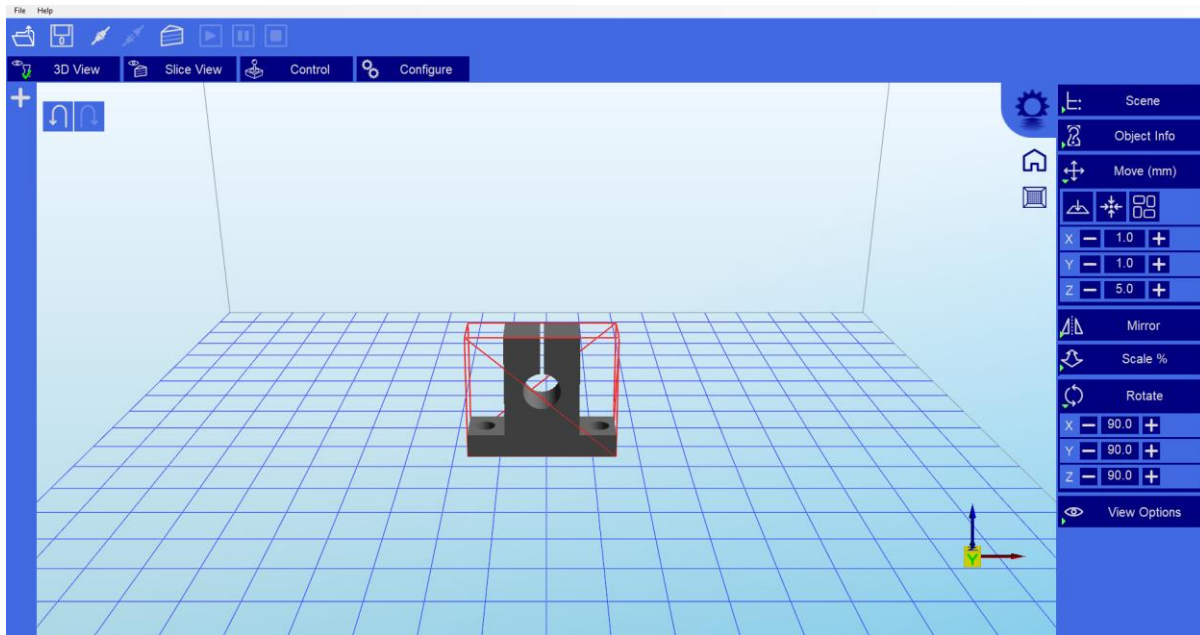


Obrázek 24 - Schéma pro zapojení elektroniky (16)

Na řadu přišla instalace softwaru CreationWorkshop, která probíhá prostým extrahováním staženého souboru. Program byl po tomto kroku připraven ke spuštění, po kterém jsme přešli do záložky Configure – Configure Machine. Zde jsme klikli na tlačítko Configure v okénku Machine Connection, kde po kliknutí na Refresh program sám rozpozná, ve kterém portu se Arduino nachází a vybere ho, my už vše pouze potvrdili tlačítkem Ok. Zbývalo už pouze v pravé části vybrat, co vše chceme programem ovládat, což je v našem případě pouze Z Axis a nakonec kliknout na tlačítko Connect v horní části obrazovky. Nyní byl program propojen s Arduinem a začal ovládat krokový motor, o čemž se dá kdykoliv přesvědčit pomocí manuálního otočení motoru v sekci Control. Před tiskem bylo nutné také upravit údaje v sekci Configure Slicing Machine, kde bylo nutno upravit časy v jednotlivých polohách a tloušťku jedné vrstvy. Jako vzorový model pro tisk jsme zvolili držák hlazené tyče, který byl použit při konstrukci tiskárny, který jsme do programu vložili, upravili jeho polohu v souřadném systému a následně rozdělili na jednotlivé vrstvy funkcí Slice.



Obrázek 25 - Nastavování programu CreationWorkshop



Obrázek 26 - Pohled na tištěný objekt v programu CreationWorkshop

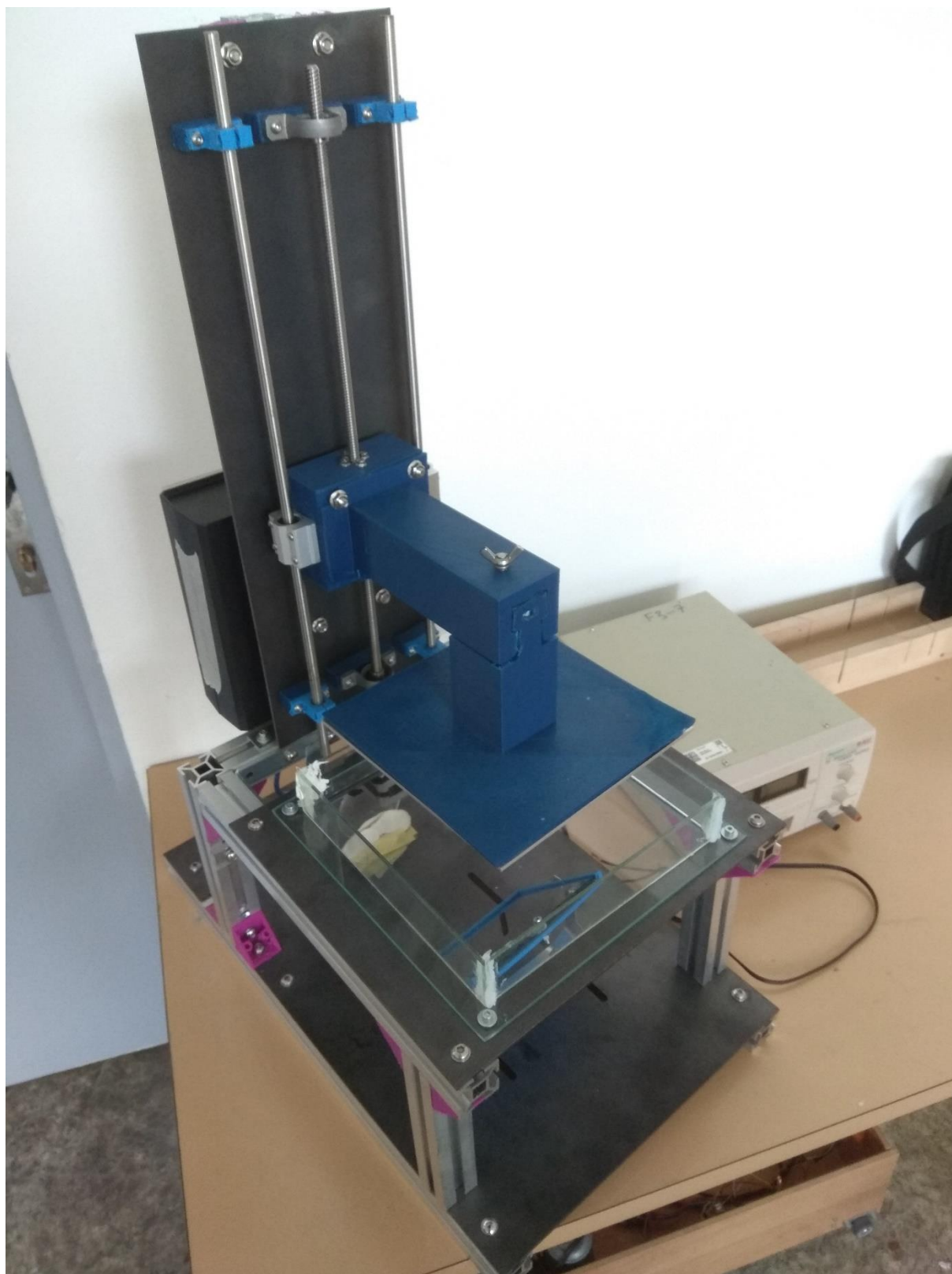
V momentě kdy jsme měli vše správně nastaveno a spojeno se obrazovce počítače začali promítat jednotlivé vrstvy (po připojení projektoru samozřejmě i na něm) a platforma se dle toho pohybovala po svislé ose.

Zbývalo už pouze vymodelovat provizorní stojan čočky ze samotvrdnoucí modelovací hmoty, kterou jsme připevnili ke spodní desce a do horní části vložili čočku.

Jelikož konstrukce byla navržena na projektor, který má čočku uprostřed stěny, tak jsme museli projektor položit za hliníkové profily. Z toho plyne, že je projektor příliš daleko od zrcadla a musíme použít jiné vzdálenosti čoček, které jsme zjistili experimentálně.

Při výběru projektoru pro tisk se musí dbát na to, aby bylo možné projektor umístit mezi hliníkové profily a čočka byla proti zrcadlu.

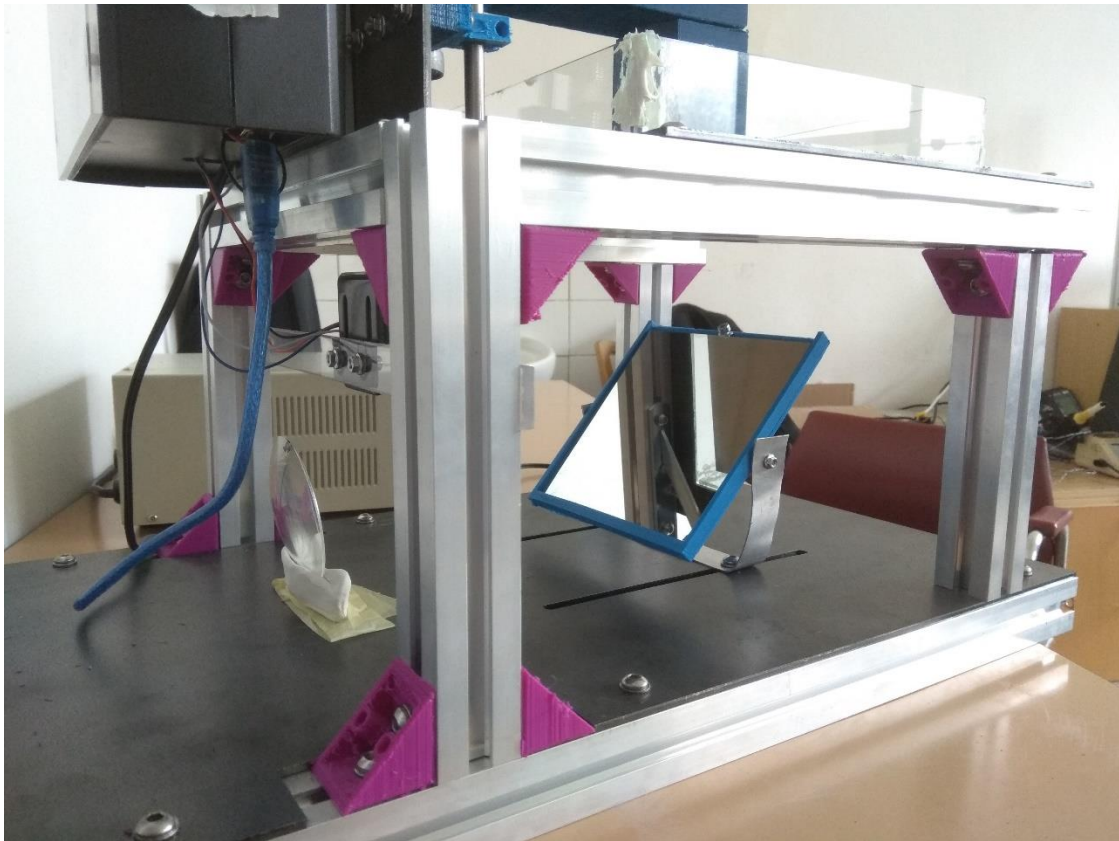
8. Sestavená tiskárna



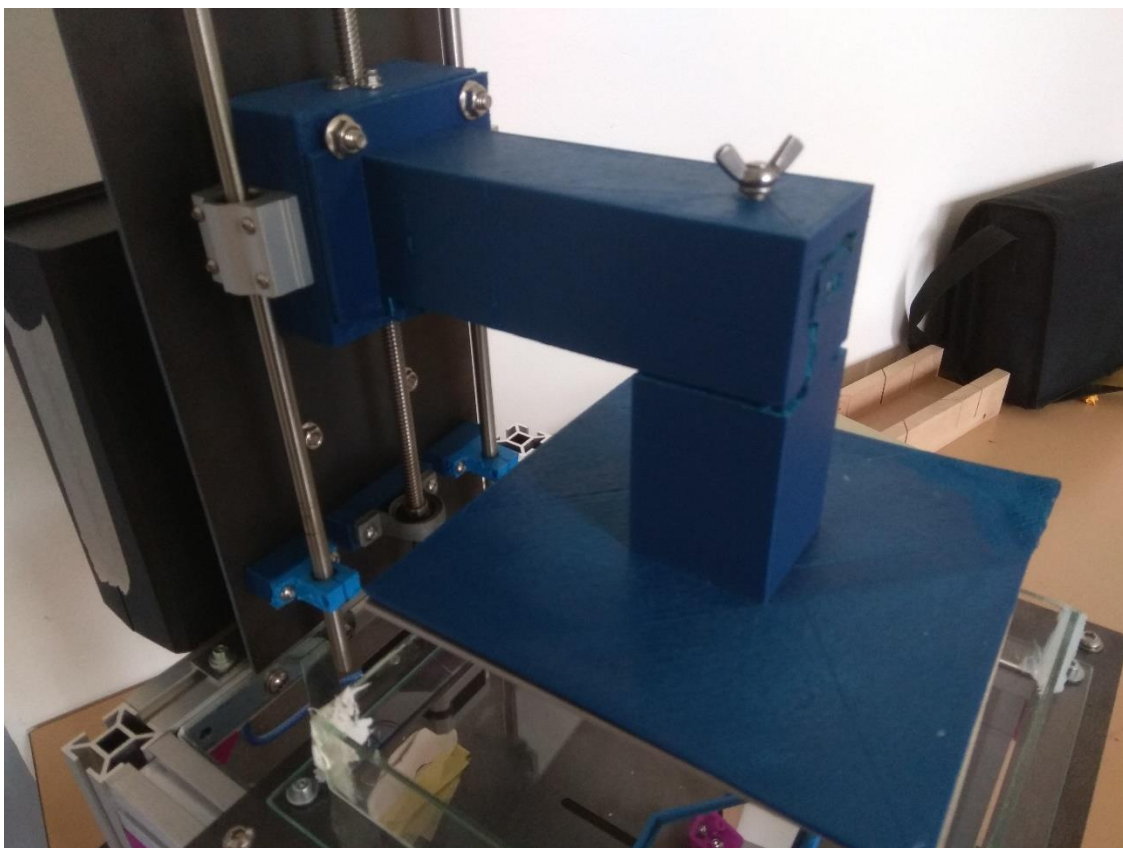
Obrázek 27 - Přední část tiskárny



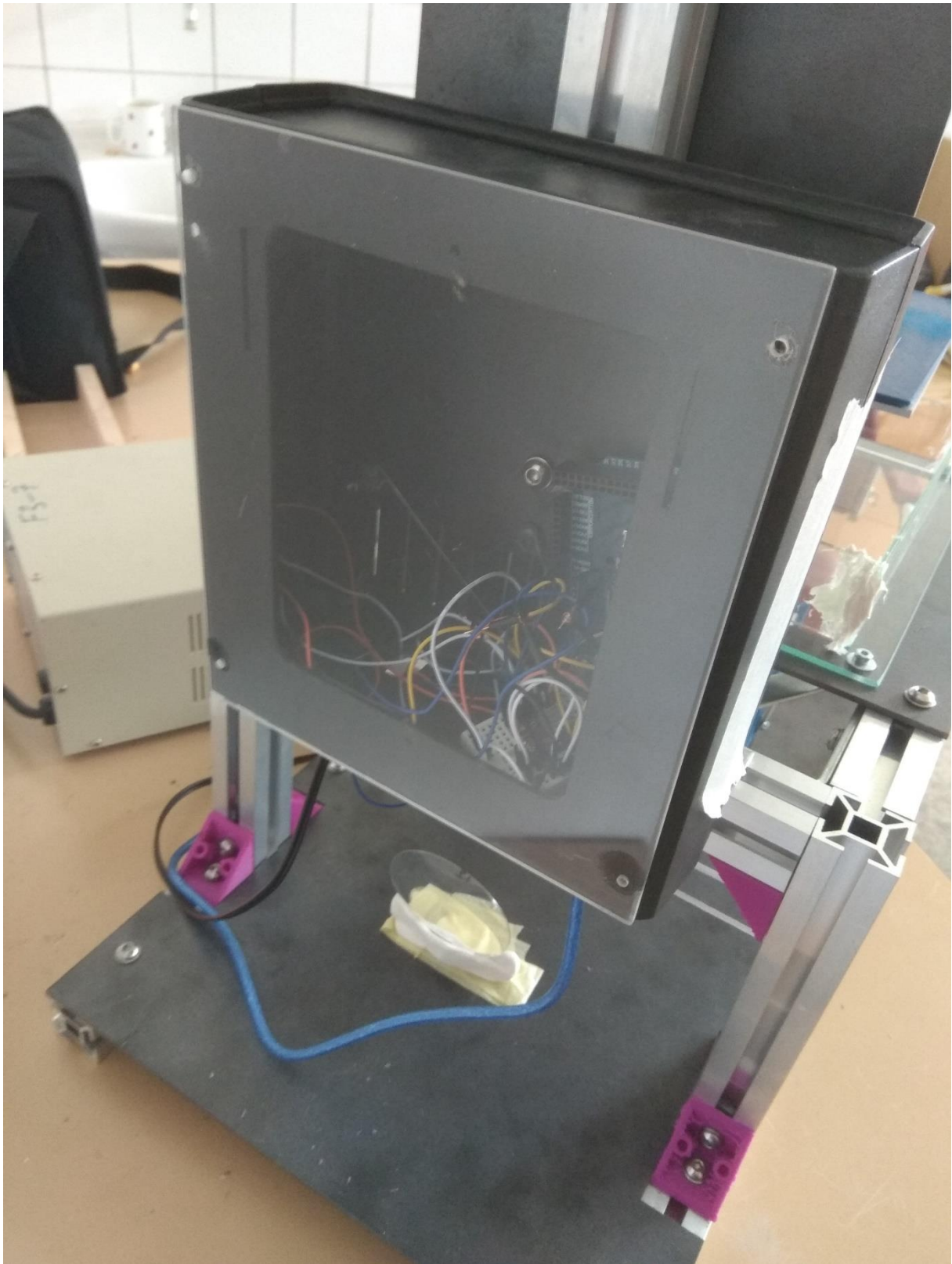
Obrázek 28 - Zadní část tiskárny



Obrázek 29 - Spodní deska tiskárny



Obrázek 30 - Spojení platformy s osou Z



Obrázek 31 - Krabička na elektroniku



Obrázek 32 - Osa Z

9. Zhodnocení

Přestože v porovnání s jinými technologiemi 3D tisku patří sestavení DLP tiskárny k těm jednodušším, tak se stále jedná o poměrně náročnou práci, kde je třeba dodržet mnoho podmínek.

Zejména je třeba dbát na to, aby se tiskárna během tisku nechvěla a nedocházelo tím ke znehodnocování výsledného objektu.

Je důležité si nejprve sestavit kompletní počítačový model a až následně začít tiskárnu konstruovat, protože si v něm všimneme chyb, které bychom jinak objevili až po nakoupení komponent, což by vedlo ke zbytečným výdajům.

Další výhodou je, že na modelu lze lehce vidět, zda sedí veškeré rozměry a platforma bude po sestavení opravdu uprostřed kádi, bez čehož se proces tisku nedá uskutečnit. Dále je také důležité se zamyslet, zda je vymyšlené řešení vůbec konstrukčně možné, což se v tomto případě týká zejména krabičky na ose Z.

Tento druh tiskárny je možné sestavit i v domácích podmínkách, nicméně v takovém případě je třeba počítat s ještě vyšší pořizovací cenou. Nejlepším příkladem je zrcadlo, které jsme si mohli vyrobit, což je samozřejmě v domácích podmínkách nemyslitelné.

Je důležité si uvědomit, že konstrukce tiskárny je sice hotová, nicméně i po nakoupení zbylých, pro tisk nutných, komponent zbývá na tiskárně spousta práce s kalibrováním tisku pro dosažení co možná nejlepších výsledků.

10. Použité zdroje

- [1] Technologie 3D tisku. PKmodel [online]. Praha, 2006 [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3dtisk.html>
- [2] Build Your Own SLA/SLS. PKmodel [online]. 2015 [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <http://www.buildyourownsla.com/forum/viewtopic.php?t=2785>
- [3] Chimera: \$60 DLP High-Res 3D Printer. Instructables [online]. 2015 [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Chimera-60-DLP-resin-3d-printer/>
- [4] Projektor: technologie promítání obrazu [online]. 2008 [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <https://www.tvfreak.cz/projektor-technologie-promitani-obrazu/2737>
- [5] Na jakém principu fungují digitální projektor. Živě [online]. 2004 [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/na-jakem-principu-funguji-digitalni-projektor/sc-3-a-118275/default.aspx>
- [6] Robot Factory releases free guide to choosing an SLA 3D printer. 3ders [online]. 2016 [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <https://www.3ders.org/articles/20160216-robot-factory-releases-free-guide-to-choosing-an-sla-3d-printer.html>
- [7] MENKEN], [Ivanka. *3D printing: complete certification kit*. 2013. ISBN 9781486456451.
- [8] Vytváření objektů v 21. století aneb historie 3D tisku. Imagazin.cz [online]. 2018, 3.3.2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://imagazin.cz/vytvoreni-objektu-v-21-stoleti-aneb-historie-3d-tisku/>
- [9] BIEHLER, John a Bill FANE. *3D printing with Autodesk 123D: create and print 3D objects with 123D, Autocad, and Inventor*. Indianapolis, Indiana: Que, 2014. ISBN 978-0-7897-5328-1.
- [10] Flashforge Hunter. *3DPRINTING.COM* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/pricewatch/3d-printer/flashforge-hunter/#details>

- [11] True story of why it was so difficult to choose my first 3D resin. *AMERALABS*[online]. [cit. 2018-05-29]. Dostupné z: <https://ameralabs.com/blog/tutorials/sla-3d-resin-printing-material-choosing-guide/>
- [12] AMD-6 DLP resin for Advanced Modelling and Miniatures. *AMERALABS* [online]. [cit. 2018-05-29]. Dostupné z: <https://ameralabs.com/shop/amd-6-dlp/>
- [13] Borosilicate glass. *Continental trade* [online]. [cit. 2018-05-30]. Dostupné z: <https://www.continentaltrade.com.pl/borosilicate-glass>
- [14] Why Use a First Surface vs. Second Surface Mirror?. *Abrisa Technologies* [online]. [cit. 2018-05-30]. Dostupné z: <http://abrisatechnologies.com/tech-notes/why-use-a-first-surface-vs-second-surface-mirror/>
- [15] Physical Vapor Deposition. *ENCYCLOPEDIA OF ENGINEERING* [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <http://www.mechscience.com/physical-vapor-deposition/>
- [16] Modifying a RAMPS 1.4 board. *RigidTalk* [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: http://rigidtalk.com/wiki/index.php?title=Modifying_a_RAMPS_1.4_board