

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 9: Strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Oliver: Open source MSLA 3D tiskárna

Adam Schuppler
Plzeňský kraj

Plasy 2020

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 9: Strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Oliver: Open source MSLA 3D tiskárna

Oliver: Open source MSLA 3D printer

Autor: Adam Schuppler
Škola: Gymnázium a SOŠ Plasy, Školní 280, 331 01
Plasy
Kraj: Plzeňský kraj
Konzultant: Ing. Libor Jelínek, Ph.D. FAV ZČU

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod 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.

Práci SOČ zveřejňuji pod svobodnou licencí CC BY-NC 4.0 umožňující volné sdílení a úpravy díla za předpokladu nekomerčního užití a uvedení autorství. Plné znění licence je dostupné online.

V Plasích dne

Podpis:

Adam Schuppler

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Liboru Jelínkovi, Ph.D. z FAV ZČU za jeho odborný dohled nad projektem a technické poradenství při tvorbě tiskárny a psaní práce. Dále bych rád poděkoval Dave Singletonovi za kontrolu anglického manuálu, Ivo Kornatovskému za zapůjčení fotografického vybavení na vyfocení tiskárny a výtisků a Mgr. Renátě Tymrové za jazykovou kontrolu práce.

Tento projekt by nebylo možné dokončit nebýt mnoha ostatních nadšenců a vývojářů open source projektů, na nichž je tato tiskárna postavená. Rád bych proto poděkoval vývojářům NanoDLP firmwaru¹ a vývojářům rozhraní Tibus².

¹<https://www.nanodlp.com/>

²<https://github.com/Tibus/TouchScreen-For-NanoDLP>

Anotace

Tato práce se zabývá realizací 3D tiskárny používající stereolitografii. Byla užitá moderní varianta s maskou na bázi tekutých krystalů. Cílem práce bylo vytvořit konkurenceschopnou alternativu ke komerčním 3D tiskárnám v cenové kategorii do 20 000 Kč. Během práce byly využity nejmodernější vývojové metody, jako je digitální dvojče nebo rapid prototyping. V práci je detailně rozebrána nejen konstrukce samotné tiskárny, ale i problematika fotopolymerů a nakládání s odpady. Tiskárna je zveřejněna na internetu pod svobodnou licencí společně s podrobným uživatelským manuálem v angličtině. Oliver byl komunitou přijat kladně a hlavní cíl práce se tak podařilo splnit. Tiskárna je velmi snadno modifikovatelná a v rámci budoucích prací ji lze využít např. na testování nových biokompatibilních materiálů, na 4D tisk nebo v rámci vývoje extrémně rychlých tiskových metod, kdy tisk trvá v řádu jednotek minut.

Klíčová slova

stereolitografie, MSLA 3D tisk, MSLA 3D tiskárna, nízkonákladová 3D tiskárna, fotopolymery, odpadové hospodářství fotopolymerů, otevřený hardware

Annotation

This thesis is concerned with the design of a stereolithography 3D printer. Modern variant with a liquid crystal mask was chosen. The goal was to create a competitive alternative to the commercially available 3D printers in the sub-US\$1000 market. The latest methods were used during the development, including digital twin and rapid prototyping. The thesis not only explains the construction of the printer itself but also discusses photopolymer chemistry and waste management. The printer is published under a free license together with a comprehensive user manual in English. Oliver was warmly accepted by the community, therefore the main goal was achieved. The printer is easily modifiable and can be further used, for instance, for testing new biocompatible materials, 4D printing or for the development of extremely fast printing

methods with printing times in a matter of minutes.

Keywords

stereolithography, MSLA 3D printing, MSLA 3D printer, low-cost 3D printer, photopolymers, waste management of photopolymers, open hardware

OBSAH

Úvod	3
1 Teorie	4
1.1 Co je to stereolitografie?	4
1.2 Současná situace na trhu	8
1.3 Cíl práce	12
2 Metodika	13
2.1 Použité metody	13
2.2 Realizace	14
3 Řešení	16
3.1 Konstrukce	16
3.1.1 Maska	17
3.1.2 Zdroj UV záření	20
3.1.3 Vana	25
3.1.4 Elektronika	26
3.1.5 Posuvný mechanismus v ose Z	34
3.1.6 Nosná konstrukce	41
3.1.7 Kryt	44
3.2 Firmware a Software	47
3.2.1 Proces tisku	47
3.2.2 Technické řešení	50
3.3 Fotopolymery	51
3.3.1 Chemická struktura fotopolymerů	52
3.4 Nakládání s odpady	54
3.4.1 Odpadové hospodářství	55

3.4.2	Budoucí vývoj	57
3.5	Webové stránky a manuál	59
3.5.1	Koncepce	59
3.5.2	Realizace	59
3.5.3	Legislativní aspekty	63
3.6	Ekonomická část	64
4	Výsledky	66
5	Diskuze	69
6	Závěr	72
	Bibliografie	73
	Seznam obrázků	79
	Seznam tabulek	82
	Slovník pojmů	83
	Seznam příloh	86
	Errata	87

ÚVOD

Psal se rok 2006 a 3D tiskárna RepRap 0.2 sestavená na půdě Bathské univerzity právě vytiskla první díl. [1] Doktor Adrian Bowyer, tvůrce tiskárny, tak odstartoval revoluci ve 3D tisku. RepRap totiž stál pouhý zlomek ceny tehdejších zařízení (které stály řádově miliony Kč) a přitom dosahoval velice solidních výsledků. [2]

Dnes je nízkonákladový 3D tisk rychle rostoucím odvětvím s velkým potenciálem. Drtivá většina levných tiskáren využívá technologii extruze struny z termoplastů (proces známý mj. pod zkratkou FFF), což je stejná technologie, kterou používal již první prototyp RepRap 0.2. Tento výrobní proces má však své limity vyplývající ze samotné konstrukční povahy technologie. Jedná se hlavně o přesnost a rychlost.

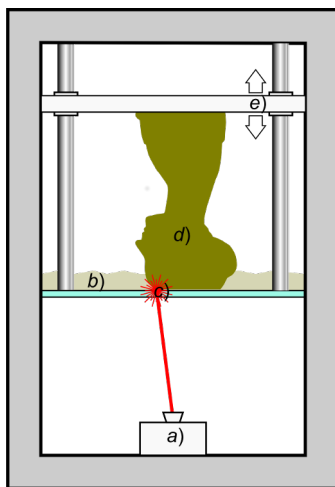
Stereolitografie (dále jen SLA) oba tyto nedostatky řeší. Donedávna tiskárny používající tento proces stály přes 100 000 korun a byly tak dostupné pouze komerčním subjektům. Nové objevy (stereolitografie používající masku na bázi tekutých krystalů neboli MSLA [3]) a masová výroba dokázaly tyto zařízení zlevnit na desetinu ceny. Jeden problém však stále přetrvává. Téměř vždy se jedná o tzv. closed source zařízení. Není pro ně dostupná podrobná projektová dokumentace a zdrojové kódy pro firmware a software, což znemožňuje jakékoliv úpravy zařízení ze strany uživatele.

Tiskárna Oliver je MSLA tiskárna s volně dostupným zdrojovým kódem. Umožňuje tak snadnou, opakovatelnou a zcela legální uživatelskou modifikaci. To otevírá nové možnosti jak pro další výzkum technologie samotné, tak pro výzkum nových tiskových materiálů pro proces stereolitografie.

1 TEORIE

1.1 Co je to stereolitografie?

Tiskárna Oliver používá technologii stereolitografie, již lze zařadit mezi aditivní výrobní procesy. Na rozdíl od technologií, jako je obrábění, se materiál postupně přidává a tím vzniká výsledný objekt (v práci označován jako vý-tisk).



Obrázek 1.1: Schéma SLA tiskárny, převzato z [4]

Základem stereolitografie je speciální kapalina (b), která ztvrdne při ozáření světlem o určité vlnové délce. Odborně se tato kapalina nazývá fotopolymer a Oliver používá fotopolymer, který tuhne při ozáření světlem o vlnové délce 405 nm. Na začátku tisku se mezi spodní transparentní fólií (v práci nazývána také jako stínítko) a pohyblivou podložkou (e) vytvoří malá mezera (např. 50 μm), kterou zaplní fotopolymer. Určité části se ozáří světlem a ty ztuhnou a přichytí se k podložce (e). Posléze se podložka (e) posune nahoru

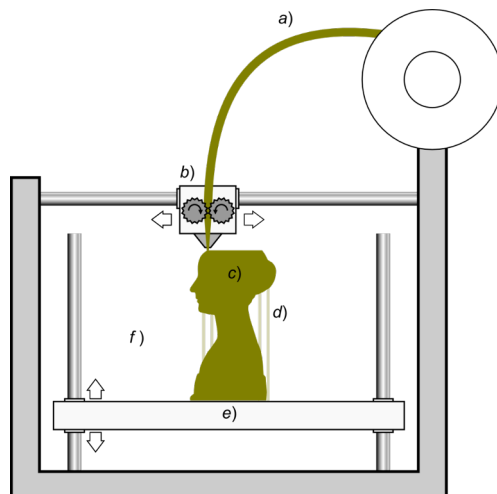
o výšku vrstvy (např. 80 μm). Tím se mezi stínítkem a podložkou vytvoří úzká mezera, kterou zaplní kapalina. Určité části se opět ozáří světlem a ztvrdnou. Přichytí se k předchozí vytvrzené hmotě a proces se opakuje, dokud není celý objekt hotový.

Existuje několik způsobů ozařování fotopolymery. Níže jsou popsány tři nejpoužívanější:

1. laser: Nejstarší způsob, vyvinutý již v roce 1984 francouzskými vědci (Alain Le Mehaute a spol.) [5]. Používá silný laser a soustavu zrcadel a dalších optických prvků pro přesné zaměření laserového paprsku na konkrétní bod na stínítku. Hlavní výhodou tohoto řešení je konstrukční jednoduchost, nevýhodou pak nízká rychlost a rizika plynoucí z používání výkonných laserů (negativní vliv na zrak, riziko vzniku požárů apod.).
2. DLP: V posledních letech populární u 3D tiskáren střední cenové kategorie (100 tisíc až 250 tisíc korun). Používá tzv. digitální mikrozrcadla umístěná na křemíkovém čipu, kdy každé zrcadlo představuje jeden pixel. Zdrojové světlo (většinou xenonová lampa nebo LED) osvítí zrcadla a v závislosti na natočení jednotlivých zrcadel se na stínítku promítne požadovaný obraz. [6] Je známější pod zkratkou DLP¹. Výhodou je možnost dosažení velmi vysokých rychlostí, nevýhodou je vysoká cena.
3. MSLA: Nejmladší technologie, která používá modifikovaný displej z tekutých krystalů (LCD). Namísto standardního bílého podsvícení se používá výkonné LED pole emitující záření o požadované vlnové délce. Tekuté krystaly poté slouží jako maska blokující určité části obrazce (proto název mask stereolithography). Tato technologie umožňuje dosažení relativně vysoké rychlosti tisku za zlomek nákladů v porovnání s technologií DLP. Výhodou je také velmi jednoduchá konstrukce. Nevýhody plynou z používání ne zcela vhodných masek. Vzhledem k nízkým výrobním objemům se zatím využívají modifikované displeje do chytrých telefonů, které mají nízkou propustnost UV záření, což limituje rychlost tisku. Dalším problémem je nízká životnost při působení UV záření. Více je o těchto problémech pojednáno v kapitole 3.1.4.

¹Digital Light Processing – obchodní značka společnosti Texas Instruments – US 75929080

Klíčovým bodem je srovnání technologie stereolitografie s dnes nejpoužívanější technologií FFF (Fused-filament Fabrication). Pro názornost je níže stručně vysvětlen princip FFF tiskárny:



Obrázek 1.2: Schéma FFF tiskárny, převzato z [4]

Plast (termopolymer) je do zařízení dodáván v podobě tenké struny (a), která je vytlačována pohybujícím se extrudérem (b). Na konci extrudéru je plast roztaven v tzv. hot-endu a vytlačen úzkou tryskou (standardní průměr je 0,4 mm). Tištěný objekt (c) je vytvářen vrstvu po vrstvě, přičemž první vrstva spočívá na pohyblivé tiskové podložce (e). Pro dosažení vyšší kvality může být tisková komora (f) vyhřívána.

Mezi výhody technologie SLA v porovnání s FFF mj. patří:

1. Několikanásobně vyšší přesnost ve všech osách (v řádu mikrometrů).
2. Hladký povrch dílů (nejsou viditelné jednotlivé vrstvy jako v případě dílů tištěných na FFF tiskárně).
3. Nové možnosti tisku komplikovaných tvarů vytvořených mj. pomocí generativního designu nebo biomimiky.
4. Jednotná rychlost na vrstvu. Nezáleží na tom, jestli se tiskne jeden díl nebo dvacet dílů. Celková doba tisku je stále stejná. Z toho plynou nové možnosti využití 3D tisku v sériové výrobě.

5. Vysoká rychlost. V případě použití kyslíku lze dosáhnout rychlosti tisku v řádu minut [7].
6. Nové materiálové možnosti plynoucí z použití fotopolymerů.



Obrázek 1.3: Výhody stereolitografie, převzato z 1: [8] 2: [9] 3: [10] 4: [11] 5: [12] 6: [13]

Naopak mezi nevýhody SLA vůči technologii FFF patří:

1. Vysoké nároky na bezpečnost a ochranu zdraví při práci s fotopolymerem. Chybějící data o dlouhodobém působení tekuté formy fotopolymerů na lidské zdraví.
2. Vysoká ekologická zátěž fotopolymerů [14]. Nedostatek dat o dlouhodobém vlivu zvýšené koncentrace fotopolymerů v životním prostředí na ekosystémy. Neexistující procesy ekologické likvidace tekuté formy fotopolymerů.
3. V době psaní práce vysoká cena fotopolymerů v porovnání s termopolymerem určenými pro FFF tiskárny.

1.2 Současná situace na trhu

V posledních letech (2017-2019) trh zaplavily levné tiskárny používající technologii MSLA. Nejlevnější zařízení se prodávají za méně než 400 dolarů a přitom dosahují velice solidních výsledků. Cílem práce proto není navrhnout zařízení, které by cenou konkurovalo masově vyráběným tiskárnám původem z Asie, nýbrž zařízení, které je pod otevřenou licencí, snadno opravitelné a které lze vyrobit v každé lepší dílně. I přesto považuji za důležité zmínit několik komerčních tiskáren pro objektivní zhodnocení úspěšnosti celého projektu.



Obrázek 1.4: Elegoo Mars, převzato z [15]

Parametr	Hodnota
Cena:	369 \$ (k 21. září 2019)
Rok uvedení na trh:	2019
Maximální rozměr výtisku:	120 mm × 68 mm × 155 mm
Rozlišení v rovině XY:	47 μm
Výška vrstvy:	10 μm až 200 μm
Rychlost tisku:	22,5 mm/h
Výkon UV zdroje:	40 W
Ovládání:	3,5" dotykový panel
Konektivita:	USB
Ovládací software:	ChiTu Box

Tabulka 1.1: Parametry tiskárny Elegoo Mars



Obrázek 1.5: Anycubic Photon, převzato z [16]

Parametr	Hodnota
Cena:	420 \$ (k 21. září 2019)
Rok uvedení na trh:	2018
Maximální rozměr výtisku:	115 mm × 65 mm × 155 mm
Rozlišení v rovině XY:	47 μm
Výška vrstvy:	25 μm až 100 μm
Rychlost tisku:	20 mm/h
Výkon UV zdroje:	neznámý
Ovládání:	dotykový panel
Konektivita:	USB
Ovládací software:	Photon Slicer

Tabulka 1.2: Parametry tiskárny Anycubic Photon



Obrázek 1.6: Prusa SL1, převzato z [17]

Parametr	Hodnota
Cena:	1 399 \$ (stavebnice) a 1 699 \$ (sestavená tiskárna) (k 21. září 2019)
Rok uvedení na trh:	2019
Maximální rozměr výtisku:	120 mm × 68 mm × 150 mm
Rozlišení v rovině XY:	47 μm
Výška vrstvy:	10 μm až 100 μm
Rychlost tisku:	6 s na vrstvu
Výkon UV zdroje:	neznámý
Ovládání:	dotykový panel
Konektivita:	USB, WiFi, LAN
Ovládací software:	PrusaSlicer

Tabulka 1.3: Parametry tiskárny Prusa SL1

1.3 Cíl práce

Přestože cíl vytvořit MSLA tiskárnu s otevřenou licencí je dostatečně vypovídající, není příliš přesný. Pro možnost objektivního zhodnocení úspěšnosti projektu byl tedy cíl dále upřesněn:

Primární cíl:	<ul style="list-style-type: none"> • Vytvořit kompaktní a vysoce přesnou MSLA tiskárnu
Sekundární cíle:	<ul style="list-style-type: none"> • Vyrobit do 31. srpna 2019 • Celková cena tiskárny nižší než 15 000 Kč vč. DPH • Hotové a funkční webové stránky
Primární trh:	<ul style="list-style-type: none"> • tzv. kategorie “Innovators” (inovátoři) [18]. Nejinovativnější skupina lidí (cca. 2,5 %) v oblasti 3D tisku – chybějící open source MSLA zařízení
Sekundární trhy:	<ul style="list-style-type: none"> • kategorie “early adopters” (časní osvojitelé) [18] • Technicky zdatní kutilové s omezeným rozpočtem • Modeláři (letadla, železnice) • Uživatelé FDM tiskáren, co si chtějí vyzkoušet stereolitografii
Zúčastněné strany:	<ul style="list-style-type: none"> • Uživatelé • Porota SOČ

Tabulka 1.4: Cíl práce

2 METODIKA

2.1 Použité metody

Během vývoje tiskárny byly použity moderní vývojové metody, jako CAD nástroje, dálková diagnostika (přes lokální síť) a v neposlední řadě také digitální dvojče. Např. Grieves a Vickers (2016) [19] definovali digitální dvojče následovně: „Digitální dvojče je soubor informací, které plně popisují budoucí nebo již existující výrobek na všech úrovních (mikro atomární úroveň i makro úroveň). V ideálním případě se jakákoliv informace získaná inspekcí fyzického výrobku shoduje s informací získanou z digitálního dvojčete“¹. Již z definice vyplývá, že vytvořit skutečné digitální dvojče (na úrovni atomů) je v současné době nemožné. Avšak i hrubé přiblížení se takovému modelu s sebou nese řadu benefitů, mj. zkrácení vývojového času o desítky procent. Jinými slovy se výrobek nejdříve celý nejen navrhne, ale i nasimuluje na počítači, a až poté se přistoupí k výrobě fyzického prototypu. Koncept digitálního dvojčete byl realizován mj. detailním CAD modelem celé tiskárny, který byl z velké části vytvořen již před fyzickou realizací prototypu, a výrobou zakázkových dílů pouze z digitálních podkladů z CAD softwaru.

Další nepostradatelná metoda užitá při vývoji se nazývá „rapid prototyping“ (česky rapidní výroba prototypů). Jedná se o souhrnné označení pro použití 3D tiskáren při vývoji hardwaru [20]. Na tiskárně Oliver je celkem 35 plastových součástí vytištěných na 3D tiskárně. Jedná se často o tvarově složité díly, jejichž výroba by při užití tradičních metod trvala i několik dní, a přesto by nebylo možné zajistit exaktní shodu s digitálním modelem.

¹“The Digital Twin is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level. At its optimum, any information that could be obtained from inspecting a physical manufactured product can be obtained from its Digital Twin.”

3D tisk zkrátil výrobu dílů na jednotky hodin při současném zvýšení přesnosti.

2.2 Realizace

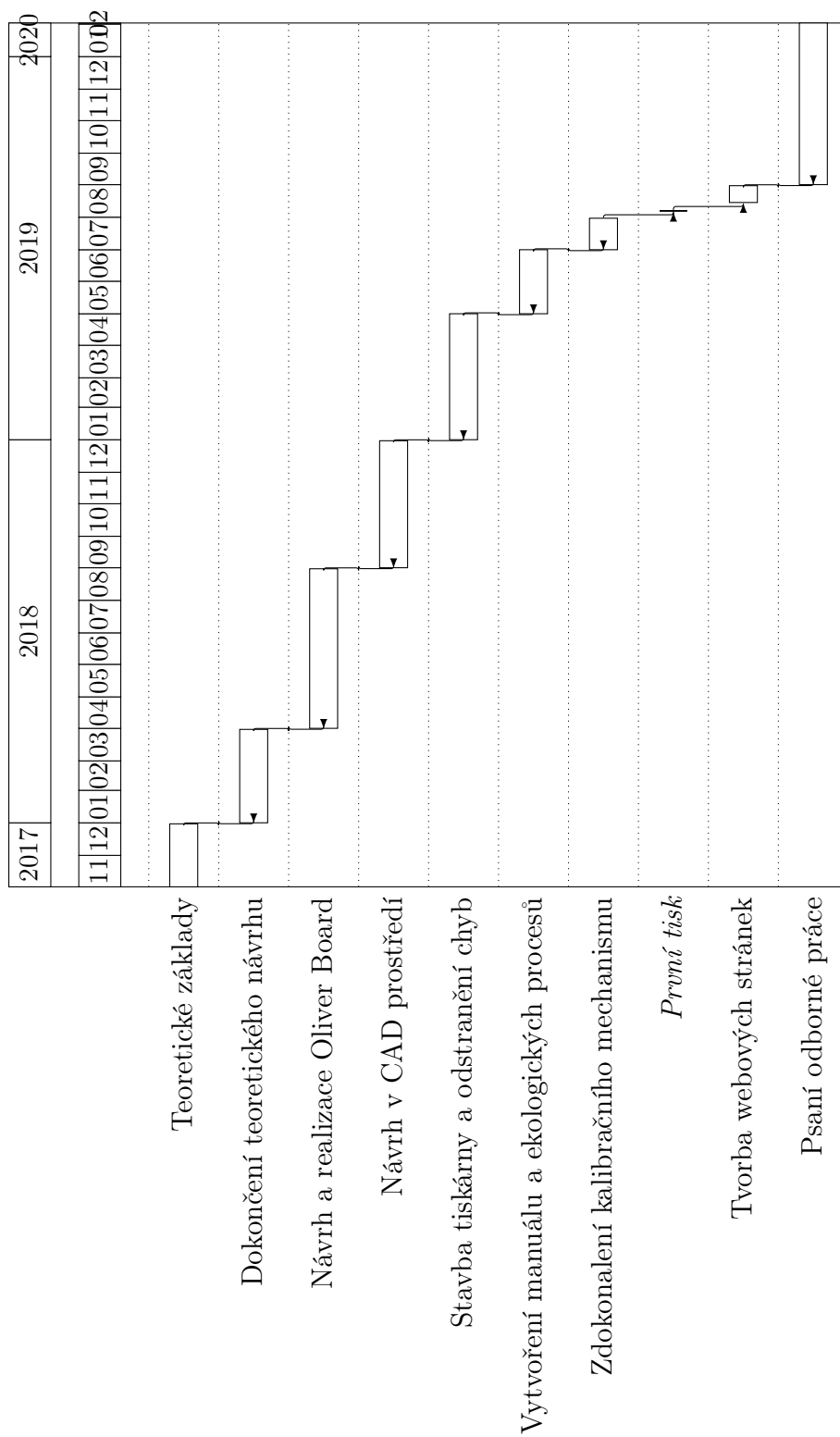
Tiskárna byla sestavována doma u autora, pouze některé díly s vysokými nároky na přesnost byly zhotoveny, popř. upraveny v prostorách NTIS FAV ZČU (řezání hliníkových profilů a vrtání chladiče). Díly byly buď zakoupeny hotové, nebo vyrobeny na míru externími dodavateli, jak je zmíněno v kapitole 3.1. Tiskárna byla vyvíjena 21 měsíců (listopad 2017 až srpen 2019). Celkové náklady na realizaci činily 66 490 Kč.

Při realizaci bylo použito pouze základní dílenské vybavení, jako je multimetr, stolní vrtačka apod. Při odstraňování chyb byl použit osciloskop. Produkt byl navržen ve studentské verzi programu Autodesk Inventor (verze 2017, 2018 a 2019) a stránky realizovány v freeware verzi programu Elementor Ltd a open source programu WordPress.

Tiskárna Oliver používá během provozu následující open source software:

Jméno	Licence	Copyright	Odkaz na licenční podmínky
NanoDLP	MIT	2016 nanoDLP	https://github.com/nanodlp/ui/blob/master/LICENSE.md .
Tibus	MIT	2017 Julien Delnatte	https://github.com/Tibus/TouchScreen-For-NanoDLP/blob/master/LICENSE

Tabulka 2.1: Seznam využívaného open source softwaru



Obrázek 2.1: Gantt chart vývoje

3 ŘEŠENÍ

3.1 Konstrukce

Popis konstrukce je rozdělen do sedmi podkapitol, které se podrobně věnují každému prvku tiskárny. V každé podkapitole je vysvětlen účel součástky, požadované vlastnosti, dostupnost dílů a případná vlastní výroba. Na závěr je zhodnocena kvalita a splnění požadavků stanovených na začátku. V některých případech je součástka porovnávána s konkurenčními tiskárnami zmíněnými v úvodu.

Je třeba také podotknout, že na webových stránkách www.oliver3d.com je ke stažení balíček dat, který obsahuje digitální podklady k tiskárně. Obsahuje následující složky:

3D printed parts obsahuje veškeré tištěné součástky dostupné ve třech formátech: 3MF, AMF a STL. Soubory lze otevřít např. v bezplatném softwaru PrusaSlicer¹.

Acrylic glass drawings obsahuje podklady pro řezání panelů z plexiskla ve formátu DXF. Soubory lze otevřít např. v bezplatném softwaru Autodesk DWG TrueView².

CAD obsahuje kompletní CAD podklady k tiskárně. Soubory lze otevřít např. v bezplatném softwaru Autodesk Viewer³ (nutná registrace).

Gerber files obsahuje komprimované balíky dat pro výrobu plošných spojů. Po rozbalení lze soubory otevřít např. v bezplatném softwaru KiCAD⁴.

¹Ke stažení zde: <https://www.prusa3d.com/prusaslicer/>

²Ke stažení zde: <https://www.autodesk.com/products/dwg/viewers>

³Dostupné na: <https://viewer.autodesk.com/>

⁴Ke stažení zde: <https://www.kicad-pcb.org>

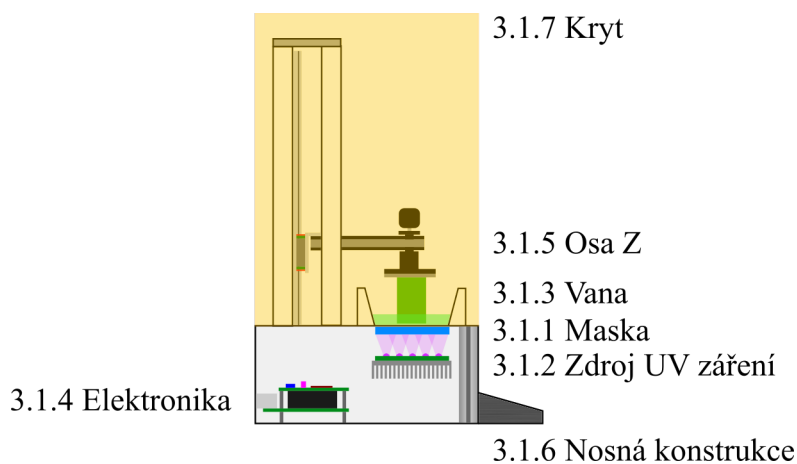
KiCAD obsahuje návrh plošných spojů. Soubory lze také otevřít v softwaru KiCAD (viz výše).

Laser cut parts drawings obsahuje podklady pro řezání kovových panelů ve formátu DXF. Soubory lze také otevřít v softwaru Autodesk DWG TrueView (viz výše).

NanoDLP obsahuje kompletní bitovou kopii, kterou uživatel musí nahrát na řídicí počítač pro zprovoznění tiskárny. Dále obsahuje konfigurační soubor s nastavením tiskárny a jeden profil pro fotopolymer (viz kapitola 3.3).

Tibus touchscreen obsahuje data, které uživatel musí nahrát do dotykového displeje pro jeho zprovoznění.

Věřím, že obzvláště CAD podklady mohou značně pomoci v pochopení konstrukce tiskárny, a proto každému čtenáři doporučuji, aby je při čtení práce měl u sebe.



Obrázek 3.1: Blokové schéma tiskárny

3.1.1 Maska

Maska je nejkritičtější část každé SLA tiskárny. Právě díky ní se na stínítku promítají příčné řezy tištěného objektu o požadovaném rozlišení a s dostatečnou světelnou intenzitou. Jak již bylo zmíněno v úvodu, tiskárna Oliver



Obrázek 3.2: Maska

používá technologii MSLA. Jako maska tedy slouží LCD panel, jenž propouští světlo jen v určitých bodech a tím vzniká na stínítku příslušný řez.

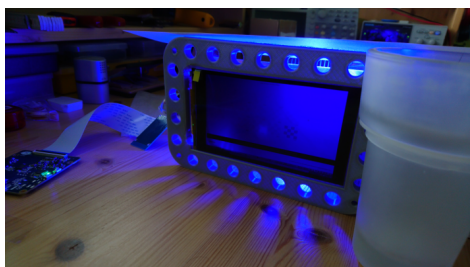
Parametry LCD panelu mají zásadní vliv na kvalitu tisku, hlavně na velikost tiskové plochy a rozlišení. Současné panely bohužel při dlouhodobém vystavení UV záření degradují, je tedy třeba zajistit snadnou výměnu panelu, který je na konci své životnosti. Při výběru byl brán ohled na následující parametry:

- Velikost: 5,5" až 7,0"
- Rozlišení: minimálně FullHD
- Rozhraní: MIPI DSI – ideálně i s ovládací deskou

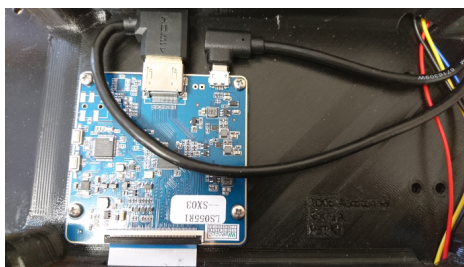
Z důvodu náročnosti vývoje vlastního komunikačního rozhraní mezi řídicím počítačem a rozhraním MIPI DSI byla vybrána kompletní sada, která již obsahuje převodník MIPI DSI-HDMI⁵. Zvolený displej má velikost 5,5" (aktivní plocha je 68,04 mm × 120,96 mm) a rozlišení 1440 × 2560 pixelů[21]. Displej byl koupen bez podsvícení, jelikož tiskárna vyžaduje mnohem silnější zdroj záření o přesně stanovené vlnové délce (viz kapitola 3.1.2). Rozlišení displeje je stejné jako u všech tří konkurenčních tiskáren zmíněných v úvodu.

⁵LCD kit: <https://www.aliexpress.com/item/32794379549.html>

Samotný LCD panel bez podsvícení má tloušťku pouhý 1 milimetr, bylo tedy nutné ho přilepit k ochrannému sklu. Toto sklo, které připomíná ochranné sklo na mobilní telefony, má na spodní straně již aplikované speciální OCA (optically clear adhesive) lepidlo, které nemění optické vlastnosti masky. Pro další zvýšení mechanické odolnosti je posléze ochranné sklo přilepeno k plastovému dílu pomocí vteřinového lepidla. Díky tomuto samostatnému modulu je možné nefunkční masku vyměnit během několika málo minut. Pro vyjmutí masky stačí odpojit jeden plochý kabel a vyšroubovat šest šroubů. Při vložení nové masky stačí celý proces pouze provést v obráceném pořadí. Masky je přitom po celou dobu chráněna proti poškození.



(a) Testování masky



(b) Převodník HDMI-MIPI DSI

Obrázek 3.3: Modul A

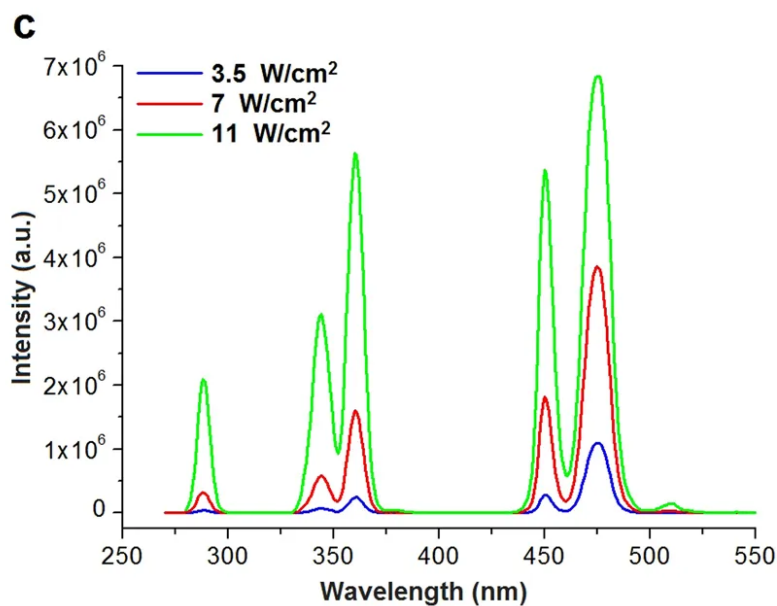
Obraz generovaný řídicím počítačem (popsaným v kapitole 3.1.4) je poslán přes HDMI konektor do HDMI-MIPI DSI převodníku. Tento převodník zajišťuje převod z univerzálních obrazových dat protokolu HDMI na konkrétní elektrické signály pro samotný panel (který disponuje pouze minimem řídicí elektroniky). Z převodníku vede 60 pinový plochý kabel, který je zakončen dalším převodníkem, ze kterého již vede flexibilní plošný spoj až k samotné masce. Toto poněkud komplikované řešení je bohužel přímým důsledkem využití hotového řešení v podobě sady LCD panelu a převodníku. V ideálním případě by samozřejmě flexibilní plošný spoj masky byl přímo připojen na řídicí počítač tiskárny, čímž by se řízení panelu značně zjednodušilo.



Obrázek 3.4: Diagram přenosu dat do masky.

Maska generuje obraz dle očekávání, na exaktní měření přesnosti vykreslování však při realizaci nebyl čas. Spoléhal jsem se tedy pouze na kontrolu jakosti při výrobě. Do budoucna by bylo třeba provést testy životnosti při dlouhodobém vystavení UV záření. Dále by bylo vhodné využít monochromatický (jednobarevný) LCD panel, namísto vícebarevného, který tiskárna využívá. Rapidně by se tak zvýšila propustnost UV záření, které je nyní blokováno červenými a zelenými filtry v panelu. V době návrhu tiskárny však monochromatické displeje o požadovaném rozlišení nebyly komerčně dostupné.

3.1.2 Zdroj UV záření



Obrázek 3.5: Relativní závislost intenzity fotopolymerizační reakce na vlnové délce u fotopolymeru, převzato z [22]

Každý fotopolymer má určité vlnové délky, při kterých dochází k fotopolymerizaci (tuhnutí) látky. Graf výše ukazuje fotopolymer, u kterého je optimální vlnová délka zhruba 475 nm. Jedná se tedy o fotopolymer, který tuhne na denním světle. Tyto fotopolymery jsou sice optimální pro technologii MSLA (odpadají technologické problémy s propustností UV záření, což bylo zmíněné v kapitole 3.1.1), nicméně v době psaní práce je jejich cena

několikanásobně vyšší v porovnání s fotopolymery, které tuhnou při ozáření světlem v UV spektru. Z důvodu nízké ceny a vysoké dostupnosti byla tiskárna navržena pro použití fotopolymerů, jež tuhnou při vlnové délce 405 nm. Jedná se zároveň o jistý technologický kompromis, kdy zmíněnou vlnovou délku lze ještě zařadit mezi denní světlo (fialová barva). Je tak zajištěna vysoká propustnost záření přes LCD panel.

Ideální zdroj světelného záření by měl vysílat paprsky kolmo na stínítko. Byl by zcela homogenní a vysoce výkonný, aby mohla probíhat fotopolymerizace při maximální možné rychlosti (při extrémně vysokých výkonech může fotopolymer dosahovat teplot stovek stupňů Celsia a začít vrýt, což je samozřejmě nežádoucí). Ideální zdroj by měl mít 100% účinnost.

Při výběru zdroje byla zvolena technologie LED kvůli své vysoké účinnosti a kompaktnosti. Důležitou volbu představoval výběr mezi bodovým LED zdrojem a plošným podsvícením:

Vlastnost	Bodový LED zdroj	Plošný LED zdroj
Úhel dopadu	-	+
Homogenita zdroje	-	+
Chlazení	-	+
Složitost konstrukce	+	-
Cena	+	-

Tabulka 3.1: Porovnání bodového a plošného LED zdroje

- *Úhel dopadu:* Jedná se o úhel, pod kterým dopadne paprsek na stínítko. Ideální je kolmý úhel. Tento požadavek lépe splňuje plošný LED zdroj. U bodového LED zdroje by bylo třeba použít komplikovanou optickou aparaturu
- *Homogenita zdroje:* U bodového LED zdroje je určen pouze kvalitou jediné LEDky. V případě plošného zdroje se případné nedostatky v jednotlivých LEDkách tolik neprojeví, protože se překrývají.
- *Chlazení:* V případě bodového LED zdroje je energetická hustota mnohem vyšší (W m^{-2}), což klade zvýšené nároky na chlazení. Plošný LED zdroj lze tedy mnohem lépe uchládit.

- *Složitost konstrukce*: Pro implementaci plošného LED zdroje je třeba navrhnout a vyrobit vlastní plošný spoj.
- *Cena*: Při analýze trhu bylo zjištěno, že bodový LED zdroj s jedinou LEDkou by byl levnější než plošný zdroj.

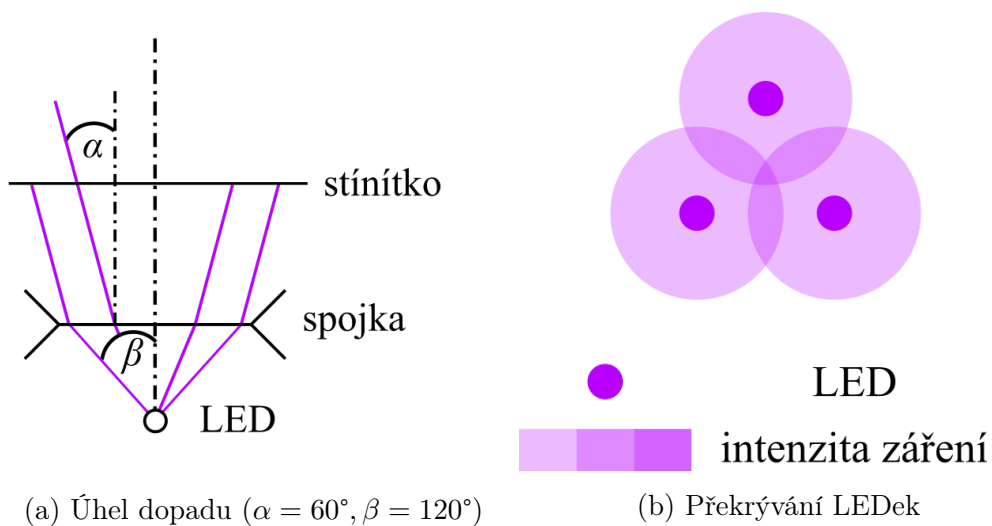
Při technickém provedení byla zvolena varianta plošného zdroje. Bylo nutné nechat si na míru vyrobit plošný spoj a ručně připájet LEDky. Zbylé součástky byly buď vytištěny na 3D tiskárně, nebo zakoupeny.

Plošný spoj obsahuje celkem 24 LEDek. Jsou zapojeny ve čtyřech paralelních linkách po šesti v sérii. Jako proudová ochrana zde slouží rezistor $1,8\ \Omega$. Obvod pracuje na napětí $20,5\ \text{V}$ a potřebuje proto samostatný DC-DC převodník napětí (viz kapitola 3.1.4). Každá LEDka je osazena 60° kolimátorem, který tak snižuje velký úhel vyzařování (120°) LEDky. Světelné zdroje jsou uspořádány do trojúhelníkového vzoru pro zvýšení homogenity podsvícení. I přesto je určité překrývání nevyhnutelné a do budoucna je třeba ho ošetřit softwarovým filtrem, který dodatečně ztmaví místa s vysokou intenzitou záření. Tím se dále zvýší homogenita podsvícení a kvalita tisku, jelikož nebude docházet k nežádoucímu tuhnutí fotopolymeru u sousedních pixelů. Plošný spoj je přišroubován k chladiči a na rozhraní je aplikována teplovodivá pasta pro lepší odvod tepla. Celý modul podsvícení je v přílohách také označován jako modul B. Pro zvýšení efektivity chlazení jsou použity dva ventilátory (o rozměrech $40\ \text{mm} \times 40\ \text{mm}$).

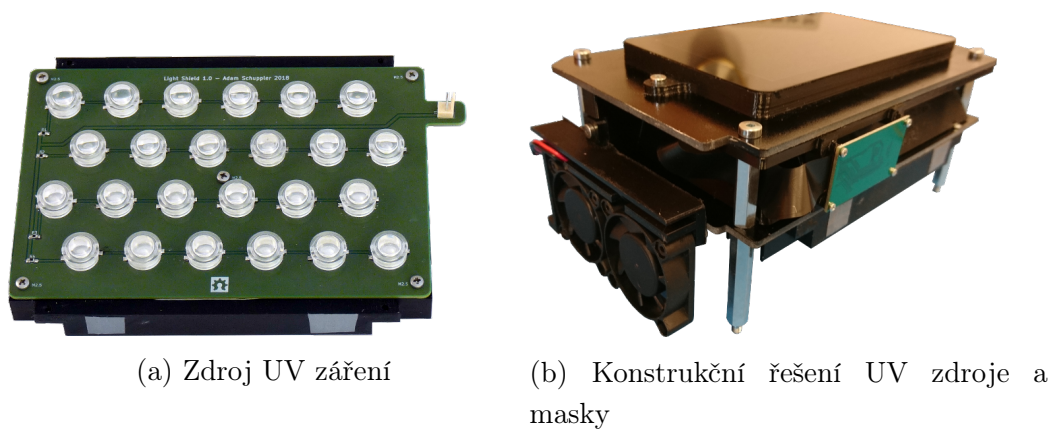
Využitím plošného LED zdroje záření se tiskárna Oliver odlišuje od většiny komerčních tiskáren ve své cenové kategorii. I dvakrát dražší tiskárny (Prusa SL1 apod.) používají pouze bodový LED zdroj. Je však třeba poznamenat, že kvůli nedostatku času nebylo provedeno přesné měření parametrů, jako je homogenita či intenzita podsvícení. Budoucí vývoj by se mohl soustředit na dvě oblasti:

Zprv by bylo možné využít vhodnější zdroj pro napájení LED pole. Jak je zmíněno v kapitole 3.1.4, současná verze používá samostatný zdroj konstantního napětí s proudovou ochrannou (zdroj snižuje napětí při překročení určitého proudu, který protéká LED polem). V budoucnu by bylo možné umístit samostatný zdroj na každou větev spolu s termistorem, takže by se v případě přehřátí LEDek automaticky snížil příkon. Tím by se značně prodloužila životnost LED pole.

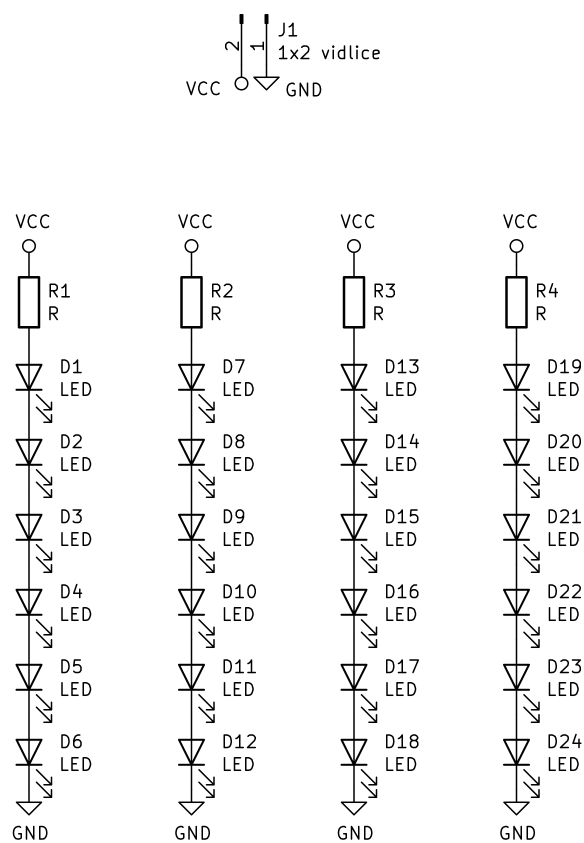
Zadruhé by bylo vhodné zvýšit hustotu rozmístění LEDek za současného snížení individuálního výkonu každé LEDky. Tím by se zvýšila homogenita podsvícení. Příkladem vysoce homogenního zdroje světelného záření mohou být moderní displeje, které využívají stovky LEDek.



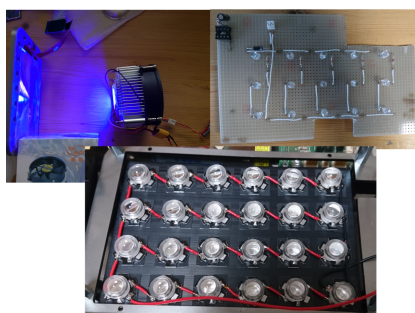
Obrázek 3.6: Optická aparatura



Obrázek 3.7: Modul B



Obrázek 3.8: Schéma plošného spoje Light shield 1.0



Obrázek 3.9: Vývoj UV zdroje

3.1.3 Vana



Obrázek 3.10: Vana na fotopolymer s průhledným dnem

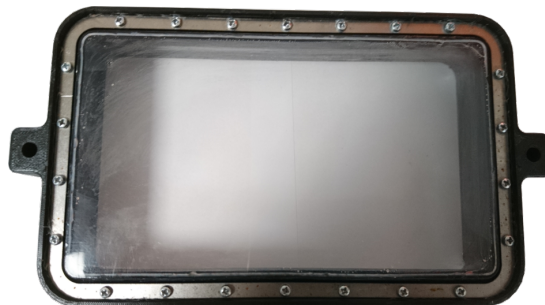
Fotopolymer je umístěn v nádobě (dále označována jako vana) s průhledným dnem, přičemž dno musí být zhotoveno z fólie, ke které se vytvrzelý fotopolymer nepřilepí. Fólie musí být snadno vyměnitelná, protože všechny typy komerčně dostupných fólií pro SLA tiskárny mají velmi omezenou životnost (5 až 50 tisků).

Problém s přilnavostí se v praxi projevuje mimo jiné omezením maximální velikosti masky (úhlopříčka maximálně 15") a omezením rychlosti tisku (pět sekund na vrstvu a více). Průmyslové tiskárny využívají speciální průhlednou folii propustnou pro kyslík, který tak proniká do spodní vrstvy fotopolymeru a zabraňuje přilepení vytvrzeného fotopolymeru ke dnu [7]. Toto řešení je však nejen velmi nákladné, ale také chráněné průmyslovými patenty. U levnějších tiskáren je v době psaní práce standardně používána FEP fólie (chemicky podobná teflonu), která je tak snadno dostupná.

Při technické realizaci bylo z důvodů zmíněných výše přistoupeno k použití FEP fólie. Samotná vana je vytištěna z PET-G plastu a fólie je ze spodní strany přišroubována ocelovým rámečkem. Pro snadnou manipulaci s vanou je k tiskárně vana přišroubována pouze dvěma aretačními šrouby, které lze ručně odšroubovat.

Vana splňuje svoji funkci, avšak v současné podobě není použitelná pro masovou výrobu. Šrouby, které drží ocelový rámeček napínající fólii, se šroubují přímo do tištěné součástky tvořící tělo vany. Příslušné závity musely být velice opatrně vytvořeny závitníkem tak, aby teplo vzniklé při závitování neroztavilo okolní plast a nezničilo závit. To se povedlo až u čtvrtého tiště-

ného dílu, proto by u druhé verze tiskárny bylo třeba vytvořit lepší způsob připevnění fólie k vaně. Životností vany jsem se v práci nezabýval.

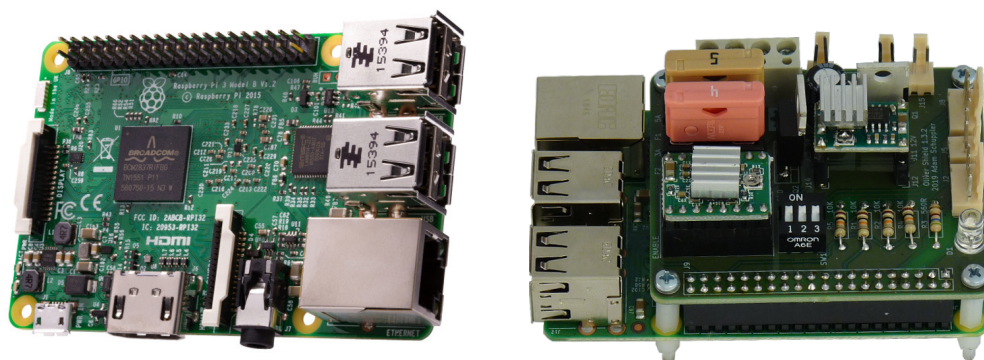


Obrázek 3.11: Ocelový rámeček sloužící k napnutí FEP folie

3.1.4 Elektronika

MSLA tiskárny kladou poněkud větší nároky na elektroniku než klasické FFF tiskárny. Je totiž nutné zajistit zpracování obrazu ve vysokém rozlišení. Při návrhu elektrického systému byl brán zřetel na následující požadavky:

1. Výstup HDMI 2K, 60 FPS (rozlišení 2160×1440 pixelů a vykreslovací frekvence 60 snímků za vteřinu)
2. Výstup 5 V a 0,6 A pro napájení masky a dotykového displeje
3. Výstup pro 1 krokový motor NEMA 17 (výstupní proud minimálně 1 A)
4. Výstup 20,5 V a 1,2 A pro UV zdroj
5. Ovládání UV zdroje
6. Výstup 12 V a 0,2 A (pro dva 40 mm ventilátory)
7. Dva koncové spínače na posuvný mechanismus
8. Ovládání přes dotykový displej
9. Ethernet (zásuvka RJ45)
10. Možnost provozu jako nezávislý (stand-alone) Linuxový server



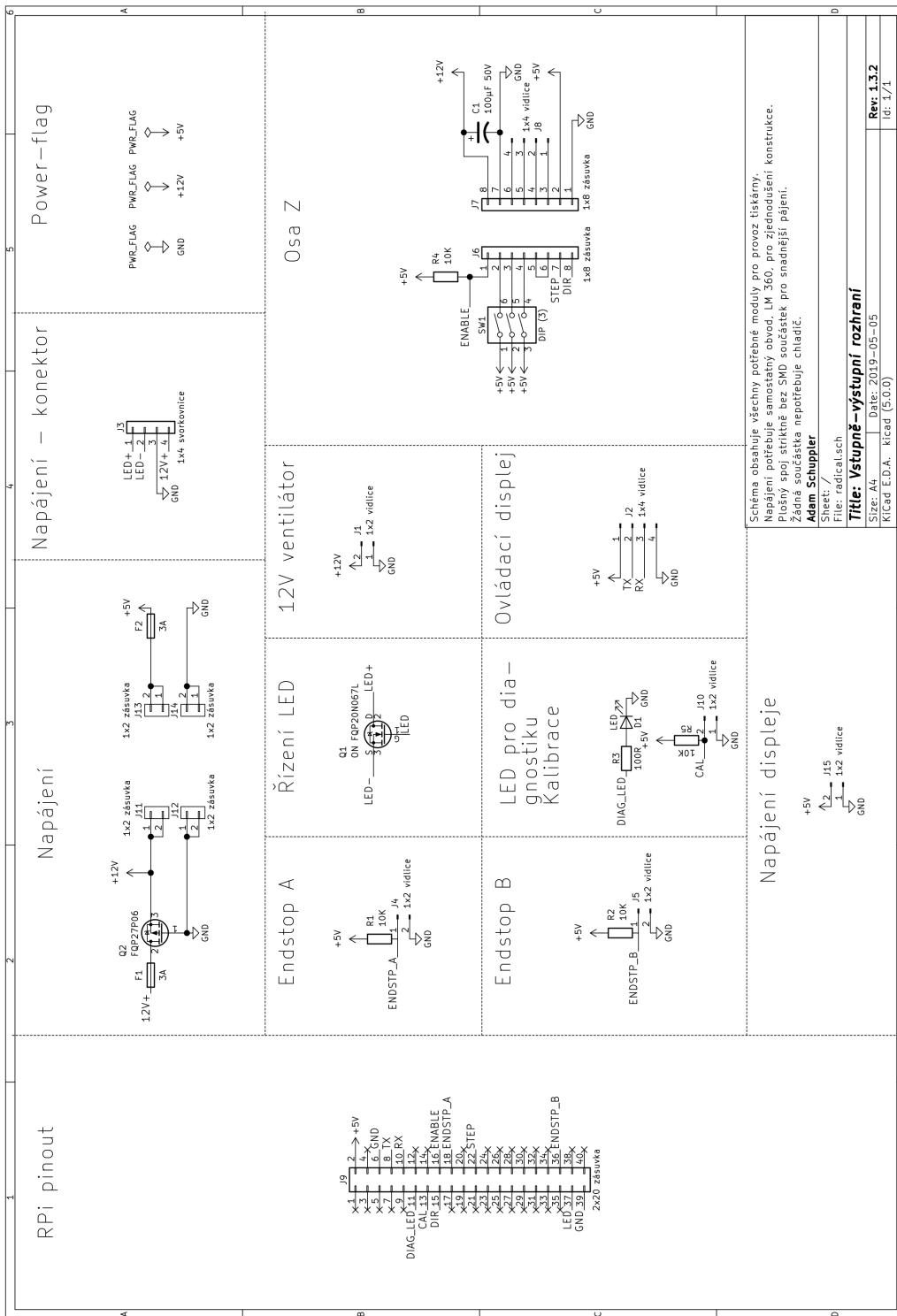
(a) Raspberry Pi 3 Model B, převzato z [23]

(b) Oliver Board 1.3.2

Obrázek 3.12: Řídící počítač

Jako hlavní řídicí počítač byl zvolen Raspberry Pi 3 Model B. Takzvaných SBC (single board computer neboli počítač na jednom plošném spoji) splňujících parametry bylo sice na trhu dostupných více (a často za mnohem nižší cenu), nicméně počítače Raspberry mají zdaleka nejrozvinutější softwarový ekosystém. Vzhledem k tomu, že cílem práce nebylo programování Linuxového systému, bylo od ostatních možností upuštěno. Počítač Raspberry Pi nebyl nijak hardwarově modifikován. O firmwaru je více pojednáno v kapitole 3.2.

Jednou z hlavních výhod SBC je jejich velká rozšiřitelnost pomocí vstupně/výstupního rozhraní, čehož bylo využito při návrhu externí desky zvané Oliver Board. Díky této vlastní desce bylo možné splnit požadavky 2 až 7, zmíněné v úvodu. V rámci zachování jednoduchosti nebyly použity žádné součástky s pouzdrem typu SMD.



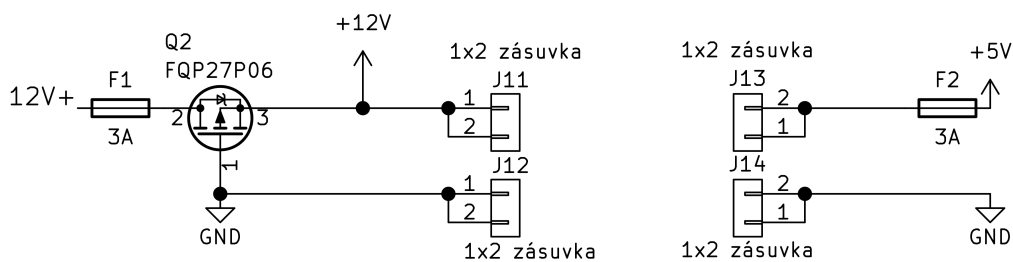
Obrázek 3.13: Schéma plošného spoje Oliver Board 1.3.2

Důležitou součástí Oliver Board je převodník napětí, který upravuje vstupní napětí 12 V na 5 V. Na tuto část byly kladeny následující požadavky:

- Proudová ochrana a ochrana proti přepólování.
- Napětí na 5 V větvi v rozmezí 4,95 V a 5,05 V.
- Schopnost dlouhodobě dodat 3 A na 5 V větvi.

Tyto požadavky byly splněny následovně:

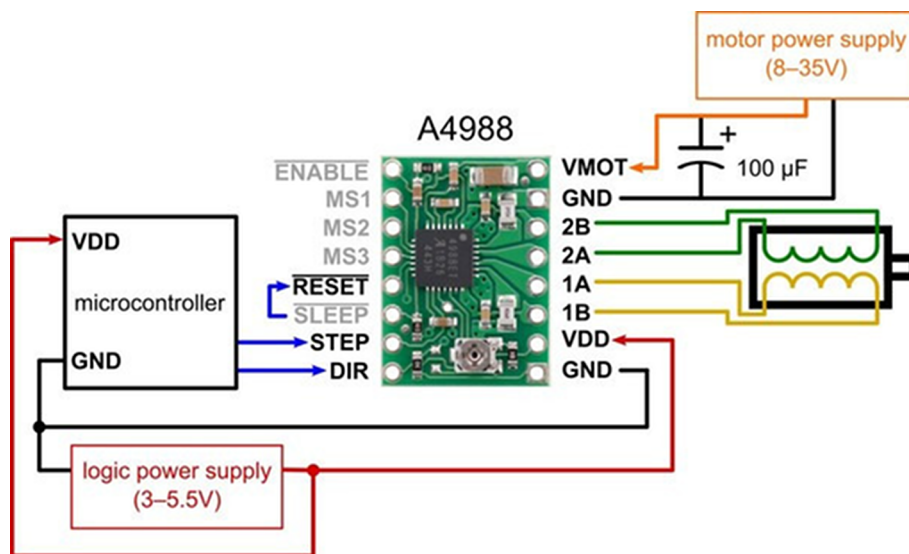
- Proudová ochrana: Zajištěna 3A pojistkou
- Ochrana proti přepólování: P-kanálový MOSFET FQP27P06
- Napětí 5 V: Externí převodník Mini 360 (koupený na on-line tržišti Aliexpress)



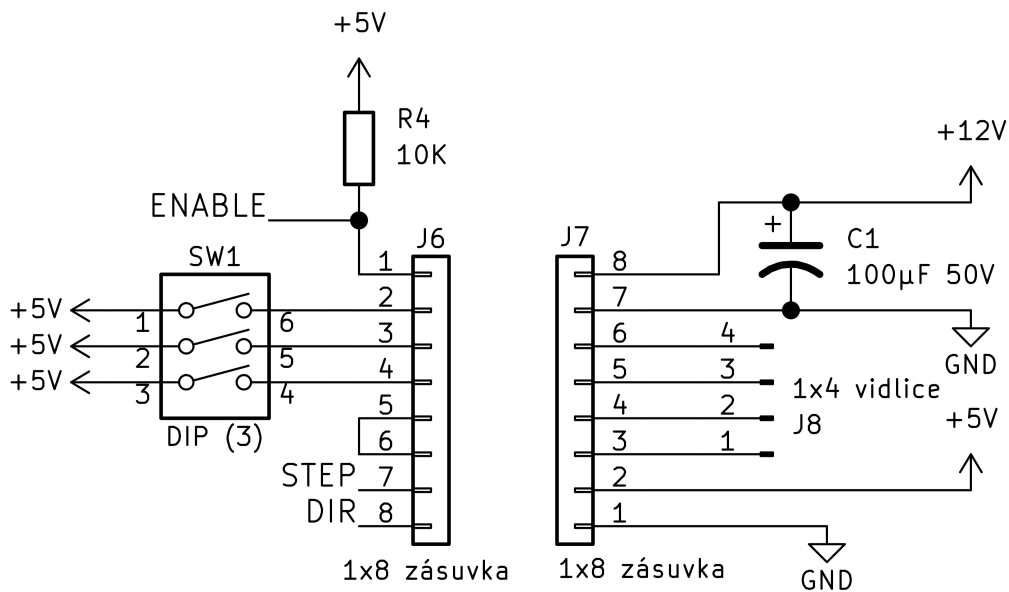
Obrázek 3.14: Schéma napájení

Dalším úkolem Oliver Board je zprostředkovat rozhraní mezi krokovým motorem a Raspberry Pi. Toho je dosaženo pomocí řadiče Allegro A4988. Pro jednoduchost konstrukce byl opět zvolen hotový open source modul zvaný StepStick⁶. Jedná se o levnější (a v České republice dostupnější) alternativu modulu Pololu A4988. Modul má šestnáct pinů.

⁶Více na: <https://reprap.org/wiki/StepStick>



Obrázek 3.15: Modul Pololu A4988 (shodné piny s modulem StepStick), převzato z [24]

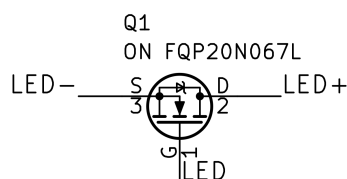


Obrázek 3.16: Rozhraní pro řadič krokového motoru

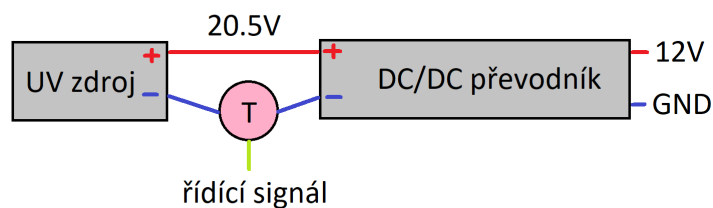
Číslo pinu (NÁZEV)	Funkce pinu
1 (ENABLE)	Aktivování krokového motoru.
2 až 4 (MS1 ... MS3):	Nastavení microsteppingu (tiskárna Oliver používá 1/16)
5 (RESET):	Při nízké úrovni (logická nula) ignoruje vstup z řídicího mikroprocesoru (Raspberry Pi). Pin není na tiskárně používán.
6 (SLEEP:)	Energeticky úsporný mód. Pin není na tiskárně používán.
7 (STEP):	Logická sekvence z Raspberry Pi přikáže řadiči, aby motor vykonal 1 krok (respektive 1/16 kroku v případě microsteppingu).
8 (DIR):	Určuje směr otáčení motoru.
9 (VMOT):	Kladný pól motorového zdroje (12 V).
10 (GND):	Záporný pól motorového zdroje.
11 až 14 (2B, 2A, 1A, 1B):	Výstup na cívky krokového motoru.
15 (VDD):	Kladný pól zdroje pro řadič (5 V).
16 (GND):	Záporný pól zdroje pro řadič.

Tabulka 3.2: Vstupně/výstupní rozhraní modulu Pololu A4988, převzato z [25]

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.2, zdroj UV záření pracuje na napětí 20,5 V. Pro převod z 12 V, které poskytuje zdroj, byl zakoupen DC-DC převodník s nastavitelnou proudovou ochranou. UV zdroj je řízen pomocí N-kanálového MOSFETU FQP20N06L. Pin LED+ na schématu reprezentuje záporný pól UV zdroje. Pin LED- reprezentuje záporný pól DC-DC převodníku a tranzistor je řízen pomocí signálu na pinu LED.



Obrázek 3.17: Řízení UV zdroje

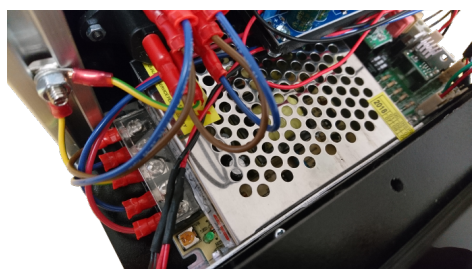


Obrázek 3.18: Diagram ovládní UV zdroje

Deska dále obsahuje dva pull-up rezistory u koncových spínačů osy Z, napájení a vstupně-výstupní rozhraní pro ovládací displej Nextion, pomocný vstup s pull-up rezistorem a diagnostickou LED diodu. Kompletní schéma desky Oliver board je dostupné v příloze.

Elektronika tiskárny má celkovou spotřebu 57,5 W. Byl proto vybrán zdroj stejnosměrného napětí s výkonem 60 W. Vzhledem ke kovovému rámu je tiskárna řádně uzemněna. Pro napájení LED pole slouží samostatný převodník stejnosměrného napětí (12 V na 20,5 V) s proudovou ochranou (nastavenou na 1,2 A).

Důležitým kritériem, na který byl brán zřetel při stavbě tiskárny, je pohodlnost ovládní tiskárny. Z toho důvodu byl zvolen dotykový panel, který poskytuje největší flexibilitu a pohodlí. Nevýhodou je vyšší technická náročnost implementace tohoto řešení. Proto byly při výběru zvažovány pouze



(a) AC zdroj a uzemnění



(b) DC-DC převodník pro napájení LED pole

Obrázek 3.19: AC a DC zdroje v tiskárně

dotykové displeje speciálně určené do prototypů (jenž vyžadují pouze minimum podpůrné elektroniky). Díky příznivému poměru cena a výkon byl vybrán displej značky Nextion. Dotykový panel o úhlopříčce 3,2" je umístěn v přední části zařízení. Používá již připravený firmware (viz kapitola 3.2).

Zhodnocení návrhu elektroniky je relativně komplikované i kvůli dlouhému seznamu požadavků a různých cest, jak tyto požadavky splnit. Z hlediska funkčnosti je elektronika zcela dostačující a splňuje parametry vytyčené na začátku. Avšak je patrné, že se jedná o pouhý prototyp. Díky používání speciálních dílů určených především pro prototypy (Raspberry Pi, displej Nextion ad.) cena vzrostla až na 2 980 Kč. V případě navržení elektroniky zcela na míru a vhodnému přizpůsobení pro masovou výrobu by neměl být problém snížit cenu až na jednu třetinu. Elektronika také nebyla řádně tes-

Součástka	Předpokládaný příkon (W)
Raspberry Pi	15
UV zdroj (včetně ztrát DC-DC převodníku)	30
Posuvný mechanismus	6
Maska	2
Ventilátory	2
Dotykový displej	2,5
Celkem	57,5

Tabulka 3.3: Spotřeba tiskárny



Obrázek 3.20: Dotykový panel Nextion

tována, zejména její životnost a provozuschopnost v různých podmínkách (nízké a vysoké teploty a vlhkost vzduchu).

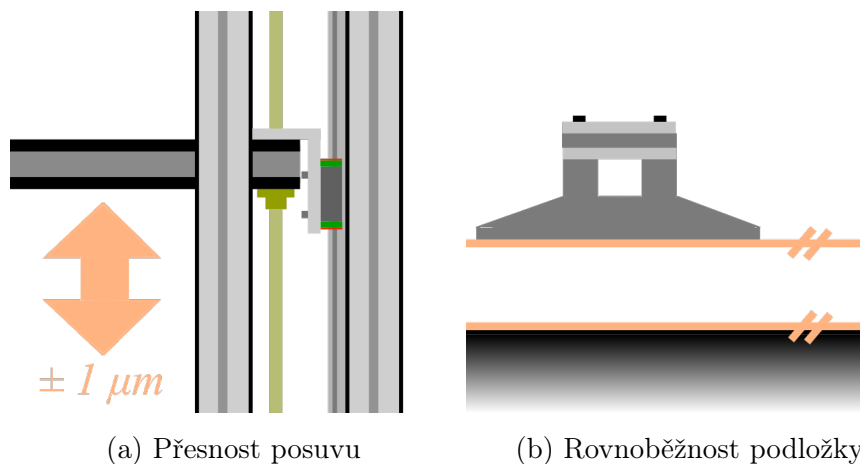
3.1.5 Posuvný mechanismus v ose Z

Posuvný mechanismus je jediná pohybující se část tiskárny. Při tisku posouvá tiskovou podložku směrem vzhůru vždy o výšku vrstvy ($50\ \mu\text{m}$). Kromě přesného posuvu je třeba zajistit mimořádně přesnou kalibraci podložky a masky. Právě kvůli vysokým nárokům na přesnost se z osy Z stala pověstná „noční můra“ projektu a vývoj tiskárny zdržela o několik měsíců. Všechny problémy se však podařilo vyřešit.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, při volbě technického řešení byl brán ohled na dva hlavní požadavky:

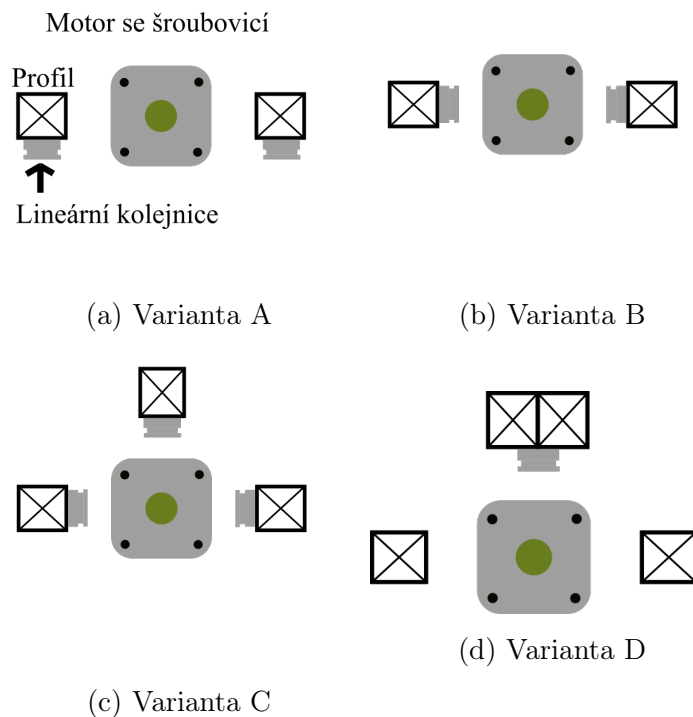
1. přesnost posuvu: Ideálně v rozmezí $\pm 1\ \mu\text{m}$.
2. kalibrace podložky: Masky a podložka musí být dokonale rovnoběžné.

Pro splnění prvního požadavku byla vybrána lineární kolejnice a krokový motor s pevně zabudovanou závitovou tyčí používající trapézový závit. Od přesnější alternativy v podobě kuličkového šroubu bylo upuštěno kvůli vysoké ceně. Během vývoje bylo zvažováno několik variant, nakonec byla zvolena varianta D zejména díky snadné montáži. Zadní nosník, který nese lineární kolejnici, je přišroubován z obou konců dvěma šrouby, a tak je zajištěna rovnoběžnost s hranou tiskárny. U zbylých variant jsou kolejnice přimontovány

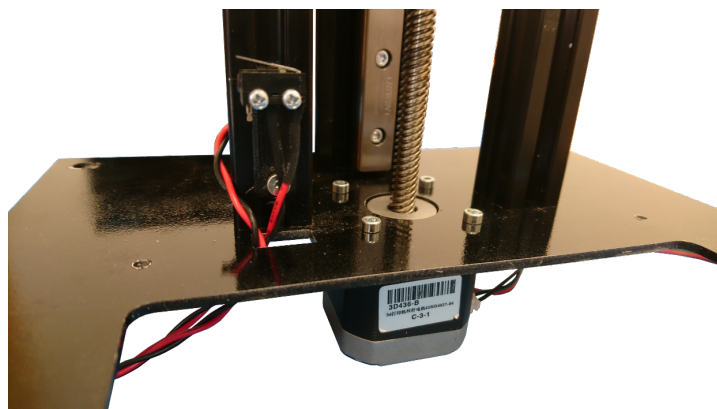


Obrázek 3.21: Požadavky na posuvný mechanismus

na nosnících přišroubovaných pouze jedním šroubem. Zajištění rovnoběžnosti při konstrukci by tak bylo mnohem náročnější.



Obrázek 3.22: Varianty řešení lineárního posuvu



Obrázek 3.23: Konstrukční řešení osy Z

Pro pohon byl zvolen krokový motor typu NEMA 17 s úhlem kroku 1.8deg, dvěma fázemi a maximálním proudem na fázi 1,2 A. Kvůli nedostupnosti krokových motorů typu NEMA 17 s pevně zabudovanou závitovou tyčí v době výroby byl na konstrukci prototypu zvolen dodavatel, který není z hlediska robustnosti dodavatelského řetězce nejvhodnější. Firma Anycubic vyrábí konkurenční tiskárnu Anycubic Photon (viz kapitola 1.5) a vybraný motor je náhradní díl do této tiskárny. Je pravděpodobné, že po čase společnost stáhne tiskárnu z trhu a nahradí ji novějším modelem, který může využívat jiný motor. Případný zájemce, jenž si bude chtít postavit tiskárnu Oliver tak bude postrádat kritický díl osy Z. V době psaní práce je však už situace na trhu s krokovými motory s pevně zabudovanou závitovou tyčí mnohem lepší, a tak by neměl být problém zajistit motor podobných parameterů od jiného výrobce (řadič desky Oliver board podporuje prakticky všechny motory NEMA 17, jediným limitem je maximální proud 1 A, v případě vyššího proudu je nutné použít odpovídající chladič).

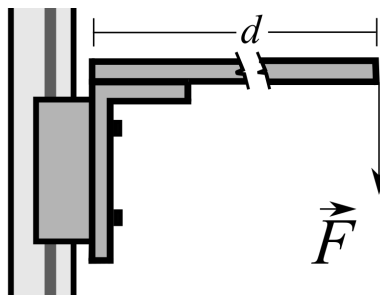
Dodavatelem lineárního vedení je společnost HiWin. Jedná se o řadu MGN s pojezdovým vozíkem MGN12H. Každý pojezdový vozík má stanovený maximální přípustný moment ve všech třech osách. Pro osu Z je kritické zvážit moment v rovině zatížení podložky při tisku. I přes použití FEP fólie totiž dochází k přilepení tištěného objektu k fólii a při vertikálním posuvu tak musí motor vyvinout značnou sílu k odlepení objektu od fólie. Tím vznikají značné momenty působící na pojezdový vozík při posuvu. Na zvolený vozík může dle následujícího výpočtu působit maximální síla 356 N:

$$M = d \cdot F$$

$$d = 0,101 \text{ m}$$

$$M = 36 \text{ N m}$$

$$F = \frac{36}{0,101} = 356 \text{ N}$$

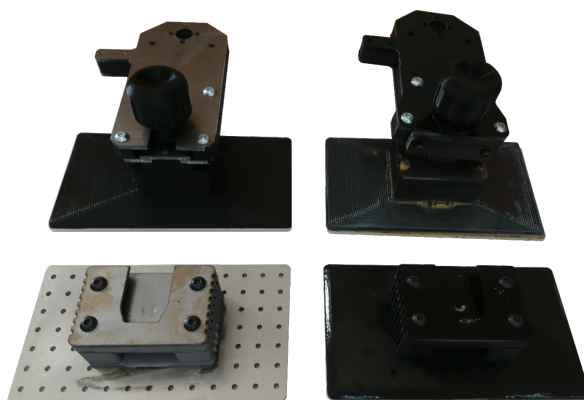


(a) Zatížení pojezdového vozíku

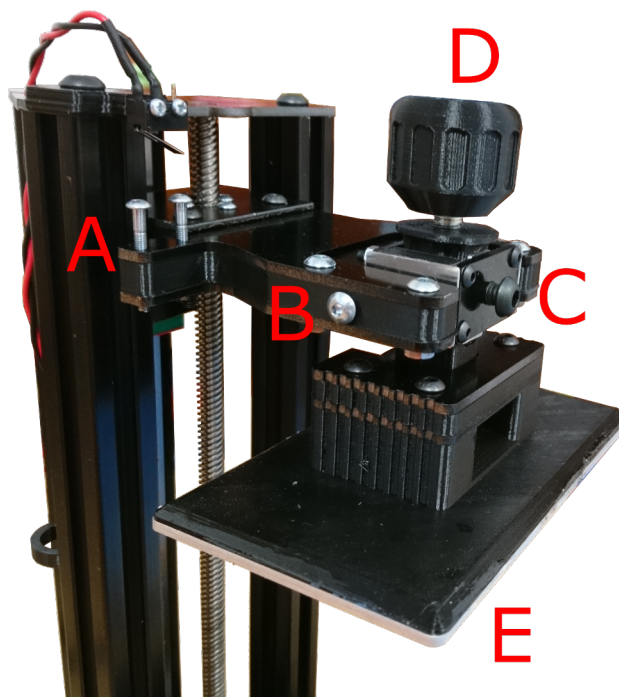
Maximální zatížení 356 N bylo shledáno jako dostatečné. Bohužel už nezbyl čas k experimentům, které by tuto domněnku potvrdily (např. v podobě sestavení aparatury ke změření přilnavosti používaného fotopolymery k FEP fólii). Na obou koncích pojezdu jsou koncové spínače, které brání nabourání pojezdové konstrukce a zároveň slouží ke kalibraci krokového motoru.

Splnění druhého požadavku v podobě přesné kalibrace se ukázalo jako značně náročné. Jedním z cílů práce byla i snadná výroba tiskárny v amatérských podmínkách ostatními nadšenci do 3D tisku. Z toho důvodu bylo upuštěno od využití CNC obrábění během realizace tiskárny. Kalibrační mechanismus se tak skládá pouze z tištěných dílů a z kovových desek vyřezaných laserem. Při vývoji byly vyvinuty a otestovány celkem čtyři varianty, z nichž zcela funkční byla až ta poslední. Jednotlivé verze se od sebe liší možnostmi kalibrace. U finální verze lze podložku volně kalibrovat ve všech třech osách.

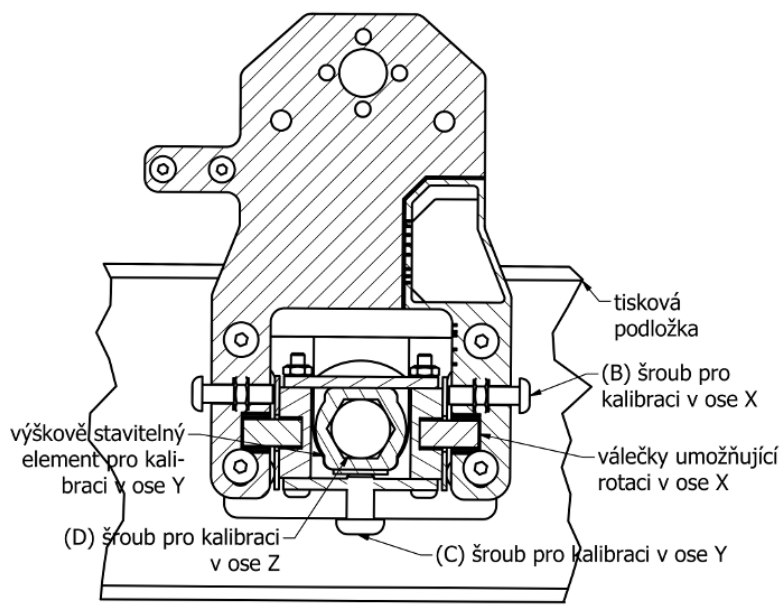
Základem celého kalibračního modulu je otočná kolébka, která umožňuje otáčení podložky. Uvnitř kolébky je díl s čtvercovým průřezem, kterým prochází utahovací šroub (D). Kolébka má vpředu utahovací šroub (C). Tlakem na čtvercový díl se tak zamezí jeho dalšímu pohybu. Stejný princip je uplatněn i při znehybnění kolébky samotné. Z obou stran jsou šrouby (B), které působí tlakem na kolébku a znemožňují její další pohyb. Na části plastových dílů, kde působí tlak šroubů, jsou epoxidovým lepidlem přilepeny hliníkové podložky. Tím je zabráněno deformaci plastových dílů. Při povolení utahovacího šroubu (D) je možné podložku (E) vyjmout nebo otočit v ose Z.



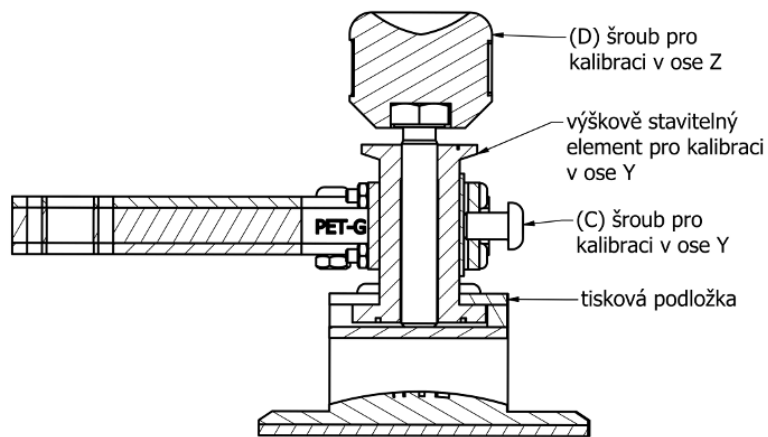
Obrázek 3.24: Vývoj tiskové podložky



Obrázek 3.25: Kalibrační mechanismus: (A) šrouby pro kalibraci koncových spínačů, (B) šroub pro kalibraci v ose X, (C) šroub pro kalibraci v ose Y, (D) šroub pro upevnění podložky a pro kalibraci v ose Z, (E) tisková podložka

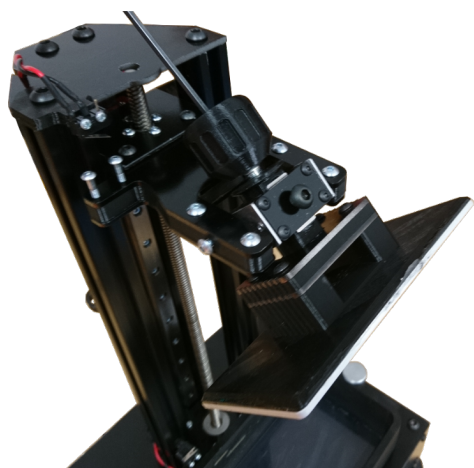


(a) Kalibrační mechanismus: pohled shora

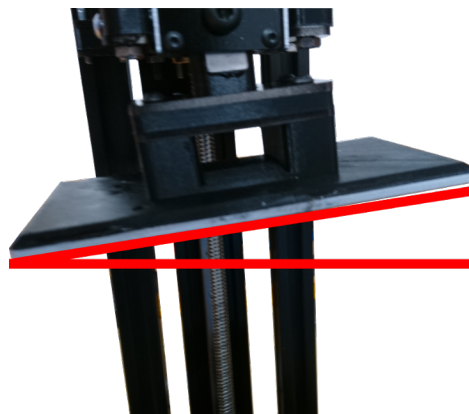


(b) Kalibrační mechanismus: pohled ze strany

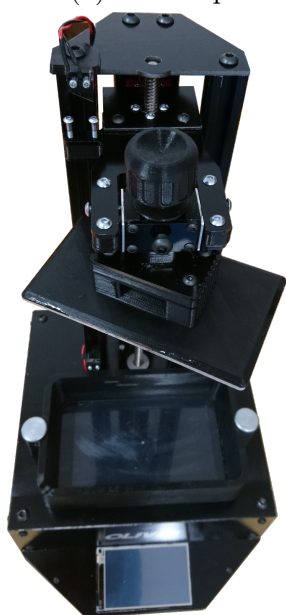
Obrázek 3.26: Technická dokumentace ke kalibračnímu mechanismu



(a) Rotace podložky v ose X



(b) Rotace podložky v ose Y



(c) Rotace podložky v ose Z

Obrázek 3.27: Kalibrace podložky

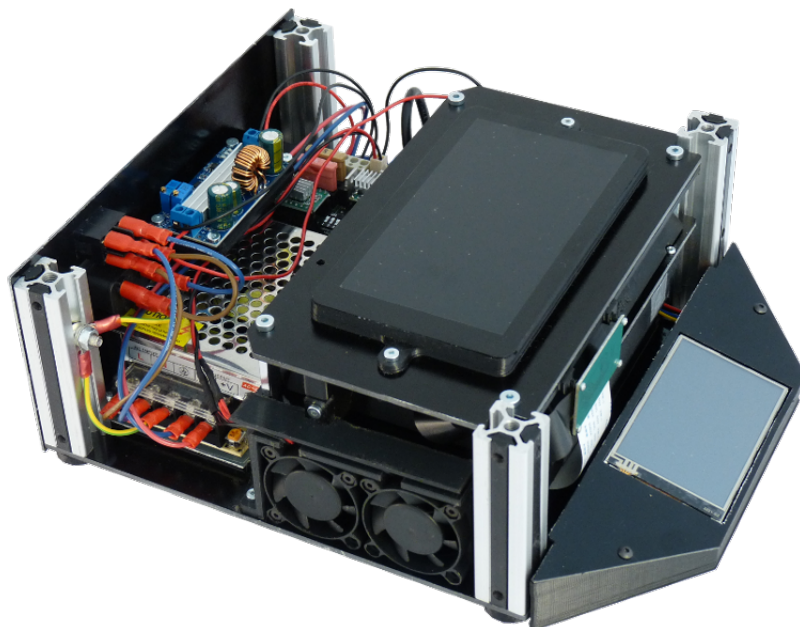
3.1.6 Nosná konstrukce

Nosná konstrukce tvoří pevný rám tiskárny a jsou k ní připevněny všechny funkční moduly. Přestože jediná pohyblivá osa je osa Z, kvůli přesnosti jsou nároky na stabilitu konstrukce velké. Výběr provedení konstrukce dále ovlivňuje parametry, jako jsou rozměry, cena a výrobní náročnost zařízení. Je jí tedy třeba věnovat náležitou pozornost. Amatérské varianty, jako konstrukce ze dřeva apod., byly vyloučeny hned. Detailně jsem se zabýval pouze rámovou konstrukcí ve spojení s ocelovými plechy řezanými laserem a ohýbanou plechovou konstrukcí (z hliníkových plechů řezaných laserem). Při rozhodování byl brán ohled na následující faktory:

- Tuhost konstrukce: Závisí hlavně na síle materiálu a racionálním návrhu. Pokud se ignorují faktory, jako poměr váha/výkon a optimalizace pro masovou výrobu, tak lze u obou variant dosáhnout značné tuhosti konstrukce
- Opravitelnost zařízení: Rámová konstrukce se skládá z více dílů, které jsou spojeny pouze šrouby. V porovnání s komplikovanou ohýbanou konstrukcí je zařízení z hliníkových profilů snáze opravitelné.
- Výrobní náročnost: Hliníkové profily lze nařezat na každé kolmé pile a firem zabývajících se laserovým řezáním prototypů je také mnoho. Na ohýbání plechů v rámci výroby prototypů se však již specializuje méně společností. Při ohýbání plechů je navíc nutné dbát na přesnější výrobní tolerance.
- Inženýrská náročnost: Rámová konstrukce je mnohem jednodušší a tedy rychlejší na návrh. Ohýbaná konstrukce vyžaduje propracovaný návrh a často několik vývojových iterací, než do sebe všechny díly perfektně pasují. Z toho plynou i mnohem vyšší vývojové náklady.
- Estetické provedení: Rámová konstrukce umožňuje vytvoření pouze ostrých úhlů. Zařízení tak nepůsobí příliš vybroušeným a profesionálním dojmem. Ohýbaná konstrukce poskytuje mnohem větší designérskou volnost a přímo vybízí k experimentování s osobitým a originálním designem a provedením výrobku.

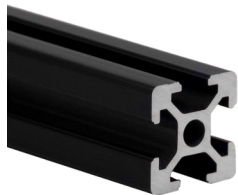
- Kompaktnost: Právě díky mnohem vyšší flexibilitě při návrhu ohýbané konstrukce je možné vytvořit kompaktnější a skladnější zařízení. U rámové konstrukce je návrhář svázán přísně geometrickým návrhem.
- Cena: Z důvodů vyšší výrobní náročnosti je ohýbaná konstrukce dražší (při kusové výrobě). Při zohlednění i vývojových nákladů tak vychází ohýbaná konstrukce mnohem draž než rámová.

Z důvodů časové a finanční náročnosti realizace ohýbané plechové konstrukce byla zvolena varianta rámové konstrukce s ocelovými plechy.

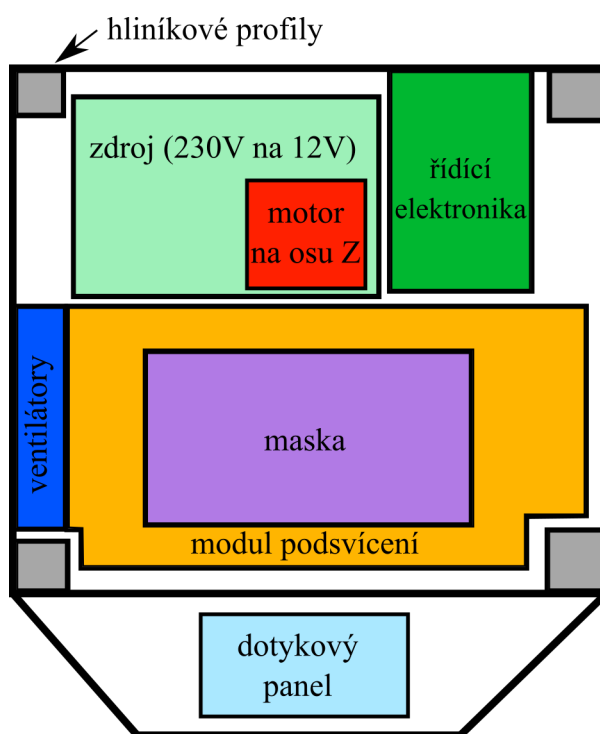


Obrázek 3.28: Uspořádání součástek

Při výběru dodavatele hliníkových profilů byl brán ohled hlavně na cenu, kvalitu a dopravu. Nakonec byli vybráni dva dodavatelé (z důvodu požadavku černého eloxování). Neeloxované profily dodala firma Modular Assembly Technology a černé eloxované profily jsou z internetového tržiště Aliexpress. Profily mají průřez 20 mm × 20 mm.



Obrázek 3.29: Hliníkové profily, převzato z [26]

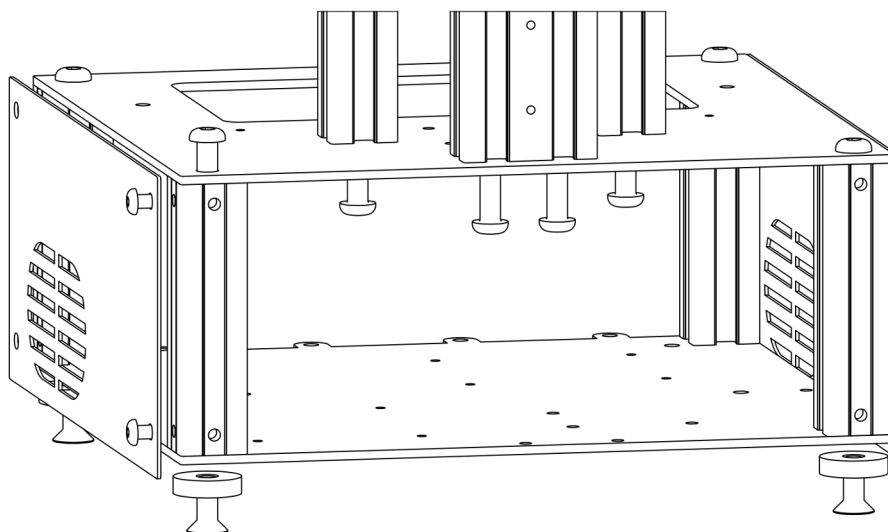


Obrázek 3.30: Blokové schéma hlavních komponent tiskárny

Tiskárna Oliver používá tři různé plechy:

- Ocelový plech 2,5 mm DC01
- Hliníkový plech 1 mm AW 5754
- Hliníkový plech 2,5 mm AW 5754

Všechny plechy byly zakázkově vyrobeny a natřeny celkem sedmi vrstvami barvy v následujícím pořadí:



Obrázek 3.31: Uchycení plechů

- 3x základní nátěr
- 2x barevný nátěr (RAL 9005 a RAL 9001)
- 2x krycí nátěr

Tiskárna Oliver používá celkem 35 tištěných dílů z materiálu PET-G. Každý díl je označen identifikačním kódem (např. 3D05) a revizním kódem (např. 1C). Díky rychlému a levnému tisku prošel téměř každý plastový díl několika iteracemi.



Obrázek 3.32: Popis plastových dílů

3.1.7 Kryt

Ochranný kryt z plexiskla chrání tiskárnu nejen před zásahem uživatele v průběhu tisku, ale také pomáhá omezit únik nebezpečných výparů z fotopolymeru. Oranžová barva má kromě estetického významu i bezpečnostní význam. Slouží jako ochrana uživatele před UV zářením při poruše masky.



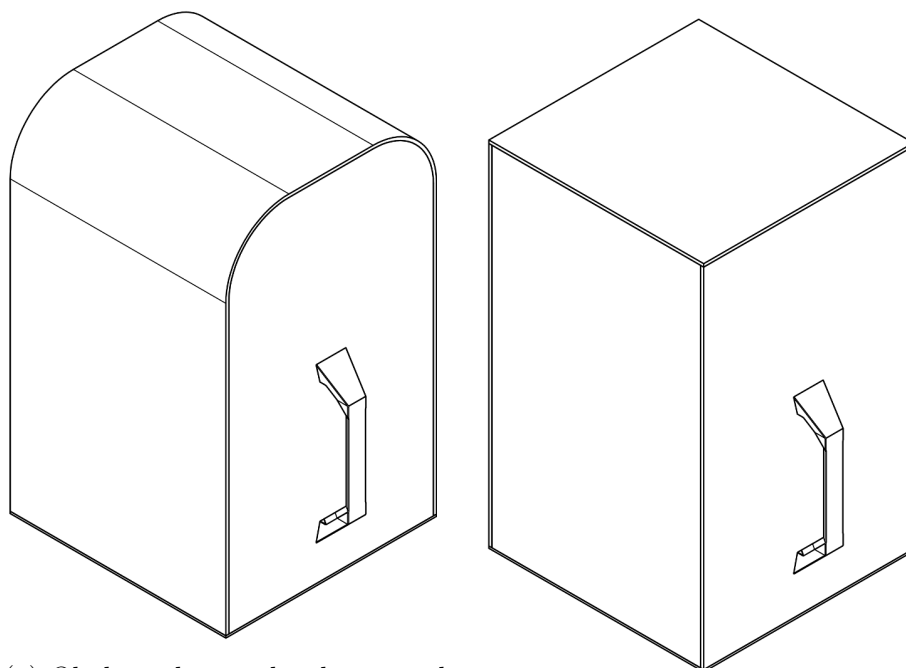
Obrázek 3.33: Rapidní iterace díky 3D tisku

Dále snižuje propustnost fialového spektra z vnějšího prostředí a omezuje tak samovolné tuhnutí fotopolymeru ve vaně.

Při volbě řešení byl brán ohled kromě výše zmíněných vlastností i na cenu a dostupnost dílů. Byly zvažovány dvě varianty:

1. Ohýbaná konstrukce: plexisklo lze velmi dobře tepelně tvarovat. Výsledná konstrukce by se skládala pouze ze tří částí, byla by ale mnohem dražší na realizaci a případná vlastní výroba dalšími zájemci o tiskárnu by byla značně komplikovaná. Z těchto důvodů bylo od této varianty upuštěno.
2. Lepená konstrukce: Zvolené řešení se skládá z pěti kusů plexiskla slepených lepidlem na plexisklo.

Ze spodní části plexiskla je nalepena ochranná guma bránící poškození lakovaného plechu a ze stran jsou přilepena madla pro manipulaci s krytem. Realizace proběhla dle očekávání a kryt plní svoji funkci.



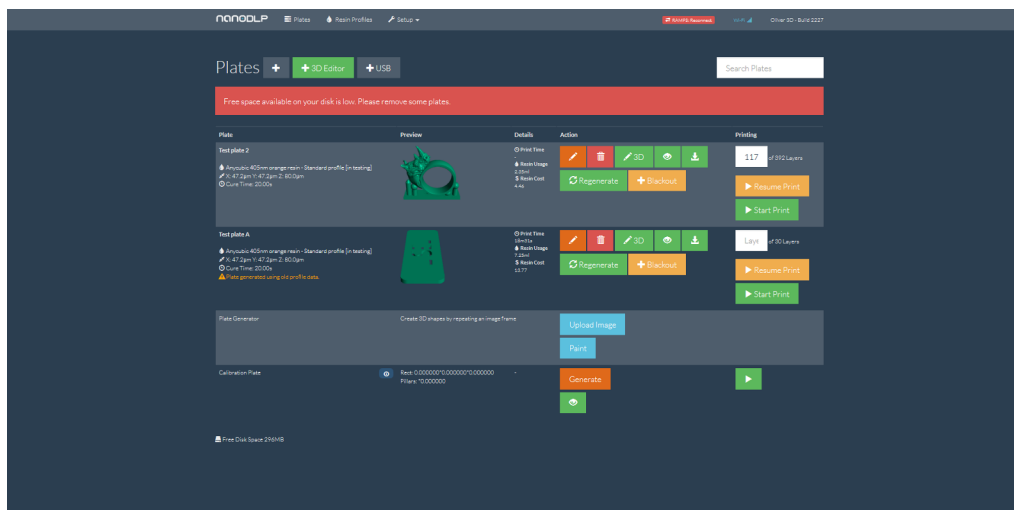
(a) Ohýbaná konstrukce krytu z plexiskla. K ohýbanému dílu by se ze stran přilepily boční díly.
(b) Lepená konstrukce krytu z plexiskla

Obrázek 3.34: Zvažované varianty realizace krytu



Obrázek 3.35: Realizovaná verze ochranného krytu z plexiskla (varianta b)

3.2 Firmware a Software



Obrázek 3.36: Software NanoDLP

Firmware (řídící systém zařízení) ovládá veškeré elektrické komponenty tiskárny. Bez firmwaru by Oliver byl jen vysoce sofistikovaným těžítkem. Zpravidla trvá vývoj i velmi triviálního firmwaru několik měsíců, což v mém případě nebylo realizovatelné. Využil jsem proto externí řešení v podobě programu NanoDLP, který je tvořen jak firmwarem, tak i příslušným softwarem, přes který může uživatel tiskárnu ovládat.

Program NanoDLP funguje jako samostatný lokální webový server. Díky tomu uživatel nepotřebuje instalovat dedikovaný program na svůj počítač a může tiskárnu ovládat přes svůj webový prohlížeč tak, že do adresního řádku napíše IP adresu zobrazenou na ovládacím displeji tiskárny. Tiskárnu lze ovládat i přes chytrý telefon nebo tablet. Pro lepší pochopení fungování celého řídicího systému je v dalších odstavcích vysvětlen průběh přípravy tištěného objektu a posléze i role firmwaru a softwaru při vlastním tisku objektu.

3.2.1 Proces tisku

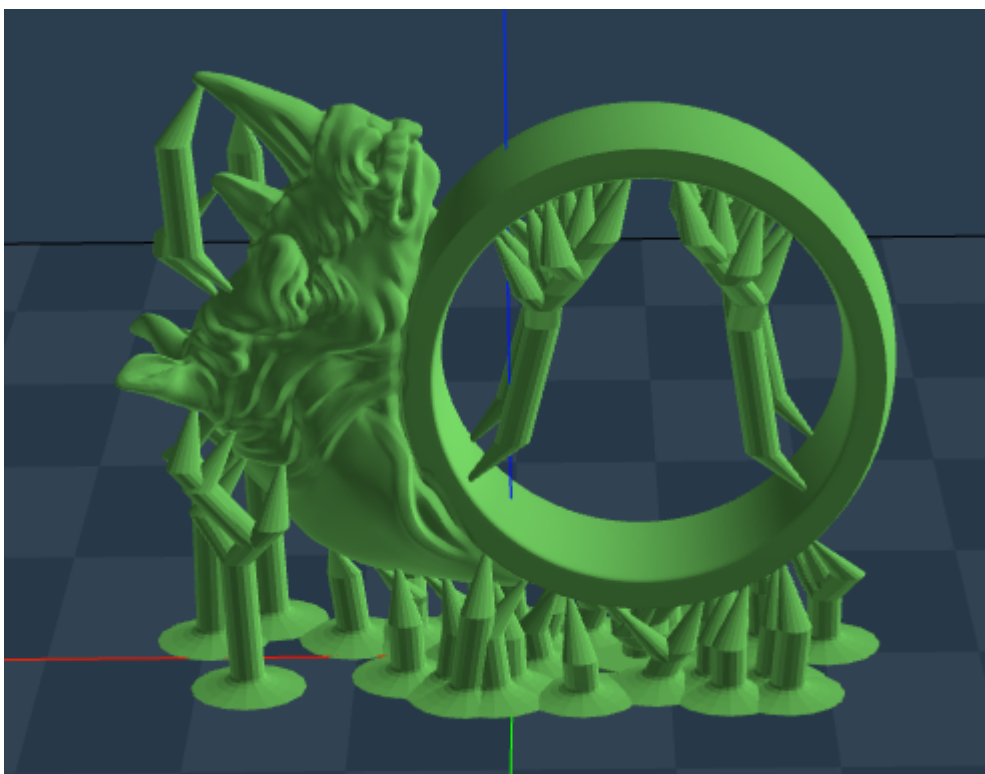
Nejprve je třeba 3D model ve formátu STL nahrát do tiskárny. V případě 3D modelů neznámé kvality stažených z internetu je vhodné ještě před nahráním

využít specializovaného softwaru (jako např. Autodesk Netfabb) k opravě STL souboru. Data popisující 3D model bývají často poškozená a to by mohlo mít za následek chybu při pozdější přípravě modelu či nesprávně vytištěný model. Program NanoDLP zatím neumí automaticky opravovat poškozené STL modely. Po nahrání je třeba model dále připravit na tisk.

Důležitou roli hraje správná orientace modelu. Tištěný objekt má tendenci se lepit k FEP fólii a v případě velkého průřezu modelu u fólie a malého průřezu v základně (kde je přilepen k hliníkové podložce) se může model utrhnout a spadnout do vany. Proto je třeba jej nasměrovat tak, aby měl u základny velký průřez. To často není možné, a proto se používá podpěr, které se po dokončení tisku odstraní. Model se tedy tak trochu „tiskne ve vzduchu“, jinými slovy je u podložky držen pouze podpěrami, které se posléze odstraní. Správná orientace modelu a přidání podpěr je zatím plně manuální činnost, kterou musí uživatel dobře zvládnout, aby mohl úspěšně tisknout i složitější 3D modely. Komerční tiskárny s cenou v řádu stovek tisíc Kč mají orientaci modelu i generování podpěr již plně automatizované.

Po přípravě modelu si musí uživatel zvolit fotopolymer, ze které bude tisknout. V uživatelském balíčku, který je ke stažení z webových stránek (www.oliver3d.com), je zahrnut pouze jediný fotopolymer (z produkce firmy Anycubic). Tvorba profilu pro jiný fotopolymer bohužel zatím ze značné části probíhá ve stylu pokus / omyl. Je třeba především nastavit dobu vytvrzování fotopolymeru, jenže tu výrobci fotopolymerů neuvádějí (z důvodu velkých rozdílů mezi různými tiskárnami). Proto je běžné provést jeden či více testů nového fotopolymeru, při kterých uživatel délku osvitů nastaví. Udávají se dva parametry: (1) délka osvitů několika (uživatel upřesní kolika) prvních vrstev (většinou 80 až 150 sekund) a (2) délka osvitů zbylých vrstev (většinou 8 až 20 sekund). První vrstvy se musí dokonale přichytit k hliníkové podložce, a proto je délka osvitů několikanásobně vyšší. Poté, co si uživatel zvolí fotopolymer, tiskárna model připraví k tisku.

Proces automatické přípravy se nazývá slicování. Jedná se o běžně používaný proces i v oblasti FFF tiskáren a spočívá v rozřezání 3D modelu na jednotlivé vrstvy o tloušťce 25 až 100 mikrometrů (tloušťku si může uživatel zvolit). Software tedy v podstatě připraví řadu snímků, které bude při samotném tisku promítat přes projektor po určitou dobu. Po dokončení slicování (většinou trvá několik minut) je objekt připraven k tisku.



Obrázek 3.37: Podpěry modelu

Před tiskem je však třeba se ujistit, jestli je tisková podložka řádně zkalibrována. Opět se zatím jedná o zcela manuální proces. Nejprve je třeba povolit všechny kalibrační šrouby, položit obyčejný kancelářský papír (který má tloušťku zhruba 100 μm , tedy podobnou jako FEP fólie) na ochranné sklo masky a posunout podložku do nejnižší možné pozice dané koncovým spínačem. Toho lze docílit jak přes webové rozhraní, tak i přes dotykový displej tiskárny. Když je podložka v nejnižší poloze, tak se kalibrační šrouby utáhnou a na webovém rozhraní (nebo na displeji) uživatel stiskne tlačítko “Calibrate”. Tisková podložka vyjede do nejvyšší polohy a tiskárna je zkalibrována. Pro kontrolu je doporučeno ještě jednou posunout podložkou do nejnižší polohy a zkusit pohyblivost papíru. Pokud lze s papírem obtížně hýbat (nepřetrhne se ani není zcela volný), je podložka zkalibrována správně.

Po kalibraci uživatel vloží tiskovou vanu, nalije fotopolymer a může začít s tiskem. K zahájení lze opět použít buď webové rozhraní, nebo dotykový displej tiskárny, kde se zobrazí seznam připravených (naslicovaných) objektů.

Po dobu tisku jsou uživateli zobrazeny základní údaje o průběhu tisku (předpokládaná doba dokončení, počet vytištěných vrstev apod.) a stav tiskárny (teplota procesoru, vytížení paměti apod.). Po vytištění podložky vyjede do horní pozice a uživatel musí vytištěný objekt očistit v isopropylalkoholu a vytvrdit pod UV zářením. Podrobněji je celý tiskový proces vysvětlen v uživatelském manuálu dostupném na www.oliver3d.com (v angličtině).

3.2.2 Technické řešení

Z popisu výše je zřejmé, že firmware a software musí zajišťovat celou řadu funkcí. Avšak vzhledem k tomu, že NanoDLP není open source software a nemám tedy přístup ke zdrojovému kódu, mohu se zde omezit pouze na zcela elementární výklad konkrétní technické implementace níže zmíněných požadavků:

- Vykreslování obrazu na masce dle zdrojových dat
- Řízení osy Z
- Řízení dalších elektrických systémů tiskárny (UV zdroj apod.)
- Řízení dotykového displeje a zprostředkování rozhraním mezi uživatelem a strojem
- Funkci webového serveru se vzdáleným přístupem přes webové rozhraní

Základ firmwaru tvoří Linuxový operační systém Debian, na němž je nainstalován program NanoDLP. Jak již bylo řečeno, Raspberry Pi zde funguje jako webový server, který je připojen na internet a je tedy ohrožen kybernetickými útoky. Kvůli nedostatku času bylo jako jediné bezpečnostní opatření změněno výchozí heslo administrátorského účtu. Další pokusy selhaly kvůli kolizi s programem NanoDLP. Do budoucna je třeba tento nedostatek vyřešit, lze si totiž představit scénáře, kdy útočník např. v průběhu tisku nahradí některé promítané pláty tak, že výsledný objekt bude mít jiné mechanické vlastnosti. U triviálních výtisků to nemusí být problém, avšak např. při tisku medicínských implantátů to představuje vážné riziko.

Řízení jednotlivých komponentů probíhá přes tzv. GPIO (vstupně-výstupní) rozhraní Raspberry Pi. Všechny komponenty jsou řízeny digitálně

a software využívá k vykreslování knihovnu OpenGL. Vykreslování na masce je zařízeno přes přímý přístup k tzv. framebufferu[27], což je část počítačové paměti, která obsahuje aktuální vykreslovaný snímek. Přímé využití framebufferu bez externí knihovny je sice náročnější na implementaci, ale lze tím docílit nejrychlejšího možného vykreslování na masce. Další technické detaily k softwaru NanoDLP jsem bohužel nenašel.

Celý proces instalace rozhraní pro ovládání displeje byl poměrně komplikovaný, proto uživatelský balíček obsahuje i kompletní diskovou kopii, kterou stačí pouze nahrát na SD kartu a vložit do Raspberry Pi. Software je nutné patřičně nastavit (velikost tiskové plochy, microstepping motorů apod.), avšak disková kopie již toto nastavení tiskárny obsahuje. Uživatel tak získá plně připravený a odladěný operační systém.

Firmware a software obsahuje veškeré základní funkce a tedy funguje, jak má. I přesto se zde nabízí obrovské možnosti zdokonalení. Jedná se o část, se kterou uživatel přijde do styku nejvíce. Softwarové prostředí má určitě rezervy v uživatelské přívětivosti i s přihlédnutím k faktu, že se jedná o zařízení určené pro nadšence. Ti by také určitě ocenili zvýšenou automatizaci některých procesů (přípravu objektu, kalibrace) a předpřipravené profily pro širokou škálu různých fotopolymerů. Ke splnění těchto očekávání by však bylo třeba vytvořit (vzhledem k uzavřenosti řešení NanoDLP) vlastní firmware a software, což by bylo nesmírně časově náročné.

3.3 Fotopolymery

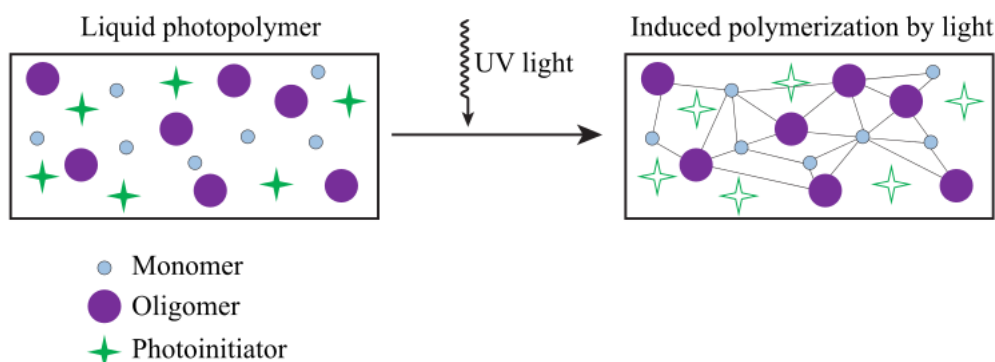
Materiál používaný k tisku se nazývá fotopolymer. Nejedná se o označení konkrétní chemické sloučeniny, nýbrž o označení rozsáhlé skupiny látek (polymerů), které nějakým způsobem reagují, když jsou vystaveny světlu. V této kapitole se zabývám nejen praktickou stránkou použití fotopolymerů, ale i základním popisem chemické struktury této skupiny látek.

Při vývoji bylo využito fotopolymerů od společnosti Anycubic, které byly v době vývoje cenově i logisticky nejdostupnější. Pro představu 1 litr fotopolymeru značky Anycubic stál 22. června 2019 44,8 amerických dolarů. Vzhledem k malému objemu tisknutých objektů by se dalo předpokládat, že náklady na materiál budou minimální. Při tisku je však třeba počítat s tím, že část tekutého (nevytvrzeného) fotopolymeru už nebude možné znovu využít.

Každý tisk má tedy své pomyslné fixní náklady, kterých se nelze vyvarovat. K nákladům za fotopolymer je třeba připočítat náklady na jednorázové rukavice (viz níže), čisticí prostředky, isopropyl alkohol a další pomůcky. Za každý tisk, nezávisle na velikosti tištěného modelu, tak uživatel utratí alespoň 100 Kč (v závislosti na ceně výše zmíněných pomůcek).

Při zacházení s fotopolymery je třeba důsledně dodržovat bezpečnostní opatření vzhledem k jejich vysoké biologické toxicitě a nejasným dlouhodobým účinkům na lidské zdraví. Mezi základní prostředky ochrany patří nitrilové rukavice a ochranné brýle. O bezpečném zacházení s fotopolymery podrobně pojednává oficiální manuál tiskárny Oliver.

3.3.1 Chemická struktura fotopolymerů

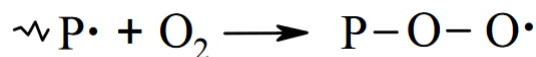


Obrázek 3.38: Fotoiniciátor vyvolá reakci, která spojí monomery a oligomery v jeden polymer, převzato z [28]

Pro zjednodušené vysvětlení chemické podstaty fotopolymerů je třeba nejprve zavést několik pojmů:

- Fotoiniciátor: Látka, jež se po absorpci energie z UV záření rozpadne na několik menších a vysoce reaktivních molekul, které zahájí reakci. Ve stereolitografii se používají např. Ivocerin, BAPO nebo TPO-L [29].
- Monomer: Malá molekula, která se váže k ostatním monomerům a tvoří tak polymer. Zpravidla se využívají methylokryláty (PEGDA, UDMA, TEGDMA apod.) [30].

ostatními monomery tvoří polymerní řetězce [35]. Po čase dojde k terminaci reakcí dvou rostoucích radikálů (makroradikálů). Rozlišujeme terminaci rekombinací a disproportionací. Rekombinace nastává, když se dva rostoucí radikály spojí kovalentní vazbou do jedné makromolekuly. Disproportionace nastává, když volný radikál odtrhne od aktivního řetězce vodík. Vznikají tak dvě makromolekuly, jedna s nasycenou a druhá s nenasycenou koncovou skupinou. Disproportionace může také nastat reakcí volného radikálu s inhibitorem. Toho využívá např. tisková metoda CLIP, kde je využíván kyslík k řízené terminaci reakce. Vzniklý peroxoradikál je mnohem méně reaktivní:



Obrázek 3.41: Kyslík jako inhibitor polymerizace, převzato z [31]

Kationtová fotopolymerizace se využívá pro svoji nízkou objemovou roztažnost (při tuhnutí se objem sníží jen o cca. 3% [36]). Mezi nevýhody patří zvýšená křehkost (přidáním polyesterových a poletherových diolů ji lze však snížit [37]) a vysoká citlivost na vlhkost okolního vzduchu [31].

Je dokumentována i fotopolymerizace pomocí thiol-enových polymerizačních systémů [38] a kombinace kationtové a radikálové fotopolymerizace [39].

3.4 Nakládání s odpady

Fotopolymery přes všechny své výhody představují zásadní riziko pro životní prostředí [14] a lidské zdraví. Proto je třeba řádně zabezpečit veškerou manipulaci s fotopolymery a následně zajistit likvidaci vzniklých odpadů. Oliver je pouze experimentální zařízení, které není určené k prodeji, a proto zdaleka nesplňuje všechny náležitosti uložené příslušnými zákony a vyhláškami Evropské unie. Přesto je v této kapitole alespoň teoreticky zpracována zmíněná problematika včetně možných praktických řešení.

Úplný výčet zdravotních rizik spojených s fotopolymery je zmíněn v uživatelském manuálu, zde se pokusím pouze stručně popsat ty nejvýznamnější. Je třeba si uvědomit, že většina fotopolymerů v tekuté formě se vstřebává pokožkou do organismu, kde se dále usazuje do tukových tkání (játra, mozek apod.). Z toho plynou dvě praktické poučky. Zaprvé je třeba se vyvarovat

kontaktem tekutého fotopolymery s pokožkou, např. použitím vhodných rukavic. Zadruhé je třeba řádně vytvrdit tištěné modely a i případné další objekty potřísněné fotopolymery pod vhodným zdrojem UV záření.

3.4.1 Odpadové hospodářství

Před vytvářením odpadového hospodářství je nejprve třeba stanovit, jaké odpady během provozu vznikají. Tyto odpady posléze průvodce odpadů zpracuje dle tzv. hierarchie odpadů.

Odpady vznikající při provozu zařízení:

- Roztok fotopolymery a isopropyl alkoholu: Vzniká při čištění vytištěného objektu, vany a podložky od zbytků nevytvrzelého fotopolymery
- Roztok fotopolymery, isopropyl alkoholu a vody: Vzniká při druhé fázi čištění (objekty se vyčistí ve vodě)
- Použité nitrilové rukavice
- Další pomůcky kontaminované fotopolymery

Při vytváření procesů nakládání s odpady se využívá hierarchie odpadů. Jedná se o abstraktní model, kde první stupně (1 až 3) jsou preferované. V ideálním případě by na jiné využití odpadů (4) a odstranění odpadů (5) nedocházelo. To je však se současnými technologiemi u fotopolymery nedosažitelné.

Hierarchie odpadů pro provoz tiskárny Oliver:

1. Předcházení vzniku odpadů: Lze dosáhnout hospodárným využíváním tiskárny.
2. Příprava k opětovnému použití: Manuální filtrace nevyužitého fotopolymery a jeho opětovné použití uživatelem.
3. Recyklace odpadů: V době psaní práce nebyl znám žádný způsob recyklace fotopolymery.
4. Jiné využití odpadů, například energetické využití: Řádně označený fotopolymer může být spálen ve spalovně odpadu.

5. Odstranění odpadů: Odstranění tekutých forem fotopolymerů je velice komplikované. Nejjednodušší je nechat fotopolymer ztvrdnout např. pomocí slunečního záření. Pak s ním lze zacházet jako s běžným plastem.

Pro vytvoření kompletního plánu odpadového hospodářství by bylo třeba konzultovat příslušného odborníka z oboru. Níže jsou proto pouze uvedeny povinnosti průvodce odpadů (právnícké osoby) dle 185/2001 Sb. – Zákon o odpadech se stručným nástinem řešení. Je třeba zmínit, že níže zmíněné povinnosti platí pouze pro podnikající fyzické osoby a právnické osoby, při vývoji tiskárny jsem tedy nebyl povinen je dodržovat. U některých povinností je na příkladech uvedeno, co by dodržování zákona obnášelo pro komerční subjekt v praxi.

Průvodce odpadů je povinen:

1. odpady zařazovat podle druhů a kategorií podle § 5 a 6:
 - (a) Komerční užití tiskárny: Nádoby na odpad jsou označeny příslušným číslem dle katalogu odpadů (viz obrázek 3.42)
2. zajistit přednostní využití odpadů v souladu s § 9a: viz hierarchie odpadů
3. odpady, které sám nemůže využít nebo odstranit v souladu s tímto zákonem a prováděcími právními předpisy, převést do vlastnictví pouze osobě oprávněné k jejich převzetí podle § 12 odst. 3, a to buď přímo, nebo prostřednictvím k tomu zřízené právnické osoby
4. ověřovat nebezpečné vlastnosti odpadů podle § 6 odst. 4 a nakládat s nimi podle jejich skutečných vlastností
 - (a) Komerční užití tiskárny: Při dodávání fotopolymerů od jiných výrobců by stačilo konzultovat bezpečnostní list a za jakékoliv odchylky by odpovídal výrobce fotopolymerů. Při výrobě vlastního fotopolymeru by bylo třeba provést laboratorní testování.
5. shromažďovat odpady utříděné podle jednotlivých druhů a kategorií:
 - (a) Komerční užití tiskárny: Pro skladování slouží řádně označené a zabezpečené nádoby

6. zabezpečit odpady před nežádoucím znehodnocením, odcizením nebo únikem
7. vést průběžnou evidenci o odpadech a způsobech nakládání s nimi, ohlašovat odpady a zasílat příslušnému správnímu úřadu další údaje v rozsahu stanoveném tímto zákonem a prováděcím právním předpisem včetně evidencí a ohlašování PCB a zařízení obsahujících PCB a podléhajících evidenci vymezených v § 26. Tuto evidenci archivovat po dobu stanovenou tímto zákonem nebo prováděcím právním předpisem:
 - (a) Komerční užití tiskárny: Bylo by možné zajistit digitálně pomocí vhodného softwaru.
8. vykonávat kontrolu vlivů nakládání s odpady na zdraví lidí a životní prostředí v souladu se zvláštními právními předpisy
 - (a) Komerční užití tiskárny: Nevztahuje se v případě využívání externích dodavatelů fotopolymerů. Při výrobě vlastního fotopolymeru by bylo třeba provést laboratorní testování.

Při komerčním prodeji by bylo třeba mj. vyřešit ekologickou likvidaci zařízení na konci své životnosti a řídit se dalšími platnými předpisy, které se na výrobky prodávané v EU vztahují (Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, nařízení vlády č. 176/2008 Sb. o technických požadavcích na strojní zařízení, ve znění pozdějších předpisů a další).

3.4.2 Budoucí vývoj

V rámci bezpečného a hospodárného provozu tiskárny je zřejmé, že manipulace s lahví fotopolymeru a následné manuální očištění a vytvrzení výtisku představují pro uživatele značné riziko. Do budoucna se tak nabízí několik řešení:

1. Nádoby na jedno použití: Fotopolymer by byl dodáván v podobě malých nádob, které by se připojily k zařízení. Tiskárna by pak dávkovala fotopolymer do vany automaticky. Nevýhodou je velká produkce odpadů

v podobě prázdných nádob (podobně jako u inkoustových tiskáren a tonerů na jedno použití). Výhodou je naprostá eliminace možnosti styku uživatele s fotopolymerem.

2. Možnost doplnění do vestavěného zásobníku: Fotopolymer by v tomto případě byl dodáván ve větších zásobnících a doléval by se do nevyměnitelného zásobníku v tiskárně (např. jako se dolévá benzín do sekačky). Jedná se o ekologičtější řešení, nevýhodou je možnost rozlití fotopolymeru.
3. Automatické čištění a vytvrzení: Zařízení by kromě tiskové komory mělo i čisticí a vytvrzovací komoru, kde by se výtisk bez zásahu uživatele dokončil. Výsledný objekt by byl zcela bezpečný.



Obrázek 3.42: Nádoba na odpady

Na závěr je třeba zdůraznit, že dle současné legislativy neplatí pro fyzické nepodnikající osoby povinnosti průvodce odpadů zmíněné výše. I přesto je povinností každého uživatele, když ne legislativní, tak alespoň morální, zamezit poškozování životního prostředí v důsledku ledabylého nakládání s použitými fotopolymery. Toho lze docílit velice snadno. Stačí, když uživatel shromáždí použitý fotopolymer do odpadní nádoby, kterou posléze odevzdá ve sběrném dvoře.

3.5 Webové stránky a manuál

Vytvořit moderní webové stránky (www.oliver3d.com) bylo od začátku jedním z cílů projektu. Jen tak lze totiž dosáhnout cíle umožnit dalším uživatelům postavit si svoji vlastní tiskárnu Oliver. Jedná se také o skvělou možnost rychlé prezentace produktu, jelikož většina lidí dá přednost krátké webové prezentaci před dlouhou odbornou prací. Zhodnocení několikaměsíčního provozu webových stránek je v kapitole 4.

3.5.1 Koncepce

Internetové stránky jsou navrženy velmi minimalisticky. Jedná se o tzv. one-page design, kdy téměř veškerý obsah je soustředěn na hlavní stranu (kromě podmínek užití a GDPR). Návrh by se dal přirovnat k letáku, kde jsou pouze stručně zmíněny hlavní vlastnosti výrobku s cílem zaujmout. Na začátku je stručně vysvětleno, co je to stereolitografie, posléze jsou uvedeny tři hlavní výhody tiskárny (přesnost, rychlost a spolehlivost) společně s fotografiemi zařízení. Dále je uživateli nabídnut uživatelský manuál a další soubory ke stažení. Na konci stránky je k dispozici kontaktní email.

Podrobnější informace o tiskárně jsou dostupné v uživatelském manuálu v angličtině, který je na stránkách volně ke stažení. Je dostupný jak ve verzi pro tisk, tak ve verzi pro digitální užití (rozdíl je v orientaci stránek). Manuál zahrnuje mj. informace o bezpečném zacházení se zařízením a fotopolymery, o ovládání tiskárny a o pravidelné údržbě. Součástí je také velice podrobný montážní manuál, který byl vytvořen právě díky konceptu digitálního dvojčete (zmíněného v kapitole 2).

3.5.2 Realizace

Webové stránky byly z důvodu úspory času vytvořeny během posledních čtrnácti dnů, a proto nebyly programovány zcela na míru. Byly využity volně dostupné šablony a pomocný software. Nižší kyberbezpečnost a designová kreativita byly pouze malou daní za značně zrychlený vývojový proces.

Základní funkčnost stránek zajišťuje systém WordPress a layout byl vytvořen v softwaru Elementor, který mj. umožňuje snadnou tvorbu responzivního layoutu (stránky jsou uzpůsobeny nejen pro velké monitory, ale i pro

CALIBRATION

Turn on the power. Before starting the actual calibration process, it is a good idea to add some sewing machine oil to the threaded rod.

Check whether the FEP film is in good condition. Always clean it with isopropyl alcohol before printing. Clean the protective glass with isopropyl alcohol too.

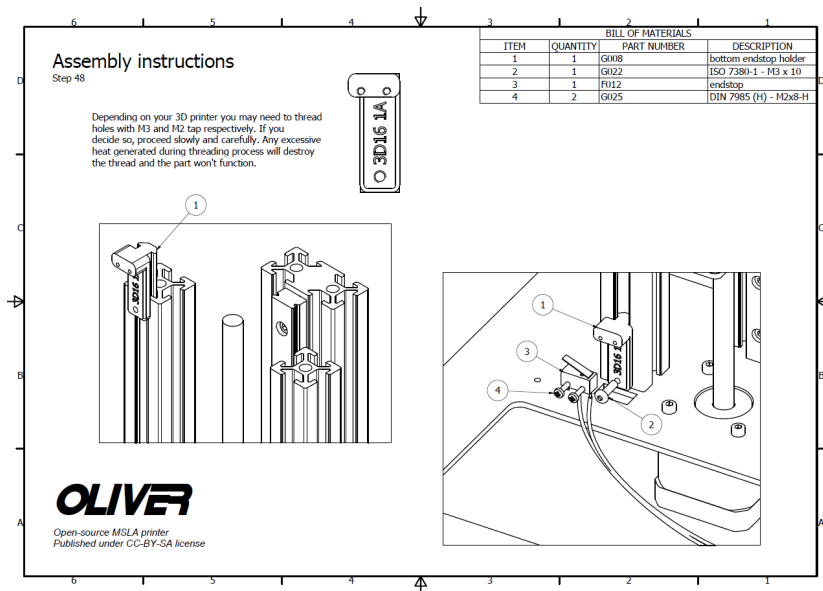


Unscrew the front and TWO side screws:

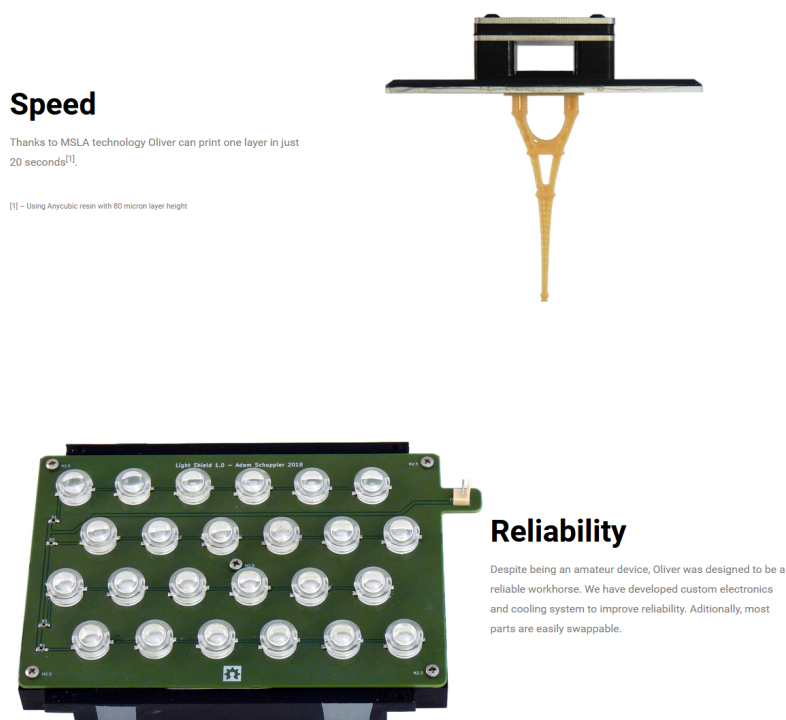


Place a sheet of paper on the protective glass. Then lower the platform all the way down and tighten the calibration screws while holding the platform tightly on the protective glass.

Obrázek 3.43: Uživatelský manuál



Obrázek 3.44: Montážní manuál



Obrázek 3.45: Webové stránky

displeje tabletů a chytrých telefonů). Z důvodu rychlého vývoje byla provedena jen minimální SEO optimalizace (optimalizace pro vyhledávače) a výkonostní optimalizace nebyla provedena vůbec. Stránky se tedy načítají cca. čtyři vteřiny, namísto doporučené jedné vteřiny od společnosti Google [40]. Vzhledem k úzkému zaměření webových stránek však delší doba načítání nepředstavuje velký problém. Součástí každé kvalitní prezentace na internetu jsou fotografie. Bylo proto vytvořeno celkem osm poloprofesionálních fotografií.

Kritickým prvkem moderních webových stránek je vysoká úroveň zabezpečení. Každý provozovatel odpovídá za bezpečnost svých stránek a dnešní útoky mohou mít velké následky. Laik by mohl předpokládat, že u takto malých stránek se nikdo s útokem obtěžovat nebude. Opak je však pravdou a dokládá to i statistika návštěvnosti: za 6 měsíců provozu (srpen 2019 až leden 2020) navštívilo dle statistik Google Analytics stránky celkem 315 uživatelů (někteří i vícekrát), celkových požadavků na server bylo však 55 082 (dle statistik webhostingu). Převážná většina požadavků na zobrazení strán-

nek tak pochází od speciálních programů. Některé jsou neškodné (např. programy, které zahrnují stránky do internetových vyhledávačů), existují však i programy, které cíleně útočí na nezabezpečené stránky.

Kyberútok na malé stránky je zpravidla automatizovaný, nikoliv šitý na míru. Pro správné posouzení rizik a následnou implementaci kyberbezpečnostních opatření je třeba nejprve analyzovat motivaci útočníka [41]:

- Ekonomická motivace: Realizovaná v podobě dvou různých útoků:
 - Infikace počítače: Útočník nahraje na webové stránky malware, spyware nebo jiný software, který infikuje nezabezpečený počítač návštěvníka. Návštěvníci webové stránky si tak kromě informací o tiskárně odnesou virus, který jim třeba vynuluje jejich bankovní účet.
 - Spamová kampaň: Útočník napadne odkazy na webové stránce. Po kliknutí se pak nezobrazí např. informace o technickém provedení tiskárny, nýbrž třeba stránky ilegálního online casina. Jedná se o méně devastující útok, přesto dokáže značně snížit důvěryhodnost stránek.
- Využití zdrojů provozovatele: Útočník se snaží využít systémové zdroje pronajatého serveru. Nejedná se tedy o tradiční útok na webové stránky. V případě špatných bezpečnostních praktik (absence monitorování využití zdrojů ap.) může probíhat i měsíce bez vědomí autora stránek. V lepším případě pak musí vlastník dopláctet za přecerpání systémových zdrojů, v horším případě mu přijde oznámení od příslušných orgánů o podezření z nelegální hackerské činnosti.

Kyberbezpečnost byla implementována následujícím způsobem:

- Prevence:
 - Zálohování: automatizované, redundantní (uložené na více místech), neuložené na webovém serveru stránek (představuje velké bezpečnostní riziko).
 - SSL certifikát: Každý uživatel se k webovým stránkám připojuje přes šifrované HTTPS spojení a je tak minimalizována šance na MITM (man-in-the-middle) útok.

- reCaptcha: tzv. challenge-response test sloužící k ověření, zda-li je přihlašovaný uživatel člověk.
- Hardwarový klíč: Pro přihlášení do administrátorského účtu je třeba kromě zadání hesla vložit do počítače speciální hardwarový klíč⁷, který vygeneruje speciální sekvenci znaků. Slouží jako ochrana v případě ukradení hlavního hesla.
- Detekce:
 - Denní reporty posílané na email (veškerá aktivita na stránkách).
- Auditování:
 - Google Webmaster Tools
- Akční plán pro případ útoku:
 - Vypnutí webových stránek a obnova z poslední zálohy.

3.5.3 Legislativní aspekty

Aby stránky byly v souladu s platnými normami, je třeba řádně ošetřit problematiku osobních údajů a licencí. V zájmu co nejmenšího zásahu do soukromí uživatele (a tedy jednoduchých podmínek ochrany osobních údajů) bylo využití softwaru sledujícího návštěvnost a pohyb uživatelů na stránce limitováno na absolutní minimum. Stránky využívají pouze dvě služby třetích stran, a to monitoring provozu a bezpečnosti stránek od poskytovatele webhostingu OneBit a základní demografickou analýzu Google Analytics. Kompletní znění lze nalézt na webových stránkách.

Vzhledem k využití studentské verze softwaru Autodesk Inventor bylo třeba také řádně ošetřit problematiku licencí. Firma Autodesk Inc. u studentských verzí svých produktů zakazuje jakékoliv komerční využití. Z toho důvodu nebylo možné realizovat původní záměr zveřejnit tiskárnu pod licencí CC BY-SA 4.0⁸, která bezplatně komerční využití třetími stranami umožňuje. Komerční prodej tiskárny zmíněný v kapitole 3.4 se vztahoval na případnou budoucí verzi tiskárny, která by již musela být navržena v komerční verzi

⁷<https://www.yubico.com/>

⁸Plné znění: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.cs>

softwaru Autodesk Inventor. Nakonec byla zvolena licence CC BY-NC 4.0⁹, která povoluje:

- Sdílet – rozmnožovat a distribuovat materiál prostřednictvím jakéhokoli média v jakémkoli formátu
- Upravit – remixovat, změnit a vyjít z původního díla

A to za následujících podmínek:

- Uvedení původu – Je povinností každého uživatele přijímajícího licenci uvést autorství, poskytnout s dílem odkaz na licenci a vyznačit provedené změny. Toho lze docílit jakýmkoli rozumným způsobem, nicméně nikdy ne způsobem naznačujícím, že by poskytovatel licence schvaloval nebo podporoval Vás nebo Váš způsob užití díla.
- Nekomerční užití – Je zakázáno užívat dílo pro komerční účely.

Licence stránek je bohužel ošetřena přísněji. Dle podmínek užití společnosti Elementor LTD. nelze grafiku, písmo, interaktivní prvky a tzv. „Look and Feel“ stránek (lze přeložit jako umělecký dojem) vytvořených v softwaru Elementor zveřejnit pod open source licencí. Na stránky se tak v plném znění vztahuje autorský zákon se všemi právy a povinnostmi z něho vyplývajícími. Fotografie tiskárny a manuál jsou zveřejněny opět pod licencí CC BY-NC 4.0.

3.6 Ekonomická část

V cíli práci je uvedeno, že tiskárna míří především na segment technických inovátorů a nadšenců. Obě skupiny spojuje kromě vysoké technické vzdělanosti také značně omezený rozpočet, a proto byla celková výrobní cena tiskárny v průběhu vývoje pečlivě hlídána. Výsledná cena se ustálila na 16 230 Kč vč. DPH. Stanovený rozpočet tak byl překročen o cca. 8 %. Celkový rozpis nákladů je dostupný v příloze, níže je pouze přehled cen jednotlivých modulů tiskárny. U modulů je v závorce uvedeno písmeno, které je shodné s označením modulu v kusovníku.

⁹Plné znění: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.cs>

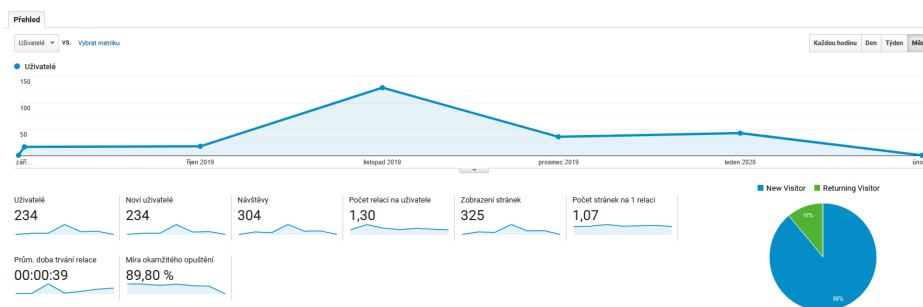
Modul	Cena
(G) modul osy Z	3 575,- Kč
(A) modul masky	2 745,- Kč
(K) modul plexiskla	2 463,- Kč
(E) Oliver Light shield	1 597,- Kč
(F) modul elektromechaniky	1 337,- Kč
(D) Oliver Board	1 027,- Kč
(J) modul nátěru	977,- Kč
(B) modul UV zdroje	911,- Kč
(I) modul předního displeje	616,- Kč
(H) modul konstrukce	565,- Kč
(C) modul vany	418,- Kč
Celkem	16 230,- Kč

Tabulka 3.5: Rozpis kusovníku

4 VÝSLEDKY

Na začátku práce jsem si vytyčil cíl vytvořit funkční, kompaktní a vysoce přesnou open source MSLA tiskárnu. Mou vizí bylo zaplnit prázdné místo na trhu, kde v té době chyběla open source MSLA tiskárna, která by byla schopná konkurovat komerčním zařízením v cenové kategorii do 20 000 Kč. Sám jsem si stanovil ještě přísnější rozpočet – pouhých 15 000 Kč. Nakonec, abych dostal open source filozofii, bylo zcela zásadní tiskárnu velice kvalitně zdokumentovat a zveřejnit na internetu. Podařilo se tyto ambiciózní cíle splnit?

Potenciální zájemce o tiskárnu musí nejprve navštívit oficiální webové stránky www.oliver3d.com. Stránky jsou v provozu od 31. srpna 2019, přesně podle plánu. Díky rigoróznímu zabezpečení zatím stránky nepostihl jediný výpadek, ani neochromil úspěšný kybernetický útok. Webovou prezentaci navštívilo (k 2. 2. 2020) již 234 uživatelů z celého světa a prozatímní ohlasy na webovém fóru www.reprap.org jsou velmi pozitivní. Podařilo se vytvořit detailní uživatelský manuál včetně balíčku digitálních podkladů. Potenciálnímu zájemci tak nic nebrání, aby si tiskárnu postavil.



Obrázek 4.1: Návštěvnost webu (k 2.2.2020)

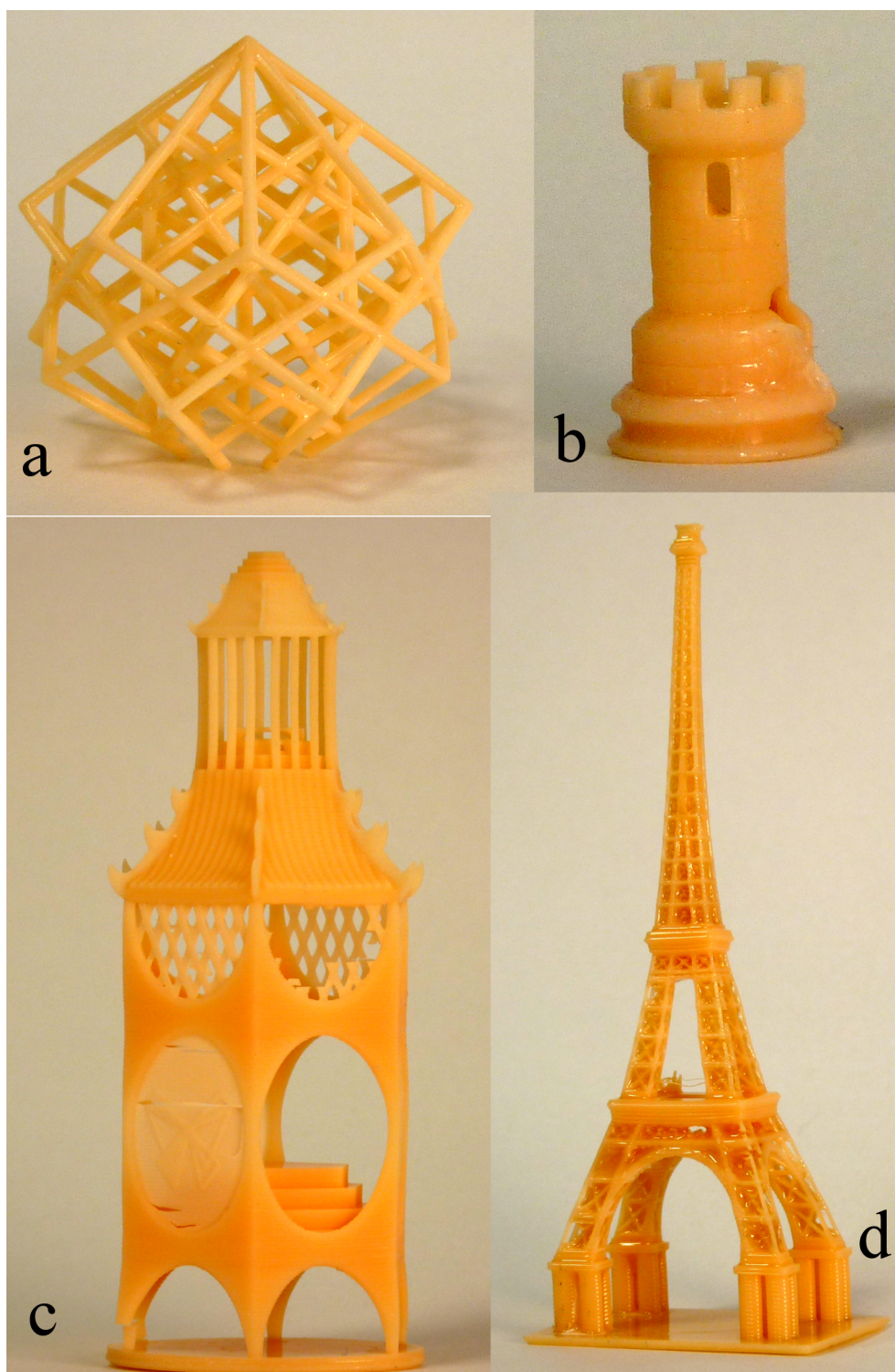
Při výrobě zařízení není třeba žádných mimořádných technologií. Zájemce

si vystačí s díly z internetu. K výrobě vlastních dílů potřebuje přístup k 3D tiskárně, laserové řezačce a k zařízení pro výrobu plošných spojů. Jen v České republice existují desítky firem, které jsou schopné výše zmíněné díly na míru zhotovit a s rozmachem veřejně dostupných dílen je dnes možné si všechny díly zhotovit v každém větším městě i svépomocí. Celková cena za díly činí 16 230 Kč vč. DPH, tedy o 8 % více, než bylo původně v plánu. Uživatelský balíček zahrnuje i nastavený a odladěný firmware tiskárny, takže po sestavení tiskárny dle montážního manuálu může uživatel přejít přímo k tisku. Zařízení bylo již v provozu desítky hodin bez žádných známek poruch či problémů.

Jestliže uživatel tiskárnu zhotovil, může se pomocí manuálu pokusit o první tisk. Předstartovní příprava většinou trvá cca. 15 minut. Zahrnuje přípravu pracoviště pro manipulaci s fotopolymery a kalibraci. Samotný tisk trvá v řádu hodin, doba závisí především na výšce vrstvy a druhu fotopolymery. Post-processing zabere rovněž cca. 15 minut. Skládá se z očištění modelu a jeho umístění pod UV zdroj pro dokončení vytvrzovacího procesu a z úklidu pracoviště. Z mé zkušenosti je vytvrzování pod UV zdrojem (v mém případě nijak neupravený přístroj na vytvrzování laku na nehty) relativně rychlou záležitostí, která nezabere více než 10 minut. Po dobu manipulace s fotopolymery je třeba dodržovat veškerá bezpečnostní opatření, což je hlavní nevýhoda této technologie.

Z fotek uvedených níže si lze udělat představu o přesnosti tiskárny. Vzhledem k časové náročnosti vývoje a psaní práce bouhžel nezbylo příliš času na samotný tisk. Pokusil jsem se pouze o několik výtisků, přičemž pár z nich selhalo kvůli špatné kalibraci či nevhodnému nastavení. To se však dá u nové tiskárny očekávat a jsem si jist, že po dalších 10 tiscích by kvalita byla o úroveň vyšší. Během realizace také již nezbyl čas na přesné změření tištěných výrobků mikrometrem či ještě lépe 3D skenerem pro ověření přesnosti. Toto měření bych však chtěl provést v nejbližší době.

Tiskárnu lze v současné podobě využít k tisku široké škály precizních výrobků všech tvarů, velikostí a barev. Speciální fotopolymery, mezi něž patří například fotopolymery určené pro odlévání zubních náhrad, nebyly kvůli své vysoké ceně vyzkoušeny. Teoreticky však jejich použití nic nebrání, jelikož mechanismus tisku je zcela totožný s běžnými fotopolymery. Tiskárnu lze také použít k tisku odlévacích forem určených k výrobě odlévaných kovových výrobků (při použití fotopolymery k tomu určenému).



Obrázek 4.2: Ukázkové výtisky. vtištěno dle zdrojových 3D modelů převzatých z a: [42] b: [43] c: [44] d: [45]

5 DISKUZE

I přes chyby a nedostatky první verze má tiskárna Oliver velký potenciál. Nabízí se mnoho směrů, jakými by se bylo možné ubírat při vývoji druhé verze tiskárny.

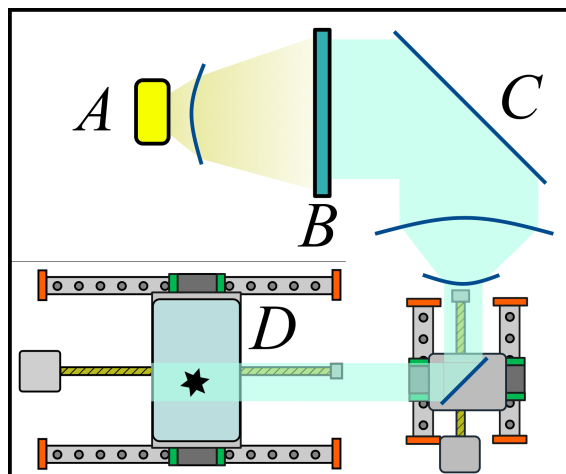
Jednou z možností je vývoj vlastní elektroniky, která by byla lépe uzpůsobená potřebám tiskárny. Současná verze např. nejprve přijme obrazový signál přes ethernet, pak ho řídicí počítač převede na HDMI signál, který je vzápětí převeden drahým převodníkem na MIPI signál. Vytvoření vlastního řídicího počítače, který by obrazový signál z ethernetu převedl přímo na MIPI signál by značně redukovalo výrobní náklady. Díky levnější elektronice by pak mohl být použit např. přesnější kuličkový šroub na ose Z.

Dalším možným vylepšením by bylo zdokonalit uživatelské rozhraní. Problémovou oblastí je hlavně slicování, kde by bylo třeba vytvořit nový software, který by prováděl výpočty lokálně (na počítači), nikoliv na tiskárně. Rozhraní tiskárny by šlo dále zlepšit třeba možností tisknout přímo z flash disku.

Funkce jako odvětrávání s HEPA filtrem nebo vestavěný zásobník by jistě nejen zvýšily uživatelský komfort, ale i celkovou bezpečnost manipulace s tiskárnou. K tiskárně by bylo možné vytvořit i čisticí stanici v zájmu minimalizace kontaktu uživatele s nebezpečnou pryskyřicí. Zdravotní aspekty stereolitografie jsou minimálně probádanou oblastí a je nutné provést další výzkum.

Zajímavým konceptem, který byl na začátku práce zvažován, je tzv. pohyblivé stínítko. Masky (B) je osvětlena zdrojem záření (A). Optická aparatura (C) obraz náležitě zmenší a ten je pak postupně promítán (D). Jedna vrstva se tak může skládat např. z pole 5×5 snímků, které se postupně promítnou. Nevýhodou je podstatně vyšší složitost, kdy je nutné zajistit velmi přesnou kalibraci všech optických prvků. Další nevýhodou je nižší rychlost. Potenciální velkou výhodou je však možnost dosažení mimořádně vysokého

rozlišení s běžně dostupnými komponentami (lineární kolejnice, zrcadla, kolimátor a krokové motory). Od realizace konceptu bylo z důvodů vysokých nároků na přesnost kalibrace upuštěno.



Obrázek 5.1: Pohyblivé stínítko

V posledních letech dochází k nasazování 3D tiskáren přímo do masové výroby [46]. Návrháři 3D tiskáren jsou tak postaveni před nové výzvy, kdy hlavním kritériem už není maximální flexibilita a přesnost, nýbrž rychlost. Stereolitografie je naštěstí pro masovou výrobu perfektní. V praxi využívanou metodou je již několikrát zmíněná metoda CLIP[7], pracující na principu inhibice fotopolymerace pomocí kyslíku. Americký startup Carbon3D, který tuto technologii představil teprve v roce 2015 dosáhl v červnu 2019 hodnoty 2,4 miliardy dolarů a dodával tiskárny mimo jiné i firmě Adidas na výrobu podrážek do bot. Jejich tiskárna však stojí desítky tisíc dolarů[47]. Technologicky je přitom velice podobná tiskárně Oliver. Má pouze několik vylepšení. Je vybavena automatickým doléváním fotopolymeru, vana je opatřena speciálním materiálem na bázi teflonu, který propouští kyslík a tiskárna obsahuje tlakovou bombu s kyslíkem. Je tedy zřejmé, že cena v řádu desítek tisíc dolarů je značně nadhodnocená a obdobné zařízení by jistě šlo vyrobit za zlomek ceny.

Mimořádně aktivní výzkumnou oblastí je chemie fotopolymerů. Jedná se o relativně novou oblast s velkým potenciálem posunout stereolitografii na novou úroveň. Bagheri a spol. [30] identifikovali pět hlavních oblastí současného výzkumu:

1. Zvýšení biokompatibility materiálů.
2. 4D tisk: Čtvrtou dimenzi představuje čas a vytištěné objekty jsou tak schopné v reálném čase reagovat na vnější prostředí, jako např. na přítomnost vody, pH okolního prostředí apod.
3. Biotisk
4. Zlepšení mechanických vlastností materiálů, hlavně snížení křehkosti a vytvoření elastických fotopolymerů.
5. Použití fotoiniciátorů s vyšší vlnovou délkou (500 nm a více), které umožní (i) větší kontrolu nad fotopolymerizační reakcí, (ii) větší průnik světla a tedy větší tloušťku vrstvy (100 μm a více), jenž umožní rychlejší tisk. Tyto fotoiniciátory mají velký potenciál i v biotisku a tkáňovém inženýrství, kde UV záření má negativní vliv na tisknuté buňky.

6 ZÁVĚR

Na začátku práce jsem si vytyčil jasný cíl postavit plně funkční open source MSLA 3D tiskárnu, který se mi podařilo splnit. Vytvořil jsem základní odpadové hospodářství a tiskárnu profesionálně prezentoval na internetu. Důležitou součástí prezentace je i 109stránkový anglický manuál, který detailně rozebírá konstrukci a provoz zařízení.

Oliver má samozřejmě i své nedostatky. Náklady na výrobu jednoho kusu překročily původní rozpočet o 8 %. Posuvný mechanismus má stále určité rezervy v kalibraci a uživatelské rozhraní není příliš nakloněné začínajícím uživatelům. Největším nedostatkem je v současné době asi nedostatek ukázkových modelů způsobený špatným rozvržením časového harmonogramu realizace. Všechny zmíněné problémy jsou však relativně snadno řešitelné.

Nabízí se mnoho směrů, kudy se může budoucí rozvoj tiskárny Oliver ubírat. Jednou variantou je vytvořit komerční alternativu, která by mohla konkurovat zavedeným tiskárnám typu Prusa SL1. Dále by bylo možné pokusit se realizovat koncept pohyblivého stínítka, koncept extrémně rychlého tisku pomocí kyslíkové inhibice, či se zabývat vývojem nových fotopolymerů. Jak dokládají mj. ohlasy na webovém fóru RepRap, tiskárna Oliver se úspěšně zařadila mezi open source 3D tiskárny a lze ji považovat za důstojného konkurenta komerčním MSLA tiskárnám.

Bibliografie

Použitá literatura

19. GRIEVES, M.; VICKERS, J. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems [online]. Ed. KAHLEN, Franz-Josef. Ed. FLUMERFELT, Shannon. Ed. ALVES, Anabela. Springer, Cham, 2016 [cit. 2019-09-28]. ISBN 978-3-319-38754-3. Dostupné z DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
31. IRENA, Prokopová. *Makromolekulární chemie* [online]. "Version 1.0". Praha: VŠCHT, 2007 [cit. 2019-11-03]. ISBN ISBN 978-80-7080-662-3. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/.
32. MAREČEK, Aleš; HONZA, Jaroslav. *Chemie pro čtyřletá gymnázia 3. díl*. "2. vydání". Brno: Proton, 2014. ISBN ISBN 978-80-902402-6-1.

Další zdroje

1. WIKIPEDIE, Příspěvatelé. *RepRap project — Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia., 2019 [cit. 2019-09-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=RepRap_project&oldid=906886376.

2. JONES, Rhys; HAUFE, Patrick; SELLS, Edward; IRAVANI, Pejman; OLLIVER, Vik; PALMER, Chris; BOWYER, Adrian. RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica*. 2011, roč. 29, č. 1, s. 177–191. Dostupné z DOI: 10.1017/S026357471000069X.
3. GOHKI, Oda; TAKASHI, Miyoshi; YASUHIRO, Takaya; TAEHO, Ha; KEIICHI, Kimura. *Microfabrication of overhanging shape using LCD microstereolithography* [online] [cit. 2019-11-20]. Dostupné z DOI: 10.1117/12.596758.
4. SCOPIGNO, R.; CIGNONI, P.; PIETRONI, N.; CALLIERI, M.; DELLEPIANE, M. Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey. *Computer Graphics Forum* [online]. 2017, roč. 36, č. 1, s. 6–21 [cit. 2019-09-17]. Dostupné z DOI: 10.1111/cgf.12781.
5. ANDRE, Jean-Claudie; MECHAUTE, Alain Le; WITTE, Olivier De. *DISPOSITIF POUR REALISER UN MODELE DE PIECE INDUSTRIELLE*. Ed. INDUSTRIELLE, INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ. Notice FR2567668. [Cit. 2019-09-18]. Dostupné z: <https://bases-brevets.inpi.fr/fr/document/FR2567668.html>.
6. LARRY JUNIOR, Hornbeck. *Spatial Light Modulation and method*. Ed. PATENT, United States; OFFICE, Trademark. US5061049A. [Cit. 2019-09-20]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US5061049A/en>.
7. TUMBLESTON, John R. et al. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science* [online]. 2015, roč. 347, č. 6228, s. 1349–1352 [cit. 2019-09-23]. ISSN 0036-8075. Dostupné z DOI: 10.1126/science.aaa2397.
8. ZORTRAX S.A. *perspectiva_large.png* [online] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: https://zortrax.com/static/img/inkspire/perspektywa_large.jpg.
9. ZORTRAX S.A. *jar_large.png* [online] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: https://zortrax.com/static/img/inkspire/jar_large.jpg.
10. ZORTRAX S.A. *kolo_large.png* [online] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: https://zortrax.com/static/img/inkspire/kolo_large.jpg.

11. FORMLABS INC. *dental_material_mode_01.png* [online] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: https://formlabs-media.formlabs.com/filer_public_thumbnails/filer_public/99/81/99811abb-6d8c-4e54-bc77-b5e777b68518/dental_material_dental_model_01.png__1354x0_q85_subsampling-2.png.
12. CARBON INC. *FUTURECRAFT4D_PRINT_HERO.png* [online] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: https://m35sf3xtzys1xo2b31hp79pu-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/08/FUTURECRAFT4D_PRINT_HERO.png.
13. FORMLABS INC. *castable_sample_part.png* [online] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: https://formlabs-media.formlabs.com/filer_public_thumbnails/filer_public/fc/73/fc73130a-1706-4a61-b7e7-7e03b2855e2e/castable_sample_part.png__1354x0_q85_subsampling-2.png.
14. MACDONALD, N. P.; ZHU, F.; HALL, C. J.; REBOUD, J.; CROSIER, P. S.; PATTON, E. E.; WLODKOWIC, D.; COOPER, J. M. Assessment of biocompatibility of 3D printed photopolymers using zebrafish embryo toxicity assays. *Lab Chip* [online]. 2016, roč. 16, s. 291–297 [cit. 2019-09-23]. Dostupné z DOI: 10.1039/C5LC01374G.
15. ELEGOO INC. *Mars1.jpg* [online] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: <https://www.elegoo.com/wp-content/uploads/2018/11/Mars1.jpg>.
16. SHENZHEN ANYCUBIC TECHNOLOGY CO., LTD. *Photon_1_1_1800x1800.jpg* [online] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0245/5519/2380/products/Photon_1_1_1800x1800.jpg?v=1563929947.
17. PRUSA RESEARCH S.R.O. *front_closed-1.jpg* [online] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: https://cdn.prusa3d.com/wp-content/uploads/2019/04/front_closed-1.jpg.
18. M. BEAL, George; M. BOHLEN, Joe. The diffusion process. *Special Report* [online]. 1957, roč. 18 [cit. 2019-09-29]. Dostupné z: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1015&context=specialreports>.

20. FRIEDRICH B., Prinz (Panel Chair) et al. *Rapid Prototyping in Europe and Japan* [online]. 1997 [cit. 2019-09-28]. ISBN 1-883712-44-0. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20170830061713/http://www.wtec.org/pdf/rp_vi.pdf.
21. NISHIHARA, Yasutomo. *Sharp LS055R1SX03* [online]. 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://files.banggood.com/2018/05/SKU958440.pdf>.
22. ROCHEVA, Vasilina et al. High-resolution 3D photopolymerization assisted by upconversion nanoparticles for rapid prototyping applications. *Scientific Reports* [online]. 2018, roč. 8 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z DOI: 10.1038/s41598-018-21793-0.
23. MICHAL PRENNER. *raspberry-pi-3-model-b-64-bit.jpg* [online] [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/6888-large-default/raspberry-pi-3-model-b-64-bit.jpg>.
24. POLOLU CORPORATION. *0J10073.600.jpg* [online] [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://a.pololu-files.com/picture/0J10073.600.jpg?75d9ca5bb2e095e5c5f64350019e1b81>.
25. LLC, Allegro MicroSystems. *A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection* [online]. 2014 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/file/0J450/A4988.pdf>.
26. ZHUHAI STORE. *HTB1DJDpSwHqK1RjSZFPq6AwapXaw.jpg* [online] [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1DJDpSwHqK1RjSZFPq6AwapXaw.jpg>.
27. NANODLP. *NanoDLP - Software for SLS/SLA/DLP 3D Printers* [online] [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.nanodlp.com/>.
28. PROKUDIN-GORSKY, Sergey. *Polzmerization of photopolymer by UV-light* [online]. 2015 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photo-polymer_scheme1.svg.
29. STEYRER, Bernhard; NEUBAUER, Philipp; LISKA, Robert; STAMPFL, Jürgen. Visible Light Photoinitiator for 3D-Printing of Tough Methacrylate Resins. *Materials* [online]. 2017, roč. 10, č. 12 [cit. 2019-11-03]. ISSN 1996-1944. Dostupné z DOI: 10.3390/ma10121445.

30. BAGHERI, Ali; JIN, Jianyong. Photopolymerization in 3D Printing. *ACS Applied Polymer Materials* [online]. 2019, roč. 1, č. 4, s. 593–611 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z DOI: 10.1021/acsapm.8b00165.
33. CAI, Ying; JESSOP, Julie L. P. Photopolymerization, Free Radical. In: *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* [online]. American Cancer Society, 2004, kap. "Photopolymerization, free radical", s. 807–837 [cit. 2019-11-03]. ISBN 9780471440260. Dostupné z DOI: 10.1002/0471440264.pst490.
34. KACZMAREK, Halina; GALKA, Piotr. Effect of Irgacure 651 Initiator on Poly(Methyl Methacrylate) Photostability Studied by UV-Vis Spectroscopy. *The Open Process Chemistry Journal* [online]. 2008, roč. 1, s. 8–11 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://benthamopen.com/contents/pdf/T0CPCJ/T0CPCJ-1-8.pdf>.
35. WU, Jiangtao. *CONSTITUTIVE MODELING OF PHOTOPOLYMERIZATION AND ITS APPLICATION TO 3D PRINTING* [online]. 2018 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/aae0/9675aadf7212b213de242ed2fb7f82df1fbc.pdf>. Dizertační práce. Georgia Institute of Technology.
36. AL MOUSAWI, Assi et al. Azahelicenes as Visible Light Photoinitiators for Cationic and Radical Polymerization: Preparation of Photoluminescent Polymers and Use in High Performance LED Projector 3D Printing Resins. *Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry* [online]. 2017, roč. 55 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z DOI: 10.1002/pola.28476.
37. STEINMANN, Bettina; SCHULTHESS, Adrian. *Liquid, radiation-curable composition, especially for stereolithography*. Ed. PATENT, United States; OFFICE, Trademark. US5972563A. [Cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US5972563A/en?q=5972563>.
38. CHEN, Li; WU, Qingyang; WEI, Guo; LIU, Ren; LI, Zhiquan. Highly stable thiol–ene systems: from their structure–property relationship to DLP 3D printing. *Journal of Material Chemistry C* [online]. 2018, roč. 6, s. 11561–11568 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z DOI: 10.1039/C8TC03389G

39. LALEVÉE, Jacques; BLANCHARD, Nicolas; TEHFE, Mohamad-Ali; PETER, Mathieu; MORLET-SAVARY, Fabrice; GIGMES, Didier; FOUASSIER, Jean Pierre. Efficient dual radical/cationic photoinitiator under visible light: a new concept. *Polymer Chemistry* [online]. 2011, roč. 2, s. 1986–1991 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z DOI: 10.1039/C1PY00140J.
40. LLC, Google. *About PageSpeed Insights, Google Developers* [online] [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://developers.google.com/speed/docs/insights/v5/about?hl=cs-CZ>.
41. PEREZ, Tony. *Why Websites Get Hacked* [online]. 2015 [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://blog.sucuri.net/2015/02/why-websites-get-hacked.html>.
42. MUSTAFA, Samir. *Lattice Cube Torture Test* [online]. 2017 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:2213842>.
43. SEECHLESS. *Rook* [online]. 2013 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:99028>.
44. FREW, Zach. *Incense Pagoda* [online] [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://pinshape.com/items/23773-3d-printed-incense-pagoda>.
45. NEWCANDLE. *Eiffel tower* [online]. 2015 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:912478>.
46. SHIPP, Stephanie S.; GUPTA, Nayanee; LAL, Bhavya; SCOTT, Justin A.; WEBER, Christopher L.; FINNIN, Michael S.; BLAKE, Meredith; NEWSOME, Sherrica; THOMAS, Samuel. *Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing* [online]. Institute for Defense Analyses, 2012 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/Emerging_Global_Trends_in_Advanced_Manufacturing.pdf.
47. EVANS, Justin. *Carbon M1 Review* [online]. 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://www.3dbeginners.com/carbon-m1-review/>.

Seznam obrázků

1.1	Schéma SLA tiskárny, převzato z [4]	4
1.2	Schéma FFF tiskárny, převzato z [4]	6
1.3	Výhody stereolitografie, převzato z 1: [8] 2: [9] 3: [10] 4: [11] 5: [12] 6: [13]	7
1.4	Elegoo Mars, převzato z [15]	9
1.5	Anycubic Photon, převzato z [16]	10
1.6	Prusa SL1, převzato z [17]	11
2.1	Gantt chart vývoje	15
3.1	Blokové schéma tiskárny	17
3.2	Maska	18
3.3	Modul A	19
3.4	Diagram přenosu dat do masky.	19
3.5	Relativní závislost intenzity fotopolymerizační reakce na vl- nové délce u fotopolymeru, převzato z [22]	20
3.6	Optická aparatura	23
3.7	Modul B	23
3.8	Schéma plošného spoje Light shield 1.0	24
3.9	Vývoj UV zdroje	24
3.10	Vana na fotopolymer s průhledným dnem	25
3.11	Ocelový rámeček sloužící k napnutí FEP folie	26
3.12	Řídící počítač	27
3.13	Schéma plošného spoje Oliver Board 1.3.2	28
3.14	Schéma napájení	29
3.15	Modul Pololu A4988 (shodné piny s modulem StepStick), pře- vzato z [24]	30

3.16	Rozhraní pro řadič krokového motoru	30
3.17	Řízení UV zdroje	32
3.18	Diagram ovládání UV zdroje	32
3.19	AC a DC zdroje v tiskárně	33
3.20	Dotykový panel Nextion	34
3.21	Požadavky na posuvný mechanismus	35
3.22	Varianty řešení lineárního posuvu	35
3.23	Konstrukční řešení osy Z	36
3.24	Vývoj tiskové podložky	38
3.25	Kalibrační mechanismus: (A) šrouby pro kalibraci koncových spínačů, (B) šroub pro kalibraci v ose X, (C) šroub pro kalib- raci v ose Y, (D) šroub pro upevnění podložky a pro kalibraci v ose Z, (E) tisková podložka	38
3.26	Technická dokumentace ke kalibračnímu mechanismu	39
3.27	Kalibrace podložky	40
3.28	Uspořádání součástí	42
3.29	Hliníkové profily, převzato z [26]	43
3.30	Blokové schéma hlavních komponent tiskárny	43
3.31	Uchycení plechů	44
3.32	Popis plastových dílů	44
3.33	Rapidní iterace díky 3D tisku	45
3.34	Zvažované varianty realizace krytu	46
3.35	Realizovaná verze ochranného krytu z plexiskla (varianta b)	46
3.36	Software NanoDLP	47
3.37	Podpěry modelu	49
3.38	Fotoiniciátor vyvolá reakci, která spojí monomery a oligomery v jeden polymer, převzato z [28]	52
3.39	Štěpení benzoinu, převzato z [31]	53
3.40	Štěpení fotoiniciátoru Igracure 651, převzato z [34]	53
3.41	Kyslík jako inhibitor polymerizace, převzato z [31]	54
3.42	Nádoba na odpady	58
3.43	Uživatelský manuál	60
3.44	Montážní manuál	60
3.45	Webové stránky	61
4.1	Návštěvnost webu (k 2.2.2020)	66

4.2	Ukázkové výtisky. vytištěno dle zdrojových 3D modelů převzatých z a: [42] b: [43] c: [44] d: [45]	68
5.1	Pohyblivé stínítko	70

Seznam tabulek

1.1	Parametry tiskárny Elegoo Mars	9
1.2	Parametry tiskárny Anycubic Photon	10
1.3	Parametry tiskárny Prusa SL1	11
1.4	Cíl práce	12
2.1	Seznam využívaného open source softwaru	14
3.1	Porovnání bodového a plošného LED zdroje	21
3.2	Vstupně/výstupní rozhraní modulu Pololu A4988, převzato z [25]	31
3.3	Spotřeba tiskárny	33
3.5	Rozpis kusovníku	65

SLOVNÍK POJMŮ

CAD je zkratka pro computer-aided design (česky počítačem podporované projektování). Zjednodušeně řečeno se jedná o používání grafických programů pro projektování namísto rýsovacího prkna.

digitální dvojče je soubor digitálních informací plně popisujících budoucí nebo již existující výrobek (např. pomocí počítačového modelu nebo počítačové simulace). Více v kapitole 2.

DLP je zkratka pro Digital Light Processing. Patří mezi stereolitografické procesy. Vysvětleno v kapitole 1.1.

FEP je transparentní látka, ke které se vytvrzelý fotopolymer nepřilepí a která zároveň pouze minimálně opticky ovlivní průchozí paprsek.

FFF je zkratka pro Fused-filament Fabrication. V praxi se také používá synonymní označení FDM (fused deposition modeling). Objekty jsou zhotovovány pomocí kontrolovaného vytlačování plastové struny z rozžhavené trysky. Vysvětleno v kapitole 1.1.

Fotopolymer je speciální kapalina, která ztvdne při ozáření světlem o určité vlnové délce. V praxi je používané hlavně UV spektrum. Vysvětleno v kapitole 3.3.

FPS, neboli frames per second je označení frekvence, se kterou se jednotlivé snímky objevují na displeji.

GPIO je zkratka pro General-purpose input/output (česky univerzální vstupně-výstupní pin). Jedná se o označení pro elektrický kontakt jednodeskového počítače, jehož využití je ponecháno na vůli programátora.

HDMI, neboli High-Definition Multimedia Interface je datový protokol pro přenášení zvukových a obrazových dat v digitální podobě.

hot-end je termín používaný u FFF tiskáren. Doslova znamená „horký konec“ a jedná se o topné těleso, které roztaví plastovou strunu, aby mohla být vytlačena úzkou tryskou sloužící k samotnému tisku. Vysvětleno v kapitole 1.1.

knihovna OpenGL je rozhraní pro tvorbu počítačové grafiky.

LCD je zkratka pro liquid crystal display, neboli displej z tekutých krystalů. Používán ve většině moderní elektroniky včetně monitorů, televizí a mobilních telefonů.

microstepping je metoda zvyšující přesnost motoru pomocí regulace proudu v každém z vinutí bipolárního krokového motoru.

MIPI DSI, neboli Mobile Industry Processor Interface Display Serial Interface je datový protokol pro přenášení dat mezi displejem a řídicím počítačem.

MSLA je zkratka pro mask stereolithography, tedy technologii, kterou tiskárna Oliver používá. Jedná se o realizaci konceptu stereolitografie s využitím LCD panelu. Vysvětleno v kapitole 1.1.

NEMA 17 je standardní model krokového motoru dle specifikací americké National Electrical Manufacturers Association.

stínítko je u tiskárny plocha, na kterou se promítá obraz právě tištěné vrstvy. Jedná se o transparentní fólii umístěnou na spodní straně vany (viz kapitola 3.1.3).

OCA, neboli optically clear adhesive je speciální lepidlo, jenž je průhledné a pouze minimálně ovlivňuje optické vlastnosti paprsku, který skrze zvrtnuté lepidlo prochází.

PET-G je druh plastu, ze kterého jsou zhotovené vytištěné součástky.

rapid prototyping je souhrnné označení pro použití 3D tiskáren při vývoji hardwaru. Více v kapitole 2.

RJ45 je označení pro telekomunikační konektor.

SBC je zkratka pro Single Board Computer, tedy počítač na jednom plošném spoji. Tyto počítače dnes dosahují výpočetního výkonu, který měly před pár lety levnější notebooky, a proto je lze použít na velmi širokou škálu projektů.

SMD, neboli Surface Mounted Device je označení pro třídu pouzder u elektronických součástek. Zjednodušeně se dá říci, že vývody součástky nejsou zhotoveny z tenkých drátů, nýbrž pouze z kovových plošek na obalu součástky. Tím je dosaženo velmi malých rozměrů a nízké výrobní ceny.

STL je formát souboru obsahující data popisující 3D model tištěného objektu.

úhel kroku je nejmenší úhel, o který se může krokový motor otočit bez použití microsteppingu.

SEZNAM PŘÍLOH

Oliver_manual_1_0_4_digital.pdf oficiální manuál v angličtině

Oliver_light_shield.pdf schéma plošného spoje Oliver Light Shield 1.0

Oliver_board_schema.pdf schéma plošného spoje Oliver Board 1.3.2

kusovník_1_0.xlsx kusovník tiskárny Oliver (verze 1.0)

ERRATA