



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

STAVBA DLP 3D TISKÁRNY

DLP LCD 3D PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Brandejs

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Bayer

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Petr Brandejs

ID: 203621

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Stavba DLP 3D tiskárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku DLP tisku a na základě nabytých znalostí navrhnete DLP 3D tiskárnu konkurenceschopnou aktuálně nabízeným zařízením na trhu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3. 2. 2020

Termín odevzdání: 8. 6. 2020

Vedoucí práce: Ing. Robert Bayer

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou DLP 3D tisku a návrhem tiskárny založené na této technologii. Součástí je náhled do různých metod 3D tisku, popis jejich funkce, porovnání vlastností a objasnění, čím je DLP tisk zajímavý v porovnání s ostatními technologiemi. Následuje návrh tiskárny s ohledem na vlastnosti potřebné pro tuto aplikaci a cenovou optimalizaci. V závěru jsou pak zhodnoceny možnosti stroje.

Klíčová slova

3D tisk, 3D tiskárna, DLP, MSLA, resin

Abstract

This project deals with DLP 3D printing and designing a 3D printer based on this technology. It consists of a glimpse across different 3D printing technologies, their comparison and reasoning behind choosing a DLP printer. Project then follows with design of individual component based on specific parameters needed for this application and price optimization. It ends with a review of the machine.

Keywords

3D printing, 3D printer, DLP, MSLA, resin

BRANDEJS, Petr. Stavba *DLP LCD 3D Tiskárny* [Online] Brno, 2020 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127036>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Robert Bayer.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Petr Brandejs

VUT ID studenta: 203621

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2019/20

Téma závěrečné práce: Stavba DLP 3D tiskárny

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

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

V Čeperce dne: 7. června 2019

.....
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Robertu Bayerovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 7. června 2019

.....

podpis autora

Obsah

ZADÁNÍ.....	2
Abstrakt.....	3
Klíčová slova.....	3
Abstract.....	3
Keywords.....	3
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	1
1. 3D tisk.....	2
1.1. FDM.....	3
1.2. SLS.....	5
1.3. SL/DLP.....	7
2. Výběr komponent.....	10
2.1. Konstrukce.....	10
2.1.1. Vertikální osa.....	10
2.1.2. Rám.....	12
2.1.3. Schránka.....	12
2.2. Optický systém.....	13
2.2.1. Displej.....	13
2.2.2. Podsvícení.....	14
2.3. Software.....	16
2.4. Řídící elektronika.....	17
3. Realizace.....	18
3.1. Základní konstrukce.....	20
3.2. Rameno podložky.....	22
3.3. Reflektor.....	24
3.4. Nádržka na resin.....	25
3.5. Opláštění.....	27
3.5.1. Tiskový prostor.....	27

3.5.2. Prostor pro elektroniku	29
3.6. Elektronika	30
3.7. Software	31
Závěr.....	33
Literatura	34
Seznam zkratk	36
Seznam příloh.....	37
A Změny nastavení NanoDLP.....	38
B Propojovací DPS.....	40
C Program běžící na ATtiny25	43

Seznam obrázků

Obrázek 1: FDM 3D tisk [1]	2
Obrázek 2: Porovnání ceny 3D tisku a vstřikování	2
Obrázek 3: Aditivní a subtraktivní výroba [3]	2
Obrázek 4: FDM 3D tiskárna [5]	3
Obrázek 5: slicer Cura	4
Obrázek 6: Část vytvořená procesem FDM [6]	4
Obrázek 7: SLS 3D tiskárna [7]	5
Obrázek 8: Vypalování prášku [8]	5
Obrázek 9: Část vyrobená procesem SLS [10]	6
Obrázek 10: Stereolitografie [11]	7
Obrázek 11: DLP 3D tisk [12]	7
Obrázek 12: SL vs DLP 3D tisk [14]	8
Obrázek 13: Resin [15]	8
Obrázek 14: Kuličkový šroub [21]	10
Obrázek 15: Lineární vedení [20]	11
Obrázek 16: Hliníkový stavebnicový profil	12
Obrázek 17: Zvolený displej [21]	13
Obrázek 18: Komerční pole LED diod [22]	14
Obrázek 19: 50 W COB LED [21]	15
Obrázek 20: Ukázka webového rozhraní NanoDLP [24]	16
Obrázek 21: Raspberry 3B+ [25]	17
Obrázek 22: Aktuální stav tiskárny	18
Obrázek 23: Hliníkový rám	20
Obrázek 24: Spojení hliníkového rámu s plechem a motorem	21
Obrázek 25: Uložení motoru	21
Obrázek 26: Rameno podložky	22
Obrázek 27: Rameno s odnímatelnou podložkou	23
Obrázek 28: Sestava základní konstrukce a vertikální osy	23
Obrázek 30: Ramena reflektoru	24
Obrázek 29: Chladič LED	24
Obrázek 31: Reflektor	25

Obrázek 33: Drážka nádržky	26
Obrázek 32: Příruby nádržky	26
Obrázek 34: Nádržky	26
Obrázek 35: Schránka tiskového prostoru	27
Obrázek 36: Víko	28
Obrázek 37: Schránka pro elektroniku	29
Obrázek 38: Nastavení NanoDLP	32

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání tiskových materiálů	4
Tabulka 2: Náklady na stavbu DLP tiskárny	19

Úvod

3D tisk je rapidně se rozvíjející technologie se zárnou budoucností. Jedná se o aditivní výrobní technologii, která umožňuje vytvářet fyzický objekt dle počítačového modelu. Oproti již rozvinutým technologiím je výhodnější pro výrobu malých sérií a prototypování.

Nejnovějším trendem v této oblasti je pak technologie DLP. Ta spočívá v osvětlení fotopolymeru skrz masku v podobě LCD displeje, a tedy vytvrzení tohoto polymeru do obrazců ve vrstvách, čímž je postupně vytvarován do potřebné podoby. Oproti běžně používanému strunovému tisku dosahuje lepších přesností a hladších povrchů, to vše za rozumnou cenu.

Cílem této práce je seznámit se s problematikou DLP 3D tisku a navrhnout dostupnou DLP tiskárnu při použití kvalitních a spolehlivých dílů. Cílová částka činí přibližně 15 000 Kč, tedy méně než polovinu ceny levnějších tiskáren vyráběných na západě. Toho bude dosaženo zejména cenově optimalizovanou volbou komponent, využití FDM 3D tisku a vlastní výrobou.

Práce je členěna do 4 základních částí. V první kapitole je objasněno fungování jednotlivých metod 3D tisku včetně jejich běžných parametrů, výhod a nevýhod. Je zde také objasněno, proč je DLP 3D tisk zajímavou volbou. Druhá kapitola líčí předběžný návrh zařízení s ohledem na cenu. Třetí kapitola se zabývá vlastní realizací DLP 3D tiskárny. V závěru je zhodnoceno, zdali bylo dosaženo stanoveného cíle.

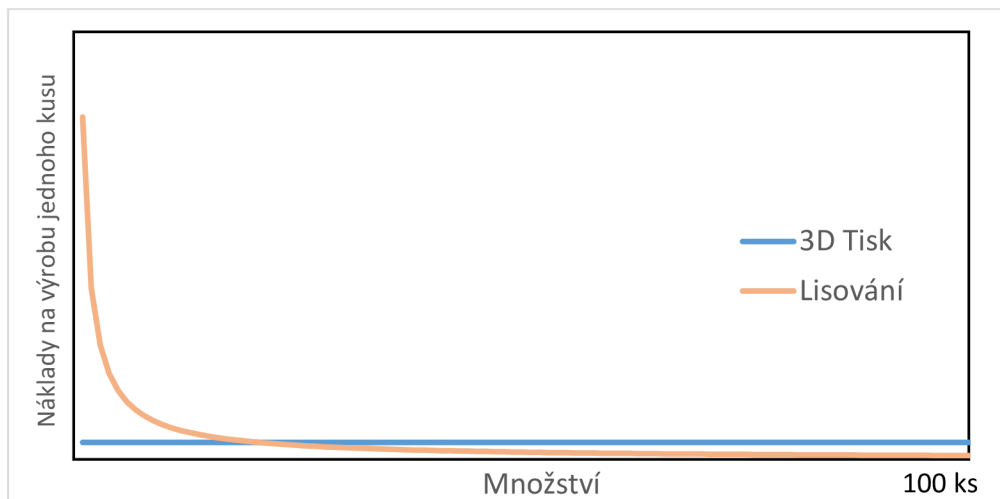
1. 3D tisk

3D tisk je oblast, která v posledních letech zaznamenala velký rozvoj. Jedná se o aditivní výrobní technologii, která umožňuje tvorbu fyzických modelů z digitálního souboru. Pracuje většinou s plasty. Dnes používané metody pracují na bázi postupného ukládání vrstev daného tvaru, čímž vzniká výsledný objekt. Příkladem tohoto procesu může být FDM 3D tisk, který vytváří obrazec pomocí vyhřáté trysky pokládající plast do obrazců ve vrstvách. Po jejím dokončení se tryska přesune o vrstvu výše a proces opakuje. Probíhající tisk je patrný na obrázku 1.



Obrázek 1: FDM 3D tisk [1]

3D tisk zaznamenal rozvoj zejména v prototypování a výrobě menších sérií, případně výrobě na míru. Oproti nejčastěji používané metodě v sériové výrobě plastových dílů, vstříkolisu, totiž nevyžaduje nejprve výrobu drahé formy. V případě nutnosti úpravy modelu, nebo při výrobě několika málo kusů tedy vychází výrazně levněji. Je však pomalejší a cena základního materiálu je výrazně vyšší než při sériové výrobě. V řádu stovek kusů se tedy 3D tisk již nevyplácí. Názna takové situace je znázorněn na obrázku 2. [2]



Obrázek 2: Porovnání ceny 3D tisku a vstříkování

Další technologií konkurující 3D tisku je již dříve rozvinuté CNC obrábění. Jedná se o subtraktivní výrobní proces (viz obrázek 3), stejně jako 3D tisk je řízený počítačem. Používanými metodami jsou frézování a soustružení, v obou případech se jedná o odběr materiálu nástrojem pohybujícím se vůči obráběnému materiálu.



Obrázek 3: Aditivní a subtraktivní výroba [3]

Výhodou obrábění je možnost obrábět téměř jakýkoliv dostatečně tvrdý materiál, velmi vysoká přesnost a skutečnost, že díl obroběný ze stejného materiálu bude vždy pevnější než ten vytisknutý. Při aditivním výrobním procesu je totiž slabým místem spojení jednotlivých vrstev. Obrábění je navíc oproti 3D tisku většinou rychlejší.

Výhodou 3D tisku je pak nižší cena a menší množství odpadního materiálu. Obráběním je také mnohdy obtížné obrábět plasty s nízkou teplotou skelného přechodu, protože jsou při kontaktu s ohřátým nástrojem deformovány a tím je zhoršena přesnost výsledného dílu. Existují tvary, které je možno vyrobit jednou z metod, ale ne oběma.

Obě metody tak mají při malých sériích své místo. 3D tisk tam, kde je cena rozhodujícím faktorem. Obrábění pak při výrobě zakázkové. Ve velkosériové výrobě jsou obě metody využitelné tam, kde jejich benefity převyšují potřebu nízké ceny. Tj. obrábění pro přesné díly a 3D tisk pro složité tvary a často modifikované díly. O nejčastějších formách 3D tisku povypráví následující kapitoly. [4]

1.1. FDM

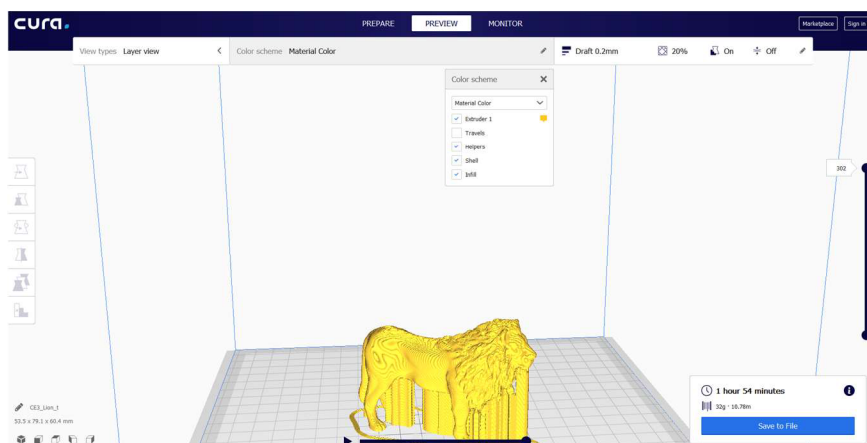
FDM je nejlevnější a nejčastější formou 3D tisku. Ceny tiskáren se pohybují od 3000 po 100 000 Kč. Jedna z levnějších tiskáren, Průša Mk3 je zobrazena na obrázku 4. Základním materiálem je tisková struna, označována jako filament, s cenou od 300 po 3 000 Kč/kg. Tato struna je protlačována přes zahřátou trysku, kde je roztavena a následně ukládána do motivu daného softwarem. Po dokončení motivu v jedné vrstvě se tryska posune o vrstvu výše a proces opakuje.



Obrázek 4: FDM 3D tiskárna [5]

Tryska je připevněna do části, která je zahřívána na přesnou teplotu pomocí topného tělíska s termistorem a PID regulací. Do této části je filament tlačěn pomocí krokového motoru s ozubeným kolem, které se opírá o filament a otáčivý pohyb motoru tak převádí na lineární. Celá tato konstrukce je pak posouvána ve 3 osách oproti podložce, na kterou se materiál tiskne. To je zajištěno krokovými motory, v horizontálních osách typicky v kombinaci s ozubenými řemeny a ve vertikální s trapézovým šroubem.

Celý proces je řízen deskou, nejčastěji založenou na procesoru ATmega, která převádí vstupní soubor typu GCODE na pulzy pro řízení krokových motorů. Instrukce v podobě GCODE jsou na počítači generovány z modelu softwarem zvaným slicer. Ten model nejprve nařeže na vrstvy definované výšky a poté dle mnoha nastavení určí, kam se má tisková hlava posunovat a kolik má při tom vytlačit materiálu. Model také rozdělí na vnější stěny a vnitřní žebrování dle přání uživatele. Výsledný objekt tak málokdy bývá plný a vykazuje lepší poměr pevnosti k hmotnosti. Protože tryska není schopná tisknout do prázdna, pro tisk převisů a mostů jsou slicerem přidány podpurné struktury. Náhled do nejčastěji používaného sliceru je na obrázku 5.



Obrázek 5: slicer Cura

Nejčastěji používanými materiály jsou PLA, ABS a PETG. Vlastnosti těchto materiálů jsou velice podobné, typické pro plastové materiály bez dodatečného zesílení. Liší se zejména výdrží při vystavení vnějším podmínkám a křehkostí. Rozdíly jsou patrné v tabulce 1.

Tabulka 1: Porovnání tiskových materiálů

MATERIÁL	OBTÍŽNOST TISKU	MECHANICKÁ ODOLNOST	ODOLNOST VNĚJŠÍM VLIVŮM	PROTI	PRUŽNOST	TEPLOTNÍ ODOLNOST DO
PLA	nízká	střední	nízká		nízká	60 °C
PETG	střední	vyšší	vysoká		nižší	75 °C
ABS	vyšší	vysoká	střední		nízká	110 °C

Výsledná část má viditelné stopy vrstev a neduhy spojené s faktem, že je materiál pokládán postupně. Lze sice materiál obrousit, zatmelit a přelakovat, nikdy však nedosáhne plné pevnosti homogenní části ze stejného materiálu. Tyto výtisky mají tendence lámat se po vrstvách. Nejlepší dosažitelná přesnost činí zhruba $\pm 0,1$ mm, nelze tisknout detaily menší, než je velikost trysky, nebo výška vrstvy – typicky 0,4 mm a 0,2 mm. Na površích s mírným náklonem od horizontální osy je přechod mezi vrstvami velice patrný. Tištěnou část bez povrchových úprav lze vidět na obrázku 6. Vlivem délky cesty, kterou musí tryska při tisku podniknout je výroba touto metodou pro větší množství kusů relativně zdlouhavá záležitost. Pro díly o objemu 1 l může tisk dle požadované kvality trvat 10 hodin až 2 dny. Tiskárna však nepotřebuje trvalý dozor a tím je doba tisku méně bolestivá. Touto dobou je určena běžná velikost tiskárny, která činí přibližně 250*250*250 mm.

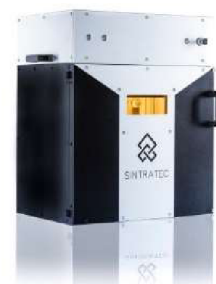


Obrázek 6: Část vytvořená procesem FDM [6]

Obrovskou výhodou FDM tisku je nízká cena. Pro kusovou výrobu relativně levných zařízení a rychlé prototypování je to vlastnost nenahraditelná. Tato technologie umožňuje mít za několik hodin a nemnoho korun v ruce fyzický díl. Ten může posloužit buď svému finálnímu účelu, nebo může ověřit princip funkce sériově vyráběné součásti a v případě nepodarku tak ušetřit nemalé peníze za případnou opravu formy. Největší množství FDM 3D tiskáren je ale v rukách domácích kutilů, kterým umožňuje vyrábět díly, nebo celé výrobky na míru svým potřebám, případně vyměnit rozbité plastové díly již koupených zařízení a prodloužit tak jejich životnost.

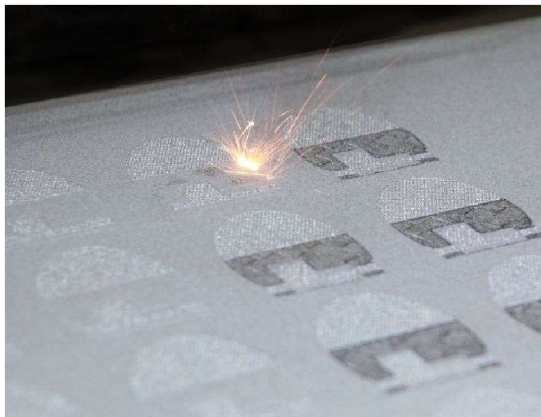
1.2. SLS

Naopak nejdražší formou 3D tisku je SLS. Nejlevnější tiskárna dostupná v době psaní této práce (viz obrázek 7) stojí 120 000 Kč. I za tuto cenu však kupující nedostane hotové zařízení, ale kit, který před použitím musí sestavit sám. Dražší jsou pak tiskárny průmyslové, které svou cenou šplhají až k desítkám milionů korun. Počáteční investicí však vysoké náklady spojené s touto technologií nekončí. Cena základního materiálu začíná okolo 2000,- za kilogram, při každém tisku navíc přijde velká část materiálu nazmar.



Obrázek 7: SLS 3D tiskárna [7]

Tato technologie využívá laseru k zapékání prášku dle motivu daného softwarem, opět se tak děje po vrstvách. Po zapečení každé vrstvy je přes výtisk rozhrnuta nová vrstva a ta opět zapečena v místech, kde je třeba. Zařízení disponují laserem o výkonu od 5 W v podobě laserové diody po 100 W v případě silnějších CO₂. Zaměření laseru na ploše zajišťuje sada otáčivých zrcadel, které jsou natáčeny do potřebného úhlu pomocí servomotorů.



Obrázek 8: Vypalování prášku [8]

Po celé ploše je pak pomocí třerky rozhrnuta vrstva prášku o tloušťce přibližně 50 μm . Rychlost tisku se v případě stolních strojů pohybuje okolo 0,2 l/h, v případě průmyslových je udávána rychlost počínající na 1 l/h. V druhém případě se jedná o rychlost řádově vyšší než v případě technologie FDM. Velikost tištěných částí se z cenových důvodů pohybuje od 100*100*100 mm u stolních zařízení po 350*350*350 mm v případě průmyslových. [9]

Vzhledem k tomu, že je práškem plněna celá komora tiskárny, části není třeba umisťovat přímo na podložku a lze tedy tisknout i více částí nad sebou. Zároveň slouží nezapečený materiál jako podpůrný, umožňuje tisknout různé tvary ve všech možných orientacích a usnadňuje také výrobu pohyblivých dílů. Pro snížení potřebného výkonu laseru a zlepšení tiskových vlastností je prášek po celou dobu procesu udržován několik stupňů pod bodem, kde dochází ke spékání.

Používanými materiály jsou zejména nylon, velice houževnatý materiál, měkčí než většina běžně používaných plastů. Tato technologie také umožňuje tisk z kovových materiálů, zejména hliníku. Ten je však velice drahý a trpí na výbušnou národu hliníkového prášku. Tisk z kovů je tedy prováděn pouze na několika místech v naší zemi a je velice nákladný.

Co se kvality týče, patří díly vyrobené technologií SLS k tomu nejlepšímu, čeho lze počítačově řízenými aditivními technologiemi dosáhnout. Části mají matný, mírně zrnitý povrch (viz obrázek 9), který je sympatický na omak. Jinou než černou či šedou barvu umožňují kvůli horšímu pohlcení záření tisknout pouze tiskárny s výkonnějšími lasery. Dosažitelná přesnost je ± 50 μm , velikost detailů je limitována šíří laserového svazku a relativně malou výškou vrstvy. Části mají izotropní mechanické vlastnosti, jejich pevnost je velice blízká odlitému materiálu. [8]



Obrázek 9: Část vyrobená procesem SLS [10]

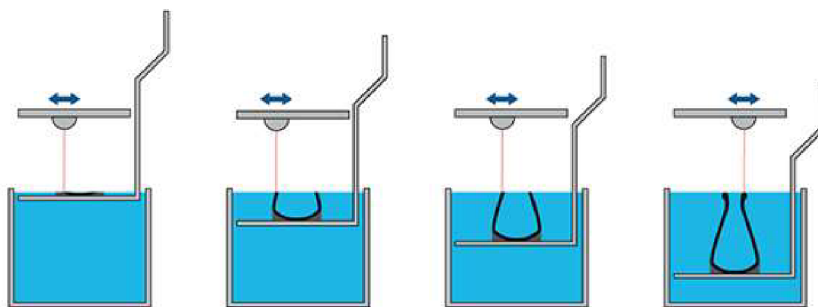
Vysokou cenu základního materiálu podtrhuje krutá skutečnost, že kvůli dříve zmíněnému vyhřívání tiskové komory se určité množství částic spojí i bez zásahu laseru. Z materiálu nevyužitého ve výrobku lze tedy pro další použití recyklovat méně než polovinu. Je tak výhodné zaplnit co možná nejvíce z prostoru nutného pro tisk. Z prachu je po skončení procesu také nutno vyjmout hotové části, což je proces velice prašný a je doporučeno při něm využívat respirátor.

Tato technologie najde využití zejména při výrobě dražších plastových produktů na zakázku, u kterých je vyžadována vysoká spolehlivost. Vzhledem k vysoké ceně není vhodná pro využití v domácnostech a použití v oblasti prototypování je také omezeno, zejména na menší díly či velké série. Narozdíl od ostatních technologií umožňuje tisknout kovové materiály, to je však velice drahé a je zde velice silná konkurence v podobě obrábění. Závěrem lze tedy říct, že se jedná o způsob výroby schopný produkovat díly ohromné kvality, jehož použití silně omezuje jediný faktor – a tím je cena.

1.3. SL/DLP

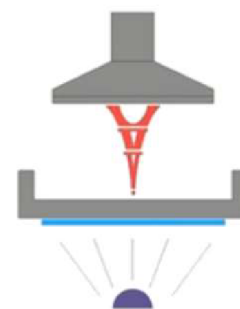
Poslední technologie běžně využívané ve světě 3D tisku jsou SL a DLP. Obě technologie spočívají v cílené fotopolymeraci tekutého materiálu (resinu) po vrstvách. Stereolitografie je dražší, cenově se však obě metody pohybují mezi tiskem FDM a SLS, přičemž produkuje části nejvěrnější modelu. Nejlevnější DLP tiskárny lze sehnat přibližně za 10 000 Kč, nejlevnější SLA pak okolo 80 000 Kč.

Starší technologií je stereolitografie. Pro polymeraci využívá řízeného paprsku laseru, který postupně prosvítí celý motiv daný softwarem. Většinou se využívá osvit horního (viz obrázek 10), kde je tisk prováděn na podložku, která se do resinu postupně zanořuje a po zpolymerování každé vrstvy laserem tak zajistí přísun nového materiálu na vrch části. Resin je před tiskem nového motivu vyhlazen pomocí třerky. Tento postup nezapře jistou podobnost s technologií SLS. Pro tento postup sice nejsou potřebné tak výkonné lasery, stále je však potřeba řešit jejich směřování a proces tak zůstává relativně drahý.



Obrázek 10: Stereolitografie [11]

Novější metodou je pak polymerace celé vrstvy najednou s pomocí jednoduchého zdroje UV záření přes masku v podobě LCD displeje (viz obrázek 11). Volí se zde většinou osvit spodní. Tisk je prováděn zespodu na podložku, která se zanořuje do nádoby s resinem do přesně definované vzdálenosti od speciálního průhledného filmu, který kryje displej. Při expozici přes masku je pak vytvrzen materiál mezi filmem a podložkou, případně částí. Krása této technologie spočívá v tom, že celé zařízení má jednu pohyblivou část, tj. vertikální osu. Zbytek je obstarán elektronicky, není třeba laseru a počáteční investice je tedy nižší.



Obrázek 11: DLP 3D tisk [12]

Běžně se volí displeje s roztečí pixelů okolo 50 μm , výška vrstvy je 30–50 μm . Tím je limitována dosažitelná velikost detailů, která je menší než v případě obou předchozích technologií. Minimální odchylka od modelu je určena vlastnostmi světelného zdroje, zejména směrovostí. Pro dražší tiskárny dosahuje $\pm 50 \mu\text{m}$, pro ty levnější pak v nejhorsím případě $\pm 200 \mu\text{m}$. Velikost je limitována maskou, pro dosažení dobrých detailů při zachování rozumné ceny se typicky volí plocha displeje 120*70 mm a výška přibližně 150 mm. Rychlost tisku je závislá na době osvitů jednotlivých vrstev, která není závislá na vytvrzované ploše. Jedna vrstva vyžaduje přibližně 10 s, při tisku přes celou plochu je tak objemová rychlost přibližně 0,1 l/h, což je hodnota srovnatelná s maximem dosažitelným FDM tiskem. Kvalita je však v případě DLP výrazně vyšší. Díly vytvořené touto metodou mají hladký povrch takřka bez okem viditelných artefaktů spojených s tiskem, tvar je velice blízký modelu za všech okolností. SL tiskárny pak obecně dosahují lepších výsledků i přesností, porovnání je patrné na obrázku 12. Vizually působí části dokonce lépe než díly vytvořené SLS tiskem. Jejich odolnost je pak silně závislá na materiálu. [13]



Obrázek 12: SL vs DLP 3D tisk [14]

Základním materiálem je zde kapalný fotopolymer, jinak také označovaný resin (viz obrázek 12). Při osvětlení zářením o dané vlnové délce dojde k polymeraci materiálu, a tedy jeho zatuhnutí. Lepších výsledků a možnosti práce na denním světle lze dosáhnout s resiny tuhnoucími při expozici na UV světlo, tvrdší UV však rychleji poškozuje displej. Volí se tak vlnová délka blízká viditelnému světlu, tedy 385, nebo 405 nm.

Resin vydává při tisku nepříjemný odér a není doporučeno dlouhodobé vdechování jeho par, tisk je tedy doporučeno provozovat v dobře větraných prostorách. Při tisku není cílem plná polymerace, ale pouze taková, aby byl udržen tvar části. Na té po dokončení procesu zůstává nezpolymerovaný resin, ten je tedy třeba omýt a díl vložit do zařízení, kde je vystaven silnějšímu UV záření po delší dobu, čímž je tuhnutí dokončeno.

Materiál se vyrábí v několika formách dle výsledných vlastností. Těmi jsou resin tvrdý, měkký a odlévatelný. Ani jeden z nich však nedosahuje univerzálně dobrých mechanických vlastností. Měkký je odolný, není však vhodný pro všechny aplikace, tvrdý je naopak křehký. Odlévatelný je pak podobný vosku, a jak již název napovídá, vhodný zejména pro odlévání. Tyto vlastnosti jsou prozatím největší limitací této technologie a vyplývá z nich



Obrázek 13: Resin [15]

dosavadní použití. Přímé je v podobě měkkých dílů a částí nevyžadujících vysokou odolnost, zejména dekorací. Nepřímé pro výrobu částí odléváním při výrobě forem, například ve šperkařství a zdravotnictví. Zde pak příliš nevádí vyšší cena materiálu. [16]

Ta činí přibližně 2 000 Kč/kg, což je však vzhledem k dobré recyklaci nepoužitého materiálu situace lepší než v případě SLS. Počáteční investice spočívá v nákupu tiskárny a pomůcek nutných k ochraně osob a omývání dílů. Ceny tiskáren začínají okolo 10 000 Kč v případě čínských, 35 000 korun a více pro ty vyrobené v ostatních částech světa. Zařízení a pomůcky potřebné pro následné zpracování je pak možno pořídit za méně než 5 000 Kč.

Základními prvky DLP tiskárny posun ve vertikální ose, zarovnání podložky oproti filmu, zdroj světla a maska. Vzhledem k malé výšce vrstvy musí být vertikální osa přesná a musí disponovat prostředky pro manuální doladění podložky oproti filmu. Zdroj světla musí být dostatečně homogenní po celé ploše, aby byl resin vytvrzen ve všech místech rovnoměrně. Zároveň je pro dosažení dobrých přesností vyžadováno světlo co nejvíce souměrné. Displej pak musí být dostatečně jemný, aby byla zajištěna co nejvyšší přesnost a jednotlivé pixely nezanechávaly na výsledné části viditelné artefakty.

Výhodou je tedy nepříliš vysoká cena, relativně vysoká rychlost vzhledem k přesnosti a dobrý vzhled výsledných částí. Nevýhody jsou omezená velikost dílů a materiálové možnosti. Obě tyto překážky jsou však řešitelné. Displeje s vysokým rozlišením se díky vývoji v oblasti konzumní elektroniky stávají čím dál tím dostupnější a náklady na výměnu displeje se tedy budou pouze snižovat, což umožní použití větších displejů při zachování detailů a ceny. Materiálové možnosti jsou řešitelné vývojem chemie, která prozatím neumožňuje tisk strukturálních součástí. Jedná se o novou technologii, a tak je stále prostor pro další zlepšení. Už za dobu psaní této práce se objevily nové resiny s lepšími mechanickými vlastnostmi a menším zápachem při tisku.

DLP prozatím není plnou náhradou ani jedné ze dříve zmíněných technologií, má však největší potenciál pro další vývoj. Pro tisk menších, přesnějších dílů je díky výslednému povrchu, velikostí detailů a opakovatelnou přesností vhodnější než FDM 3D tisk při zachování ceny výrazně nižší než SLS tisk. V případě potřeby tisku takových částí je tedy z dostupných technologií nejlepší volbou. Na trhu je prozatím malé množství kvalitních a dostupných tiskáren. I proto je cílem této práce realizovat 3D tiskárnu pracující na této technologii, pokud možno tak, aby byla spolehlivá a uživatelsky přívětivá, svými vlastnostmi převyšovala tiskárny z dálného východu, ale byla finančně dostupnější než tiskárny vyráběné v Evropě.

2. Výběr komponent

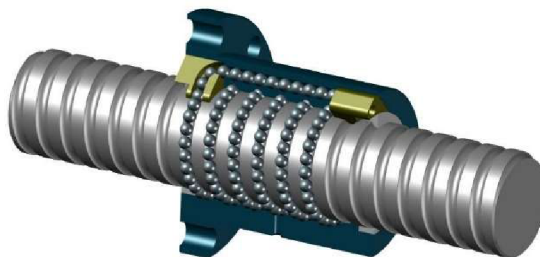
Obsahem této kapitoly je průzkum možností realizace jednotlivých komponent a plán takové realizace, která by splňovala kladené požadavky. V úvahu byla brána kvalita a spolehlivost dílů, jejich cena a konkrétní parametry potřebné pro tento projekt. Odhad výsledné ceny by měl být nižší, než 15 000 Kč, pro každou volbu tedy byly provedeny kalkulace s touto cenou.

2.1. Konstrukce

Konstrukce musí zajistit dosažení přesnosti nutné pro sesouhlasení tiskové podložky oproti fólii a zachování tohoto sesouhlasení po co nejdelší dobu. To je nastavováno manuálně. Pro snadnější odstraňování vytištěných dílů z podložky bude součástí rychlé odnímání podložky od vertikální osy. Vzhledem k nepříjemnému pachu a možným zdravotním následkům dlouhodobého vdechování výparů vznikajících při práci je pak třeba celý tiskový prostor opatřit uzavíratelnou schránkou s dostatečnou těsností a odvodem výparů přes uhlíkový filtr.

2.1.1. Vertikální osa

Posun po vertikální ose je obecně nejsnadnější a nejlevnější realizovat pomocí krokového motoru a šroubu. Nejdostupnějším krokovým motorem je momentálně motor typu NEMA 17, neboť je velice často využíván pro stavbu FDM 3D tiskáren. Většina krokových motorů tohoto typu má dostatečný otáčivý moment pro dané účely. Je tak možno využít naprosto běžný motor za dostupnou cenu. V případě šroubu je pak výběr složitější, zde se sehrává volba mezi trapézovým a kuličkovým šroubem, vyobrazeným na obrázku 14. Šroub kuličkový je výrazně dražší, dosahuje však menších vůlí, výrazně vyšší maximální zátěže a účinnějšího převodu otáčivého pohybu na posuvný. Cena sestavy kuličkového šroubu o požadované délce s upevněním a maticí začíná okolo 3 000 Kč oproti 300 Kč v případě šroubu trapézového. Zvýšená cena je v tomto případě obhajitelná vysokými požadavky na přesnost a opakovatelnost pohybu. Byl tedy zvolen šroub kuličkový. Vzhledem k vysokému možnému zatížení a přesnostem, se kterými jsou kuličkové šrouby vyráběny pak vystačí ten nejlevnější možný. Z důvodů nejistoty spojené s nákupem čínských vedení a šroubů byl ale zvolen exemplář vyrobený značkou HIWIN v nejmenší vyráběné velikosti, tedy 12 mm. Pro nalezení nulové pozice pak bude sloužit mikrospínač s páčkou, jeho přesnost je se směrodatnou odchylkou menší než 5 μm dostatečná. [17][18][19]



Obrázek 14: Kuličkový šroub [21]

Jako řadič krokového motoru byl zvolen LV8729 pro svou spolehlivost, přesné řízení a dostatek mikrokroků (128) pro tichý a přesný chod. Ze znalosti počtu mikrokroků, stoupání šroubu a počtu kroků motoru na otáčku lze vypočítat teoreticky dosažitelné rozlišení

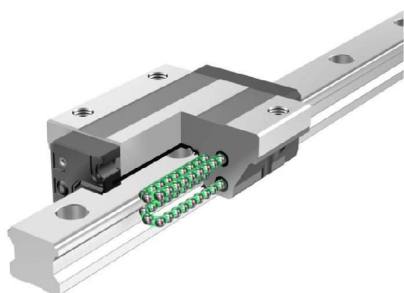
$$\Delta L_{min} = \frac{\text{stoupání šroubu [um]}}{\text{počet kroků na otáčku} \cdot \text{počet mikrokroků}} = \frac{4000}{200 \cdot 128} \cong 0,16 \text{ um}$$

Je však třeba poznamenat, že toto je opravdu pouze teoretické hodnota a taková přesnost není reálně dosažitelná. Větší počet mikrokroků vede zejména ke snížení hluchnosti zmenšením skoku mezi kroky a tím snížení vibrací. Oblast mezi jednotlivými kroky není příliš dobře definována a posun po ose zde není zcela lineární. Je navíc velice složité detekovat takové změny např. koncovým spínačem a při každém nulování osy pak bude daná pozice o kousek posunuta. V praxi je pro dosažení přesnější polohy dobré volit výšky vrstev odpovídající velikosti celého kroku, případně jeho poloviny. Pak by velikosti vrstev byly násobkem

$$\Delta L_{min} = \frac{\text{stoupání šroubu [um]}}{\text{počet kroků na otáčku} \cdot 2} = \frac{4000}{200 \cdot 2} \cong 10 \text{ um}$$

Ačkoliv tato hodnota není tak působivá, je stále dostačující pro dané účely, jelikož běžná velikost vrstev se pohybuje v rozsahu 20-60 um a tak lze dle potřeby snadno nastavit několik hodnot v tomto rozmezí.

Druhým komponentem vertikální osy je vedení. Dostupnými možnostmi jsou v tomto případě lineární vedení (viz obrázek 14) a vodící tyče s lineárními pouzdry. Ačkoliv na osu nebude vyvíjen příliš velký tlak, z důvodu stálosti a dlouhodobé přesnosti je vyžadována vysoká pevnost. Vzhledem k rozhodnutí volit evropské výrobce byly pak zvažovány možnosti použití 2 lineárních vodících tyčí o průměru 10 mm s pojezdy v ceně přibližně 800 Kč, nebo lineární vedení od značky HIWIN o rozteči 15 mm za 1200 Kč. Pro malý cenový rozdíl, lepší vlastnosti a snazší upnutí do stroje bylo zvoleno lineární vedení. [18]



Obrázek 15: Lineární vedení [20]

Celé upnutí podložky k ose a sesouhlasení s displejem je provedeno hliníkovou konstrukcí. Použití plastových tištěných dílů by neumožňovalo plné využití potenciálu zvolené osy. Pro sesouhlasení podložky a displeje bylo nutno v konstrukci vytvořit drážky a díry větších rozměrů, což je v domácích podmínkách obtížně realizovatelné. Zvolena tedy byla forma obrábění na objednávku, zahrnutá do výsledné ceny.

2.1.2. Rám

Vzhledem k drahým dílům zvoleným pro vertikální osu a požadované přesnosti bylo rozhodnuto, že žádná z částí stojících mezi displejem a podložkou nebude vyrobena z plastů. Celá tiskárna tedy bude obestavěna okolo rámu složeného z hliníkových profilů s T drážkami. Zvoleným rozměrem zde byl profil 20*40 mm s 5mm drážkou, viz obr. 16. Díky drážkám je možno k tomuto rámu snadno připevnit potřebné komponenty, tedy vnější schránku, posuvy a hliníkovou desku s otvory pro montáž displeje, motoru a nádržky na resin. Tato hliníková deska vzhledem ke složitějšímu sesouhlasení otvorů a obtížím s vytvářením otvoru pro displej druhou komponentou vyžadující pro svou výrobu obrábění.



Obrázek 16: Hliníkový stavebnicový profil

2.1.3. Schránka

Schránka je poslední důležitou součástí konstrukce, její pevnost však oproti předchozím dílům nenikritická pro správné fungování stroje. Zvolena tedy byla výroba pomocí FDM 3D tisku. Připevnění k základní konstrukci je realizováno pomocí tištěných zářezek a T-matic. Byla rozdělena na 2 hlavní části. Horní část slouží k uzavření tiskového prostoru a ochraně obsluhy před výpary. Pro pozorování procesu tisku je vybavena okénky. Otevírání bylo zajištěno pantem. Kvůli nepříjemným pachům vznikajícím při tisku bylo také nutno oddělit vnitřní a venkovní vzduch formou těsnění a zvaženo bylo i ventilátor s uhlíkovým filtrem pro odsávání vzduchu dle potřeby.

Spodní část pak bude obsahovat elektroniku a optický systém, stejně jako horní byla vyrobena s pomocí FDM 3D tisku a k základní konstrukci byla připevněna stejným způsobem. Nevyžaduje utěsnění, ani průzory. Bylo však třeba navrhnout otvory pro napájení, odvětrávání a zasazení displeje pro ovládání stroje. Pro snadný přístup k elektronice je složena ze 2 částí, spojených šrouby. Musí být dostatečně pevná, neboť nese celou hmotnost stroje. Vzhledem k velikosti této části a ceně hliníkových profilů bylo rozhodnuto vyztužit schránku a nemontovat k základní konstrukci nosné profily. Použitým materiálem byl PETG pro svou dobrou mechanickou a chemickou odolnost. Celkem byly použity přibližně 2 kg materiálu v celkové hodnotě 1 100 Kč.

Tento materiál byl také použit pro výrobu nádržky na resin. Ta je pro usnadnění obsluhy odnímatelná a uzavíratelná. Musí být tak vysoká, aby pojala dostatek filamentu, ale zároveň

nedošlo ke kolizi ramena podložky a nádržky, jako přijatelná výška se jeví přibližně 20-30 mm. Její součástí pak musí být systém pro napnutí FEP filmu, který k ní bude vespuďu připevněn.

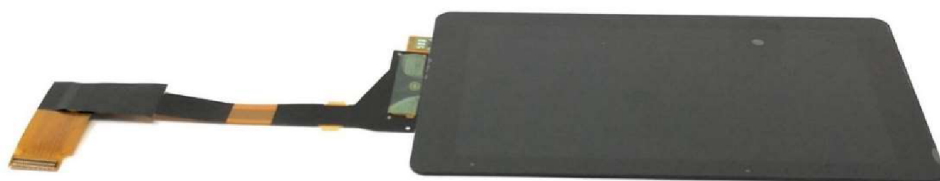
2.2. Optický systém

Cílem optického systému je zde dosáhnout co nejlepší přesnosti a vzhledu tištěných částí za přijatelnou cenu. Důležitými komponenty jsou displej a maska v podobě LCD displeje. Maska určuje viditelnost artefaktů spojených s tiskem a velikost tisku, zatímco podsvícení je kritické pro zachování správných rozměrů a dostatečně homogenní vytvrzení tisknuté části.

2.2.1. Displej

Jako maska je zde vyžadován ideálně černobílý displej bez integrovaného podsvícení. To je velice specifický požadavek, který nepožaduje mnoho zákazníků. Nejsnazší způsob, jak takový displej sehnat je tedy obchod s náhradními díly pro komerční DLP tiskárny, jedním z mála takových obchodů dovážejících do Česka FEPSHOP. Zde jsou displeje snadno dostupné, neboť vlivem UV záření dochází časem u všech tiskáren k jejich degradaci. Výběr konkrétního obchodu však také omezuje výběr.

Zvažovanými možnostmi jsou displeje o velikostech 5,5“ a 8,9“ při rozlišení 2560*1440. Displeje disponující pouze full HD rozlišením přináší horší vlastnosti při malé úspoře, ty 4K jsou naopak příliš drahé, cenově se pohybují okolo 7 000 Kč. 5,5“ displej je s cenou 1 500 Kč výrazně levnější, dosahuje rozteče pixelů 47 μm , což je dostatečně málo na to, aby nebyly na povrchu viditelné artefakty a bylo dosaženo velice vysoké přesnosti. Pro svou velikost by i přes větší rozteč 75 μm mohl být pro specifické účely použit i displej 8,9“ za cenu 2 500 Kč. Znamená by však nutnost použití dražšího zdroje světla a také větší a dražší konstrukce celé tiskárny. Celkový cenový rozdíl by tak činil přes 3000 Kč, což v tomto případě vzhledem k horší kvalitě tištěných dílů není obhajitelné. [22]



Obrázek 17: Zvolený displej [21]

Konkrétním displejem použitým v tiskárně tedy je náhradní displej pro tiskárnu EPAX X1 o velikosti 5,5“ a vzdálenosti pixelů 47 μm , patrný na obrázku 18. S cenou přibližně 1 500 Kč je dražší než ostatní displeje s podobným rozlišením, jedná se však o speciální displej navržený pro DLP tiskárny a vykazuje tedy vyšší odolnost proti UV záření. Tento displej disponuje rozhraním MIPI, pro jeho řízení je tedy nutno použít driver. Tím se ale bude zabývat až část o řídicí elektronice.

2.2.2. Podsvícení

Důležitými parametry zvoleného podsvícení jsou dobrá směrovost, homogenita a intenzita osvětlení. Směrovost je důležitá pro zachování správných rozměrů tisknutého objektu. Při jejím nedodržení je fotopolymer osvícen i přes jiné, než k tomu určené pixely a může tak dojít k vytvrzení míst, která měla zůstat nezpolymerovaná. Tím je ovlivněn tvar výsledné části. Tento problém lze omezit softwarem, záleží však na konkrétní konfiguraci světelného zdroje. Vzdálenost masky od svrchní roviny FEP filmu lze odhadnout na přibližně 0,5 mm. Pro relativně dobrou odchylku o velikosti 0,1 mm je pak požadovaný maximální úhel přibližně 11°.

Druhým, neméně důležitým parametrem, je homogenita. Její nedodržení vede k přeexponování některých míst a podexponování jiných. V případě nutnosti lze i tuto nedokonalost odstranit pomocí softwaru. Přílišné vytvrzení nevádí, příliš malé však může znamenat odplavení, nebo odloupení dané části. Při nedodržení homogenity by tak bylo nutno prodloužit expoziční dobu. Na tu má také vliv intenzita osvětlení, a tedy svítivost zdroje.

Vyšší svítivost znamená kratší expoziční dobu a tím vyšší rychlost tisku. Zároveň však vede k rychlejší degradaci displeje, která je navíc zrychlena v místech s vyšší intenzitou způsobenou nedostatečnou homogenitou osvětlení. Při shodné velikosti masky pak závislost intenzity osvětlení na výkonu LED světelného zdroje zhruba odpovídá přímé úměře. Jako vhodná hodnota výkonu se dle pozorování vlastností komerčních tiskáren vybavených 5,5“ displejem jeví přibližně 20-40 W.

Z těchto požadavků vyplývají 2 možné realizace podsvícení. Tou první je pole LED diod (viz obrázek 19). Vzhledem k poměru stran a velikosti displeje je možné použít 15, nebo 24 LED diod. To by znamenalo použití 15 3W LED, nebo 24 1W LED o celkovém výkonu 45, respektive 24 W. V obou případech by bylo nutno obstarat chlazení, vzhledem ke vzdálenostem a počtu diod by bylo nutno použít DPS s hliníkovým jádrem. Dosažitelný vyzařovací úhel je zde při použití diod s menším úhlem a čoček přibližně 10°, což by s odchylkou 0,09 mm uspokojilo požadavky po přesnosti. Vzhledem k počtu zdrojů zde není možno použít softwarovou kompenzaci. Další otázkou je homogenita, která by silně závisela na návrhu a činila ho tedy značně složitý, při vlastní výrobě by však nehladě na návrh nebyla příliš dobrá. Tato možnost vychází při vlastní výrobě na přibližně 1 200 Kč, při použití hotových modulů se zakázkově vyráběnými čočkami a lepšími vlastnostmi pak minimálně 2 500 Kč.



Obrázek 18: Komerční pole LED diod [22]

Druhou možností je použití jednoho silnějšího zdroje s reflektorem. Zvolena zde vzhledem k požadovanému výkonu byla COB LED o výkonu 50 W, v případě potřeby dostavitelném pomocí PWM regulace. Chlazení by zde bylo obstaráno relativně jednoduchým chladičem. Dosažený vyzařovací úhel by závisel na vzdálenosti zdroje od masky, ta může být v této tiskárně vzhledem k rozměrům maximálně 150 mm. Při dané velikosti displeje tak nejhorší možný úhel dopadu světla na displej od kolmice činí 25° , toho je však dosaženo pouze v rozích displeje až při velkém úhlu paprsku vycházejícího z diody, reálná hodnota tak bude nižší. Odchylka skutečných rozměrů od modelových při tomto úhlu činí přibližně 0,2 mm, což je stále přijatelná hodnota, ale jen o málo lepší než v případě FDM 3D tisku. Tu však lze tomto případě pomocí softwarové kompenzace srazit přibližně na polovinu, je tak dosaženo zanedbatelného rozdílu oproti poli LED diod. Díky malému úhlu, ve kterém dioda přímo osvětluje displej, a reflektoru je pak po softwarové kompenzaci dosaženo homogenity srovnatelné s koupeným polem diod. Cena pak dohromady činí přibližně 700 Kč, tato varianta je tak výrazně levnější. [22]

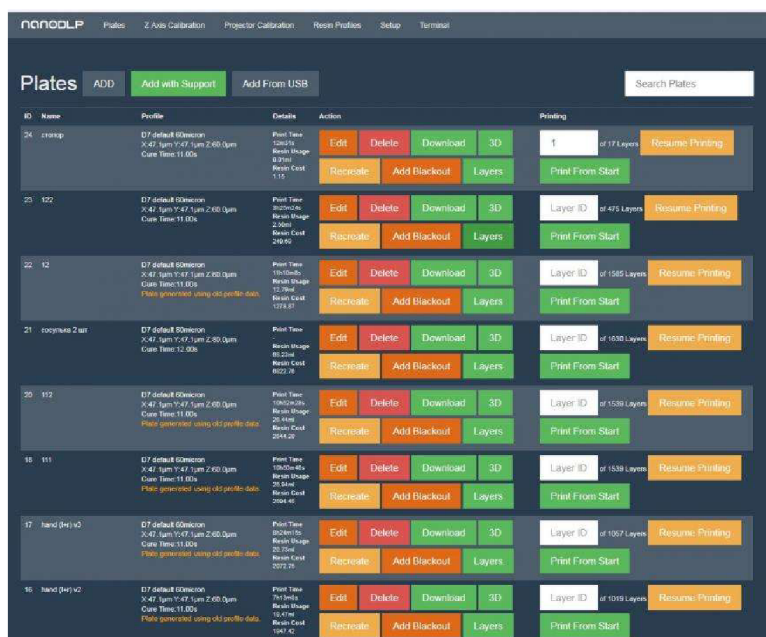


Obrázek 19: 50 W COB LED [21]

Volbu díky srovnatelným parametrům a výrazně nižší ceně vyhrála jedna 50 W COB LED s reflektorem. Ten je realizován zasazením zrcadel do tisknutého rámu, který zároveň upevní LED k desce, ve které je osazen displej. Dioda vyžaduje napájení o parametrech 30-34 V, 1,5 A. Chlazení je provedeno aktivním chladičem z procesoru.

2.3. Software

Úlohou softwaru běžícího v srdci DLP tiskárny je ovládání vertikální osy, zobrazení obrazců odpovídajících jednotlivým vrstvám na displeji, spínání zdroje světla a kompenzace nedokonalostí displeje a jeho podsvícení. Některé řešení využívají zobrazování obrazců pomocí počítače s OS Windows, jiné volí minipočítač Raspberry Pi. Většina komerčních 3D tiskáren využívá vlastní softwaru. Mimo to však existuje několik projektů otevřených pro tiskárny všech druhů a velikostí. S ohledem na nižší výslednou cenu stroje bylo rozhodnuto použít software dostupný bez poplatku. To omezuje výběr na několik málo druhů. Požadavkem je dostatečné množství funkcí včetně softwarových kompenzací podsvícení, podpoře pro již zvolený hardware a anti-aliasing, zlepšující povrch výrobků. Pro zvýšení spolehlivosti pak bylo rozhodnuto pro software běžící na Raspberry Pi, neboť OS Windows může během jiných aplikací, případně svým chováním ohledně aktualizací způsobit defekty, nebo zastavení tisku a tím i ztrátu nepřiliš levného základního materiálu. To dále omezilo výběr a s požadavkem na uživatelsky přívětivé a spolehlivé prostředí pak vytrvala pouze jedna varianta, kterou je NanoDLP z dílny stejnojmenné společnosti. Náhled do jeho webového rozhraní je patrný na obrázku 21. Tento software disponuje vlastním slicerem a prozatím nepřijímá soubory vytvořené jinými programy, čímž také odpadá výběr konkrétního sliceru. [23]



Obrázek 20: Ukázka webového rozhraní NanoDLP [24]

NanoDLP běží na minipočítači Raspberry Pi. Jeden z jeho HDMI výstupů slouží pro ovládání maskovacího displeje. Pohyb po vertikální ose, ovládání podsvícení a ostatních komponentů tiskárny mohou být zajištěny buď pomocí portů přímo na minipočítači, nebo nepřímo s pomocí desky ovládané přes USB pomocí G-codu. Tato deska pak může být ovládána softwarem grbl, nebo marlin. Pro přímé ovládání lze pro Raspberry zakoupit rozšiřující desku pro NanoDLP, nebo podobný systém navrhnout. Software umožňuje ovládání tiskárny přes webové rozhraní, pomocí tlačítek, nebo dotykovým displejem založeným na rozhraní HMI od firmy Nextion.

2.4. Řídící elektronika

Řídící elektronika je silně závislá na použitém softwaru a byla již nastíněna v rámci předchozí kapitoly. Pro řízení celého procesu je použito Raspberry Pi 3B+ v ceně přibližně 1 000 Kč. Jedná se o 64bitový minipočítač založený na 4jádrovém procesoru architektury ARMv8. Tento procesor je více než dostačující pro dané účely, důležitější jsou zde možnosti připojení periferií. Raspberry disponuje 4 konektory USB, jedním micro USB, HDMI, CSI, DSI a také Wi-Fi, Bluetooth a ethernet konektivitou. Specialitou je pak 40pinová GPIO sběrnice. 26 z jejích pinů pak lze ovládat dle libosti, zbytek slouží pro napájení a jiné funkce. Z uvedených portů je zde využito HDMI pro ovládání displeje a několik pinů GPIO sběrnice pro napájení, ovládání pohybu vertikální osy, vypínání světelného zdroje a ovládání dotykového displeje.



Obrázek 21: Raspberry 3B+ [25]

Řízení displeje použitého jako maska zde nelze realizovat přímo, protože displej má vyvedené pouze rozhraní typu MIPI. Jediným aktuálně dostupným řešením, jak tento problém obejít, je použití fyzického driveru rozhraní MIPI s HDMI vstupem. Většina tiskáren včetně EPAX X1, ze které pochází zvolený displej, používá displeje se stejným vnitřním rozhraním. Tím je tedy vyřešena otázka kompatibility, postačuje koupit driver určený pro tyto tiskárny. Ten je dostupný buď ze dříve zmíněného obchodu FEPSshop, nebo na Aliexpressu. Cena pak činí 2000, respektive 1300 Kč. Vzhledem k lepší dostupnosti nakonec vyhrála první varianta. [22]

Třetím potřebným komponentem je propojovací deska sloužící pro rozšíření schopností Raspberry. Ta poslouží k zajištění napájení minipočítače, vyvedení GPIO portů pro snadnější manipulaci a ponese driver krokového motoru. Napájení zajistí zdroj k tomu určený, tedy 12 V zdroj pro krokový motor a Raspberry a stmívatelný proudový zdroj pro LED. Připojení k minipočítači pak zajistí plochý kabel. Cena desky společně se zdroji je odhadována na přibližně 1200 Kč.

Ovládání je, jak již bylo řečeno, zajištěno webovým rozhraním. Přestože ovládání přes webové rozhraní je na rozdíl od toho na dotykovém displeji plnohodnotné, je praktické mít možnost ovládat některé funkce přímo na stroji. K tomu slouží dotykový displej typu HMI od firmy Nextion. Jeho velikost určuje použitelnost, je však omezena cenou. Jako dobrý kompromis se zdá 3,2" displej za 700 Kč. Pro zrychlení ovládání je možnost často používané funkce ovládat přímo, fyzickými tlačítky.

3. Realizace

Následující kapitola pojednává o návrhu a realizaci konstrukce a elektronických součástí pro jednotlivé komponenty a jejich propojení. Byl kladen důraz na splnění již stanovených požadavků, tedy izolace tiskového prostoru, precizní posuv osy a dostatečná tuhost konstrukce za dodržení rozumné cenové hladiny. Neméně důležitým cílem je pak snadnost obsluhy a údržby stroje, které byla umožněna všude tam, kde to dostatek prostoru povolil. Vhodného řešení se dožadovalo pohybové ústrojí, opláštění i umístění optického systému.

Mechanické řešení probíhalo v návrhovém prostředí Fusion 360. Většina tiskárny byla navržena ze 2 různých materiálů dle požadavků na jednotlivé díly. Části kritické pro tuhost vertikální osy byly voleny hliníkové, zde tak převládala tradiční výroba řezáním, vrtáním a broušením, tam kde to nebylo praktické pak nastoupilo řezání laserem. Druhým použitým materiálem byl pro složitější díly nevyžadujících zvýšenou pevnost plastový materiál, konkrétně FDM tištěný PET-G. Tisk samotný probíhal na tiskárně Ender 3, pro většinu dílů byla použita tryska o velikosti 0,6 mm, neboť se pro větší výtisky jedná o dobrý kompromis mezi rychlostí tisku a kvalitou. Vzhledem k použitým výrobním technologiím pro výrobu není zapotřebí kompletní výkresové dokumentace, v přílohách je tedy dodána sestava ve formě STEP souboru a dxf soubory pro laserovou řezačku.

Z důvodů obtíží spojených s dopravou některých částí z území mimo Českou republiku v posledních měsících stavby nebyla tiskárna kompletně dokončena a nebylo tak možno provést testování, odladění a zjištění konečných parametrů. Jedná se zejména o díly z obchodu FEPSshop, tedy maskovací displej společně s řadičem a světelný zdroj. Byl však proveden kompletní návrh a sestavení všech ostatních dílů potřebných pro funkci tiskárny a zařízení je tak připraveno na zasazení těchto součástí ve chvíli, kdy dorazí, aktuální stav tiskárny je patrný na obrázku 22. Zkouška funkcí, ke kterým není těchto dílů třeba byla provedena s úspěchem.



Obrázek 22: Aktuální stav tiskárny

Původní cenový odhad byl stanoven na přibližně 15200 Kč. Tato částka bohužel byla překročena (viz tabulka ...) o přibližně 2400 Kč. Započítány jsou všechny objednané díly. Ty, které byly objednány ze zahraničí jsou vyznačeny modře, cena zde může být vzhledem ke kurzu výrazně proměnlivá. Na vině zvýšené ceny jsou zejména dražší než předpokládané ceny řezu profilů, nutnost dodatečné desky k řadiči displeje, změna v návrhu napájení a nezapočítání některých výdajů v prvotním odhadu. Původní cenový odhad a konečné výdaje jsou vyznačeny v následující tabulce.

Tabulka 2: Náklady na stavbu DLP tiskárny

Položka	Odhadovaná cena [Kč]	Výsledná cena [Kč]
Hliníkové profily 2040	500	1000
Ostatní hliníkové profily	300	154
Obrábění	1000	1288
Filament	1200	1200
Plexisklo	500	254
Kuličkový šroub	4000	3850
Lineární vedení	1200	1440
Displej	1500	1459
MIPI driver	1300	2309
COB LED	500	530
Chlazení, reflektor	500	194
NanoDLP	0	0
Raspberry Pi 3B+	1000	1463
Napájení, DPS	1200	1300
Spojovací materiály, kabely	500	485
Krokový motor	-	300
Celkem	15200	17226

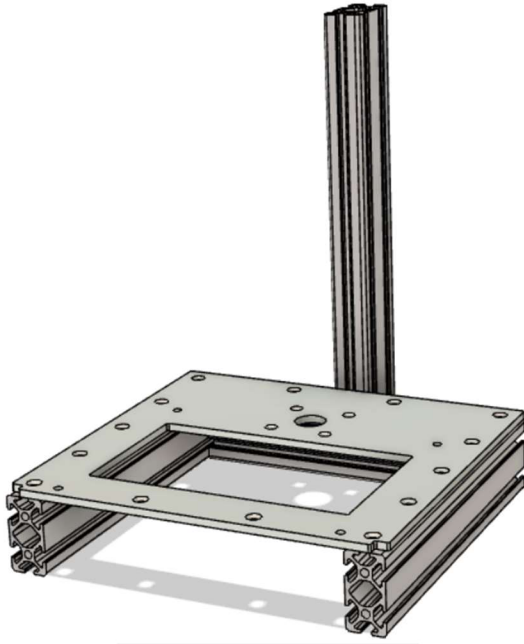
3.1. Základní konstrukce

Základem každého pohybového ústrojí je dostatečně tuhá konstrukce zajišťující dlouhodobou stálost pohybu. Jak již bylo zmíněno, voleny byly hliníkové díly. Nosným prvkem celé tiskárny je rám složený ze stavebnicových hliníkových profilů o velikosti 20*40 mm s drážkou 5 mm (viz obr. 23). Vertikálně umístěný profil zde slouží pro upnutí lineárního vedení a je také připevněn k vnějšímu plášti pro snazší instalaci a další zvýšení tuhosti. Pro připevnění dalších dílů byly mimo této stojny a profilu, ke kterému je připevněna byly přidány profily také na bok. Vzhledem k nadbytečnosti případného profilu pak bylo čelo ponecháno prázdné. Spojení jednotlivých profilů je realizováno stavebnicovými spojkami, které i přes svou vyšší cenu dodávají potřebné vlastnosti. Stojna je připevněna prošroubováním skrz spodní profil společně se spojkami, které by zde samostatně nedodaly dostatečnou tuhost spoje.



Obrázek 23: Hliníkový rám

K tomuto rámu je připevněn spojovací plech, patrný na obrázku 24, který poskytuje zejména montážní díry pro pevné spojení jednotlivých dílů. Spolu se stavebnicovými profily poskytuje konstrukci potřebnou tuhost. Na obrázku níže jsou patrné díry pro spojení profilů, krokového motoru a nádržky s plechem, ale také výřez pro displej a kuličkový šroub. Vzhledem k tomu, že tento plech je podstavcem pro nádržku, což vyžaduje hladký povrch bylo třeba volit šrouby se zapuštěnou hlavou. Motor je od plechu oddálen tak, aby pod něj bylo možno umístit ložisko a spojku mezi kuličkovým šroubem a hřídelí motoru.



Obrázek 24: Spojení hliníkového rámu s plechem a motorem

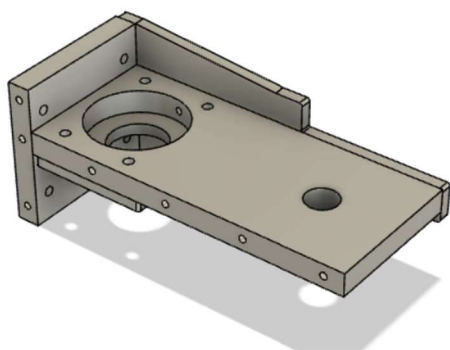
To zajišťuje díl tištěný na FDM 3D tiskárně (viz obr. 25), ve kterém je uloženo ložisko přitlačením oproti plechu. Správný přítlak je regulován vymezovací podložkou. Díry pro šrouby jsou zde navrženy větší tak, aby posouváním krokového motoru do stran za zachování polohy ložiska bylo možno mírně regulovat shodu úhlu šroubu a lineárního vedení, což umožňuje úhlová vůle kuličkového ložiska a spojky. Drážka na boku je nutná pro rozebrání a přístup ke šroubům spojovacího členu mezi hřídelí motoru a šroubem, dírami v zadní části je pak možno připevnit díl k základnímu profilu a dále tak zpevnit konstrukci a také zajistit stálou polohu při doladování úhlu. Tento díl je nutno vytisknout s větším počtem stěn a vyšším žebrováním z důvodu vyšších požadavků na pevnost – jedná se o uložení ložiska, standardně prováděné v litině. V jeho blízkosti jsou ale 2 další ložiska v motoru, ložisko je zčásti uloženo oproti hliníkové desce a síly vyvíjené touto osou nebudou příliš vysoké. Plastový materiál zde tedy postačí. Celá sestava je pak patrná na následujícím obrázku, kde je ke stejné připevněno lineární vedení a kuličkový šroub je uložen ve svém ložisku a spojce.



Obrázek 25: Uložení motoru

3.2. Rameno podložky

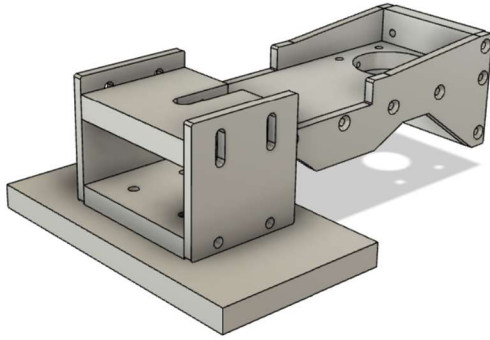
Druhou částí vertikální osy je rameno podložky. Požadavky zde byly vysoká tuhost, nastavení pozice oproti displeji, malé změny této pozice s časem a možnost odnímání podložky. Samozřejmostí je propojení podložky, kuličkového šroubu a lineárního vedení. Zvolena byla kombinace hliníkových plochých profilů tloušťky 8 a 10 mm a složitějších plechových dílů pálených laserem, což umožňuje relativně dobrý kompromis mezi pevností konstrukce a cenou. Vzhledem k požadavkům na dlouhodobou odolnost a vlastnostem šroubových spojů v hliníku pak byly v některých místech použity silnější profily, aby bylo v případě potřeby možno použít závitové vložky, pro začátek však nebyly umístěny, neboť po sestavení se závity v hliníku zdály jako dostatečné.



Obrázek 26: Rameno podložky

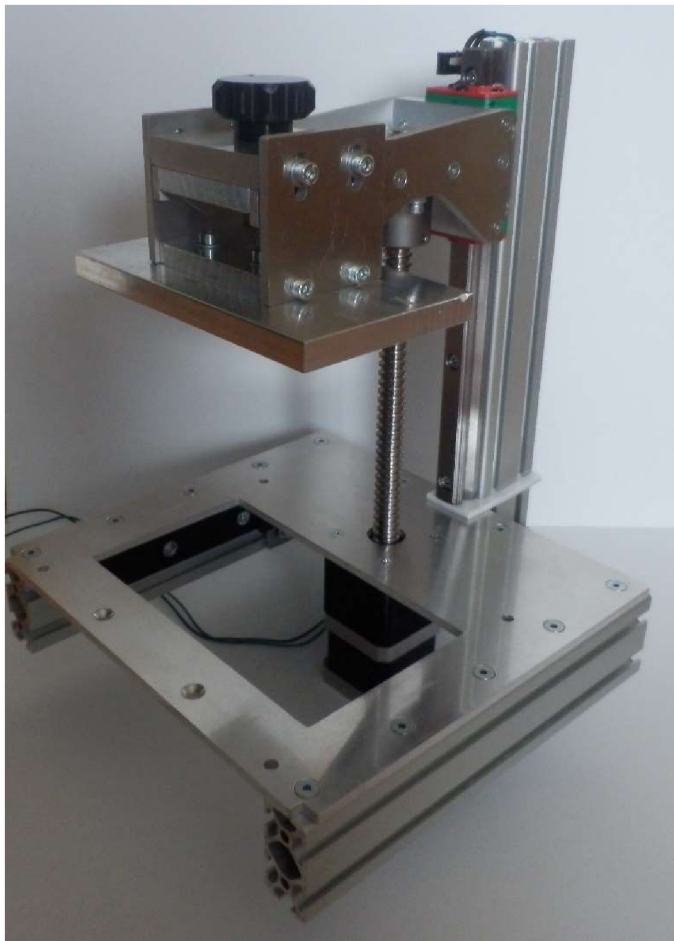
Rameno, znázorněné na obr. 26 je k lineárnímu vedení upnuto plochým profilem se 4 závity v rozteči dané výrobcem, šrouby jsou vedeny zezadu. Matice kuličkového šroubu je opatřena vnějším závitem M20, zde tedy bylo z důvodů menších rozměrů třeba použít KM matici, běžně používanou pro upevnění ložisek na hřídeli. Kuličková matice šroubu je s pomocí KM matice pevně stažena oproti menšímu plechu, který je následně připevněn k vodorovnému plochému profilu ramena s otvorem pro KM matici. Toto spojení slouží mimo jiné pro doladění vzdálenosti a stranové souměrnosti mezi ložiskem a lineárním vedením. Jedná se totiž o značně pevný systém s malými vůlemi a komponenty velice blízko u sebe. I malá neshoda v tomto jejich sesouhlasení by tak mohla vést ke ztíženému chodu kuličkového šroubu. Při montáži byla zjištěna mírná odchylka od kolmosti mezi plochým profilem a osou šroubu, pro hladký chod tak musel být menší plech vypodložen a běžné podložky pod šrouby stahujícími ho k profilu byly nahrazeny pružnými, což tento problém vyřešilo.

Oba zmíněné ploché profily drží pohromadě bočnice v podobě hliníkového plechu síly 4 mm. Ty jsou opatřeny děrami pro šrouby stahující tyto díly k sobě, ale také výřezy pro připojení odnímatelného dílu a nádržku, jejíž výška by bez tohoto výřezu byla značně omezena (viz obr. 27).



Obrázek 27: Rameno s odnímatelnou podložkou

Odepínatelný díl je zde třeba proto, aby to dokončení tisku bylo možno odejmout tiskovou podložku a usnadnit si tak sundání výtisku. Pro nejsnazší z možných řešení je odnímatelná větší část konstrukce. Upnutí je provedeno pomocí drážky pro šroub velikosti M8 v plochem profilu, ke kterému jsou z boku připevněny drážky umožňující sesouhlasení podložky s displejem. Mezi těmi je pak upnut spojovací díl a konečně samotná podložka. Šroub sloužící k připnutí části je pro snadnější manipulaci opatřen tisknutou čepičkou pro ruční dotažení. Celá tato sestava je patrná obr. č. 28.

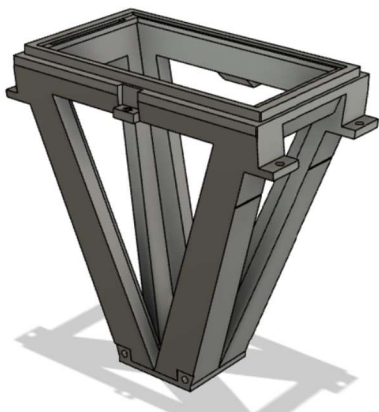


Obrázek 28: Sestava základní konstrukce a vertikální osy

3.3. Reflektor

Reflektor v této konstrukci mimo usměrnění světla slouží také pro upevnění LED a displeje. Zvolena byla výroba 3D tiskem, pro lepší teplotní odolnost opět materiál PETG. Ten má teplotu skelného přechodu okolo 80 °C, čehož by při dostatečném chlazení nemělo být dosaženo, neboť zvýšená teplota by mimo jiné mohla vést k rychlejší degradaci displeje. Důležitá je také dobrá odolnost materiálu proti UV záření, neboť některá místa by mu přece jen mohly být vystaveny.

K upevňovacímu plechu je připojen rámeček se 4 rameny spojenými vespod (viz obr. 30). Nutnost zachování co nejhladšího povrchu pod nádržkou neumožňovala připojení přímo ke spojovacímu plechu, to je tak realizováno s pomocí plastových spojek upnutých k bočním profilům se závity, kterými je reflektor přitažen k plechu. Tyto spojky jsou zároveň opatřeny závitovými vložkami pro připevnění nádržky. Ve spojení ramen reflektoru jsou z boku díry se závity pro připojení rámečku pro LED. Do toho je LED zasazena a následně přitažena oproti chladiči. Jako chlazení byl pro dobrou dostupnost a efektivitu zvolen použitý aktivní chladič na procesor počítače (viz obr. 29). Pro teplotní spojení bude použita standartní teplovodivá pasta běžně používaná na procesorech. Zatímco z jedné strany chladiče je připevněna LED, na druhé spočívá ventilátor.



Obrázek 30: Ramena reflektoru



Obrázek 29: Chladič LED

Aby bylo dosaženo dostatečně malého rozdílu úhlů paprsků dopadajících na jednotlivá místa na displeji, byla zvolena vyšší vzdálenost LED od displeje, přibližně 150 mm. To je blízko maximální vzdálenosti, kterou použitá FDM tiskárna dovoluje, neboť pod reflektor je také třeba umístit chladič, ventilátor a mezeru oproti dnu. Vnější schránka by tak byla zvětšena nad tisknutelné rozměry. Při dalším zvětšování vzdálenosti by navíc bylo dosaženo nevelkého zlepšení úhlů za nepřijatelného zvýšení schránky.

Vzhledem ke komplikovanějším tvarům odrazivého materiálu a velkým úhlům dopadajících paprsků byla použita zrcadlová nalepovací fólie. Tu lze sehnat ve čtvercích 150x150 mm. Jako základ pro nalepení této fólie je třeba rovný povrch. Zde postačí spodek dílu tištěného FDM 3D tiskárnou na skleněnou podložku. Ten při tisku přejme strukturu podkladu a měl by tedy být dostatečně hladký. Lze tak zvolit libovolný tvar reflektoru, zde však pro jednoduchost návrhu byl zvolen prostý komolý jehlan. Odrazivé desky touto metodou vyrobené byly zasazeny do zmíněných ramen. Aby bylo dosaženo mimo dobrých úhlů také přijatelné

homogenity světla, mezi držák LED a ramena reflektoru je umístěn difúzní film, který by měl zajistit lepší rozložení úhlů než vyzařovací charakteristika světelného zdroje. Sestavený reflektor je patrný na obrázku 31.

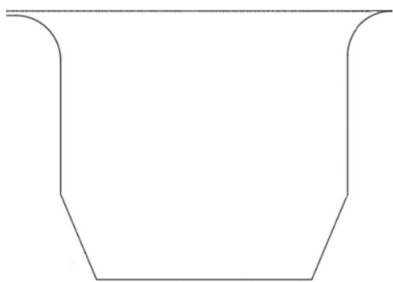


Obrázek 31: Reflektor

3.4. Nádržka na resin

Na nádržku jsou kladeny 2 hlavní nároky – průhledné dno z vyhovujícího materiálu a dobré těsnění. Průhledné dno bude zajištěno s pomocí komodity s výhodou používané v tomto typu tiskáren již několik let – FEP filmu. Jedná se o fólii ze speciálního materiálu určeného k tomuto účelu. Ten mimo průhlednosti včetně UV spektra zajišťuje dostatečnou pevnost při napnutí a pro resin není příliš přilnavý. Při propnutí tahem se tak součást snadno odlepí ode dna. Film lze koupit ze specializovaných obchodů v rozměrech odpovídajících standartním velikostem nádržek s tímto typem displeje. [22]

Druhým požadavkem je dostatečné utěsnění, zejména mezi FEP filmem a nádržkou. Vzhledem k vyšším cenám kupovaných nádržek bylo rozhodnuto o výrobě FDM 3D tiskem. Bylo tak třeba vyřešit potíže s pórovitostí a nerovností povrchu tištěných dílů. Byl použit princip podobný, jako u prodávaných nádržek, pouze s drobnou obměnou. Základem je nádržka s drážkou pro vsazený rámeček a závity. Rámeček má podobu 2 tištěných dílů, jednoho z materiálu flexibilního a druhého pevného s otvory pro šrouby se zapuštěnou hlavou, pomocí kterých je stažen do drážky (viz obr. 32). Obměnou je zde vyšší množství použitých šroubů a zkosený tvar drážky, naznačený na obrázku 33, díky kterému jsou místo pórovitého vrchního profilu pro utěsnění použity „drážkované“ boky tištěných dílů. Přitažením rámečku navíc dojde k vtlačení širší části pružného těsnění do drážky a to nadále zlepšuje těsnící vlastnosti. Nádržka byla testována vodou, které je méně viskózní, než resin, a ani zde nedošlo k úniku kapaliny.



Obrázek 33: Drážka nádržky



Obrázek 32: Příruby nádržky

Velikost nádržky byla volena tak, aby úzce obklopovala tiskový prostor, avšak nevedla ke zbytečnému zvětšení tiskárny. Vnitřní rozměr tak činí 90*150 mm se stěnami necelých 12 mm. Vzhledem k velikosti hlav šroubů si drážka vyžádala 6 mm a okolní stěny pak po 3 mm. Kvůli omezením v šířce tiskárny jsou pak montážní otvory umístěny po 4 kusech v rozích na čelní a zadní stěně. V jednom z rohů je pro snadnější manipulaci s kapalinou opatřena výlevkou. Na obou delších stěnách jsou také umístěny otvory pro přichycení víka. Nádržky jsou vyobrazeny na obr. 34.

Pro dobrou chemickou odolnost byla vytištěna z materiálu PETG, vzhledem k požadavkům na těsnost je doporučeno použít trysku alespoň 0,5 mm s vyšší šířkou čáry, alespoň 4 stěny, vyšší teplotu a o 5 % zvýšený flow rate.



Obrázek 34: Nádržky

3.5. Opláštění

Opláštění je nedílnou součástí přístroje samotného. Poskytuje ochranu před vlivy z obou směrů, mechanické zpevnění i funkční vlastnosti. Zde bylo s ohledem k velikosti použité FDM 3D tiskárny a potřebné funkce rozděleno na 2 oddělené prostory, jeden uzavírající tiskovou oblast a druhý nesoucí elektroniku.

3.5.1. Tiskový prostor

Hlavní rolí této části je oddělení tiskového prostoru od okolního vzduchu. Jak již bylo zmíněno, resin při tisku vydává nepříjemný zápach a je tak výhodné opatřit zařízení formou těsnění tak, aby byl vnější vzduch odstíněn od vnitřního. Toho je dosaženo opláštěním z tištěných dílů a těsněním v každém spoji, kde je to možné. Tam, kde není předpokládán častý pohyb s díly byl zvolen silikon, případně díl tištěný z flexibilního materiálu. Zvláštním případem je pak víko, které bude často otvíráno. Prostor mezi schránkou a víkem tak byl opatřen mikroporézním těsněním kruhového profilu do drážky, zvoleným materiálem zde byl pro svou chemickou odolnost namísto pryže silikon. Víko pak bylo navrženo tak, aby tato těsnící plocha byla v jedné rovině, což by mělo znamenat jak jednodušší realizaci, tak lepší funkci. Díky šikmému uspořádání je také umožněn snazší přístup k nádržce a podložce. Opláštění tiskového prostoru je patrné na následujícím obrázku.



Obrázek 35: Schránka tiskového prostoru

Do prostoru bylo umístěno odvětrávání ve formě ventilátoru s uhlíkovým filtrem, který by měl zabránit nepříjemnému zápachu při otvírání víka. Ovládání je manuální, samodržícím tlačítkem pod displejem. Vzhledem k nutnosti jistého utěsnění i v těchto místech byla zvolena soustava měkkých tištěných přírub, ventilátoru a mřížky držící pohromadě 4 šrouby v rozích. Přimo pod mřížkou je pro možnou snadnější výměnu umístěn filtr.

Mimo zápachů bylo nutno odstínit průchod UV světla mezi vnitřním a vnějším prostorem. Průchod dovnitř by mohl znamenat degradaci resinu příliš časným vytvrzením, ven pak vystavení obsluhy relativně silnému zdroji UV záření. Je však vhodné, aby bylo na proces tisku vidět. Jako okénka tak byly zvoleny průhledné desky z plexiskla oranžové barvy. Dle výrobce tento materiál pohltí až 99,5 % UV záření. Zde použitá vlnová délka však spadá na rozhraní UV a viditelného světla a bylo tak třeba zvolit další pohlcení záření z této části spektra. Jako vhodné řešení se jevila ona oranžová barva. Desky byly po nařezání na stanovené rozměry uloženy do drážek v tištěných dílech. Použité plexisklo má relativně velké tolerance v síle, pro lepší utěsnění tak byly drážky vyplněny silikonem. Rám víka je rozdělen do 4 dílů, aby byl usnadněn tisk a vkládání plexisklových desek (viz obr. 36). [26]



Obrázek 36: Víko

Opláštění je k základní konstrukci připevněno pomocí šroubů s maticemi do drážek profilů, které se nasunou na konstrukci. Rozebírání, případně skládání by tak mělo být relativně jednoduché. Otevírání je zajištěno panty v podobě šroubů. Víko i protikus jsou opatřeno výměnným dílem, díky kterému je možno zvýšit tlak na silikonové těsnění například magneticky. Po sestavení však bylo zjištěno, že hmotnost víka pro tento účel postačí, a tak bylo umístěno pouze prosté madlo.

3.5.2. Prostor pro elektroniku

Druhou podstatnou částí tiskárny mimo samotný tiskový prostor je prostor pro elektroniku. Zde je třeba umístit zdroje, LED pro podsvícení, reflektor a ovládací elektroniku. Tam, kde to bylo možné, byl zajištěn co nejsnazší přístup. Velikost reflektoru v poměru ke konstrukci však vytvořily v některých místech stísněné podmínky. I přesto byl zvolen co nejmodulárnější přístup, aby bylo možno jednotlivé bloky vyměnit dle potřeby. Důležitým je také požadavek na pevnost, neboť na této konstrukci stojí celý zbytek tiskárny. Zvoleny tak byly silnější stěny, v bocích a rozích jsou umístěny výztuhy. Pro dostatečnou stabilitu na podkladu také byla tiskárna vybavena nožičkami z flexibilního materiálu. Pohled do této soustavy je patrný na obr. 37, následující popis odpovídá tomuto rozložení.

Řídící elektronika, tedy Raspberry Pi a pomocná deska byly umístěny do zadního krytu, který je možno rychle odejmout s pomocí šroubů. Po obou stranách krytu jsou na zkosené hraně umístěny rohové výčnělky, nalevo se nachází Raspberry s přístupnými porty, napravo je konektor pro přívodní kabel a vypínač. Zezadu byl umístěn ventilátor pro přísun chladného vzduchu do této části konstrukce, tedy pro LED a zbylou elektroniku.

Po pravém boku jsou nad sebou umístěny oba zdroje, tedy proudový zdroj pro LED a 12V pro řídicí systémy. Protože nezbylo příliš místa a prostor by byl příliš stísněný pro snadnou demontáž, zdroje jsou umístěny na tištěné podložce, kterou je se nimi možno po odšroubování zcela odejmout. Po levé straně pak bude umístěna obdobná podložka pro elektroniku maskujícího displeje. To umožňuje zejména umístění montážních děr bez znalostí rozměrů dílů, které zde budou spočívat. Ty jsou umístěny tak, aby bylo umožněno snadné odepnutí konektoru displeje při jeho případné výměně.

V přední části se nachází displej pro ovládání tiskárny. Ten je zasazen v odepínatelném prvku pro snazší manipulaci při prvotní montáži a případnou možnost výměny dotykového displeje. Ten je zasazen do rámečku a ze zadu přitážen šrouby přes přírubu. To umožňuje bližší umístění displeje od vnější slupky, zde je tato vzdálenost přibližně 1 mm. Na přírubě je také umístěna DPS pro fyzické tlačítka rychlých funkcí a odvětrávání. Pro lepší čitelnost svrchu je pak displej i s tlačítky umístěn pod úhlem.



Obrázek 37: Schránka pro elektroniku

3.6. Elektronika

Po konstrukci samotné je neméně důležitým prvkem DLP tiskárny také její ovládání. To je mimo softwarového vybavení zajištěno zejména elektronikou. Elektronika je kromě propojovacích prvků viditelná na předchozím obrázku. Jak již bylo zmíněno, základním kamenem vši elektroniky v tomto zařízení je Raspberry Pi (dále Pi). Na tom jsou mimo GPIO sběrnici využity také porty HDMI a Ethernet. Na HDMI výstup bude navazovat MIPI řadič, který převádí výstup z Pi do formátu srozumitelného pro samotný displej a následuje deska převádějící výstup na správný konektor. Výstupní konektor byl zvolen tak, aby bylo možno použít nejčastěji používané displeje na trhu a zejména pak zvolený displej pro tiskárnu Epax X1. Všechny tyto komponenty byly objednány, nepřišly však včas. Tato kapitola se tak bude zabývat zejména návrhem a zbylé elektroniky. [25]

Základní komunikaci s uživatelem zajišťuje síťové rozhraní. Vzhledem k tomu, že Pi je vybaven Wi-Fi, je možno zařídit síťové připojení touto cestou. Při problémech s Wi-Fi či potřebě přímé komunikace s počítačem lze ale využít konektor RJ-45 či USB porty snadno přístupné na boku tiskárny. USB porty také umožňují nahrávání souborů při úplném výpadku síťového připojení. Tiskárna je mimo jiné ovladatelná s pomocí dotykového displeje Nextion HMI v přední části konstrukce. Ten s Pi komunikuje s pomocí sériové linky.

Pro lepší organizaci připojených zařízení pak slouží přídavná propojovací deska. Ta zajišťuje zejména vyvedení GPIO sběrnice na připravené konektory, ale také napájení samotného Pi. Přes tuto desku je připojen dotykový displej, 4 tlačítka v přední části zařízení, vstup pro stmívání LED a koncové tlačítko vertikální osy. Deska je také vybavena patiči pro vsazení řadiče krokových motorů ve formě pololu.

Další funkcí této desky je ovládání ventilátorů. Zvolené ventilátory Sunon maglev mají dobrý poměr hlučnosti k proudění vzduchu, nejsou však orientovány na tichý chod. Zvoleno tak bylo doladění jejich rychlosti dle potřeby s pomocí PWM. Pro DLP tiskárnu nejsou kladeny příliš vysoké nároky na toto řízení, neboť vzhledem k neustálému zapínání a vypínání LED by teplotní řízení ventilátorů vedlo k cyklickému zvyšování a snižování hlučnosti, což by mohlo působit rušivě. Zvoleno tak bylo prosté manuální doladění s pomocí trimmerů. To zajišťuje mikroprocesor ATTiny25, umístěný na této desce jako méně prostorná a levnější náhrada obvodu s 555.

Poslední funkcí této části je napájení. Pro zmíněné součásti jsou třeba 2 hladiny napájecího napětí, 5 V pro Pi a 12 V pro krokový motor a ventilátory. 12 V je přivedeno přímo ze zdroje, zde je počítáno s odběrem přibližně 1,25 A na fázi, celkem tedy 2,5 A. Získání 5 V je mírně složitější, vzhledem k tomu, že nebyl vybrán dražší zdroj se dvěma napájecími větvemi. Proudový odběr Pi však není příliš vysoký a v klidovém stavu se pohybuje okolo 500 mA, ve špičce až 900 mA. To je příkon takřka zanedbatelný oproti světelnému zdroji a v místech, kde je deska umístěna je navíc zajištěno obstojné proudění vzduchu. Zvolen tak byl lineární regulátor napětí 7805, konkrétně pak L78S05CV od společnosti ST micro s maximálním povoleným proudem přibližně 2 A, což je vyšší než maximální proud, které je Pi schopno odebírat při připojení všech periférií. [25]

Původním plánem bylo vyrobit tuto desku na fakultě, vzhledem ke vzdálené výuce to však nebylo možné. Byla tedy vyrobena v domácích podmínkách. Došlo také k některých změnách v propojích způsobených omezeními na softwarové straně a na DPS se tedy nachází několik úprav. Její funkce byla ověřena, pro zvýšení spolehlivosti by však bylo v budoucnu dobré použít náhradu vytvořenou lepší výrobní technologií.

Konfigurace napájecích zdrojů již byla mírně nastíněna. Jedná se o 2 zdroje, kde jeden obstarává napájení elektroniky a druhý pak proud pro světelný zdroj. Pro relativně dobrou spolehlivost a příznivou cenu byly zvoleny zdroje značky Mean-Well. Prvním kusem je zdroj 12 V / 4,2 A pro elektroniku. Mírně výkonnější zdroj by byl vhodnější, v době objednávání však nebyl dostupný a tento zdroj tak postačí. Průměrný odběr by zde měl být přibližně 3 A (krokový motor po 1,25 A na fázi, raspberry 500 mA), zdroj tak bude po většinu času operovat relativně efektivně a s rezervou, díky které by nemělo dojít k předčasnému opotřebení. [27]

Druhým exemplářem je stmívatelný proudový zdroj pro LED diody o parametrech 1400 mA při 19–32 V. Maximální napětí zde značí pokles maximálního proudu, zdroj je schopen operovat do 50 V. Napětí zvolené LED činí 32 V, což pro tento zdroj odpovídá přibližně 45 W. Vzhledem k tomu, že se jedná o proudový zdroj, důležitou vlastností je stmívatelnost, která umožňuje vypnutí zdroje ve chvílích, kdy není potřeba, ale také dostavení výkonu LED v případě, že by byl příliš vysoký pro bezpečné vytvrzení resinu, nebo by docházelo k přílišnému zahřívání okolních částí. Vstup pro stmívání je buď stejnosměrných, nebo PWM modulovaných 0–10 V. Nelze tak spínat přímo z raspberry a bylo použito 12V spínaných skrze bipolární tranzistor. [27]

3.7. Software

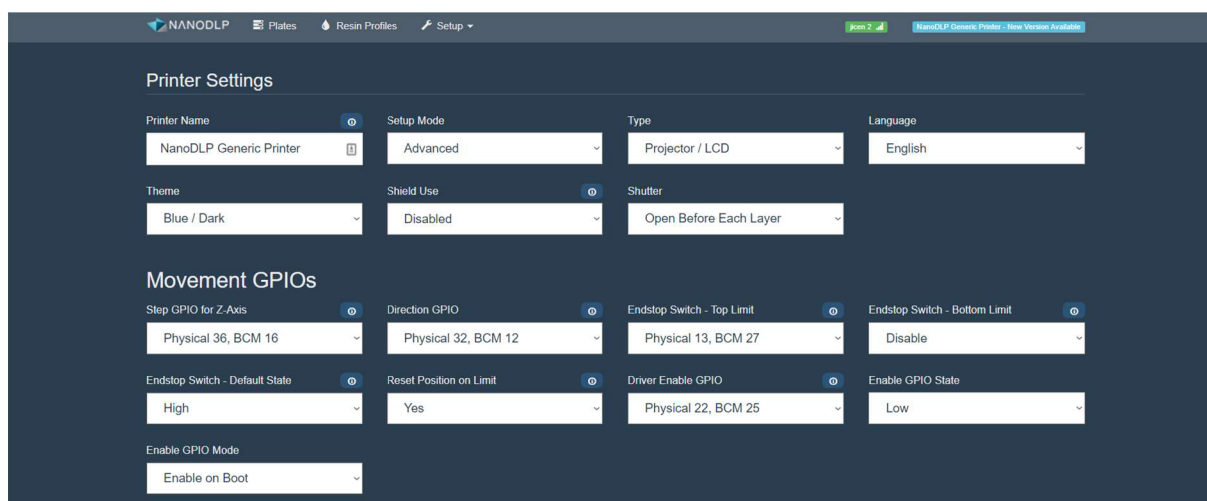
Po elektronice (hardwaru) je druhou, neméně důležitou součástí řízení software. V této tiskárně se nachází 2 základní softwarové bloky. Tím důležitějším je samotný řídicí software NanoDLP. Ačkoliv je velice komplikovaný, samotné nastavení je jednoduché. Druhým je program běžící na čipu AVR, který obstarává ovládání ventilátorů. Celý program se nachází v příloze.

Program běžící na ATtiny25 má za úkol pouze dostavení rychlosti ventilátorů v případě, že by byly příliš hlučné, nebo by chlazení bylo nedostatečné. Nároky zde nejsou příliš vysoké a procesor vykazuje na tyto zmíněné funkce více než dostatečnou kapacitu, je tak využit program jednodušší, ač nepříliš úsporný. Jediným důležitým požadavkem byla vyšší frekvence PWM modulace, posunutá mimo frekvenční oblast slyšitelnou člověkem. Z možných variant byla zvolena frekvence 31,25 kHz. [28]

Chladicí ventilátor v zadní části skříně je ovládán s pomocí PWM modulace řízené napětím na jezdcí potenciometru, běží neustále. Odsávání je řízeno tak, že ventilátor lze vypnout či zapnout tlačítkem. Po jeho stisknutí běží zprvu na plné otáčky, které se postupně snižují až na hodnotu nastavenou potenciometrem. Chlazení LED diody pak ovládání postrádá, neboť zvolený ventilátor byl i při nejvyšších otáčkách výrazně tišší než ostatní a byl tedy připojen přímo na 12 V.

V případě NanoDLP se ze strany uživatele jedná zejména o instalaci a nastavení. Instalaci lze provést podle pokynů ze stránek dodavatele. Nejprve bylo nutno nahrát na SD kartu software pro dotykový displej, který si po zapnutí se zasunutým úložištěm stáhne potřebná data. Karta je tak uvolněna pro další krok, kterým je instalace NanoDLP. To běží na Raspberry Pi, které používá jako své úložiště také SD kartu. Na tu je třeba vypálit edici Raspbianu (větve linuxu určené pro Raspberry) s NanoDLP staženou ze stránek výrobce. [23]

Poté následuje samotné nastavení. Pro to je výhodné použít ethernetovou přípojku, neboť nastavení sítě Wi-Fi v předchozích krocích je nejisté. Nejprve je vhodné nastavit dotykový displej. Raspberry má v základu sériovou sběrnici rezervovanou pro jiné funkce. Prvním krokem je tak zprovoznění této sběrnice přes příkazový řádek skrz secure shell protokol (SSH). To je provedeno příkazem „sudo raspi-config“ a následným povolením sériové linky pod „Interfacing options“. Pak již je možné přejít do webového rozhraní (viz obr. 37) a nastavit zbylé věci pod options/settings. Všechna změněná nastavení jsou uvedena v příloze. [29]



Obrázek 38: Nastavení NanoDLP

Následně byla ověřena funkce krokového motoru, dotykového displeje, HDMI výstupu a koncového spínače, které fungovaly dle předpokladů. Byla také ověřena opakovatelnost pohybu, kde se po několika zapnutích a vypnutích, pohybu s tiskárnou, odepínání podložky a výrazném pohybu s osou neprojevíly výrazné změny, které by mohly znamenat nutnost dalšího provedení sesouhlasení podložky s displejem. V budoucnu je třeba nastavit vhodné profily pro resin a ozkoušet samotné tiskové funkce. Nebyla také vyzkoušena funkčnost ovládání světelného zdroje.

Závěr

Byla nastudována problematika DLP 3D tisku a proveden návrh a sestavení tiskárny založené na této technologii. Jako základ byly použity velice robustní komponenty vertikální osy v podobě kuličkového šroubu a lineárního vedení značky HIWIN. Konstrukce tedy byla navržena tak, aby bylo umožněno plné využití těchto dílů. Bylo také provedeno utěsnění tiskového prostoru a odvětrávání výparů přes filtr pro zamezení úniku člověku nepříjemných zápachů při tisku. Tiskárna disponuje delším reflektorem, než je obvyklé a je připravena pro použití 50 W LED diody pro přesnější a rychlejší tisk. Velikost tiskového prostoru činí 70*120*130 mm při horizontálním rozlišení 2560*1440 bodů. Výšky vrstev je možno volit v rozmezí 20-60 μm . Použitým softwarem je NanoDLP, umožňuje Wi-Fi konektivitu a nahrávání souborů přes USB disk.

V rámci testování byla ověřena pouze základní funkcionality vertikální osy a elektronických systémů. Z důvodů obtíží spojených s dopravou zboží ze zahraničí v posledních měsících práce nebyla stavba zcela dokončena. Chybí podstatné části optického systému, konkrétně LED dioda a displej s řadičem. Tiskárna tedy prozatím není schopná funkce, návrh je však dokončen a díly u kterých je to možné byly sestaveny, zařízení je tak plně připraveno k zasazení zmíněných komponent po jejich doručení.

Původní finanční plán byl překročen o přibližně 15 % kvůli zanedbání některých nákladů v prvotním odhadu. I přesto byla při nákladech okolo 17 000 Kč sestavena tiskárna cenově bližší levnějším modelům, avšak s vlastnostmi modelů výrazně dražších. Příkladem může být srovnání s nejprodávanějšími DLP tiskárnami v České republice v době vydání této práce, Anycubic Photon za 14 000 Kč a Prusa SL1 v hodnotě 35 000 Kč. Kvalitou použitých komponent je stroj blíže Průšovi, cenou pouze mírně převyšuje Anycubic. [30]

Zmíněná cena však zahrnuje pouze materiály, pokud je brána v úvahu práce, je patrné, že výroba jednoho kusu není příliš výhodná. Po započtení zhruba 250-350 hodin návrhu a dalších 70 hodin první stavby by i při minimální hodinové sazbě náklady vzrostly nade všechny meze. Při výrobě vyššího množství kusů a použití obdobných komponent vertikální osy od jiného výrobce by však tyto náklady byly rozptýleny a s lehkou úpravou některých modelů a nabytou praxí by také došlo ke zrychlení výrobního procesu, zde lze počítat přibližně 30-40 hodin. To by umožnilo dosažení obstojné konkurenceschopnosti i při započítání pracovních nákladů.

Literatura

- [1] What is FDM 3D printing [online]. 2017 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://3dsupplyguys.com/education-center/types-of-3d-printers/what-is-fdm-3d-printing/>
- [2] 3D Printing vs Injection Molding – Know the Differences [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printing-vs-injection-molding-know-the-differences/>
- [3] CNC Machining vs AM for metal prototyping [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.rapiddirect.com/blog/cnc-machining-vs-am-for-metal-prototypes/>
- [4] 3D Printing vs CNC Machining: Which is best for prototyping? [online]. 2017 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/85>
- [5] 2019 Original Prusa i3 MK3S Review: Simply the Best [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/original-prusa-i3-mk3-review/>
- [6] Introduction to FDM 3D printing [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [7] Sintratec kit [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://sintratec.com/product/sintratec-kit/>
- [8] SLS 3D Printing: Selective Laser Sintering Simply Explained [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/selective-laser-sintering-sls-3d-printing-simply-explained/>
- [9] 2019 SLS 3D Printer Buyer's Guide [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-sls-3d-printer-desktop-industrial/>
- [10] SLS 3D Printing, when it's detail and strength you need! [online]. 2018 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.side-design.uk/our-services/sls-3d-printing/>
- [11] 3D Printing Technologies: Stereolithography [online]. 2014 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://i.materialise.com/blog/en/an-intro-to-our-3d-printing-technologies-stereolithography/>
- [12] Illuminate DLP 3D printer hits Kickstarter with affordable 2K resolution [online]. 2016 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.3ders.org/articles/20161117-illuminate-dlp-3d-printer-hits-kickstarter-running-with-affordable-2k-resolution.html/>
- [13] SLA vs. DLP: Which One Is Better? [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/sla-vs-dlp/>
- [14] SLA vs DLP: The Differences – Simply Explained [online]. 2018 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout/>
- [15] Green resin for DLP 3D printer [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <http://www.3dprinting-jh.com/3d-printing-materials/green-resin-for-dlp-3d-printer.html/>
- [16] UV DLP fotopolymery [online]. 2018 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/uv-dlp/>
- [17] Ballscrews [online]. 2018 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.hiwin.com/pdf/ballscrews.pdf>

- [18] CNCShop [online]. 2016 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://cncshop.com/>
- [19] Autoleveling on 3D printers: 9 myths and 12 sensors tested! [online]. 2017 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=i19bNWN66BY/>
- [20] What limits linear bearing speed? [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/what-limits-linear-bearing-speed-part-1/>
- [21] How a ball screw works? [online]. 2017 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://abroncnc.com/wp-content/uploads/2017/01/?SA>
- [22] FEPSShop [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://fepshop.com/>
- [23] NanoDLP [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://nanodlp.com/>
- [24] What is NanoDLP and how to treat it? [online]. 2017 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://3dtoday.ru/blogs/plastmaska/what-is-nanodlp-and-how-to-treat-it/>
- [25] Raspberry Pi 3B+ [online]. 2018 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- [26] PMMA Acrycolor [online]. 2020 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.guttashop.cz/polymetakrylat-acrylcolor-3-mm-.7910/>
- [27] E-shop Mean-Well [online]. 2020 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.eshop-meanwell.cz>
- [28] Raspi-config [online]. 2019 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/configuration/raspi-config.md>
- [29] ATtiny 25/45/85 Datasheet [online]. 2020 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7598_Automotive-Microcontrollers-ATtiny25-45-85_Datasheet.pdf
- [30] 3D Tiskárny [online]. 2020 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://3d-tiskarny.heureka.cz>

Seznam zkratk

DLP.....	Digital light processing, zpracování fotopolymeru digitálně řízeným osvětlením
LCD	Liquid Crystal Display, displej z tekutých krystalů
FDM	Fused Deposition Modeling, modelování ukládáním roztaveného materiálu
CNC.....	Computer numerical control, číslicové řízení
SLS	Solid Layer Sintering, sinterování pevných vrstev
SL	stereolitografie
MIPI.....	Mobile industry processor interface, vnitřní rozhraní mobilních zařízení
GPIO.....	General purpose input output, univerzální vstupně-výstupní pin
HMI	Human machine interface, „rozhraní pro komunikaci člověka a stroje“
COB	Chip on Board, montování čipů přímo na desku (většinou LED)

Seznam příloh

Přílohy v dokumentu

Příloha A	Změny nastavení NanoDLP
Příloha B	Propojovací DPS
Příloha C	Program běžící na ATTiny25

Elektronické přílohy

DPS_podklady.pdf	Podklady pro tisk DPS
DPS_deska.sch	Soubor Eagle
DPS_schema.brd	Soubor Eagle
DLP_tiskarna.step	Sestava mechanických součástí tiskárny

A Změny nastavení NanoDLP

Printer Settings

-Setup Mode	Advanced
-Shutter	Open before each layer
Movement GPIO	
-Step GPIO for Z-Axis	Physical 36, BCM 16
-Direction GPIO:	Physical 32, BCM 12
-Endstop Switch – Top Limit	Physical 13, BCM 27
-Driver Enable GPIO	Physical 22, BCM 25
-Enable GPIO Mode	Enable on boot

Shutter

-Shutter	True/False signal
-Shutter GPIO	Physical 37, BCM 26
-Servo Pulse Width - Open	500
-Servo Pulse Width - Closed	2500
-Servo Signal Length	1000

Display

-Horizontal Resolution	2560
-Horizontal Resolution	1440
-X/Y Resolution	47

Motor

-Max Speed	5000
-Min Speed	1000
-Motor startup Speed	150
-Motor Step Angle	1,8
-Microstep	128
-Leadscrew Pitch	4
-Z-Axis Height	192000

Physical Buttons

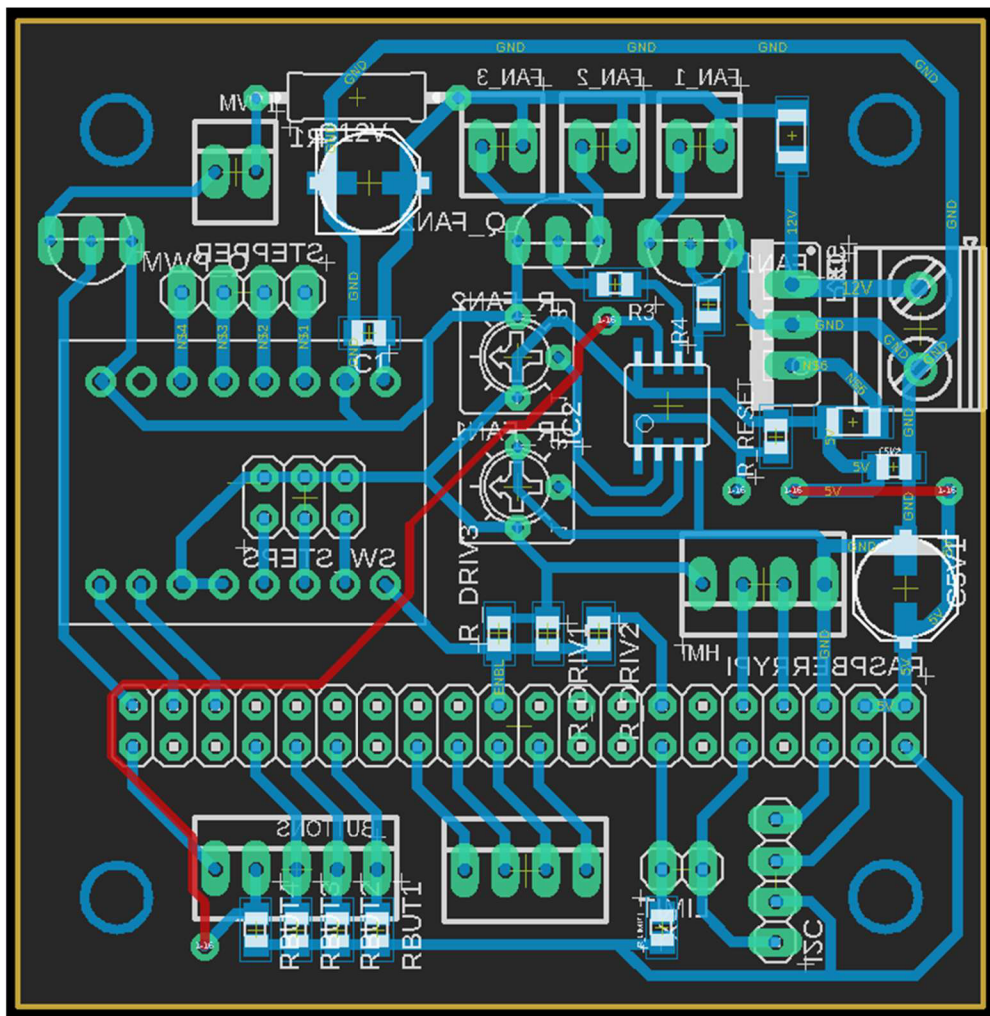
-Stop/Shutdown GPIO

Physical 29, BCM 5

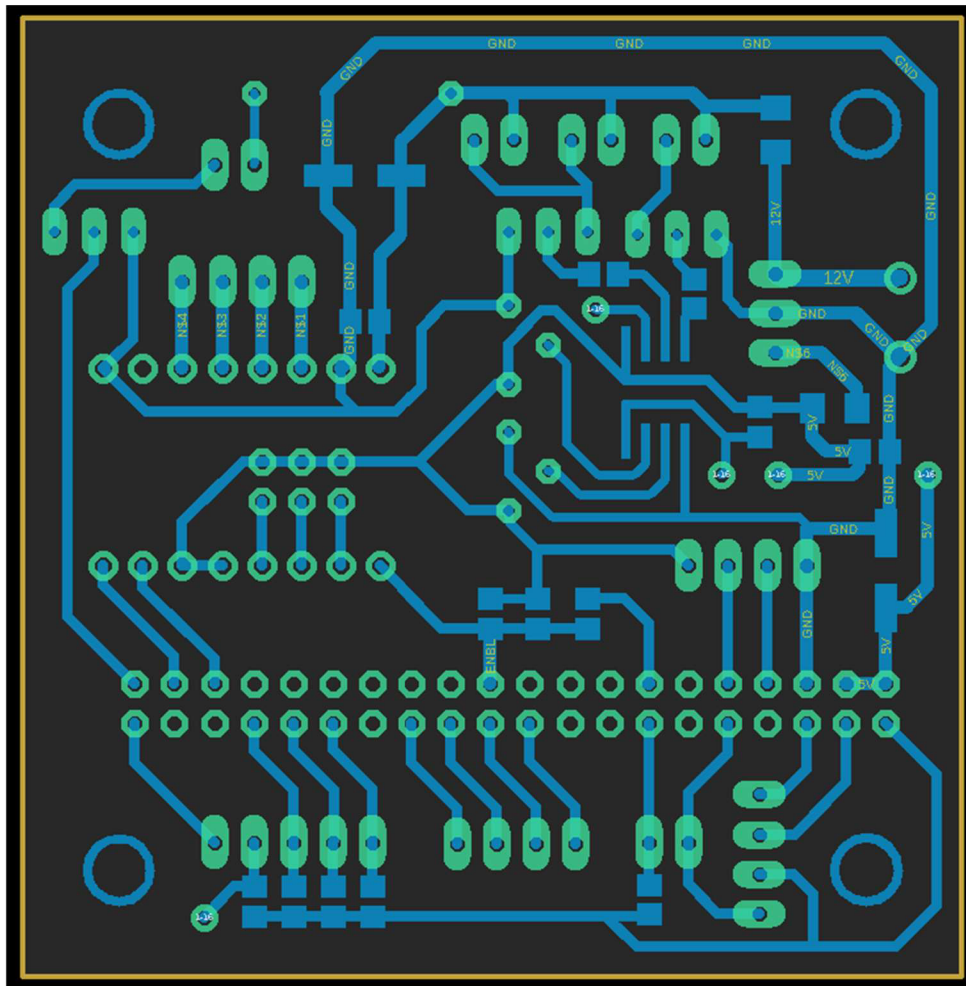
Nextion Display Port Adress

/dev/ttyS0

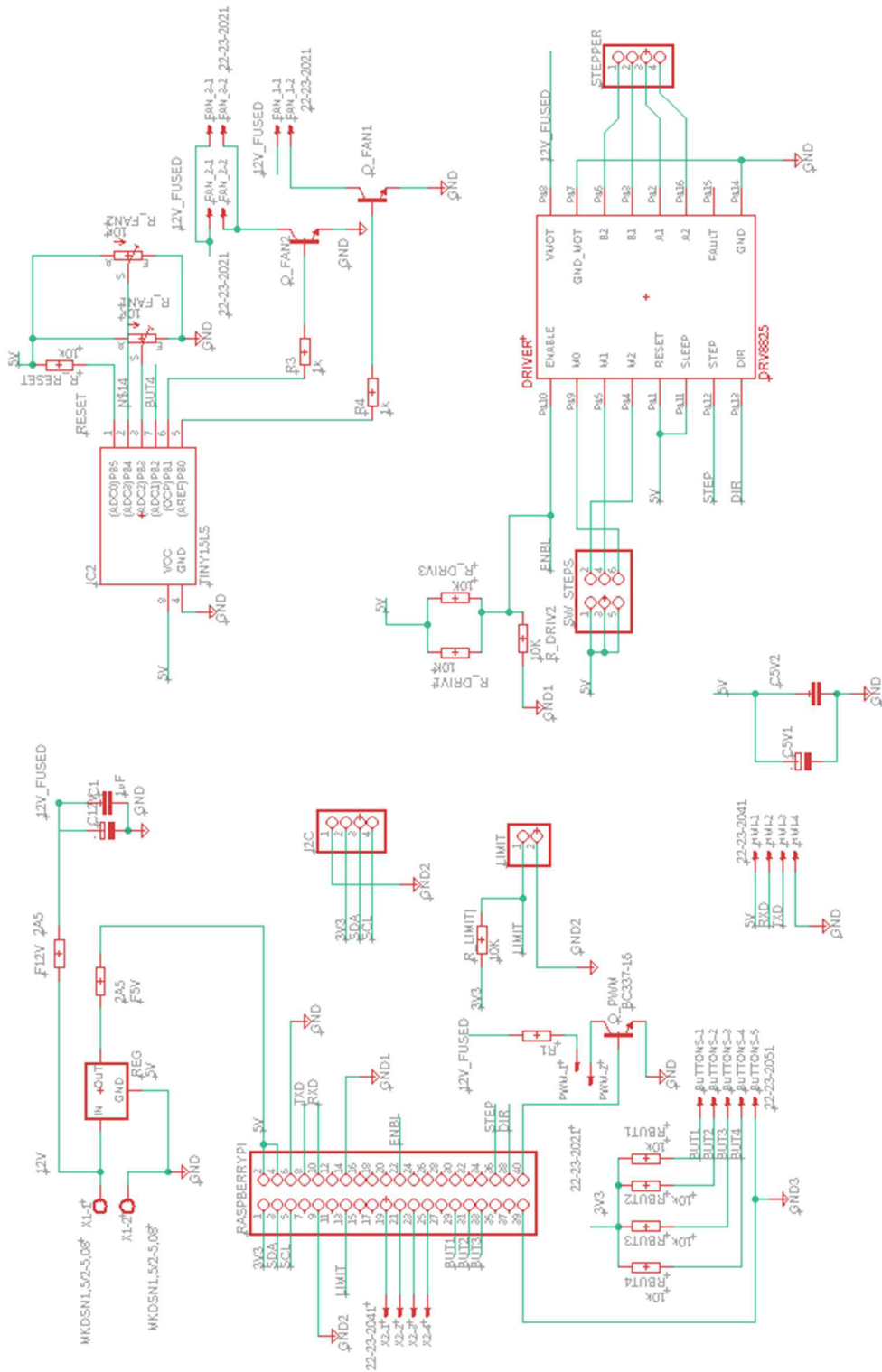
B Propojovací DPS



Obrázek b1: Propojovací DPS, strana Bottom s propojkami a součástkami



Obrázek B2: Propojovací DPS, strana Bottom, pouze cesty



Obrázek B3: Propojovací DPS, schéma

C Program běžící na ATTiny25

```
int fanspeed, fanspeed2;
int fan_timer;
void setup()
{
  DDRB = 0b00000011;
  TCCR0A |= (1 << COM0A1) | (1 << COM0B1);;
  TCCR0A |= (1 << WGM01) | (1 << WGM00);
  TCCR0B |= (1 << CS01);
  OCR0A = 128;
  OCR0B = 128;
}

void loop()
{
  fanspeed=analogRead(A2);
  fanspeed >>= 2;
  OCR0A = fanspeed;
  if(digitalRead(2))
  {
    fanspeed=analogRead(A3);
    fanspeed >>= 2;
    fanspeed2 = fan_timer >> 4;
    if((fanspeed2)>fanspeed)
    {
      OCR0B = fanspeed2;
      fan_timer--;
    }
    else
    {
      OCR0B = fanspeed;
    }
  }
  else
  {
    OCR0B = 0;
    fan_timer=4080;
  }

  delay(10);
}
```