FAKULTA STROJNÍ TUL

Diplomová práce

Zařízení pro výzkum 3D tisku skleněných výrobků

Studijní program: N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce: **Bc. Martin Beneš**

Vedoucí práce: doc. Ing. Marcel Horák, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Konzultant práce: Ing. Michal Starý, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Liberec 2023

FAKULTA STROJNÍ TUL

Zadání diplomové práce

Zařízení pro výzkum 3D tisku skleněných výrobků

Jméno a příjmení:	**Bc. Martin Beneš**
Osobní číslo:	S21000171
Studijní program:	N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
Zadávající katedra:	Katedra sklářských strojů a robotiky
Akademický rok:	2022/2023

Zásady pro vypracování:

V současné době představují 3D tiskové technologie jedno z nejrychleji se rozvíjejících odvětví. Existují dva základní typy tiskáren, které uplatňují metodu FDA nebo SLA a běžně se používají jak v průmyslu, tak pro potřeby výzkumu a vývoje. Cílem diplomové práce je provést rešerši v oblasti 3D tisku skla a zpracovat návrh zařízení pro výzkum tisku skleněných polotovarů na principu mikrotavení skleněného vlákna CO2 laserem. Předpokládá se koncept řešení uplatňující princip stacionární laserové hlavy v kombinaci s pohybujícím se technologickým stolkem ve třech na sebe kolmých osách. Vlastní výzkum FDA metody tisku pro potřeby sklářského průmyslu již není předmětem řešení diplomové práce.
Úkolem Vaší DP bude:

1. Provést podrobnou rešerši současného stavu techniky v oblasti 3D tiskových technologií se zaměřením na sklo.
2. Realizovat návrh koncepce mechaniky 3D laboratorní tiskárny umožňující pohyb technologického stolu ve třech osách oproti stacionární laserové hlavě.
3. Provést dimenzování mechaniky a dílčích lineárních pohonů tiskárny, zpracovat 3D počítačový model a výkresovou dokumentaci.
4. Závěrem specifikovat aplikační přínos navrženého řešení.

Rozsah grafických prací:	výkresová dokumentace
Rozsah pracovní zprávy:	40 – 50 stran textu
Forma zpracování práce:	tištěná/elektronická
Jazyk práce:	Čeština

Seznam odborné literatury:

1. HOTAŘ, Vlastimil, Vladimír KLEBSA a Ivo MATOUŠEK. *Technologie automatické výroby skla*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-237-2.
2. BELDA, Jaroslav. *Sklářské a keramické stroje*. Sv. 1. 2. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1994.
3. BARNATT, Christopher. *3D printing: the next industrial revolution*. [Spojené státy americké]: ExplainingTheFuture.com, 2013. ISBN 978-1-484-181768..
4. HEINRICH, Andreas, ed. *3D printing of optical components*. Cham, Switzerland: Springer, [2021]. Springer series in optical sciences, Volume 233. ISBN 978-3-030-58959-2.
5. CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-40-1.
6. Katalogy renomovaných výrobců pohonů.

Vedoucí práce:	doc. Ing. Marcel Horák, Ph.D. Katedra sklářských strojů a robotiky
Konzultant práce:	Ing. Michal Starý, Ph.D. Katedra sklářských strojů a robotiky
Datum zadání práce:	4. listopadu 2022
Předpokládaný termín odevzdání:	4. května 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 4. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

22. května 2023 Bc. Martin Beneš

Anotace

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem zařízení pro výzkum 3D tisku skla. Práce obsahuje podrobnou rešerši v oblasti 3D tiskových technologií jak v obecné rovině, tak ve směru tisku skleněných výrobků a rešerši v oblasti laserových technologií. Návrh je následně proveden výběrem a specifikací jednotlivých pohonů, spojením těchto pohonů a výpočetní kontrolou pohonů a jejich motorů. Dále byla vytvořena celková konstrukce 3D tiskárny, kde jsou jednotlivé části podrobně popsány a k celé konstrukci je vytvořena výkresová dokumentace.

Klíčová slova

aditivní technologie, 3D tisk, sklo, tiskárna, laser, servopohon

Annotation

The master thesis deals with the design of a device for research of 3D printing of glass. The thesis includes a detailed research in the field of 3D printing technologies both in general and in the direction of printing glass products and a research in the field of laser technologies. The design is then carried out by selection and specifying individual actuators, connecting these actuators and computationally controlling the actuators and their motors. Next, the overal design of the 3D printer was created, where the individual parts are described in detail and a drawing documentation is created for the entire design.

Keywords

additive technology, 3D printing, glass, printe, laser, servo drive

Poděkování

Tímto bych rád chtěl poděkovat doc. Ing. Marcelu Horákovi Ph.D. za vedení této diplomové práce, především za jeho vstřícnost a cenné rady po celou dobu řešení. Dále bych chtěl velmi poděkovat přátelům a rodině, kteří mě po celou dobu studia podporovali a byli mi oporou.

Obsah

1. Úvod 11
2. Cíle práce 12
3. Klasifikace aditivních technologií 12
3.1. Vytlačování materiálu (material extrusion) 13
3.1.1. FDM (Fused Deposition Modeling) 13
3.1.2. G3DP (Glass 3D Printing) 14
3.1.3. DIW (Direct Ink Writing) 16
3.2. Fotopolymerizace (Photopolymerization) 17
3.3. Spékání práškového materiálu (Powder bed fusion) 18
3.4. Přímé energetické nanášení (Direct energy deposition) 19
3.5. Shrnutí aditivních technologií 20
4. Laserové technologie 20
4.1. Laserové světlo 21
4.2. Základní konstrukce laseru 21
4.3. Rozdělení laserů 22
4.3.1. Rozdělení podle typu aktivního prostředí 22
4.3.2. CO_2 laser 23
5. Rozbor vlastního řešení 23
6. Specifikace pohonů a jejich spojení 24
6.1. Pohon L-812.091400 (v osách x, y) 24
6.2. Pohon L-406.40SD00 25
6.3. Pohon DS 50 26
6.4. Konstrukce manipulátoru 27
7. Výpočtová část 31
7.1. Opakovatelná přesnost polohování 31
7.2. Dynamická únosnost systému 32
7.2.1. Zavedení hmotností 33
7.2.2. Zavedení kinetických a potenciální energií 34

7.2.3. Zatížení prvního pohonu ... 35
7.2.4. Zatížení třetího pohonu ... 36
7.2.5. Zatížení klopným momentem ... 36
7.2.6. Zhodnocení dynamické únosnosti systému ... 38
7.3. Výpočet zatížení motorů pohonů ... 38
7.3.1. Výpočet motoru prvního pohonu v ose *x* ... 38
7.3.2. Výpočet motoru třetího pohonu ... 41
7.3.3. Zhodnocení zatížení motorů pohonů ... 44
8. Celková konstrukce 3D tiskárny ... 44
8.1. Rámová konstrukce ... 46
8.2. Konstrukce laserové technologie ... 50
8.3. Technologické příslušenství ... 51
9. Montáž a oživování 3D tiskárny ... 51
9.1. Popis postupné montáže 3D tiskárny ... 52
9.2. Popis oživování 3D tiskárny ... 55
9.2.1. Řízení pomocí kontroléru C-663.12 ... 56
9.2.2. Řízení pomocí PLC USP-070-B10 ... 58
10. Závěr ... 62

Seznam použitých značek

Značka	Název	Jednotka
Δx	Přesnost polohování pohonu v ose *x*	[µm]
q	Obecná souřadnice	[mm]
Δq	Obecná odchylka souřadnice	[µm]
Δy	Odchylka přesnosti pohonu v ose *y*	[µm]
Δz	Odchylka přesnosti pohonu v ose *z*	[µm]
Δc_m	Celková přesnost	[µm]
L	Lagrangeův koeficient	[-]
t	Čas	[s]
$\dot{q}$	Obecná rychlost	[m/s]
Q	Obecný silový účinek	[N]
W_k	Kinetická energie	[J]
W_p	Potenciální energie	[J]
m	Hmotnost	[kg]
x, y, z	Poloha jednotlivých os	[mm]
$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$	Rychlost jednotlivých os	[mm/s]
$\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$	Zrychlení jednotlivých os	[mm/s^2]
g	Gravitační zrychlení	[m/s^2]
F	Síla	[N]
M	Moment	[N·m]
a	Zrychlení	[mm/s^2]
R	Poloměr ramena klopného momentu	[mm]

p	Stoupání šroubu	[mm]
$d_š$	Průměr šroubu	[mm]
$l_š$	Délka šroubu	[mm]
J	Moment setrvačnosti	[kg·mm^2]
v	Rychlost	[mm/s]
ρ	Hustota materiálu	[kg/m^3]
ω	Úhlová rychlost	[s^{-1}]
ε	Úhlové zrychlení	[s^{-2}]

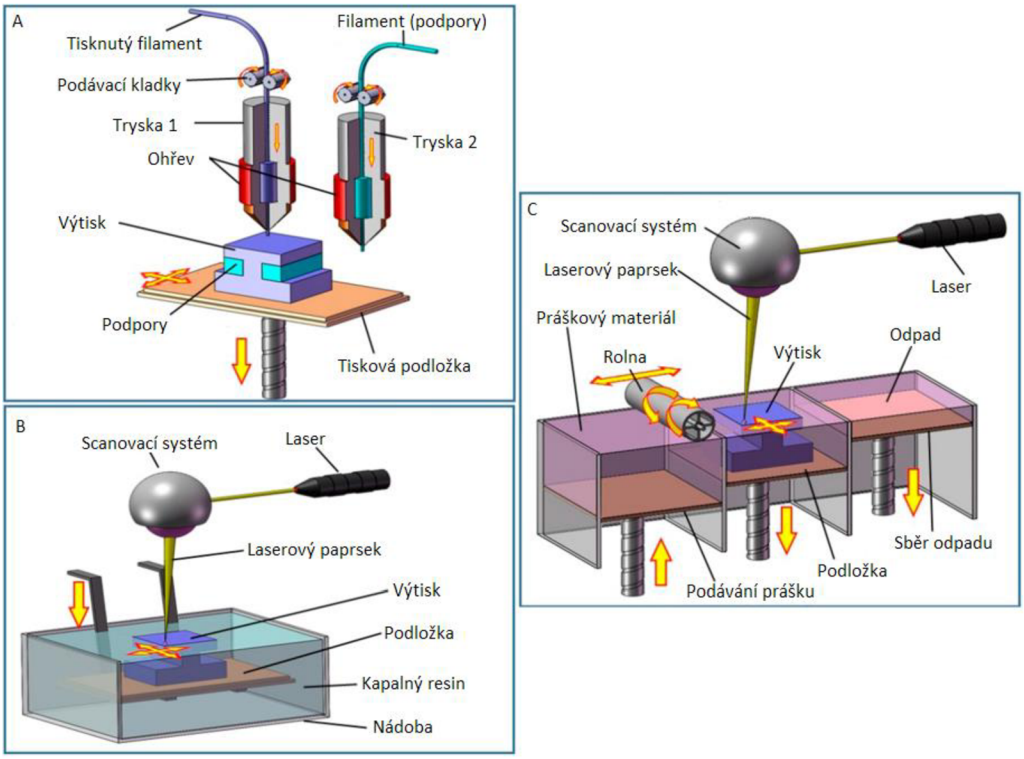
1. Úvod

Sklo je směs, kde základ tvoří sklářský písek, který je nejčastěji na bázi oxidu křemičitého, s dalšími oxidy (vápenatý, sodný a draselný). Vzniklá směs se nazývá sklářský kmen, který s přidáním drceného odpadu (střepů) tvoří vsázku. Vsázka je tavena v tavícím agregátu a následně tvarována pro zisk určitého tvaru výrobku, kterým může být ploché, obalové nebo užitkové sklo.

Jako hlavní trend moderní doby v oblasti výrobních technologií jsou aditivní technologie, u kterých je hlavním představitelem technologie 3D tisku. Tyto technologie jsou poměrně často využívány v prototypové nebo kusové výrobě. Hlavními výhodami je vysoká pružnost výroby s minimálním množstvím odpadního materiálu a s tím spojená výroba tvarově složitých dílů, které by se konvenčními technologiemi vyrobit nedaly nebo by jejich výroba byla složitá a nákladná.

Mezi základní metody 3D tisku patří FDM (Fused Deposition Material), která je využívána i pro amatérské účely v domácnostech, SLA (Stereolytografie) a SLS/SLM (Selective Laser Sintering/Melting), kde jejich základní principy jsou ukázány na *obr. 1*.

Materiály, které se dají technologií 3D tisku zpracovávat je celá řada, kde mezi nejpopulárnější patří polymerní, kovové, kompozitní a keramické materiály [1]. Mezi další materiály patří i sklo a konkrétním řešením 3D tisku skelných výrobků se zabývá předkládaná diplomová práce.



Obr. 1 Základní metody 3D tisku A – FDM, B - SLA, C - SLS/SLM [1]

2. Cíle práce

Cílem této práce je zpracovat rešerši v oblasti technologií 3D tisku zaměřujících se na sklo a následně zpracovat návrh koncepce mechaniky a konstrukce 3D laboratorní tiskárny, kde pohyb bude vykonáván technologickým stolem ve třech osách oproti stacionární laserové hlavě (CO_2 laser). Následně provést dimenzování mechaniky a dílčích lineárních pohonů, realizovat 3D počítačový model a výkresovou dokumentaci. Na závěr specifikovat aplikační přínos navrženého řešení.

Práce byla rozdělena do několika základních kapitol, kap. 3. byla zaměřena na klasifikaci aditivních technologií, kap. 4. na klasifikaci laserových technologií, kap. 5.-7. na konstrukci a výpočty manipulačního zařízení, kap. 8. na vytvoření celkové konstrukce 3D tiskárny, kap. 9. na proces montáže a oživování a kap. 10. na závěrečné zhodnocení.

3. Klasifikace aditivních technologií

Aditivní neboli 3D tiskové technologie jako takové jsou známy již od konce 80. let 20. století a od té doby se výrazně rozšiřovaly a zlepšovaly. Základem aditivních technologií je 3D model, který je programem rozdělen na několik vrstev, které jsou následně tisknuty pomocí 3D tiskárny jedna na druhou, dokud nevytvoří finální objekt. Tyto technologie se vyznačují vysokou mírou flexibility jak z hlediska designu, kdy lze vytvářet tvarově složité díly, tak z hlediska použití různých materiálů, kdy lze tisknout z plastových, kovových, keramických, ale i netradičně z potravin (čokoláda), biologických materiálů nebo se tisknou celé domy, další poznávací znamení je minimální materiálový odpad [2, 3, 4].

U 3D tisku skla se výzkum a detailnější studium problematiky provádí až v posledním desetiletí navzdory potenciálu, jaký by mohl přinést v různých aplikacích jako je například biomedicína, optika, bižuterie nebo umění [4].

Aditivní technologie lze rozdělit podle různých hledisek. Podle normy ISO/ASTM 52900:2015(en) lze tyto technologie rozdělit podle principu výroby (jednotlivé principy jsou volně přeloženy) [5]:

- Tryskání pojiva – proces, kdy se tekuté pojivo selektivně nanáší na práškový materiál pro spojení.
- Přímé energetické nanášení (natavování) – proces, kdy se natavuje materiál pomocí soustředěné tepelné energie (např. laser, elektronový paprsek atd.) a následně je nanášen na podložku.
- Vytlačování materiálu – proces, kdy je materiál selektivně vytlačován a nanášen na podložku skrze trysku nebo otvor.
- Tryskání materiálu – proces, kdy jsou na podložku selektivně nanášeny kapénky stavebního materiálu, kde příklad materiálu obsahuje fotopolymer a vosk.

- Spékání práškového materiálu – proces, kdy tepelná energie selektivně natavuje oblasti práškového materiálu.
- Laminování desek – proces, kdy je součást tvořena spojováním (laminováním) a formováním desek na sebe.
- Fotopolymerizace – proces, kdy kapalný fotopolymer v kádi je polymerizován, což znamená selektivně vytvrzován pomocí světla (např. laseru).

Další možné rozdělení aditivních technologií je podle vzniku finálního objektu [3, 4]:

- Nepřímé (indirect)
- Přímé (direct)

Ve spojení s 3D tiskem skla mají oba způsoby své výhody a nevýhody. U nepřímé metody je 3D tiskem vytvořen polotovar nejčastěji z rozptýlených částic a polymeru, čímž je vytvořené tzv. "green body", které se musí následně tepelně zpracovat, aby bylo možné dostat finální objekt ze skla. Hlavní výhodou této metody je, že většinou tisknutí probíhá za normální teploty a využívá již existující technologie 3D tisku a z toho plynoucí obecně levnější řešení. Hlavní nevýhodou je naopak vysoká míra smrštění a zaoblení, což vede hlavně ke studiu a optimalizaci směsi, která se tiskne a následného tepelného zpracování pro získání ideálního finálního objektu.

U přímé metody se většinou tiskne přímo finální výrobek z roztaveného skla, což redukuje následné smrštění. Dalšími výhodami jsou kratší čas pro přípravu produktu a u většiny případů levnější tisknutý materiál, ale hlavní nevýhodou je tisk za zvýšených teplot (okolo 1500 °C) a s tím spojená vysoká cena zařízení, která je spojena s těmito teplotami (např. laser) [4].

3.1. Vytlačování materiálu (material extrusion)

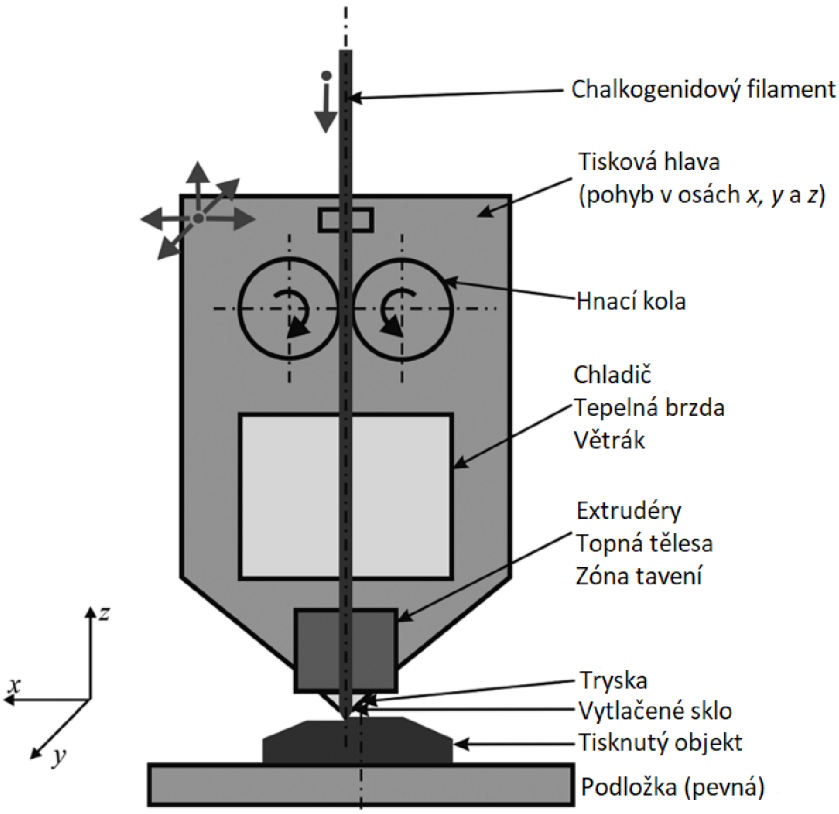
Metoda vytlačování materiálu uplatňuje princip, kdy je tisknutý materiál aplikován na tiskovou podložku ve vrstvách, kde se vrstva musí vytisknout celá a poté se buď tisková hlava, nebo podložka posune o výšku vrstvy, aby mohl začít tisk další vrstvy. Hlavními výhodami této technologie je pořizovací cena 3D tiskárny, relativně nízká cena tisknutého materiálu a široká škála použitelných materiálů, které se nadále rozrůstají. Mezi nevýhody patří dlouhý čas tisku, značný rozptyl přesnosti a nutnost volby orientace modelu pro tisk, kde u složitějších výrobků je nutnost podpor, které se po tisku musí odstranit [3, 4, 6]. Mezi technologie metody vytlačování materiálu patří FDM (Fused Deposition Modeling), G3DP (Glass 3D Printing) a DIW (Direct Ink Writing).

3.1.1. FDM (Fused Deposition Modeling)

Mezi obecně nejznámější metody 3D tiskové technologie patří FDM hlavně v oblasti osobního a hobby užití v domácnostech a to především u plastových výrobků. Jedná se o přímou metodu, která využívá struny materiálu tzv. filamentu, který je vtlačován do vyhřívané

hlavy, kde je natavován a následně vytlačen na tiskovou podložku. Výtisk je zhotoven vrstvu po vrstvě a obvykle vykonává posuvy ve všech osách (x, y, z) hlava. Mezi výhody patří nižší cena jak v ohledu tiskárny, tak u materiálů, dále také není nutný dodatečné zpracování po tisku. Nevýhodou jsou dlouhé časy tisku a pokud by byl vyžadován hladký povrch, který kvůli nízkému rozlišení v ose *z* nelze přímo dosáhnout, tak je nutné provést dodatečnou úpravu povrchu [1, 3, 7].

Ve spojení se sklem je tato metoda založena na vytlačování chalkogenidového skla ($As_{40}S_{60}$) jako filamentu, který je význačný svou nízkou teplotou skelného přechodu (T_g = 188 °C). Filament je vtahován do tiskové hlavy pomocí hnacích kol a skrz chladič následně do extrudérů, které obsahují topné prvky, zakončenými vytlačovací tryskou *Obr. 2*. Zvýšením teploty se sníží viskozita skla a skrz trysku je sklo vytlačováno na vyhřívanou podložku, kde je výtisk tvořen vrstvu po vrstvě. Posuvné pohyby *x, y, z* v tomto případě vykonává tisková hlava [4, 8].



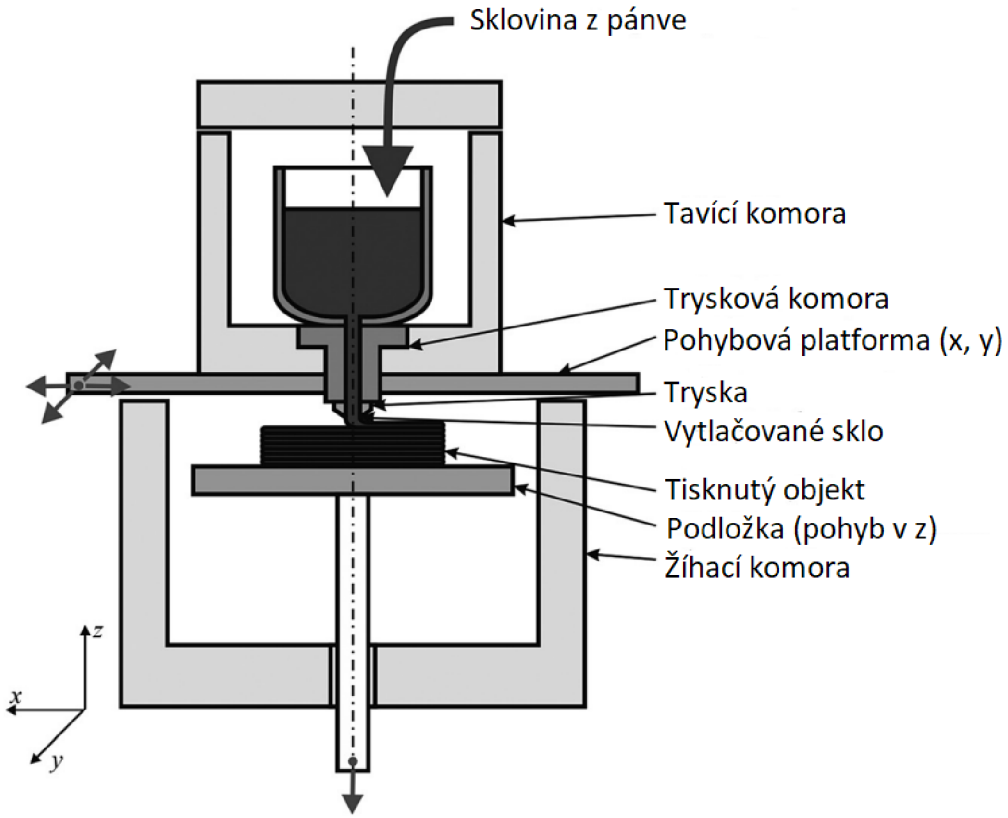
Obr. 2 Metoda FDM pro chalkogenidové sklo [4].

3.1.2. G3DP (Glass 3D Printing)

G3DP patří mezi nejznámější přímou technologii, která byla představena v roce 2015 v Technologickém institutu v Massachusetts. Technologie využívá křemičitého skla, které je taveno mimo zařízení tiskárny v pánvových pecích, kde musí být dosaženo homogenní teploty v celém objemu skloviny, což vyžaduje určitý čas. Samotná konstrukce sestává ze tří elektricky

vytápěných komor, kde první tzv. tavící komora obsahuje sklovinu dopravenou z pánvové pece a udržuje její teplotu tak, aby byla viskozita ideální pro tisk (okolo 1100 °C je $\nu = 10^2$-10^3 Pa·s). Tato komora musí být tak velká, aby mohla vytvořit z obsahu skloviny v ní produkt. Druhá komora je tzv. trysková a zajišťuje průchod skrz vlastní tíhou skloviny. Na konci této komory se nachází tryska, která je vyhřívána na teplotu okolo 1000 °C a je vyrobena z hliníku, zirkonia a křemíku. Sklovina je takto vytlačována do třetí tzv. žíhací komory, která je temperována na teplotu okolo 480 °C a uvnitř ní je podložka pro tisk *Obr. 3* [4, 9].

Pohyby v jednotlivých osách *x*, *y*, *z* jsou realizovány prostřednictvím lineárních jednotek, které jsou řízeny počítačem, kde pohyb v ose z (nahoru-dolů) je pohyb tiskové podložky a pohyby v osách x a y zajišťují pohyb první komory, která obsahuje zásobu skloviny. Sklovina při tisku a tvorbě vrstvy musí mít takovou viskozitu, aby nedocházelo ke zhroucení výtisku. Nejdůležitější u této metody je správné nastavení a stabilizování teplot v jednotlivých komorách, aby byla dosažena vhodná viskozita pro tisk. Z důvodu výtoku skloviny vlastní tíhou je tento proces časově náročný [4, 9, 10].



Obr. 3 Metoda G3DP [4]

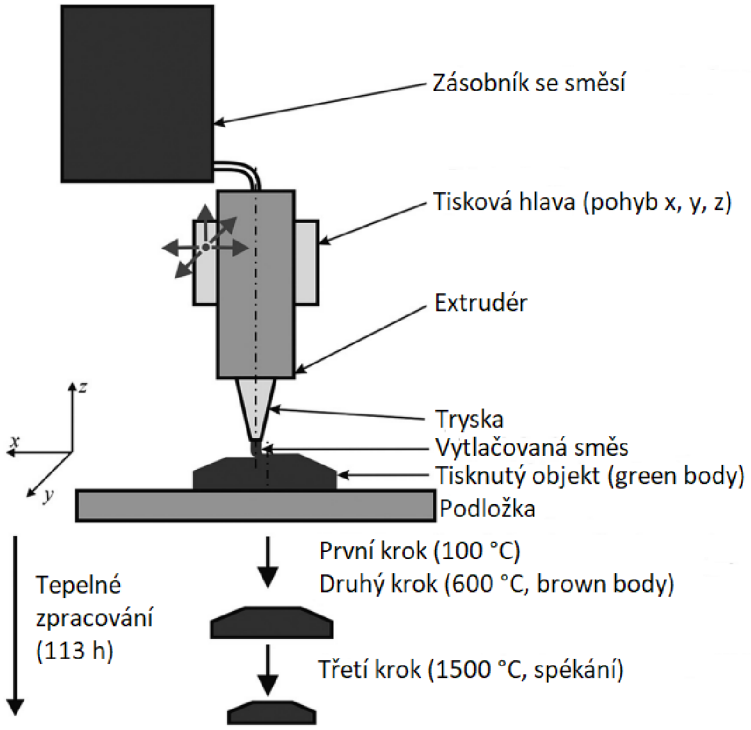
V roce 2017 bylo představeno vylepšené zařízení G3DP2, které bylo zaměřeno na větší architektonické objekty. Hlavní změna nastala v konstrukci, kde již pohyby v osách *x, y, z* byly realizovány pouze podložkou, na kterou se nanášela sklovina z trysky, což je mnohem

výhodnější k použití v průmyslové výrobě z důvodu možnosti připojení trysky ke kontinuální tavící jednotce [11].

3.1.3. DIW (Direct Ink Writing)

Vedle technologií přímých u vytlačování materiálu existují v tomto odvětví také technologie nepřímé, kde se vytlačuje materiál, který je složený ze skelného prášku jako plniva a pojiva, kterým nejčastěji bývá vytvrditelný polymer (např. UV zářením) nebo látky, které schnou na vzduchu. Techniky, které spadají do této oblasti, jsou vytlačovací tisk, robocasting (robot nanášející vysoce viskózní pastu), kapalné nanášení a metoda DIW. Tento princip je využíván především u 3D tisku keramiky [4, 6].

Princip metody DIW je vytlačení směsi na bázi křemičitého skla (tzv. inkoustu), která je uložena v zásobníku, skrz extrudér, který je uchycen v tiskové hlavě, kde na konci extrudéru je tryska. Pohyby v osách *x, y, z* jsou prováděny tiskovou hlavou a objekt se tiskne na nepohyblivou podložku. Výsledný objekt, který je takto vytištěn se nazývá tzv. green body. Následuje tepelné zpracování ve třech krocích, kde první krok dlouhé sušení při nízké teplotě 100 °C, při kterém se ze směsi odstraňuje rozpouštědlo, protože bez tohoto kroku by následně mohli vzniknout ve výsledném objektu trhliny. Poté následuje krátký krok o střední teplotě 600 °C, který odstraňuje zbytky organických látek a vytváří se tím tzv. brown body. Kdyby nedošlo k tomuto kroku a neodstranily se organické látky, mohlo by dojít ke změně barvy a vzniku trhlin při spékání. Nakonec je využit rychlý krok o vysokých teplotách spékání 1500 °C pro dosažení transparentnosti objektu *Obr. 4*.



Obr. 4 Metoda DIW [4]

Hlavními znaky této technologie je vysoká míra smrštění (až o 47 %), která je typická pro nepřímé metody a také dlouhý čas přípravy (přes 100 h). Další znaky hlavně pro skla na bázi SiO_2 je vysoká teplota přípravy produktu (1500 °C) a krátká doba zahřívání a ochlazování, aby nedošlo k přechodu amorfní struktury do krystalické fáze, což vyžaduje vysokou míru optimalizace, která je nutná pro tuto metodu [4, 6, 12-16].

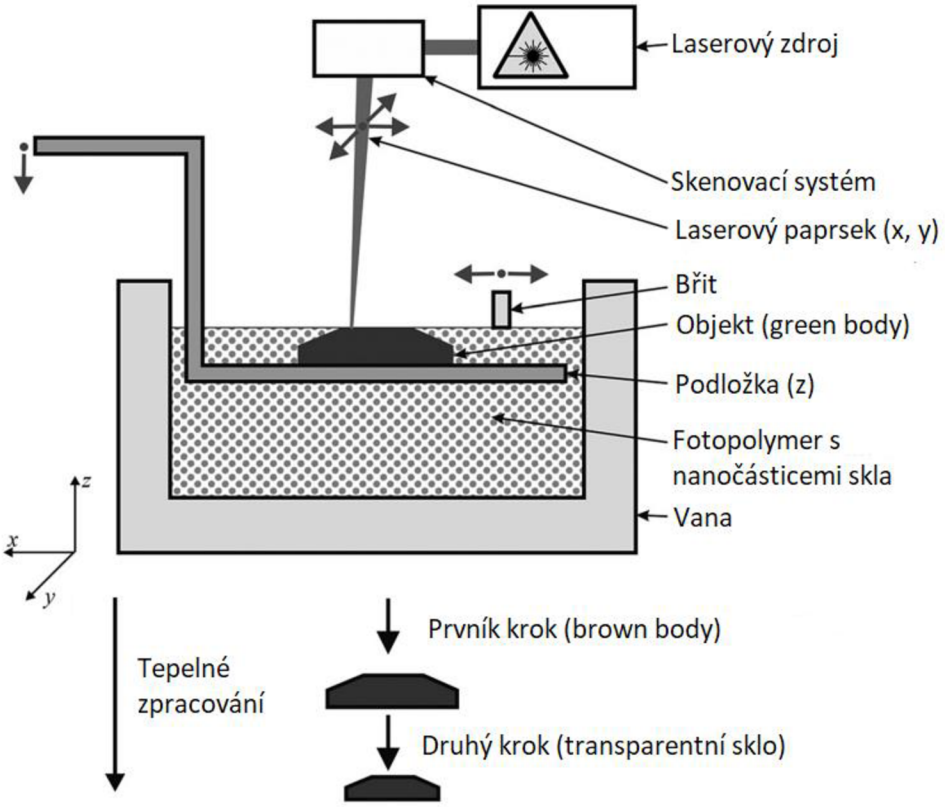
3.2. Fotopolymerizace (Photopolymerization)

Je to nepřímý princip technologie, kde je jako základní materiál používána směs, která obsahuje malé částice skelného prášku v řádech mikrometrů nebo nanometrů rozptýlených ve fotopolymeru a při tisku se vytvrzuje (např. UV světlem nebo laserem). Jako příklady technologií tohoto principu jsou SLA (Stereolitografie) nebo DLP (Digital Light Processing) [3, 4, 6].

Pro případ SLA se využívají speciální vytvrditelné křemičité pasty, které se podle Kotz a spol. [17-20] nazývají "Glassomer". Při samotném tisku, kdy se vytváří tzv. green body, nejsou vyžadovány vysoké teploty, jelikož nanočástice skla nebo SiO_2 od 40 do 100 nm jsou rozptýleny jako suspenze ve speciálním fotopolymeru. Polymerní část je při tisku vytvrzována pomocí tepla nebo světla. Po vytvrzení musí následovat tepelné zpracování ve dvou krocích. První krok, díky kterému je z objektu odstraněna polymerní část, o teplotách v intervalu 500 až 600 °C se získá tzv. brown body, po kterém následuje druhý krok spékání o teplotě 1300 °C pro získání transparentnosti. Při těchto tepelných procesech dochází ke smrštění, které je izotropní a může být spočítáno. Záleží u něj na poměru mezi nanočásticemi a polymerní částí, kde u poměru 40:60 je smrštění 26,3 % a u poměru 60:40 je smrštění 15,6 % (*Obr. 5*) [17-20].

Jako výhoda je uváděna možnost zpracování vytisknutého Glassomeru na výrobních strojích "jako běžný polymer", což znamená, že může být např. zpracováván a obráběn na CNC strojích. Takto je umožněno vytvářet menší, složitější a detailnější výrobky, které se mohou aplikovat v optice, biotechnologiích, mikroelektronice a lékařském průmyslu [17-20].

Technologie SLA a DLP jsou díky svému potenciálu dále často studovány hlavně ve směru modifikací a vzniku nových křemičitých past. Například Liu a spol. navrhli rozšiřující techniku, která dopuje do předem spékaných částí křemenného skla ionty Eu^{3+}, Tb^{3+} a Ce^{3+}, které po dalším tepelném zpracování vykazují luminiscenci [21]. Arita a spol. studovali použití nanočástic SiO_2 modifikovaných polyethyleniminem dále složený s kyselinou olejovou, kde společně s fotoiniciátorem a multifunkčními akryláty vytváří novou suspenzi pro rychlý 3D tisk s rychlým prvním i druhým krokem tepelného zpracování [22]. Moore a spol. navrhli výrobu vícesložkového 3D tisku (SiO_2-B_2O_3-P_2O_5) využívající fázově oddělené pryskyřice (resiny). Tato metoda je užitečná pro různé technologie, vědu a umění vzhledem k tomu, že většina vlastností skla vychází z jeho průhlednosti a vícesložkové podstaty [23].



Obr. 5 Metoda SLA [4]

3.3. Spékání práškového materiálu (Powder bed fusion)

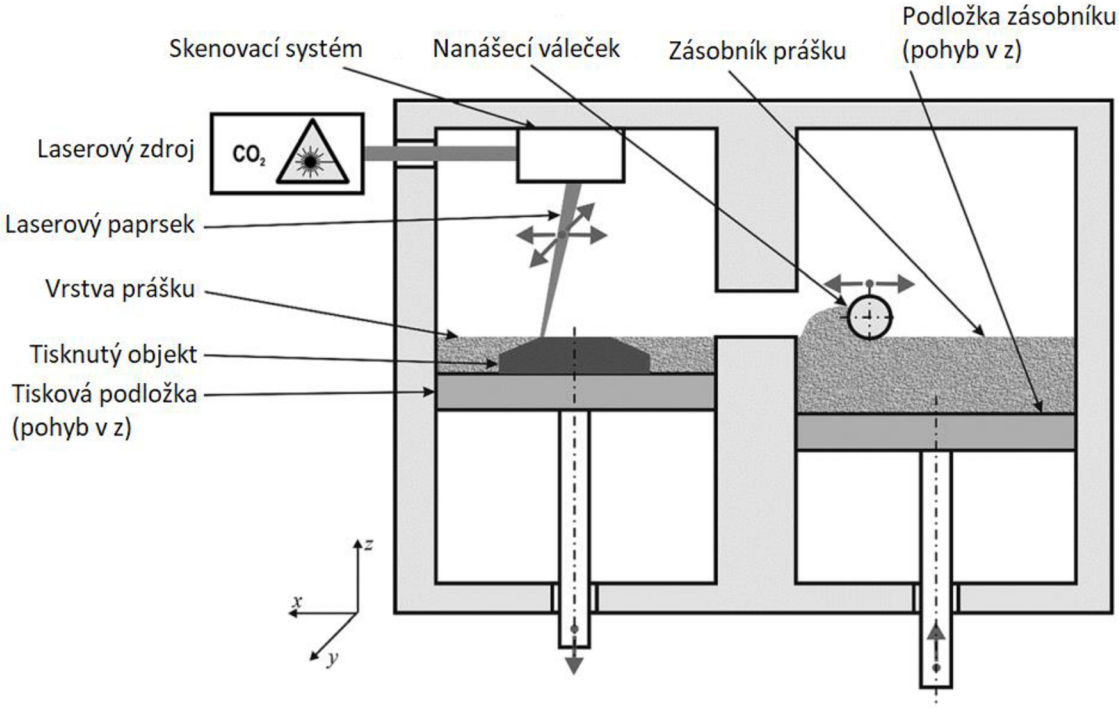
U technologie spékání je využíváno prášku, který je rovnoměrně rozprostřen v tenké vrstvě po podložce a následně natavován (spékán) laserem v programem daných místech pro vytvoření vrstvy objektu. Následuje posunutí podložky s budoucím objektem o výšku vrstvy a nanesení další vrstvy práškového materiálu ze zásobníku, která je následně opět spékána. Jako příklady technologií této metody mohou být SLS (Selective Laser Sintering) a SLM (Selective Laser Melting) [3, 4, 6].

V případě skla se jedná o tzv. HT-SLS (High-Temperature SLS), kde se využívá SiO_2 prášku, který je nanášen ve vrstvách pomocí válečku na tiskovou podložku, která se pohybuje směrem dolů při každé vrstvě a spékán pomocí CO_2 laseru (*Obr. 6*). Tento laser má hlavní výhodu vlnovou délku, která je okolo 10 µm, kde se SiO_2 chová jako netransparentní materiál (laser s touto vlnovou délkou neprochází materiálem).

V porovnání s keramikou a kovovými materiály je sklo v případě této technologie složitější zpracovávat pro jeho vysokou teplotu skelného přechodu (T_g) a nízký koeficient tepelné roztažnosti, což vede ke vzniku trhlin a póru (bublin) v průběhu tisku. To vede k častému studiu hlavně v oblasti procesu tisku, kde se studují vlivy výkonu laseru, tloušťky vrstvy, rychlosti tisku atd. na výsledný objekt, jeho hustotu a drsnost. Bylo dokázáno, že při příliš vysokém výkonu

laseru se ve vzorcích objevují trhliny, při větší tloušťce vrstvy byla vyšší následně i drsnost vzorku a při vyšší rychlosti tisku se snižovala hustota vzorku.

Parametry laseru, tepelné a procesní parametry byly optimalizovány a tato technologie může v budoucnu představovat novou metodu, díky které byly získány nové skleněné struktury pro širokou škálu aplikací [4, 6, 24-26].



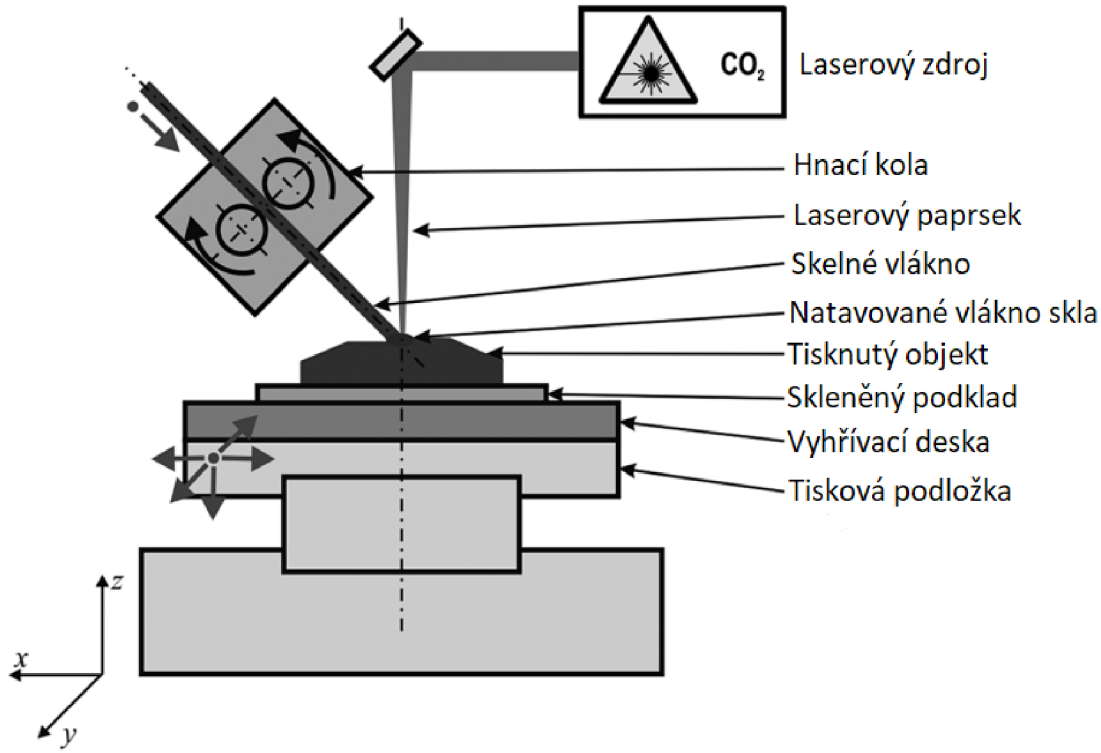
Obr. 6 Metoda SLS [4]

3.4. Přímé energetické nanášení (Direct energy deposition)

Z názvu je patrné, že se jedná o přímou metodu 3D technologie, která využívá natavování vlákna nanášeného ve vrstvách na tiskovou podložku. Tiskárna obvykle disponuje tryskou, skrz kterou je podáván tisknutý materiál do místa tisku a vysoce výkonného zdroje tepelné energie, který natavuje tisknutý materiál. Tato technologie se odlišuje od vytlačování materiálu pohyblivostí trysky, která v případě DED (Direct Energy Deposition) může být až v pěti různých osách, kdežto u vytlačování materiálu jsou pouze tři pohyby v osách. Dále se odlišuje tím, že natavování probíhá přímo na tištěném objektu. Tyto 3D tiskárny většinou mají velmi velký půdorys, které vyžaduje uzavřené a kontrolované prostředí pro bezpečný provoz [3, 4].

Pro příklad využití skla u této technologie je vlákno ze sodnovápenatého skla o průměru 1 mm a tavených křemenných tyčinek o jmenovitém průměru 0,5 mm, které jsou natavovány CO_2 laserem. Tato technologie je též známa jako tzv. wire-fed aditivní technologie *Obr. 7*. Studium u této technologie je prováděno ve výkonu laseru, rychlosti posuvu vláken a následně ve výsledných tvarech nanesených vrstev a jejich optických vlastnostech. Důležitou součástí

jsou také numerické simulace těchto procesů. U expozice laserem je také důležité studovat chemické složení a uspořádání strukturních prvků ve výsledném produktu, kde různé výkony laserového paprsku vedou k různým stavům v exponovaných vrstvách [4, 27, 28].



Obr. 7 Metoda DED [4]

3.5. Shrnutí aditivních technologií

V předchozích částech kap. 3. byly představeny jednotlivé aditivní technologie, jejich základní principy a příklady využití ve výrobě skleněných výrobků. Byly popsány jejich výhody a úskalí, které se studují v souvislosti s využitím 3D tisku skla a v návaznosti vybrána technologie DED (Direct Energy Deposition) pro diplomovou práci z důvodů vysoké pohyblivosti tiskového stolku a univerzálnosti s tím spojenou. Z patentového průzkumu [29] bylo zjištěno, že výzkum v technologii DED probíhá v rámci celého systému (např. patent EP4076805), v rámci podávacího ústrojí (např. patent EP3330007) nebo v tisku speciálních materiálů (např. patent US20220250159).

4. Laserové technologie

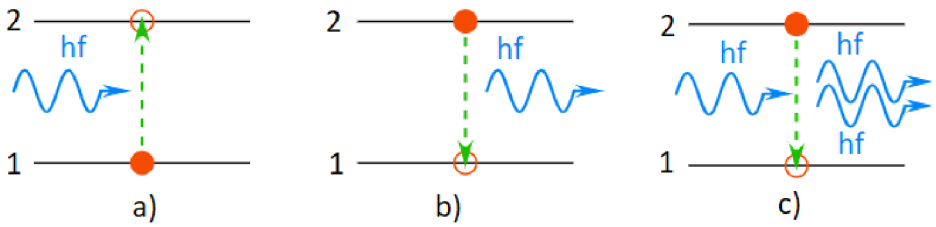
Slovo laser vychází ze zkratky anglického popisu principu (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), což v překladu znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření. Z toho lze odvodit, že se jedná o elektromagnetické záření s určitou vlnovou délkou. Albert Einstein v roce 1917 jako první zmínil možnost stimulované emise záření, ale první laser byl vytvořen až v roce 1960 americkým fyzikem T. H. Maimanem [30, 31].

4.1. Laserové světlo

Běžně světlo vzniká pomocí spontánní emise záření, které vyzařují atomy. Laserové světlo vzniká zesílením světla pomocí stimulované emise záření, což je i základ přeloženého názvu.

Spontánní emise vzniká v případě, kdy je dodáno atomu dostatečné množství energie (absorpce), aby se elektron dostal do excitovaného stavu (na vyšší energetickou hladinu). Tento stav je pro atom energeticky nevýhodný, proto vyzáří (emituje) energii zpět do okolí, kdy se elektron vrátí na původní hladinu.

Stimulovaná emise je obdobná emisi spontánní, ale je požadována výdrž v excitovaném stavu po delší dobu a zajištění, aby bylo více elektronů v excitovaném stavu než v základním stavu tzv. inverzní populace. Pokud se tyto podmínky zajistí, tak dojde ke skládání energií a následnému zesílení záření, které je monochromatické, koherentní a může mít velkou intenzitu. Grafické porovnání obou emisí záření je zobrazeno v *Obr. 8* [30-34].



Obr. 8 Emise záření a) absorpce záření, b) spontánní emise záření, c) stimulovaná emise záření [29]

4.2. Základní konstrukce laseru

Laser v základním uspořádání obsahuje řadu částí, kde každá část má svůj účel. Mezi tyto části patří již zmíněné aktivní prostředí, čerpací (budící) zařízení a optický rezonátor.

Aktivní prostředí je část, ve které dochází ke stimulované emisi záření o určité vlnové délce, která je dána materiálem aktivního prostředí. Materiály mohou být různého typu od pevných, kapalných, plynných materiálů až po polovodiče.

Čerpací nebo budící zařízení je část, která dodává potřebnou energii do aktivního prostředí, což zajišťuje tzv. “inverzní populaci“ neboli přebytek částic v excitovaném stavu nutných pro stimulovanou emisi záření.

Aby se dosáhlo dostatečného zesílení stimulovaného záření, tak se aktivní prostředí umisťuje do optického rezonátoru, což jsou dvě zrcadla, mezi kterými je aktivní prostředí umístěno. Jedno ze zrcadel je úplně odrazivé a druhé polopropustné. Záření se odráží od zrcadel zpátky do aktivního prostředí, kde dochází k další stimulované emisi a tím se toto záření zesiluje, dokud nedosáhne požadované intenzity, kde následný paprsek je přes polopropustné zrcadlo propuštěn. Tento princip je graficky zobrazen na *Obr. 9* [30, 32, 34].

Obr. 9 Základní konstrukce laseru [30]

4.3. Rozdělení laserů

Lasery se dají rozdělit z mnoha různých hledisek, základní rozdělení je uvedeno níže a detaily jsou uvedeny např. v [30, 31, 33-35].

Podle typu aktivního prostředí:

- Pevnolátkové
- Kapalinové
- Plynové

Podle vlnové délky:

- Infračervené (780 nm - 1 mm)
- Ve viditelném spektru (380 nm - 780 nm)
- Ultrafialové (10 nm - 380 nm)
- Rentgenové (< 10 nm)

Podle režimu práce:

- Kontinuální (proces je nepřetržitý)
- Pulsní (pulsy s vysokou frekvencí opakování)
- Impulsní (pulsy s nízkou frekvencí opakování a vysokou energií)

4.3.1. Rozdělení podle typu aktivního prostředí

Pevnolátkové lasery

Tyto lasery využívají aktivní prostředí, které se sestává z opticky propustné látky (matrice-sklo, krystaly atd.), která může mít krystalickou nebo amorfní strukturu a musí obsahovat aktivátory v podobě iontů (atomy Nd, Fe, Cr atd.) [31-34].

Kapalinové lasery

U těchto laserů se jako aktivní prostředí využívají různé roztoky organických barviv nebo speciální kapaliny, které jsou dopovány ionty vzácných zemin. Tyto lasery jsou schopny

pracovat jak v pulsním, tak kontinuálním režimu a jejich hlavní výhodou je laditelnost vlnové délky a homogenní aktivní prostředí. Nevýhodou je krátká životnost aktivního prostředí z důvodu rozkládání působením světla a tepla. Mezi základní organická barviva patří rhodamin, fluorescin atd. [31-33].

Plynové lasery

U těchto laserů se jako aktivní prostředí využívají atomy (He-Ne – helium-neonový laser), ionty (Ar – argonový laser), molekuly (CO_2 – laser s oxidem uhličitým) nebo směsi plynů. Buzení je zde prováděno pomocí elektrického výboje. Mezi hlavní výhody patří velký rozsah vlnových délek a poměrně vysoká účinnost. Používají se hlavně pro kontinuální režimy práce. Jejich nevýhoda je poměrně malý výkon, který je závislý na objemu plynného média, z toho důvodu jsou výkonné plynové lasery velmi rozměrné [31, 33, 34].

4.3.2. CO_2 laser

Lasery s oxidem uhličitým se označují jako jedny z nejvýkonnějších laserů, kde výkon může dosahovat i desítek kW. Jejich vlnová délka je 10 µm, z toho vyplývá, že CO_2 lasery emitují světlo v infračervené oblasti, které lidské oko již není schopno spatřit. Oproti ostatním laserům se také vyznačuje vyšší účinností generování laserového paprsku.

Díky těmto vlastnostem a možnosti generovat různé výkony podle velikosti aktivního prostředí a druhu budícího systému je možné tyto lasery využívat v různých aplikacích a odvětvích. V průmyslu se díky možnosti generování vysokého výkonu využívá pro svařování a dělení materiálu. Laser našel uplatnění i ve zdravotnictví, kde se využívá jako skalpel pro získání čistého řezu.

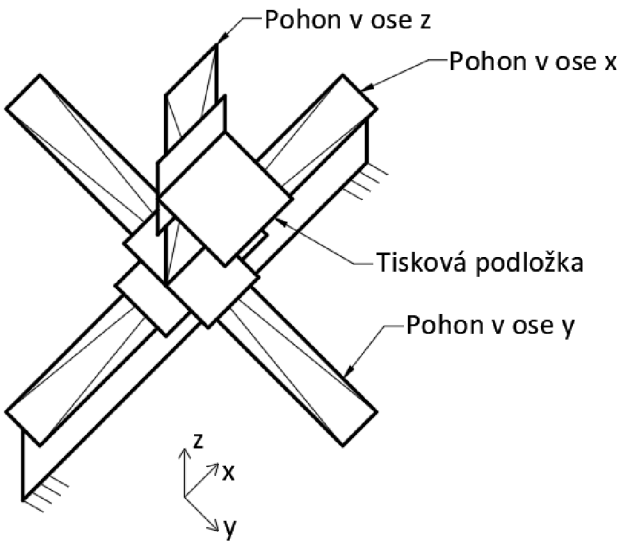
V souvislosti se sklem je hlavní výhoda vlnová délka, která není v oblasti blízkého infračerveného záření a sklo se stává netransparentní (záření o této vlnové délce neprochází), záření je pohlcováno. Díky této vlastnosti a vysoké energii je možné tavit sklo, z tohoto důvodu je vybrán tento typ laseru i pro předloženou diplomovou práci [30-32, 34, 35].

5. Rozbor vlastního řešení

Cílem práce je vytvořit konstrukci 3D tiskárny, která bude sloužit k manipulaci tiskové podložky, na kterou bude nanášen tiskový materiál pomocí technologie DED (Direct Energy Deposition). Samotný tisk bude prováděn natavováním skelného vlákna pomocí CO_2 laseru a následným nanesením na tiskovou podložku. Součástí práce bude konstrukce manipulačního zařízení, laserové technologie a rámové konstrukce tiskárny. Podávací zařízení a technologie laseru není součástí této práce.

Pohyby, které budou vykonávány pro vytvoření tvaru výsledného výtisku, budou prováděny tiskovou podložkou pomocí tří na sebe kolmých lineárních pohonů, které budou tvořit kartézský souřadný systém, ve kterém se budou pohybovat *Obr. 10*. Pohony *x* a *y* budou sloužit

k vytvoření tvaru jednotlivých vrstev a pohon *z* bude sloužit k mikro-polohování výšky jednotlivých vrstev.



Obr. 10 Kinematické schéma polohovacího periferie

6. Specifikace pohonů a jejich spojení

Pohon je důležitou součástí každého zařízení jako je manipulátor nebo právě 3D tiskárna. Musí být volen tak, aby parametrově vyhovoval dané aplikaci, kterou má následně zařízení vykonávat. Mezi tyto parametry patří rychlost, zrychlení, opakovatelná přesnost polohování a tuhost pohonu, kde tyto parametry souvisí s druhem motoru a celkovou konstrukcí částí pohonu, které zahrnují transformační blok, vedení atd.

Typy pohonů byly vybrány předběžně od firmy Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG [36], kde pohyb v prvních dvou osách (*x*, *y*) bude vykonáván pohonem typu L-812.091400 a pohyb ve třetí ose bude vykonáván pohonem typu L-406.40SD00. Následně byly tyto pohony kontrolovány.

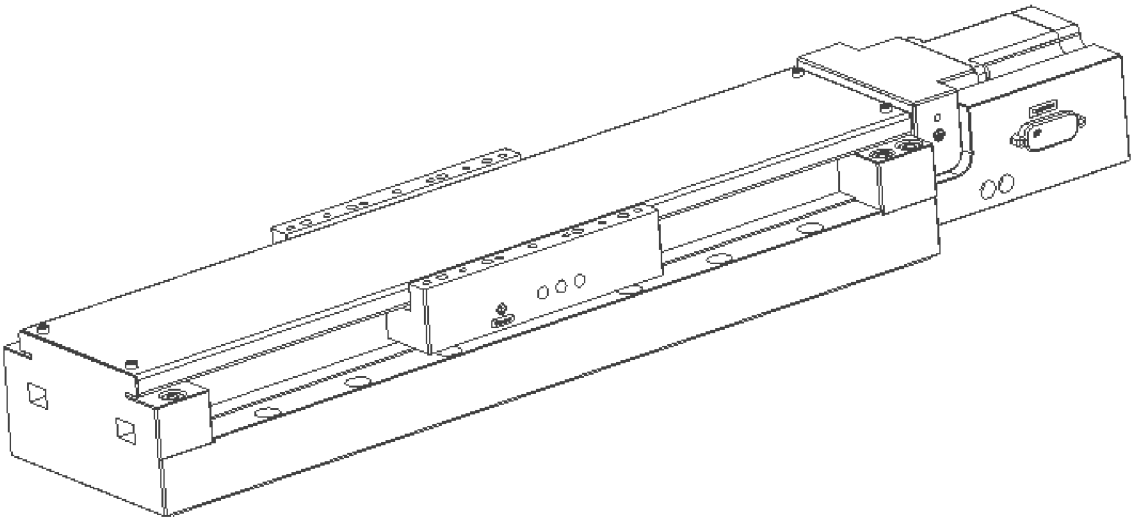
6.1. Pohon L-812.091400 (v osách x, y)

Jedná se o kompaktní pohon pro vysoká zatížení, který je poháněn 2-fázovým krokovým rotačním motorem, který nezpůsobuje vibrace a přesné polohování i bez řízení polohy. Pro neidentickou transformaci (přeměna rotačního na translační pohyb) obsahuje pohon kuličkový šroub, který je konstruován pro vysoká zatížení. Pohon obsahuje recirkulační valivé vedení ve dvou bočních lištách pro zvýšení únosnosti celého systému. Motor obsahuje konektor HD D-SUB 26 pro sériovou komunikaci a připojení řídícího kontroléru k pohonu. Pohon je využíván v produkci elektroniky, laserových technologiích atd. a je zobrazen na *Obr. 11* [36].

Důležité parametry tohoto pohonu, které budou následně využívány při výpočtech, jsou zapsány v *Tab. 1.*

Tab. 1 Parametry pohonu L-812.091400 [36]

L-812.091400			
Parametr	**Značka**	**Hodnota**	**Jednotka**
Zdvih	$i_x = i_y$	204	[mm]
Maximální zrychlení	$a_{maxx} = a_{maxy}$	10	[m/s^2]
Maximální rychlost	$v_{maxx} = v_{maxy}$	100	[mm/s]
Stoupání závitu šroubu	$p_x = p_y$	5	[mm]
Přesnost polohování	$\Delta x = \Delta y$	±5	[µm]
Maximální osové zatížení	$F_x = F_y$	377	[N]
Celková hmotnost	$m_{px} = m_{py}$	7800	[g]
Hmotnost pohyblivého vozíku	$m_{vx} = m_{vy}$	2800	[g]
Moment setrvačnosti rotoru	$J_{motx} = J_{moty}$	380	[g·cm^2]



Obr. 11 Pohon L812.091400 (osy x a y)

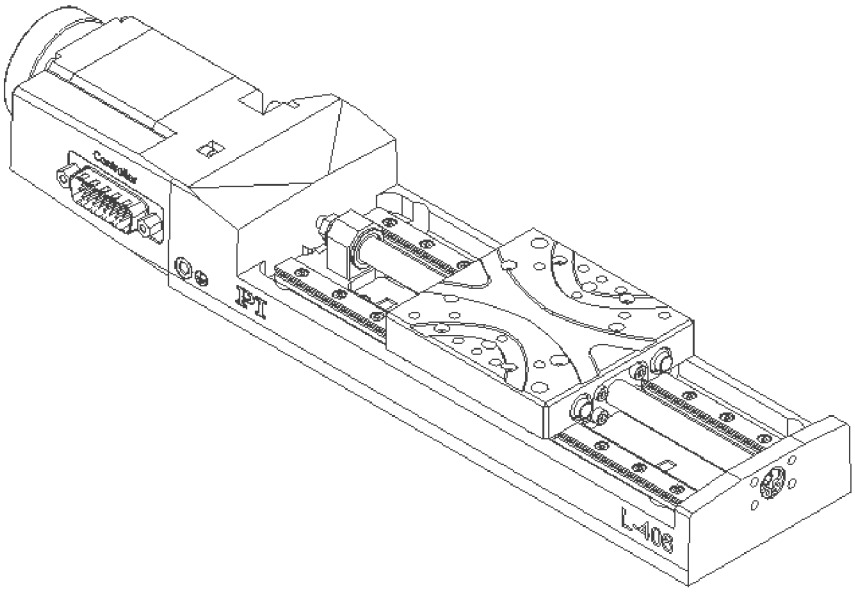
6.2. Pohon L-406.40SD00

Jedná se o kompaktní pohon, který je poháněn 2-fázovým krokovým rotačním elektromotorem uzpůsobeným pro mikro-polohování. Obsahuje vodící šroub, který zajišťuje neidentickou transformaci pohybu a spolu s recirkulačním valivým vedením ve dvou bočních lištách zajišťuje vysokou únosnost a životnost. Pohon je vybaven dvěma optickými snímači krajních poloh a jedním referenčním snímačem umístěným v polovině dráhy posuvu z důvodu bezpečnosti a nutnosti nalezení reference při zapnutí pohonu. Pro připojení pohonu k řídícímu kontroléru je motor vybaven konektorem HD D-SUB 26. Pohon je vhodný pro pohyb v ose *z*, protože umožňuje dostatečně malý posuv (minimum 0,2 µm), aby bylo možné nastavit výšku vrstvy při tisku, využívá se v mikromontáži, výzkumu a automatizaci a je zobrazen na *Obr. 12* [36].

Důležité parametry pohonu, které budou následně využívány při výpočtech, jsou zapsány v *Tab. 2.*

Tab. 2 Parametry pohonu L-406.40SD00 [36]

L-406.40SD00			
Parametr	**Značka**	**Hodnota**	**Jednotka**
Zdvih	i_z	102	[mm]
Maximální zrychlení	a_{maxz}	200	[mm/s^2]
Maximální rychlost	v_{maxz}	20	[mm/s]
Stoupání závitu šroubu	p_z	1	[mm]
Přesnost polohování	Δz	±5	[µm]
Maximální osové zatížení	F_z	50	[N]
Celková hmotnost	m_{pz}	1000	[g]
Hmotnost pohyblivého vozíku	m_{vz}	160	[g]
Povolené momentové zatížení	M_{kz}	7,5	[Nm]



Obr. 12 Pohon L-406.40SD00 (osa z)

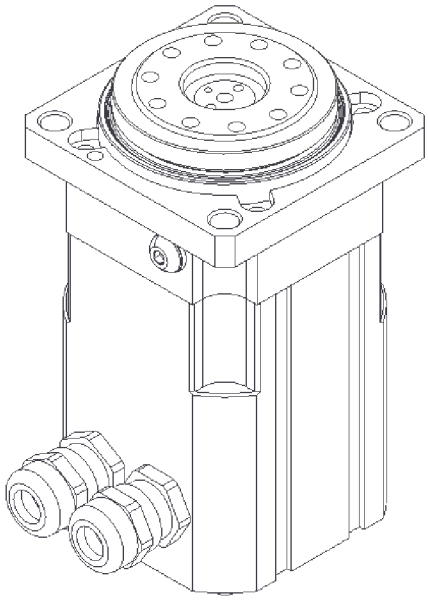
6.3. Pohon DS 50

Z důvodu vyšší pohyblivosti tiskového stolku byl přidán další pomocný pohon na konec kinematického řetězce, aby tiskový stolek mohl rotovat a tím se dali tisknout výrobky rotačního tvaru efektivnějším způsobem. Jedná se o kompaktní rotační aktuátor firmy TG drives [37], který obsahuje střídavý synchronní servomotor s cykloidní převodovkou a vyznačuje se nízkými vůlemi a hmotností a vysokou tuhostí a dynamikou. Pohon je využíván v oblastech robotiky, manipulátorů, CNC strojů atd. a je zobrazen na *Obr. 13*.

Důležité parametry pohonu, které budou následně využívány při výpočtech jsou, zapsány v *Tab. 3.*

Tab. 3 Parametry pohonu DS 50 [37]

DS 50			
Parametr	**Značka**	**Hodnota**	**Jednotka**
Převodový poměr	i_r	63	[-]
Jmenovité vstupní otáčky	n_r	2000	[min^{-1}]
Jmenovitý moment	M_r	18	[Nm]
Maximální klopný moment	M_{kr}	14	[Nm]
Celková hmotnost	m_r	950	[g]



Obr. 13 Pohon DS 50 (rotace stolku)

6.4. Konstrukce manipulátoru

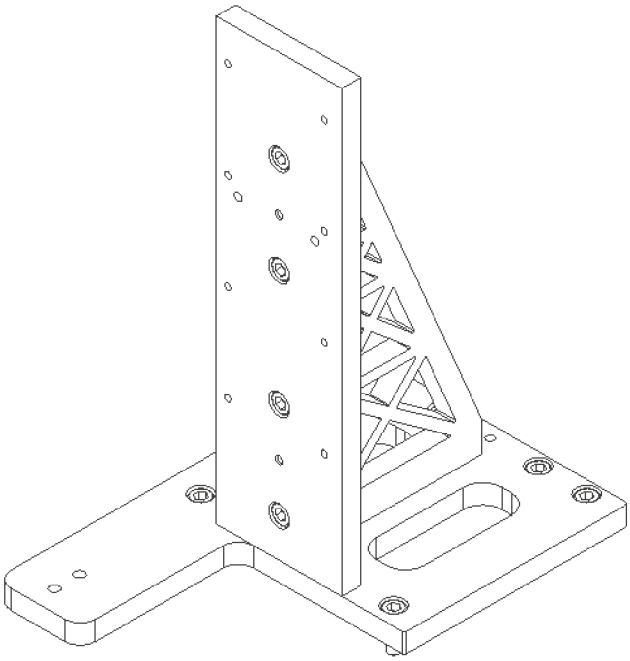
Aby bylo možné vytvořit manipulátor, který bude manipulovat s tiskovým stolem v kartézských souřadnicích s přidaným rotačním pohonem, bude nutné vytvořit konstrukční spojení jednotlivých pohonů tak, aby vyhovovala z hlediska přesnosti spojení, tuhosti a co možná nejnižší hmotnosti. Pro připojení k jednotlivým pohonům byly využity katalogové informace od výrobců [36, 37], kde byly podrobně zakresleny možnosti připojení na daný pohon. Pohony v osách *x* a *y* budou namontovány přímo na sebe bez příruby mezi nimi.

Spojení mezi osou *y* a osou *z* bude realizováno pomocí montovaného rámu (první příruby), který bude sestávat ze dvou na sebe kolmých desek a jednoho žebra (viz *Obr. 14.*). Všechny části byly zkonstruovány tak, aby byla možná přesná a tuhá montáž pohonů k sobě. Příruba bude mít povrchovou úpravu RAL 1018 (zinkově žlutá). Materiál všech částí příruby bude ocel 11 373.1, spojovací šrouby budou pevnostní třídy 8.8 a spojovací kolíky budou z nerezové oceli. Celková hmotnost příruby se spojujícími komponentami byla vypočítána pomocí

programu Autodesk Inventor Professional 2023, kde se zadaly příslušné materiály jednotlivým částem a software následně vypočítal hmotnost $\boldsymbol{m_{p1} = 2{,}934\ kg}$.

Detailní informace o stojanu lze nalézt ve výkresové dokumentaci:

- 3-DP S21000171-7-0 (sestavný výkres stojanu)
- 3-DP S21000171-7-1 (výrobní výkres desky k pohonu v ose *y*)
- 4-DP S21000171-7-2 výrobní výkres desky k pohonu v ose *z*)
- 3-DP S21000171-7-3 (výrobní výkres žebra)

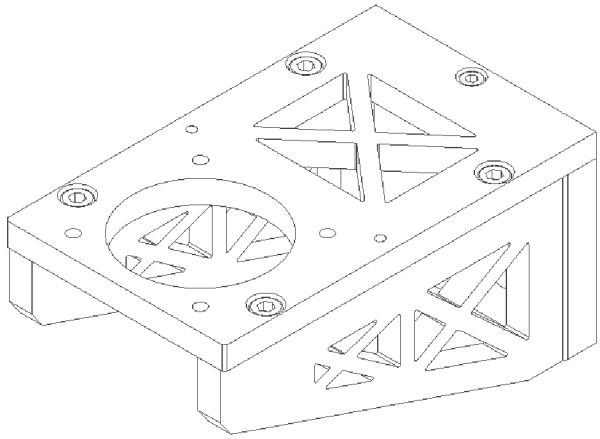


Obr. 14 Příruba mezi pohony y a z

Spojení mezi pohonem v ose *z* a rotačním aktuátorem bude realizováno pomocí druhé příruby, která bude ze dvou na sebe kolmých desek a dvou žeber (viz *Obr. 15*), tak aby byla montáž přesná a tuhá s přihlédnutím k co možná nejlehčí konstrukci. Materiál částí příruby bude slitina hliníku 6061 s povrchovou úpravou RAL 1018, spojovací šrouby budou pevnostní třídy 8.8 a spojovací kolíky z nerezové oceli. Celková hmotnost příruby byla vypočítána pomocí softwaru $\boldsymbol{m_{p2} = 0{,}454\ kg}$.

Detailní informace o podpěře lze nalézt ve výkresové dokumentaci:

- 3-DP S21000171-8-0 (sestavný výkres podpěry)
- 4-DP S21000171-8-1 (výrobní výkres desky k pohonu v ose *z*)
- 3-DP S21000171-8-2 (výrobní výkres žebra)
- 3-DP S21000171-8-3 (výrobní výkres desky k rotačnímu aktuátoru)

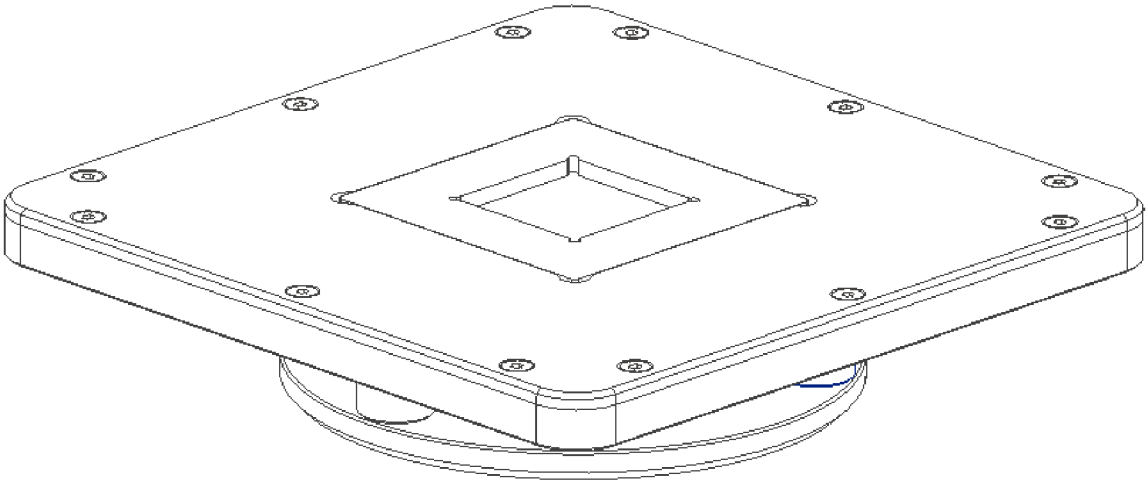


Obr. 15 Příruba mezi pohonem v ose z a rotačním aktuátorem

Jako další byl zkonstruován tiskový stolek, který bude připojen k rotačnímu aktuátoru, kde materiál bude slitina hliníku 6061, kromě spojovacích šroubů (pevnostní třída 8.8). Součásti stolku budou bez povrchové úpravy. Stolek bude mít dvě možnosti rámečku pro vložení sklíčka, na které se bude tisknout. Celková hmotnost stolku s větším rámečkem byla softwarem vypočítána na $\boldsymbol{m_{st} = 0{,}82\ kg}$ a jeho konstrukce je zobrazena na *Obr. 16*.

Detailní informace o tiskovém stolku lze nalézt ve výkresové dokumentaci:

- 3-DP S21000171-9-0 (sestavný výkres tiskového stolku)
- 4-DP S21000171-9-1 (výrobní výkres desky tiskového stolku)
- 4-DP S21000171-9-2 (výrobní výkres menšího ráměčku)
- 4-DP S21000171-9-3 (výrobní výkres válečku)
- 4-DP S21000171-9-4 (výrobní výkres příruby k rotačnímu aktuátoru)
- 4-DP S21000171-9-5 (výrobní výkres většího rámečku)
- 4-DP S21000171-9-6 (výrobní výkres redukce)

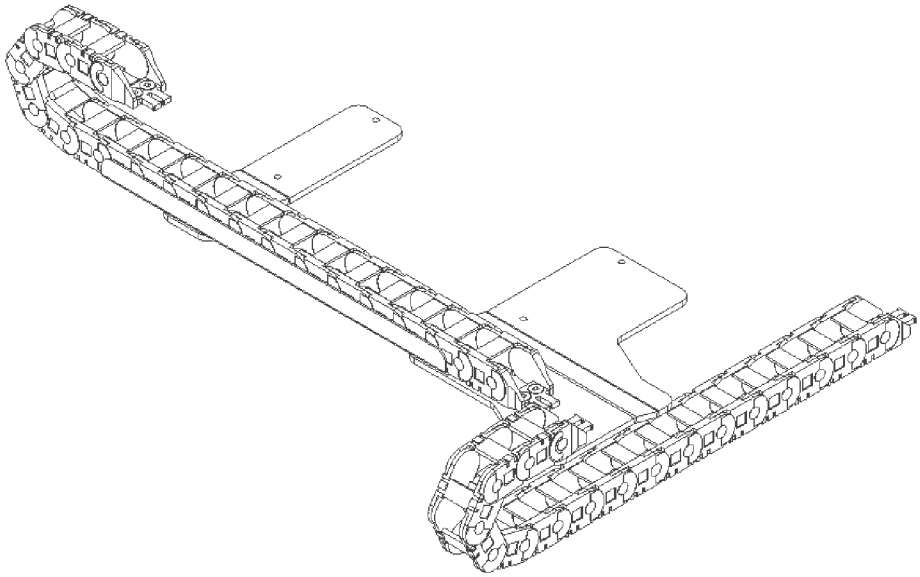


Obr. 16 Tiskový stolek

Aby bylo možné dovést kabely k jednotlivým pohonům, bylo nutné zkonstruovat žlaby, na které budou namontovány nebo připojeny energetické řetězy. Tyto plechy byly následně přišroubovány na pohon v ose *y* a spojeny k sobě. Materiál těchto plechů byl zvolen 11 343.1 a jsou připojeny spojovacími šrouby pevnostní třídy 8.8, kde celková hmotnost byla podle softwaru i jedním neseným energetickým řetězem $\boldsymbol{m_{en} = 1{,}853\ kg}$. Výsledné konstrukční řešení je zobrazeno na *Obr. 17*.

Detailní informace o žlabech s energetickými řetězci lze nalézt ve výkresové dokumentaci:

- 3-DP S21000171-10-0 (sestavný výkres plechů s energetickými řetězci)
- 3-DP S21000171-10-1 (výrobní výkres plechového žlabu)
- 3-DP S21000171-10-2 (výrobní výkres držáku pro energetické řetězce *y* a *z*)
- 4-DP S21000171-10-3 (výrobní výkres držáku pro energetický řetězec *z*)

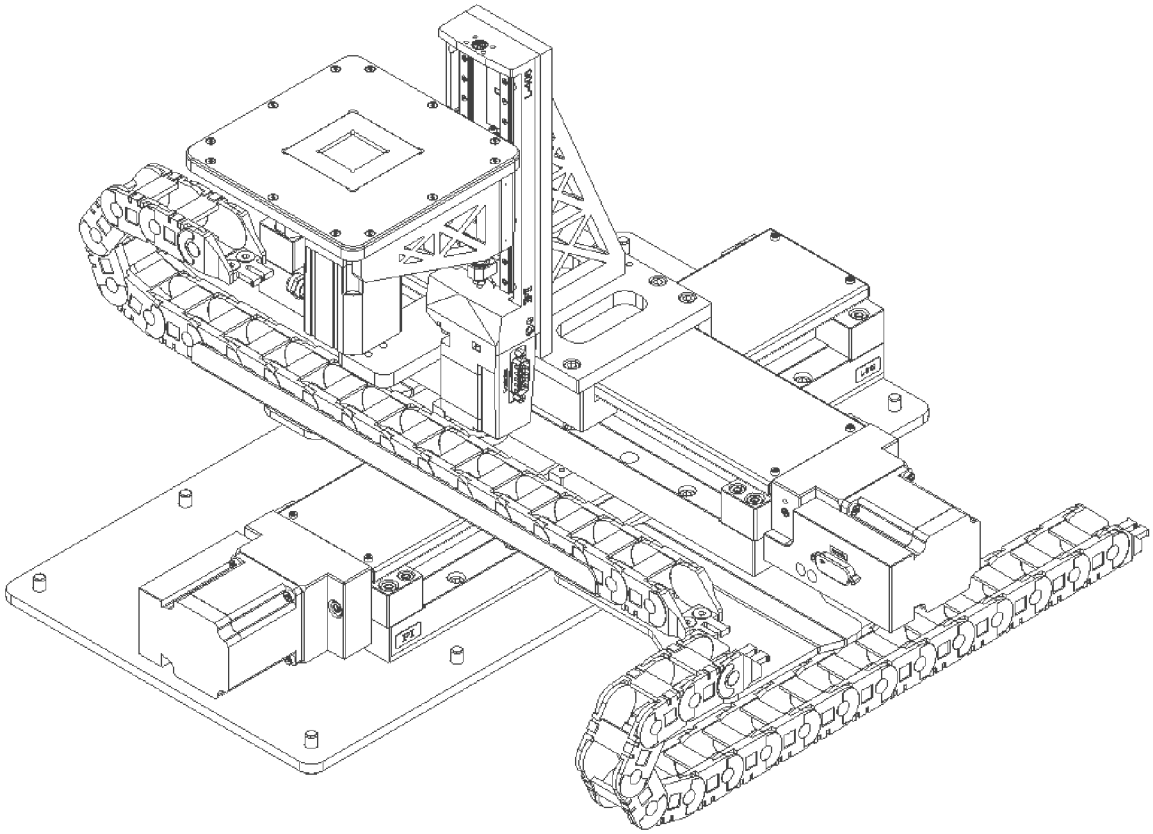


Obr. 17 Plechy s energetickými řetězy

Celková konstrukce manipulátoru, který je umístěn na základové desce je zobrazena se všemi komponentami na *Obr. 18*.

Detailní informace manipulátoru lze nalézt ve výkresové dokumentaci:

- 3-DP S21000171-4-0 (sestavný výkres manipulátoru)
- 3-DP S21000171-4-1 (výrobní výkres základové desky)
- 3-DP S21000171-7-0 (sestavný výkres stojanu)
- 3-DP S21000171-8-0 (sestavný výkres podpěry)
- 3-DP S21000171-9-0 (sestavný výkres tiskového stolku)
- 3-DP S21000171-10-0 (sestavný výkres plechů s energetickými řetězci)



Obr. 18 Konstrukce manipulátoru

7. Výpočtová část

Výpočtová část se bude zabývat v první části výpočtem opakovatelné přesnosti polohování systému, který se pohybuje v kartézských souřadnicích. Ve druhé části bude počítána únosnost systému, kde se bude specifikovat, jak velkou hmotu tisknutého skla budou jednotlivé pohony schopny unést. V poslední třetí části bude provedeno dimenzování motorů pohonů v jednotlivých osách *x, y* a *z*. Výpočtová část není prováděna v oblasti rotačního aktuátoru, jelikož jeho dynamické vlastnosti jsou vyšší a je zatížen pouze tiskovým stolkem, který se bude v rámci tisku pohybovat velmi pomalu.

7.1. Opakovatelná přesnost polohování

Každý pohon má určitou chybu polohování, která je klasifikována jako odchylka skutečné hodnoty od hodnoty požadované. Na chybu má vliv více faktorů jako je například tuhost, mechanická stavba systému, způsob řízení nebo v jakém uspořádání se daný kinematický řetězec nachází. Tyto chyby polohování jsou uvedeny v katalozích jednotlivých pohonů firmy Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG [36] a jsou vypsány v *Tab. 4*. Výpočty byly prováděny podle zdroje [38].

Chyba v jednotlivých osách je počítána přes totální diferenciál, který pro osu *x* vypadá takto:

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial q_1} \cdot \Delta q_1 + \frac{\partial x}{\partial q_2} \cdot \Delta q_2 + \frac{\partial x}{\partial q_3} \cdot \Delta q_3 \tag{1}$$

kde

$q_1 = x$, $\Delta q_1 = \Delta x$,

$q_2 = y$, $\Delta q_2 = \Delta y$,

$q_3 = z$, $\Delta q_3 = \Delta z$.

Pro osy *y* a *z* by vypadaly vzorce stejně a po dosazení vyšel výsledek nepřesnosti polohování v jednotlivých osách takto:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x \\ \Delta y &= \Delta y \\ \Delta z &= \Delta z \end{aligned} \tag{2}$$

Z výsledku vyplývá, že nepřesnost v jednotlivých osách způsobuje pouze pohon, který má posun ve směru dané osy.

Tab. 4 Polohové odchylky jednotlivých os

Polohové odchylky jednotlivých os			
Parametr	**Značka**	**Hodnota**	**Jednotka**
Přesnost polohování pohonu v ose x	Δx	5	[µm]
Přesnost polohování pohonu v ose y	Δy	5	[µm]
Přesnost polohování pohonu v ose z	Δz	5	[µm]

Celková chyba polohování se následně vypočítá geometrickým součtem chyb v jednotlivých směrech.

$$\Delta c_m = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} = \sqrt{5^2 + 5^2 + 5^2} = 8{,}66\ \mu\text{m} \tag{3}$$

Výsledná polohová odchylka je 8,66 µm.

7.2. Dynamická únosnost systému

Tento výpočet bude zaměřen na výpočet možné hmotnosti skla, kterou bude možné tisknout pro jednotlivé pohony v osách *x, y* a *z*. Pro výpočet budou potřeba hnací síly jednotlivých pohonů, jejich maximální zrychlení, hmotnosti jednotlivých pohonů, které jsou uvedeny v *Tab. 1-3* a hmotnosti jednotlivých konstrukčních částí manipulátoru. Výpočty byly prováděny podle zdroje [38].

Pro výpočet bude využívána Lagrangeova rovnice 2. druhu, která má tvar:

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \tag{4}$$

kde

L = Lagrangeův koeficient, q_i = obecná souřadnice, $\partial \dot{q}_i$= obecná rychlost,

Q_i= obecný silový účinek.

Pokud se za *L* dosadí rozdíl kinetické a potenciální energie ($W_k - W_p$), tak se rovnice (4) změní a bude mít takový tvar:

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} + \frac{\partial W_p}{\partial q_i} = Q_i \tag{5}$$

Tento vzorec se již dále dá využít pro výpočet únosnosti systému, kde v našem případě nebude neznámá dynamická síla nebo moment, ale hmotnost jakou může mít výrobek ze skla.

7.2.1. Zavedení hmotností

Z rovnice (5) vyplývá, že pro výpočet jsou nutné kinetická a potenciální energie systému, kde v obou těchto složkách vystupuje hmotnost. Tyto energie se následně derivují podle obecných souřadnic (v tomto případě *x, y* a *z*). Z toho důvodu je nutné rozdělit hmotnosti podle toho v jakých směrech se pohybují. Hmotnosti vystupující v systému manipulátoru a budou využívány ve výpočtech jsou uvedeny v *Tab. 5*.

Tab. 5 Hmotnosti jednotlivých částí systému manipulátoru

Hmotnosti jednotlivých částí systému manipulátoru			
Parametr	**Značka**	**Hodnota**	**Jednotka**
Hmotnost pohyblivého vozíku pohonu *x* a *y*	$m_x = m_y$	2800	[g]
Hmotnost pohonu *y*	m_{yc}	7800	[g]
Hmotnost pohonu *z*	m_{zc}	1000	[g]
Hmotnost pohyblivého vozíku pohonu *z*	m_z	160	[g]
Hmotnost rotačního aktuátoru	m_r	950	[g]
Hmotnost první příruby	m_{p1}	2934	[g]
Hmotnost druhé příruby	m_{p2}	454	[g]
Hmotnost tiskového stolku	m_{st}	820	[g]
Hmotnost držáků energetických řetězů	m_{en}	1853	[g]

Hmotnost m_1 bude zahrnovat hmotnosti, které se pohybují pouze v ose *x* (ve směru osy prvního pohonu). V tomto směru pohybu bude uvažována hmotnost pohyblivého vozíku prvního pohonu m_x, hmotnost druhého pohonu bez pohyblivého vozíku $m_{yc} - m_y$ a hmotnost držáků energetických řetězů m_{en}.

$$m_1 = m_x + m_{yc} - m_y + m_{en} = 2800 + 7800 - 2800 + 1853 = \\ = 9653\ g \tag{6}$$

Hmotnost m_2 bude obsahovat hmotnosti, které se pohybují jak v ose *x*, tak v ose *y*. V m_2 bude obsažena hmotnost pohyblivého vozíku druhého pohonu m_y, hmotnost první příruby spojující druhý pohon s třetím pohonem m_{p1} a hmotnost třetího pohonu bez pohyblivého vozíku $m_{zc} - m_z$.

$$m_2 = m_y + m_{p1} + m_{zc} - m_z = 2800 + 2934 + 1000 - 160 = \\ = 6574\ g \tag{7}$$

Hmotnost m_3 bude obsahovat hmotnosti, které se pohybují ve všech třech osách (*x, y* a *z*). Což je hmotnost pohyblivého vozíku třetího pohonu m_z, hmotnost druhé příruby mezi třetím pohonem a rotačním aktuátorem m_{p2}, hmotnost rotačního aktuátoru m_r a hmotnost tiskového stolku m_{st}.

$$m_3 = m_z + m_{p2} + m_r + m_{st} = 160 + 454 + 950 + 820 = 2384\ kg \tag{8}$$

Do hmotnosti m_3 by se počítala i hmotnost tisknutého výrobku ze skla, ale ta není známa. Do následujících výpočtů bude zavedena jako neznámá *m* a následně bude vypočítána jako maximální hmotnost tisknutého skla, který je systém schopný unést.

7.2.2. Zavedení kinetických a potenciální energií

Pohyb, který bude systém vykonávat, bude v kartézském souřadném systému a jeho celková kinetická energie bude součtem dílčích kinetických energií v jednotlivých směrech souřadného systému. Dílčí kinetické energie budou vyplývat z jednotlivých hmotností m_1, m_2 a m_3, které byly definovány v kapitole *7.2.1.* a pohybů, které jednotlivé hmotnosti budou vykonávat. Hmotnost tisknutého skla *m* bude v kinetické i potenciální energii zavedena jako neznámá, která bude následně vypočítána. Dílčí kinetické energie budou následně vypadat takto:

$$W_{k1} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \dot{x}^2 \tag{9}$$

$$W_{k2} = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \tag{10}$$

$$W_{k3} = \frac{1}{2} \cdot (m_3 + m) \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) \tag{11}$$

Celková kinetická energie systému manipulátoru je rovna součtu jednotlivých dílčích energií a její výsledný tvar bude vypadat takto:

$$W_k = W_{k1} + W_{k2} + W_{k3} = \\ = \frac{1}{2} \cdot [(m_1 + m_2 + m_3 + m) \cdot \dot{x}^2 + (m_2 + m_3 + m) \cdot \dot{y}^2 + (m_3 + m) \cdot \dot{z}^2] \tag{12}$$

Potenciální energie bude uvažována ve směru osy třetího pohonu, protože jedině v tomto směru se tato energie mění. Hmotnosti byly uvažovány m_3 a hledaná m. Výsledná potenciální energie bude vypadat následovně:

$$W_p = (m_3 + m) \cdot g \cdot z \tag{13}$$

Kde g je gravitační zrychlení, které má hodnotu 9,81 m/s^2.

7.2.3. Zatížení pohonu v ose *x*

Zatížení prvního pohonu, který se pohybuje v ose *x*, bude počítáno pro maximální zrychlení pohonu a_{maxx} a z maximálního osového zatížení daného pohonu F_x, které byly uvedeny v *Tab. 1*. Podle rovnice (5) bude potřeba jako první spočítat derivaci celkové kinetické energie podle obecné rychlosti, v tomto případě ve směru osy *x*.

$$\frac{\partial W_k}{\partial \dot{x}} = (m_1 + m_2 + m_3 + m) \cdot \dot{x} \tag{14}$$

Výsledek z rovnice (14) bude následně nutné derivovat podle času.

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{x}}\right) = (m_1 + m_2 + m_3 + m) \cdot \ddot{x} = F_x \tag{15}$$

Následně bude nutné provést derivaci celkové kinetické a potenciální energie podle obecné souřadnice (*x*), ale rovnice (12) a (13) neobsahují *x*, z toho důvodu budou vycházet obě derivace nulové a výsledná síla bude rovna výsledku v rovnici (15). Jelikož bude výsledná síla rovna hnací síle pohonu, tak jediná neznámá zbývá hmotnost tisknutého skla *m*, která bude vyjádřena následovně:

$$m = \frac{F_x}{\ddot{x}} - (m_1 + m_2 + m_3) = \frac{377}{10} - (9{,}653 + 6{,}574 + 2{,}384) = \\ = 19{,}089\ kg \tag{16}$$

Z výsledku rovnice vyplývá, že první pohon v ose *x* bude schopný unést 19,037 kg tisknutého skla.

Jelikož jsou pohony *x* a *y* stejné, tak výpočet není nutné opakovat pro druhý pohon, protože druhý pohon nese nižší hmotnost než první a kinetická ani potenciální energie neobsahují obecnou souřadnici *y* a budou také nulové.

7.2.4. Zatížení pohonu v ose *z*

Zatížení třetího pohonu, který se pohybuje v ose *z,* bude počítáno pro maximální zrychlení pohonu a_{maxz} a hnací sílu pohonu F_z, které jsou uvedeny v *Tab. 2*. Opět bude nutné jako první provést derivaci celkové kinetické energie podle obecné rychlosti, v tomto případě *z* a následný výsledek opět derivovat podle času.

$$\frac{\partial W_k}{\partial \dot{z}} = (m_3 + m) \cdot \dot{z} \tag{17}$$

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{z}}\right) = (m_3 + m) \cdot \ddot{z} \tag{18}$$

V rovnici (12) celkové kinetické energie není obsažena obecná souřadnice *z*, proto její derivace podle této souřadnice bude rovna nule. Dále bude nutné vypočítat derivaci celkové potenciální energie podle obecné souřadnice *z*, která bude vycházet následovně:

$$\frac{\partial W_p}{\partial z} = (m_3 + m) \cdot g \tag{19}$$

Celková hnací síla F_z působící v ose *z* bude následně rovna součtu výsledků těchto derivací podle rovnice (5).

$$F_z = (m_3 + m) \cdot (\ddot{z} + g) \tag{20}$$

Z rovnice (20) následně bude vyjádřena neznámá *m*, která představuje hmotnost tisknutého výrobku ze skla.

$$m = \frac{F_z}{\ddot{x} + g} - m_3 = \frac{50}{0{,}2 + 9{,}81} - 2{,}384 = 2{,}61\ kg \tag{21}$$

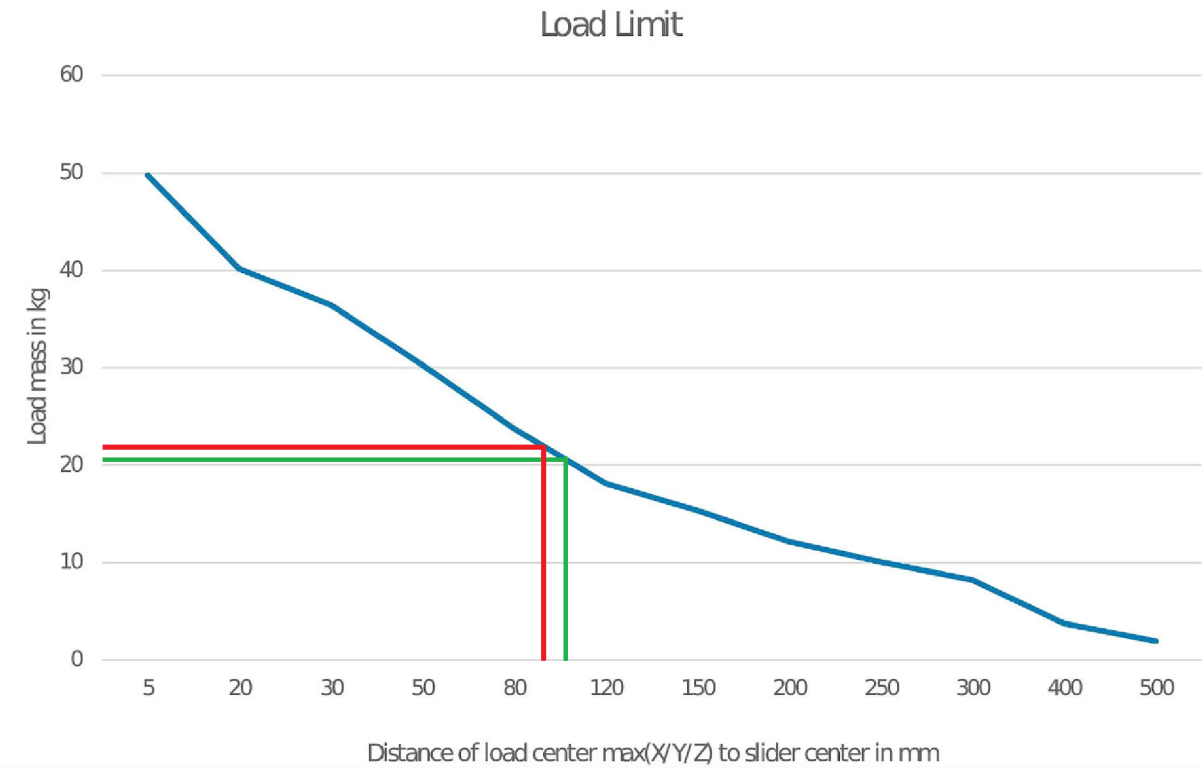
Z výsledku rovnice (21) vyplývá, že třetí pohon v ose *z* bude schopný unést 2,61 kg tisknutého skla.

7.2.5. Zatížení momentem

V rámci únosnosti systému bylo nutné zkontrolovat, zda klopný moment působící na jednotlivé pohony nebude přesahovat maximální hodnoty, které jednotlivé pohony dovolují. Pro pohony *x* a *y*, které jsou stejné, je daný moment uváděn výrobcem [36] v grafu. Rameno, na kterém působí daná zátěžná síla, bude podle konstrukce manipulátoru rovno maximálně polovině pojezdu druhého pohonu (102 mm). Z grafu bylo vyčteno (viz *Obr. 19*), že hmotnost,

kterou bude schopný daný pohon v ose *x* unést na tomto rameni je zakreslena zelenou barvou a má přibližně hodnotu 20 kg. S přihlédnutím, že na tomto rameni bude působit pouze část hmotnosti pohonu v ose *y*, pohon v ose *z* s připevněnými komponentami, bude pohon v zatížení klopným momentem vyhovující.

Pohon v ose *y* bude počítán obdobně s tím, že rameno, na kterém je bude daná síla působit bylo stanoveno pomocí softwaru Autodesk Inventor Pro 2023, kde bylo zjištěno těžiště hmot, které jsou připojeny na daný pohon. Tato hodnota byla stanovena jako 92,3 mm a z grafu na *Obr. 19* vyplývá, že hmotnost, kterou pohon zvládne unést je přes 20 kg. Tato hodnota je zobrazena červenou barvou a vzhledem k hmotnostem jednotlivých částí, které pohon nese je dostatečně vyhovující.



Obr. 19 Závislost maximální hmotnosti na vzdálenosti od osy prvního a druhého pohonu [36]

Pro pohon v ose *z* je předepsáno povolené momentové zatížení, které je uvedeno v *Tab. 2*. Rameno, na kterém budou hmoty působit bylo pomocí softwaru stanoveno přibližně na 89 mm a na rameni bude působit hmotnost druhé příruby m_{p1}, hmotnost rotačního aktuátoru m_r, hmotnost tiskového stolku m_{st} a hmotnost tisknutého skla m. Vzorec pro zjištění maximální hmotnosti tisknutého skla m vypadá následovně:

$$m = \frac{M_{kz}}{\left(g + a_{myxz}\right) \cdot R} - \left(m_{p2} + m_{st} + m_r\right) = \tag{22}$$

$$= \frac{7{,}5}{(9{,}81 + 0{,}2) \cdot 0{,}089} - (0{,}454 + 0{,}82 + 0{,}95) = 6{,}19\ kg$$

Z výsledků rovnice (22) je patrné, že hmotnost skla při dané konfiguraci zařízení a momentovém zatížení může být až 6,19 kg. Vzhledem k maximálnímu osovému zatížení, které je dáno výrobcem na 50 N, což je přibližně nosnost 5 kg s celkovou konstrukcí plus tisknuté sklo, tak vypočtená hodnota z momentového zatížení nemůže být dosažena. Momentové zatížení by bylo limitující při působení na větším rameni.

7.2.6. Zhodnocení dynamické únosnosti systému

Z výsledků výpočtů, které byly provedeny v kap. 7.2. vyplývá, že nejhorší případ pro dynamickou únosnost systému bude dynamika třetího pohonu, kde vyšla hmotnost tisknutého skla 2,61 kg. Hodnota byla počítána z maximálních hodnot zrychlení (0,2 m/s^2), která se softwarově může zvolit nižší a tím únosnost systému zvýšit. Dále se výrobek bude tisknout po vrstvách, takže z počátku bude hmotnost nulová a v průběhu tisku se bude zvyšovat, kde by se mohlo. V návaznosti na tyto by se vždy volilo ideální zrychlení třetího pohonu podle toho, jaký výrobek by byl tisknut.

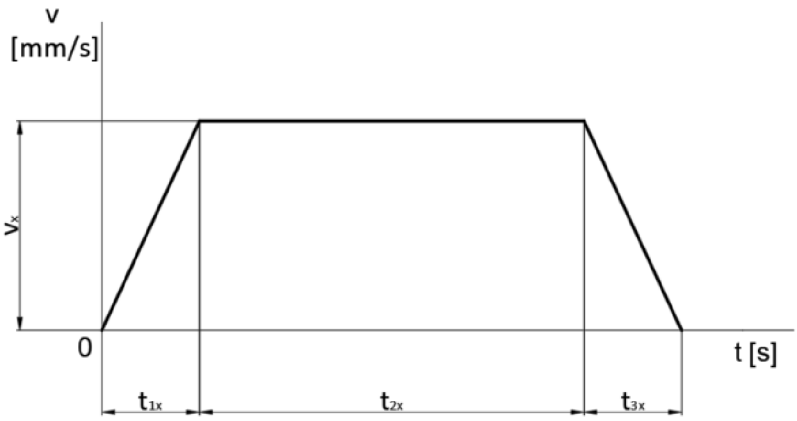
7.3. Výpočet zatížení motorů pohonů

Výpočty pro jednotlivé motory systému budou zahrnovat výpočet redukovaného momentu setrvačnosti na hřídel motoru, výpočet zátěžného kroutícího momentu působícího na hřídel motoru a porovnání zvolených pohonů, zda vyhovují vypočteným zátěžným parametrům. Výpočty budou prováděny podle zdrojů [38, 39, 40]

Jelikož jsou pohony v osách *x* a *y* stejného typu a pohon *x* je zatížen větší hmotou než pohon *y*, tak výpočet bude prováděn pouze pro pohony *x* a *z*.

7.3.1. Výpočet motoru pohonu v ose *x*

Pro výpočet zátěžných parametrů byl zvolen průběh rychlosti závislý na čase, který je zobrazen na *Obr. 20*.



Obr. 20 Průběh rychlosti prvního pohonu v ose x

Parametry, které se týkají výpočtů jak zátěžného momentu setrvačnosti, tak průběhu rychlosti, jsou zobrazeny v *Tab.6* a zahrnují zvolené hodnoty rychlosti a časů a parametry příslušného motoru v ose *x* ze zdroje [36]. Jelikož zdroj neobsahuje žádné informace o třecích účincích ve vedení a kuličkovém šroubů, tak je předpokládáno, že tyto účinky byly započítány do maximálního osového zatížení F_x. Tyto silové účinky působí při konstantní rychlosti (tedy v čase t_{2x}) a pro účely diplomové práce je uvažována síla od pasivních odporů stanovena na 10 % z F_x.

Tab. 6 Parametry pro výpočet zátěže motoru v ose x

Parametry pro výpočet zatížení motoru v ose *x*			
Parametr	**Značka**	**Hodnota**	**Jednotka**
Hmotnost pohybujících hmot ve směru osy *x*	m_1	9,653	[kg]
Hmotnost pohybujících hmot ve směru os *x* a *y*	m_2	6,574	[kg]
Hmotnost pohybujících hmot ve směru os *x*, *y* a *z*	m_3	2,384	[kg]
Hmotnost tisknutého skla	m	2	[kg]
Stoupání kuličkového šroubu	p_x	5	[mm]
Průměr kuličkového šroubu	$d_{šx}$	10	[mm]
Délka kuličkového šroubu (délka posuvu)	$l_{šx}$	204	[mm]
Moment setrvačnosti rotoru	J_{motx}	380	[g·cm^2]
Zvolená rychlost posuvu	v_x	80	[mm/s]
Doba rozběhu a brzdění	$t_{1x} = t_{3x}$	0,1	[s]
Doba konstantní rychlosti	t_{2x}	2	[s]
Hustota materiálu kuličkového šroubu (ocel)	ρ	7850	[kg/m^3]
Maximální osové zatížení	F_x	377	[N]

Aby bylo možné vypočítat redukovaný moment setrvačnosti na hřídel motoru, bylo nutné stanovit jaké hmoty se v tomto směru pohybují m_{xc}. Jedná se všechny hmoty systému manipulátoru, kromě hmotnosti prvního pohonu bez pohyblivého vozíku (tedy hmotnosti m_1, m_2, m_3 a m).

$$m_{xc} = m_1 + m_2 + m_3 + m = 9{,}653 + 6{,}574 + 2{,}384 + 2 = \\ = 20{,}521\ kg \tag{23}$$

Z hmotnosti m_x byl následně vypočítán redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot na hřídel motoru J_{mx}.

$$J_{mx} = m_x \cdot \left(\frac{p_x}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 21{,}521 \cdot \left(\frac{5}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 13\ kg \cdot mm^2 \tag{24}$$

Z parametrů pohybového šroubu bylo nutné stanovit moment setrvačnosti kuličkového šroubu $J_š$.

$$J_{šx} = \frac{\pi \cdot d_{šx}^4 \cdot l_{šx}}{32} \cdot \rho = \frac{\pi \cdot 0{,}01^4 \cdot 0{,}204}{32} \cdot 7850 = 1{,}57\ kg \cdot mm^2 \tag{25}$$

Celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru J_x se následně vypočítal jako součet předchozích momentů setrvačnosti J_{mx} a $J_{šx}$.

$$J_x = J_{mx} + J_{šx} = 13 + 1{,}57 = 14{,}57\ kg \cdot mm^2 \tag{26}$$

Aby bylo možné vypočítat dynamický moment M_{Dx}, bylo nutné spočítat úhlovou rychlost ω_x působící na hřídeli motoru ze zvoleného průběhu rychlosti na *Obr. 20*.

$$\omega_x = v_x \cdot \frac{2 \cdot \pi}{p_x} = 80 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{5} = 100{,}53\ s^{-1} \tag{27}$$

Z úhlové rychlosti ω_x, bylo vypočítáno úhlové zrychlení ε_x, které působí na hřídeli motoru.

$$\varepsilon_x = \frac{\omega_x}{t_{1x}} = \frac{100{,}53}{0{,}1} = 1005{,}3\ s^{-2} \tag{28}$$

Ze zrychlení ε_x a momentu setrvačnosti J_{motx} a J_x byl vypočítán dynamický moment, který působí na hřídel motoru M_{Dx}.

$$\begin{aligned} M_{Dx} &= (J_{motx} + J_x) \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_x = (38 + 14{,}57) \cdot 10^{-6} \cdot 1005{,}3 = \\ &= 0{,}053\ N \cdot m \end{aligned} \tag{29}$$

Jak již bylo psáno síla od pasivních odporů byla uvažována jako 10 % z hnací síly, jelikož výrobce neuvádí žádné údaje o třecích účincích ve vedení a kuličkovém šroubu a tyto síly bývají většinou velmi malé. Ze síly od pasivních odporů byl vypočítán statický moment M_{Sx}.

$$M_{Sx} = M_{Px2} = 0{,}1 \cdot F_x \cdot \frac{p_x}{2 \cdot \pi} = 0{,}1 \cdot 377 \cdot \frac{0{,}005}{2 \cdot \pi} = 0{,}03\ N \cdot m \tag{30}$$

Z dynamického a statického momentu následně byly počítány rozběhový a doběhový momenty M_{Px1} a M_{Px3}.

$$M_{Px1} = M_{Dx} + M_{Px2} = 0{,}053 + 0{,}03 = 0{,}083\ N \cdot m \tag{31}$$

$$M_{Px3} = M_{Dx} - M_{Px2} = 0{,}053 - 0{,}03 = 0{,}023\ N \cdot m \tag{32}$$

Výsledný zatěžující střední moment M_{Px}, který zatěžuje motor prvního pohonu v ose *x* byl vypočítán následovně:

$$M_{Px} = \sqrt{\frac{M_{Px1}^2 \cdot t_{1x} + M_{Px2}^2 \cdot t_{2x} + M_{Px3}^2 \cdot t_{3x}}{t_{1x} + t_{2x} + t_{3x}}} =$$
$$= \sqrt{\frac{0{,}083^2 \cdot 0{,}1 + 0{,}03^2 \cdot 2 + 0{,}023^2 \cdot 0{,}1}{0{,}1 + 2 + 0{,}1}} = 0{,}034\ N \cdot m \tag{33}$$

Pro porovnání, zda bude motor, který pohání pohon v ose *x* vyhovovat bylo následně nutné vypočítat moment, kterým je schopný motor působit M_{motx} z hnací síly F_x.

$$M_{motx} = F_x \cdot \frac{p_x}{2 \cdot \pi} = 377 \cdot \frac{0{,}005}{2 \cdot \pi} = 0{,}3\ N \cdot m \tag{34}$$

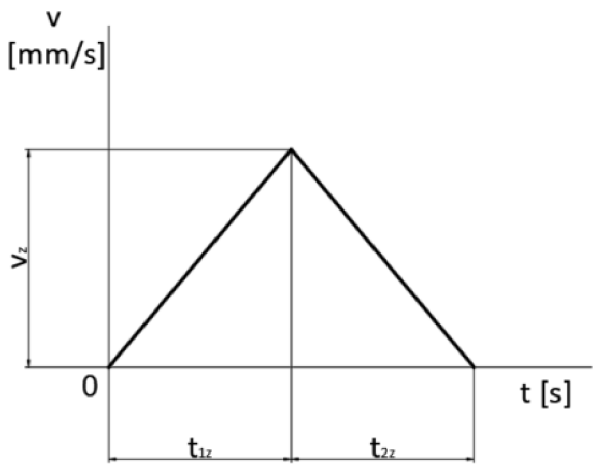
Porovnání výsledného dynamického momentu M_{Dx} působícího na hřídel motoru a kroutícího momentu motoru M_{motx} vypadalo následovně:

$$\begin{aligned} M_{motx} &> M_{Dx} \\ 0{,}3 &> 0{,}034 \end{aligned} \tag{35}$$

Z výsledku v rovnici (35) je patrné, že daný motor při dané konfiguraci systému a zvoleném průběhu rychlosti a hmotnosti tištěného skla vyhovuje pro zatížení kroutícím momentem.

7.3.2. Výpočet motoru pohonu v ose *z*

Pohon v ose *z* bude vykonávat posuvy, které se budou rovnat výšce vrstvy (krátké v rámci desetin mm). Z toho důvodu byl zvolen průběh rychlosti, který je zobrazen na *Obr. 21*.



Obr. 21 Průběh rychlosti třetího pohonu v ose z

V případě průběhu třetího pohonu v ose *z* byl zvolen posuv, který bude muset být vykonán za určitý čas. Hodnoty posuvu a časů jsou spolu s katalogovými informacemi [36] uvedeny v *Tab. 7*. Mezi katalogovými informacemi chyběl moment setrvačnosti rotoru motoru, proto byl moment setrvačnosti rotoru volen jako podobný ze zdroje [41]. V katalogu nebyly uvedeny

žádné informace o třecích účincích ve vedení a vodícím šroubu, proto bylo jako v předchozím případě předpokládáno, že tyto účinky jsou již započítány do hnací síly F_z. Stejně jako v předchozím případě byla uvažována síla od pasivních odporů jako 10 % ze zadané hnací síly F_z pohonu v ose *z*.

Tab. 7 Parametry pro výpočet zátěže motoru v ose z

Parametry pro výpočet zatížení motoru v ose *x*			
Parametr	**Značka**	**Hodnota**	**Jednotka**
Hmotnost pohybujících hmot ve směru os *x*, *y* a *z*	m_3	2,384	[kg]
Hmotnost tisknutého skla	m	2	[kg]
Stoupání kuličkového šroubu	p_z	1	[mm]
Průměr kuličkového šroubu	$d_{šz}$	8	[mm]
Délka kuličkového šroubu (délka posuvu)	$l_{šz}$	102	[mm]
Moment setrvačnosti rotoru	J_{motz}	82	[g·cm^2]
Zvolená dráha posuvu (výška vrstvy)	s_z	0,1	[mm]
Doba rozběhu a brzdění	$t_{1z} = t_{2z}$	0,1	[s]
Hustota materiálu kuličkového šroubu (ocel)	ρ	7850	[kg/m^3]
Hnací síla	F_z	50	[N]
Gravitační zrychlení	g	9,81	[m/s^2]

Jako první bylo nutné stanovit jaké hmoty m_z se v tomto směru pohybují. Byly to hmotnosti jednotlivých komponent, které jsou zahrnuty v hmotnosti m_3 a hmotnost tisknutého skla, která byla jako v předchozím případě volena $m = 2\ kg$.

$$m_z = m_3 + m = 2{,}384 + 2 = 4{,}384\ kg \tag{36}$$

Z hmotnosti m_z byl vypočítán redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot působící na hřídel motoru J_{mz}.

$$J_{mz} = m_z \cdot \left(\frac{s_z}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 4{,}384 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 0{,}111\ kg \cdot mm^2 \tag{37}$$

Následně byl stanoven moment setrvačnosti kuličkového šroubu $J_{šz}$, který byl počítán z parametrů pohybového šroubu.

$$J_{šz} = \frac{\pi \cdot d_{šz}^4 \cdot l_{šz}}{32} \cdot \rho = \frac{\pi \cdot 0{,}008^4 \cdot 0{,}102}{32} \cdot 7850 = 0{,}323\ kg \cdot mm^2 \tag{38}$$

Součtem momentů setrvačnosti J_{mz} a $J_{šz}$ byl získán celkový moment setrvačnosti působící na hřídel motoru J_z.

$$J_z = J_{mz} + J_{šz} = 0{,}111 + 0{,}323 = 0{,}434\ kg \cdot mm^2 \tag{39}$$

Aby bylo možné vypočítat dynamický moment M_{Dx}, bylo nutné spočítat úhlové zrychlení ε_z ze zvoleného průběhu rychlosti (*Obr. 21*) a zvolených parametrů v *Tab. 7*, kde pro rozběh je uvažována poloviční dráha, jelikož druhá polovina podle *Obr. 21* bude využita pro brzdění.

$$\varepsilon_z = \frac{s_z}{2 \cdot t_{1z}^2} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{p_z} = \frac{0{,}1}{2 \cdot 0{,}1^2} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{1} = 31{,}42\ s^{-2} \tag{40}$$

Dynamický moment M_{Dz} působící na hřídel motoru byl vypočítán z úhlového zrychlení ε_z a momentů setrvačnosti J_{motz} a J_z.

$$M_{Dz} = (J_{motz} + J_z) \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_z = (8{,}2 + 0{,}434) \cdot 10^{-6} \cdot 31{,}42 = \\ = 0{,}27\ N \cdot mm \tag{41}$$

Pohon v ose *z* se bude posouvat ve vertikálním směru, proto byl uvažován i moment M_{gz}, který působí od gravitačního zrychlení *g*. Třecí účinky byly jako v předchozím případě uvažovány jako započítány do tažné síly F_z.

$$M_{gz} = m_z \cdot g \cdot \frac{p_z}{2 \cdot \pi} = 4{,}384 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{0{,}001}{2 \cdot \pi} = 6{,}84\ N \cdot mm \tag{42}$$

Následně jako u předchozího pohonu bylo nutné spočítat statický moment M_{Sz}, který z důvodů neuvedení třecích účinků ve vodícím šroubu a vedení byl stanoven na hodnotu 10 % z hnací síly F_z pohonu v ose *z*.

$$M_{Sz} = M_{Pz2} = 0{,}1 \cdot F_z \cdot \frac{p_z}{2 \cdot \pi} = 0{,}1 \cdot 50 \cdot \frac{0{,}001}{2 \cdot \pi} = 0{,}8\ N \cdot mm \tag{43}$$

Z těchto dvou momentů M_{Dz} a M_{gz} byly vypočítány rozběhový M_{Pz1} a brzdný moment M_{pz2}, který působí podle zvoleného průběhu působí na hřídel motoru. Pohyb je konán ve vertikálním směru nahoru.

$$M_{Pz1} = M_{Dz} + M_{gz} + M_{Sz} = 0{,}27 + 6{,}84 + 0{,}8 = 7{,}91\ N \cdot mm \tag{44}$$

$$M_{Pz2} = M_{Dz} - M_{gz} - M_{Sz} = 0{,}27 - 6{,}84 - 0{,}8 = -7{,}37\ N \cdot mm \tag{45}$$

Následně se vypočítal střední zátěžný moment, který působí na hřídel motoru M_{Pz}.

$$M_{Pz} = \sqrt{\frac{M_{Pz1}^2 \cdot t_{1z} + M_{Pz2}^2 \cdot t_{2z}}{t_{1z} + t_{2z}}} = \sqrt{\frac{7{,}91^2 \cdot 0{,}1 + 7{,}37^2 \cdot 0{,}1}{0{,}1 + 0{,}1}} = \\ = 7{,}64\ N \cdot mm \tag{46}$$

Pro porovnání byl vypočítán kroutící moment M_{motz}, který bude schopný vyvinout motor pohonu v ose *z*.

$$M_{motz} = F_z \cdot \frac{p_z}{2 \cdot \pi} = 50 \cdot \frac{0{,}001}{2 \cdot \pi} = 7{,}96\ N \cdot mm \tag{47}$$

Vypočítaný kroutící moment M_{motz} byl následně porovnán se zatěžujícím středním momentem M_{Pz} a musel být nižší.

$$\begin{gathered} M_{motz} > M_{Pz} \\ 7{,}96 > 7{,}64 \end{gathered} \tag{48}$$

Z výsledku rovnice (48) vyplývá, že motor pohonu v ose *z* při dané konfiguraci systému a zvoleném průběhu a hmotnosti tištěného skla vyhovuje pro zatížení kroutícím momentem.

7.3.3. Zhodnocení zatížení motorů pohonů

Z výsledků výpočtů provedených v kapitole *7.3.* vyplývá, že motory systému 3D tiskárny vyhovují pro zátěž danou konstrukcí a zvolenou hmotností skla *m = 2 kg* a průběhem rychlosti, kde nejtěsněji vycházelo zatížení kroutícím momentem pro třetí motor v ose *z*. Bylo to dáno tím, že při výpočtu bylo uvažováno s maximálním dynamickým zatížením, tedy hmotou tisknutého skla. Jelikož se jedná o 3D tiskárnu, kde se na sebe tisknou vrstvy skla, tak z počátku tisku bude manipulováno pouze s hmotností tiskového stolku bez tisknutého skla. Hmotnost tisknutého skla bude během tisku růst, ale maximální hodnoty by dosáhla až na konci tisku a pouze pokud by daný výrobek ze skla měl takovou výslednou hmotnost. Proto lze považovat i toto zatížení vyhovující s větší rezervou než v rovnici (48).

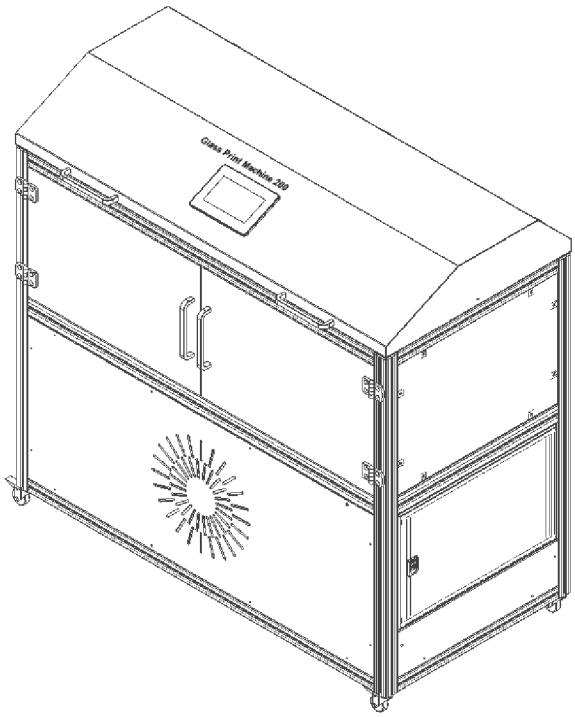
8. Celková konstrukce 3D tiskárny

V předchozích kapitolách *6.* a *7.* byla popsána konstrukce manipulátoru s jednotlivými pohony, který byly následně výpočtově kontrolovány, zda je návrh vyhovující dané aplikaci. V závislosti byla následně vytvořena koncepce celé konstrukce 3D tiskárny, která byla zobrazena na *Obr. 22*.

Detailní informace o konstrukci 3D tiskárny, která je postupně zobrazena na *Obr. 22-27*, lze najít ve výkresové dokumentaci:

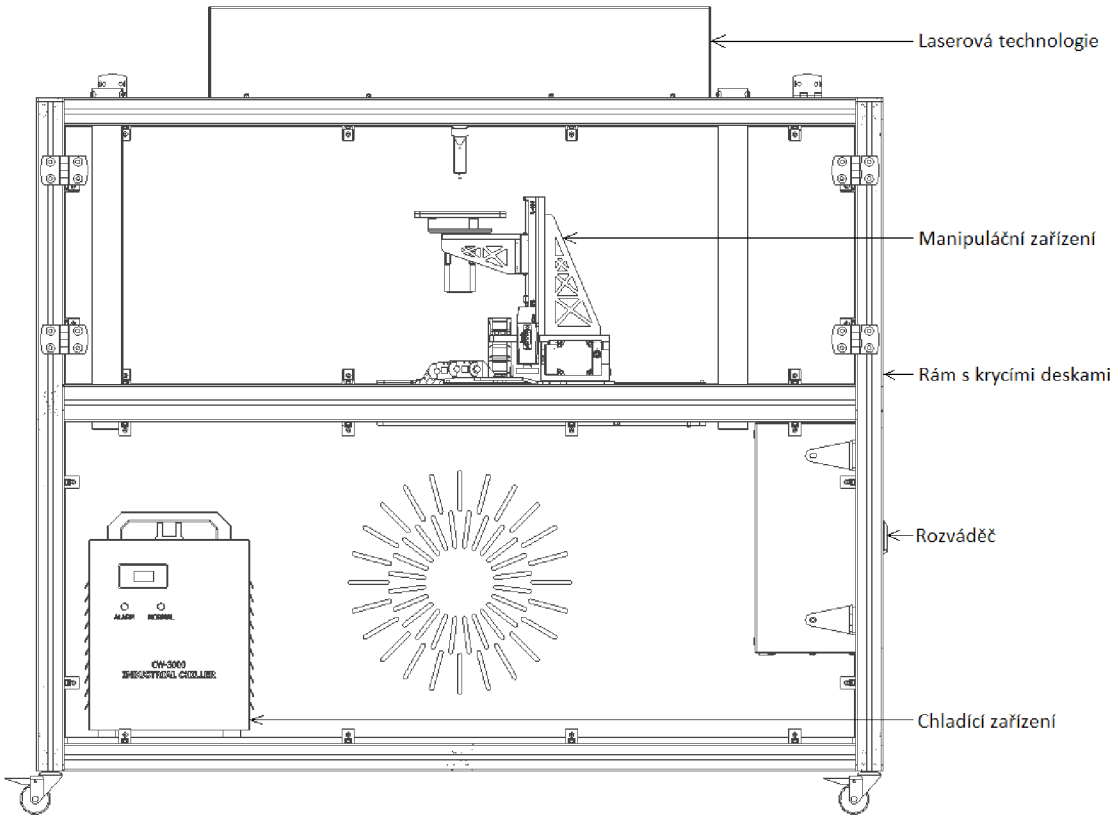
- 3-DP S21000171-0-0 (sestavný výkres 3D tiskárny)
- 3-DP S21000171-0-1 (výrobní výkres krycího plechu 1)
- 3-DP S21000171-0-2 (výrobní výkres krycího plechu 2)
- 3-DP S21000171-0-3 (výrobní výkres krycí desky 1)
- 3-DP S21000171-0-4 (výrobní výkres krycí desky 2)
- 3-DP S21000171-0-5 (výrobní výkres krycí desky 3)

- 3-DP S21000171-0-6 (výrobní výkres desky dvířek)
- 3-DP S21000171-1-0 (sestavný výkres horního krytu)
- 3-DP S21000171-1-1 (výrobní výkres vrchního krytu)
- 3-DP S21000171-1-2 (výrobní výkres bočního pravého krytu)
- 3-DP S21000171-1-3 (výrobní výkres bočního levého krytu)
- 4-DP S21000171-1-4 (výrobní výkres bočního pravého krytu)
- 4-DP S21000171-1-5 (výrobní výkres bočního levého krytu)
- 3-DP S21000171-2-0 (sestavný výkres rámu s technologií a plechy)
- 4-DP S21000171-2-1 (výrobní výkres držáku rozváděče)
- 4-DP S21000171-2-2 (výrobní výkres trubky pro rozvod energie)
- 3-DP S21000171-3-0 (sestavný výkres rámu s vnitřními plechy)
- 3-DP S21000171-3-1 (výrobní výkres plechu k manipulátoru 1)
- 3-DP S21000171-3-2 (výrobní výkres plechu k manipulátoru 2)
- 3-DP S21000171-3-3 (výrobní výkres plechu k manipulátoru 3)
- 3-DP S21000171-3-4 (výrobní výkres plechu k manipulátoru 4)
- 3-DP S21000171-3-5 (výrobní výkres plechu k technologii 1)
- 3-DP S21000171-3-6 (výrobní výkres plechu k technologii 2)
- 3-DP S21000171-3-7 (výrobní výkres plechu k technologii 3)
- 3-DP S21000171-3-8 (výrobní výkres regálu)
- 3-DP S21000171-4-0 (sestavný výkres manipulátoru)
- 3-DP S21000171-5-0 (sestavný výkres laserové technologie)



Obr. 22 Konstrukce 3D tiskárny (zakrytovaná)

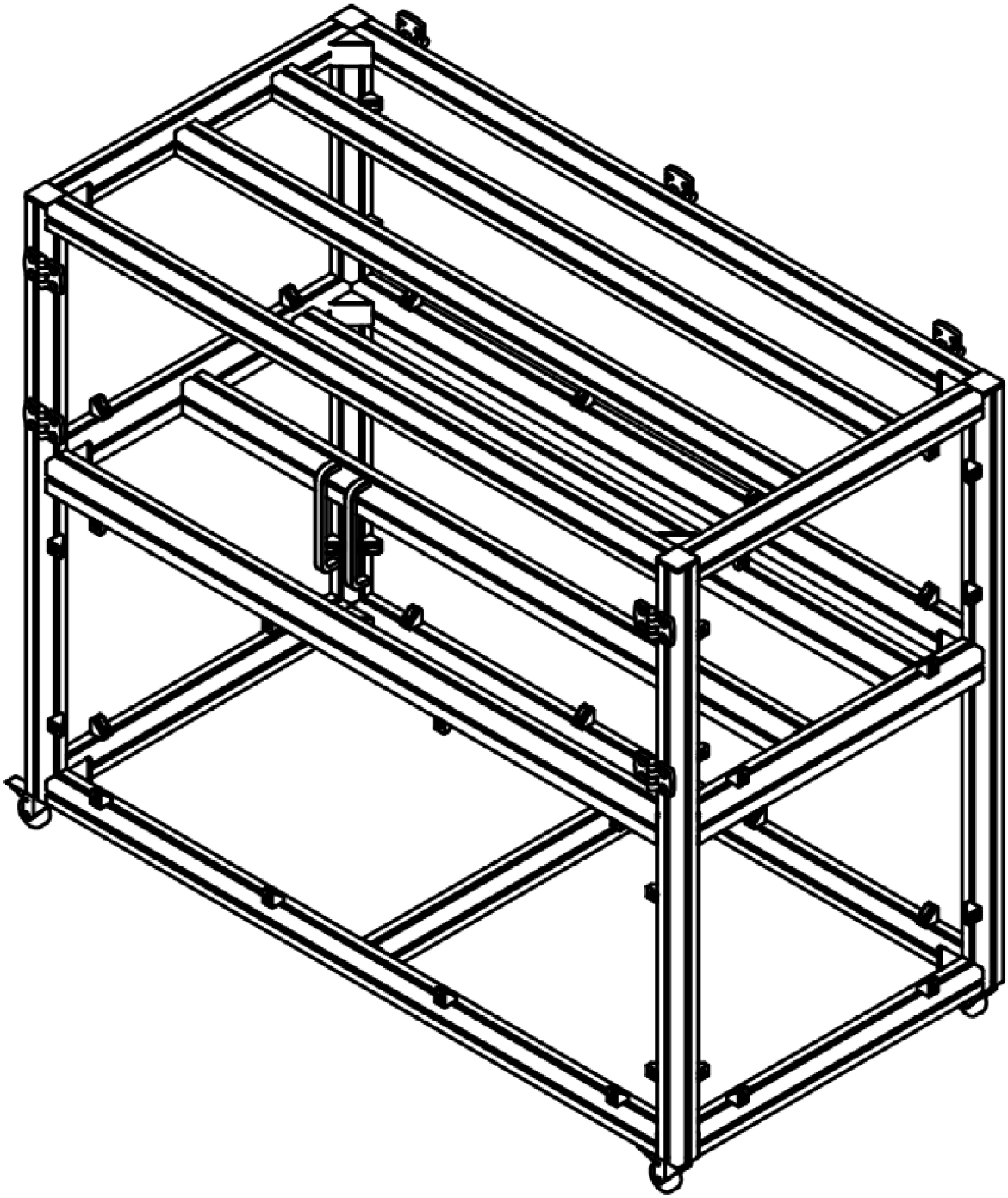
Aby bylo možné vidět jednotlivé části 3D tiskárny, je zde zobrazen *Obr. 23*, na kterém je zobrazena 3D tiskárna bez vrchního krytu s PLC, dvířka a spodní přední kryt. Na obrázku je vidět zakrytovaná laserová technologie, manipulační zařízení, technologická příslušenství a rám s kryty 3D tiskárny. Jednotlivé části jsou v obrázku popsány.



Obr. 23 Konstrukce 3D tiskárny (odkrytovaná)

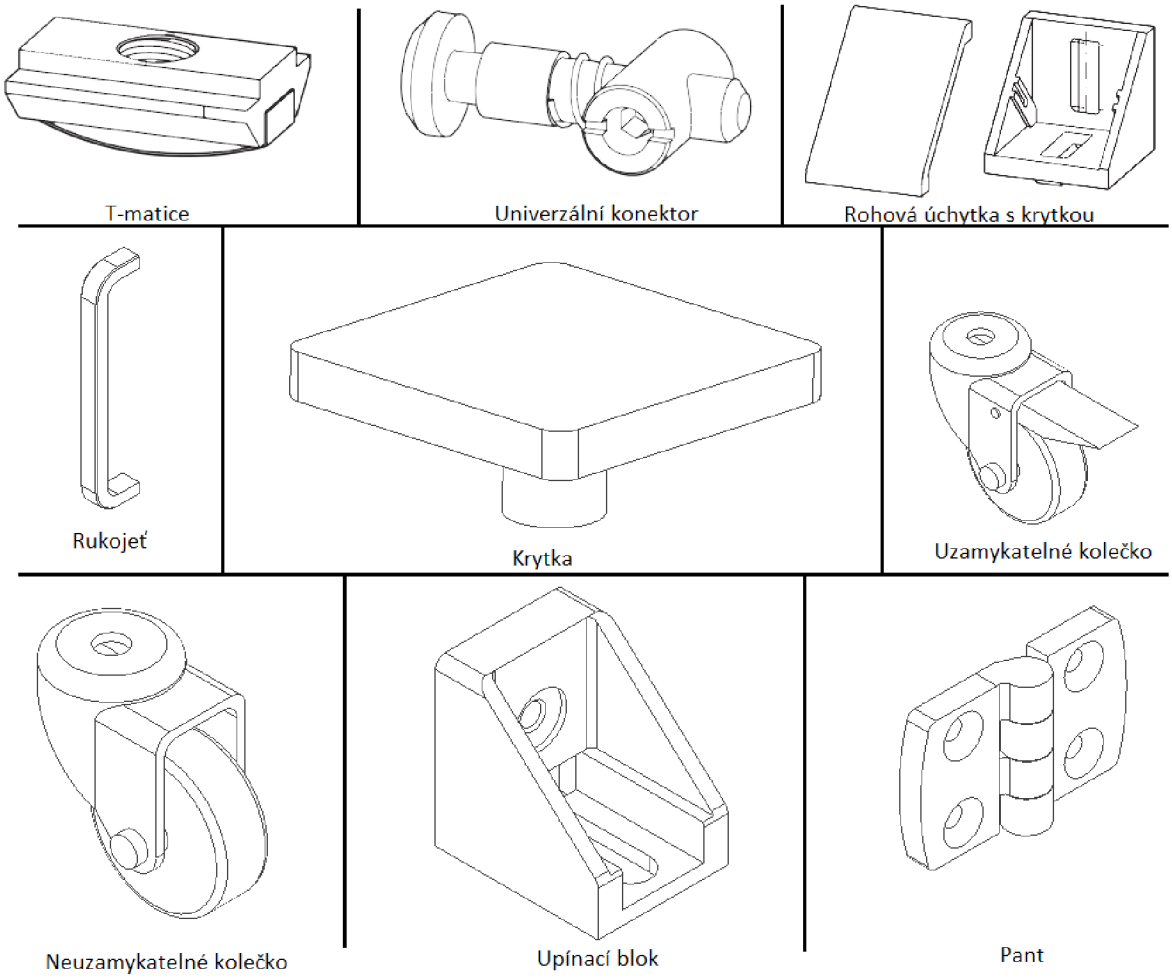
8.1. Rámová konstrukce

Rámová konstrukce (viz *Obr. 24*) byla sestavena z extrudovaných hliníkových profilů, které byly mezi sebou spojeny univerzálními konektory a spojovací úhelník s krytkami. Jednotlivá spojení byly realizovány pomocí T-matic, které byly usazovány do drážek extrudovaných profilů a následně se na ně připevňovaly jednotlivé komponenty. Pro upnutí krycích desek na konstrukci rámu byly přidány upínací bloky a pro upnutí dvířek a horního krytu laserové technologie byly využity panty. Konstrukce dále bude obsahovat dvě madla, krytky na konce profilů a pojezdová kolečka pro usnadnění přesunutí, a to dvě uzamykatelná a dvě neuzamykatelná. Všechny komponenty byly vybrány od firmy MayTec z katalogového listu [42].



Obr. 24 Rámová konstrukce 3D tiskárny od firmy MayTec [41]

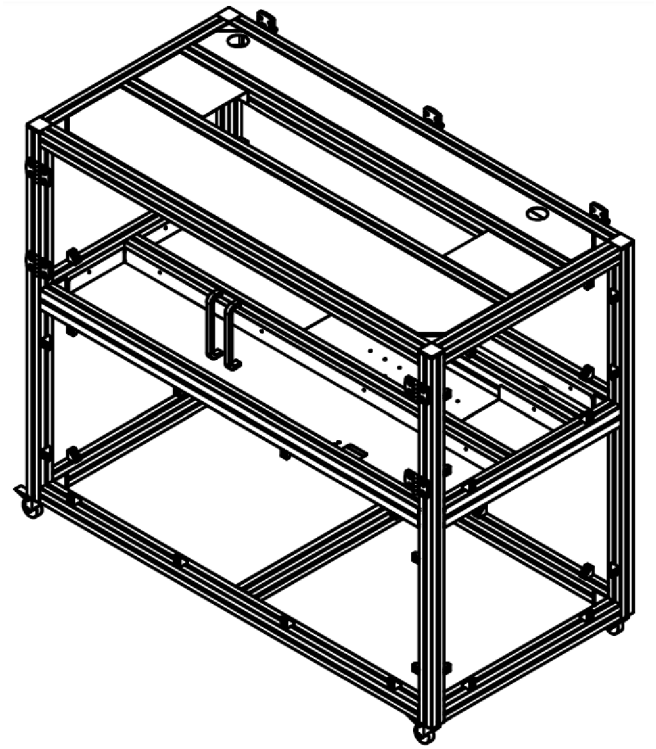
Detailní zobrazení jednotlivých komponent rámové konstrukce je na *Obr. 25*.



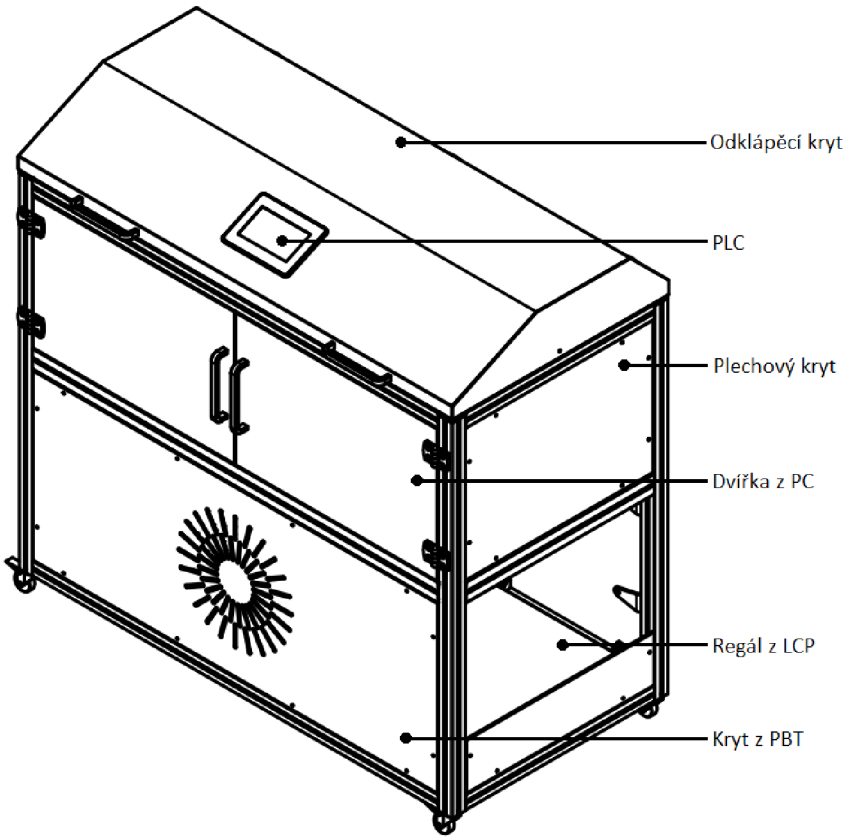
Obr. 25 Komponenty rámové konstrukce od firmy MayTec [41]

Aby byla zvýšena bezpečnost provozu a laserový paprsek nemohl něco zničit nebo někoho zranit, byly mezery mezi extrudovanými profily opatřeny krycími ohýbanými plechy z ocele 11 373.1. Plechy byly ohnuty tak, aby vyplnily mezeru mezi profily a bylo možné je k profilům připevnit pomocí šroubů. Ohýbané plechy v prostorách manipulačního zařízení a laserové technologie na konstrukci rámu jsou zobrazeny na *Obr. 26*.

Celá konstrukce byla opatřena krytováním po obvodu, kde na spodní úrovni byly vyrobeny kryty z PBT (polybutylen-tereftalát), které byly z obou stran pokryté kovovou fólií, na úrovni manipulačního zařízení byly kryty z plechů materiálu 11 373.1 a dvířka byly vyrobeny z PC (polykarbonátu). Do spodní části konstrukce byl vložen regál z materiálu PVC (polyvinylchlorid). Laserová technologie byla opatřena odklápěcím krytem, který byl vyroben z ohýbaných dílů, které byly následně k sobě svařeny. Odklápěcí kryt byl vyroben z oceli 11 343 a obsahuje otvor pro uchycení ovládacího PLC. Rámová konstrukce s obvodovými kryty je zobrazena na *Obr. 27*.



Obr. 26 Rámová konstrukce 3D tiskárny s vnitřními plechy



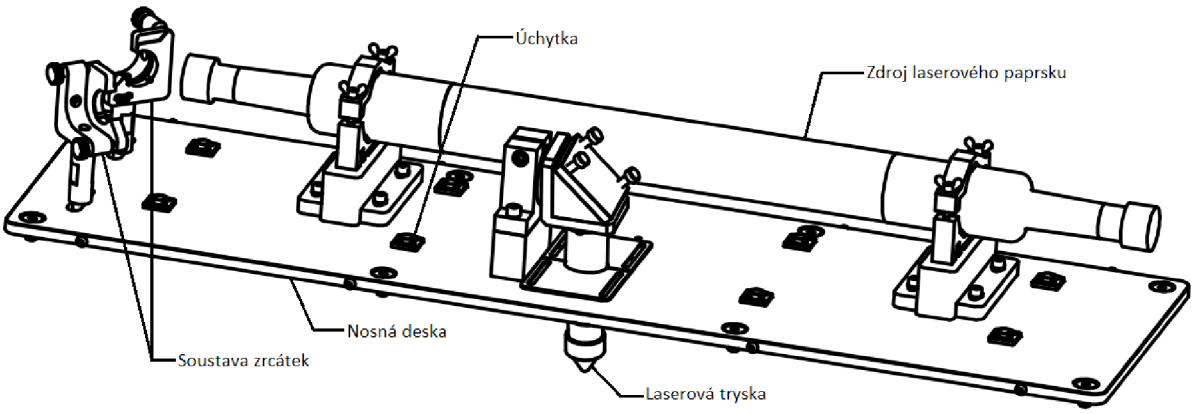
Obr. 27 Rámová konstrukce 3D tiskárny s obvodovými plechy

8.2. Konstrukce laserové technologie

Laserový paprsek bude generován pomocí CO_2 laseru v horní části konstrukce tiskárny a následně bude směrován do míst, kde bude docházet k expozici vlákna a následnému tisku na tiskový stolek. Konstrukce (viz *Obr. 28*) byla vytvořena z nosné desky, na kterou byl umístěn tubusový CO_2 generátor laserového paprsku spolu se soustavou zrcadel, který usměrňují paprsek až do nakloněné trysky [43]. Tryska je nakloněna z bezpečnostních důvodů směrem k zadní části tiskárny. Na nosné desce byly umístěny úchytky pro připevnění přívodních kabelů ke zdroji laserového paprsku. Celá konstrukce byla následně z bezpečnostních důvodů opatřena ocelovým krytem, který je vidět na *Obr. 23*. Konstrukce dále obsahuje z bezpečnostních důvodů trubku na utlumení odraženého paprsku, aby se neodrážel v prostoru 3D tiskárny a nezpůsoboval nebezpečí.

Detailní informace o konstrukci laserové technologie lze nalézt ve výkresové dokumentaci:

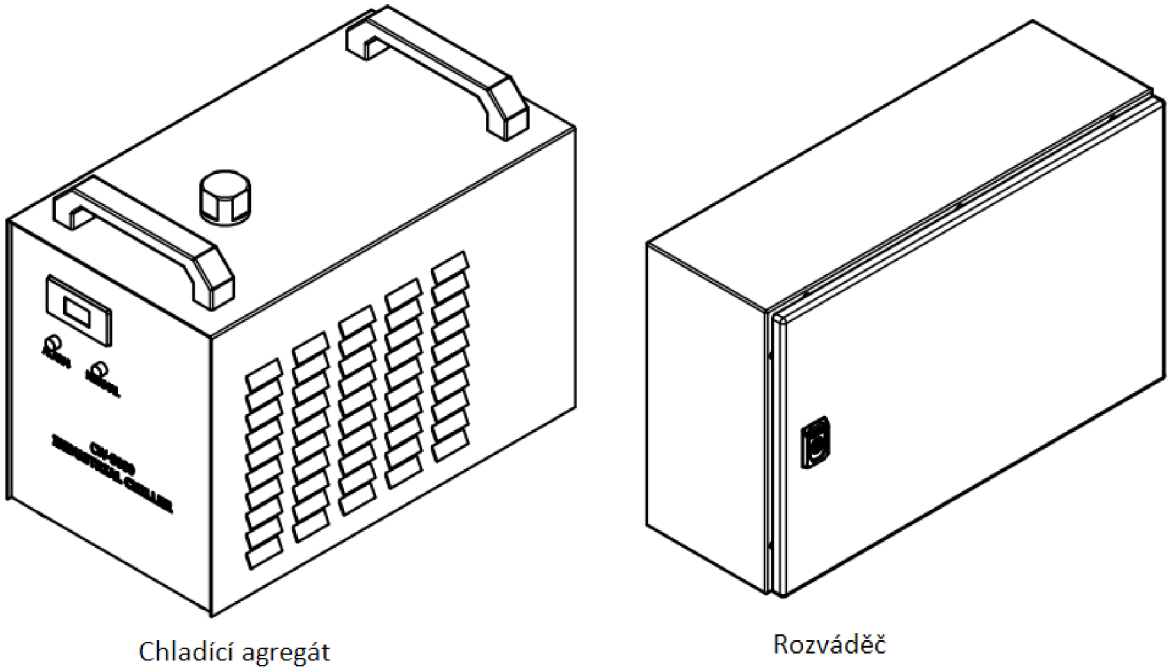
- 3-DP S21000171-5-0 (sestavný výkres laserové technologie)
- 3-DP S21000171-5-1 (výrobní výkres krytu technologie)
- 3-DP S21000171-5-2 (výrobní výkres desky technologie)
- 4-DP S21000171-5-3 (výrobní výkres stojanu zrcátka)
- 4-DP S21000171-5-4 (výrobní výkres krytky)
- 3-DP S21000171-11-0 (sestavný výkres laserové hlavy)
- 4-DP S21000171-11-1 (výrobní výkres trnu)
- 3-DP S21000171-11-2 (výrobní výkres držáku hlavy)
- 4-DP S21000171-11-3 (výrobní výkres distančního bloku)
- 4-DP S21000171-12-0 (sestavný výkres útlumu laserového paprsku)
- 4-DP S21000171-12-1 (výrobní výkres držáku trubky)
- 4-DP S21000171-12-2 (výrobní výkres tlumící trubky)
- 4-DP S21000171-12-3 (výrobní výkres kroužku trubky)



Obr. 28 Laserová technologie 3D tiskárny

8.3. Technologické příslušenství

Mezi technologické příslušenství 3D tiskárny patří agregát pro aktivní chlazení laseru a elektrický rozváděč, který jsou zobrazeny na *Obr. 29*. Chladící agregát bude volně postaven na regálu ve spodní části tiskárny a přes dopravní hadice se bude dopravovat chladící kapalina do zdroje laserového paprsku pro jeho aktivní chlazení a s tím spojenou vyšší účinností a bezpečností technologického procesu generování laserového paprsku [43]. Elektrický rozváděč [44] bude připevněn přes úchytky na rámovou konstrukci z hliníkových profilů ve spodní části 3D tiskárny. Rozváděč bude připojen ke zdroji elektrického napětí ze sítě a bude obsahovat veškerou elektroniku pro řízení jednotlivých pohonů včetně kontrolérů od firmy Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG [35], které řídí příslušné pohony v osách *x*, *y* a *z*. Dále také bude obsahovat elektroniku pro přívod a funkci chladícího agregátu a generátoru laserového paprsku.



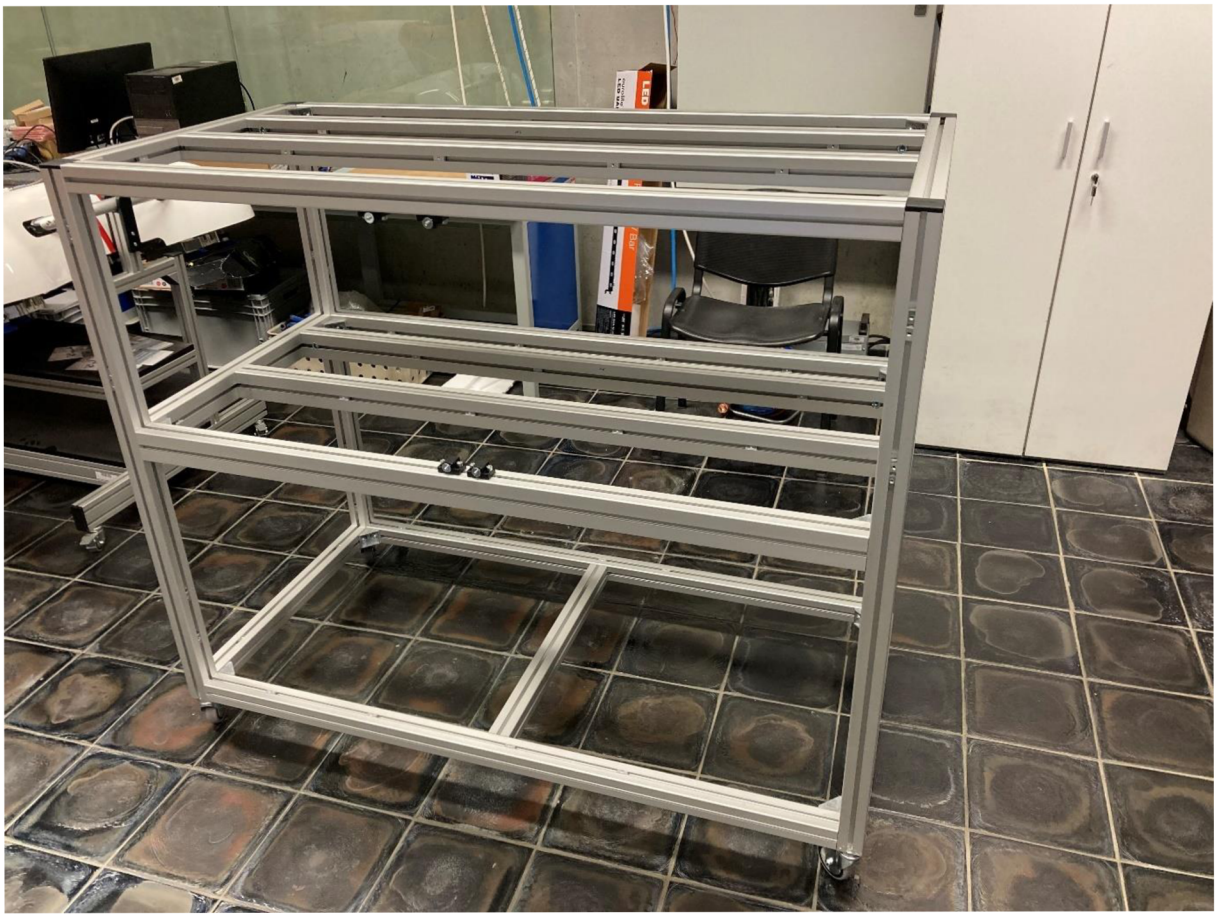
Obr. 29 Technologické příslušenství 3D tiskárny

9. Montáž a oživování 3D tiskárny

V rámci tvorby výkresové dokumentace jednotlivých komponent byly zaváděny průběžně jednotlivé díly do výrobního procesu nebo byly objednány od dodavatelských firem, aby bylo možné fyzicky 3D tiskárnu sestavit a bylo možné začít s oživováním a odladěním funkčnosti s následnými experimenty. V následujících kapitolách bude popsán postup montáže 3D tiskárny s jejím následujícím oživováním.

9.1. Popis postupné montáže 3D tiskárny

Montáž byla realizována na Technické univerzitě v Liberci (TUL) v prostorách laboratoří katedry sklářských a robotických strojů (KSR). V první fázi byla provedena montáž rámové konstrukce od firmy MayTec [42], kde postupně byly k sobě připevňovány jednotlivé extrudované hliníkové profily pomocí univerzálních konektorů a spojovacích úhelníků. Před připevněním bylo nutné do jednotlivých drážek napočítat a vložit daný počet úchytných T-matic, které následně sloužily k upínání dalších komponent. Poté co byly všechny profily spojeny byla konstrukce opatřena krytkami na tyto profily, pojízdnými kolečky a panty *Obr. 30*. Všechny tyto komponenty jsou zobrazeny na *Obr. 25*.



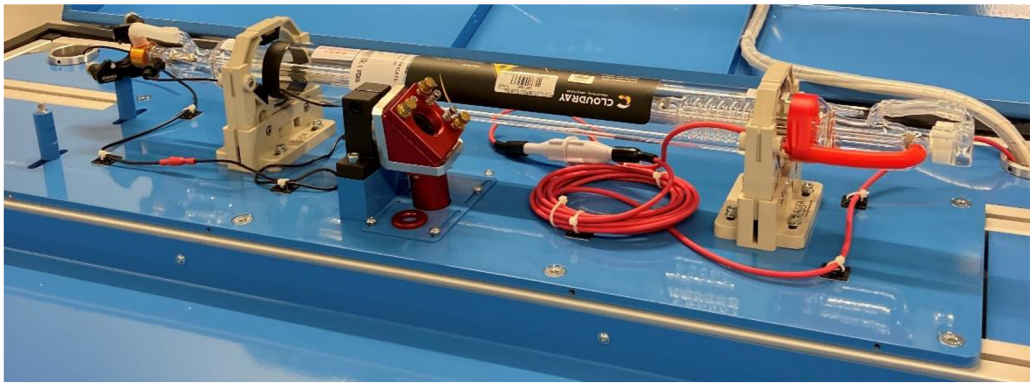
Obr. 30 Montáž rámové konstrukce

V druhé fázi byla provedena montáž manipulačního zařízení, kde byla připevněna základová deska manipulátoru k rámové konstrukci, na kterou byl připevněn první pohon (v ose *x*). Na první pohon byl přímo připevněn druhý pohon (v ose *y*). Následně byla připevněna příruba mezi druhý pohon a třetí pohon (v ose *z*), který byl připevněn k této přírubě. Poté byla na třetí pohon připevněna druhá příruba, která spojovala tento pohon s rotačním aktuátorem, na který byl připevněn tiskový stolek. Spoje mezi pohony byly realizovány kolíkovými a šroubovými spojeními. Jako poslední část manipulátoru byly připevněny plechy spolu

s energetickými řetězci na druhý pohon, které měli nést a rozvádět přívodní a komunikační kabely do jednotlivých pohonů. Výsledek této části montáže je zobrazen na *Obr. 31*.

Obr. 31 Montáž manipulačního zařízení

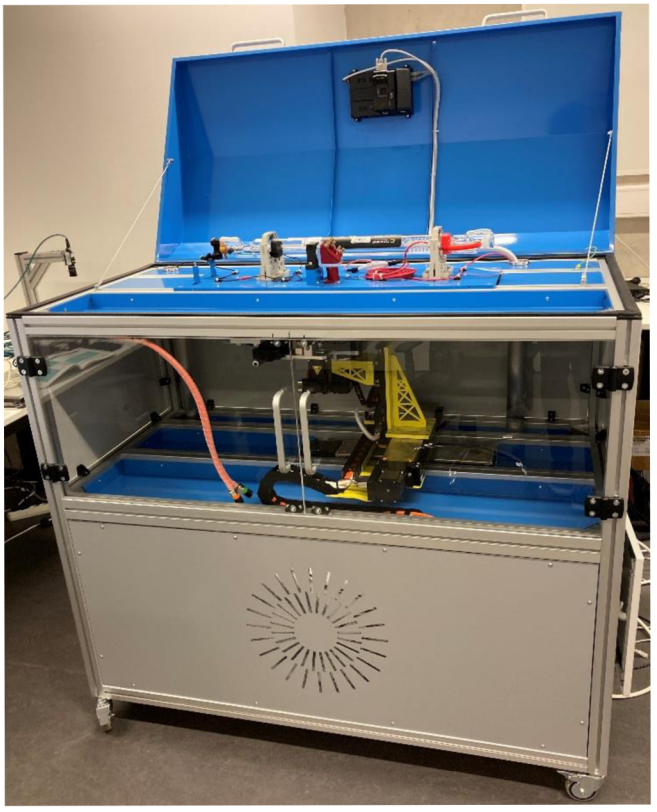
Třetí fáze spočívala v montáži laserové technologie na rámovou konstrukci, kde byla připevněna nosná deska technologie přímo na rámovou konstrukci. Na desku byly následně připevňovány držáky laseru se zdrojem laserového paprsku, držáky zrcátek se zrcátky, distanční blok s upínkou a laserovou tryskou, trubka na útlum laserového paprsku a kabelové úchytky. Tato část je zobrazena na *Obr. 32*.



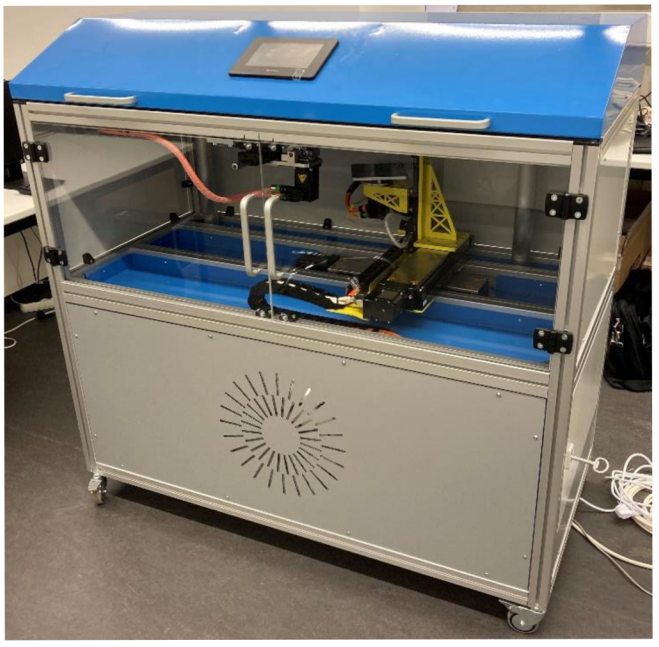
Obr. 32 Montáž laserové technologie

Ve čtvrté fázi byla 3D tiskárna opatřována vnitřními plechy u manipulátoru a laserové technologie, rozváděčem, vnějším krytováním spolu s vrchním odklápěcím krytem laserové technologie a dvířky opatřenými madly. Vnitřní plechy byly připevňovány přímo na rámovou konstrukci z extrudovaných profilů prostřednictvím T-matic a vnější krytování bylo

připevňováno na upínací bloky rámové konstrukce kromě vrchního krytu a dvířek, které byly připevněny na panty, aby bylo možné otevírat. Na *Obr. 33* je zobrazena konstrukce, která byla otevřena pro zviditelnění vnitřních plechů a na *Obr. 34* je zobrazena zakrytovaná konstrukce, která zároveň zobrazuje finální smontovanou 3D tiskárnu.

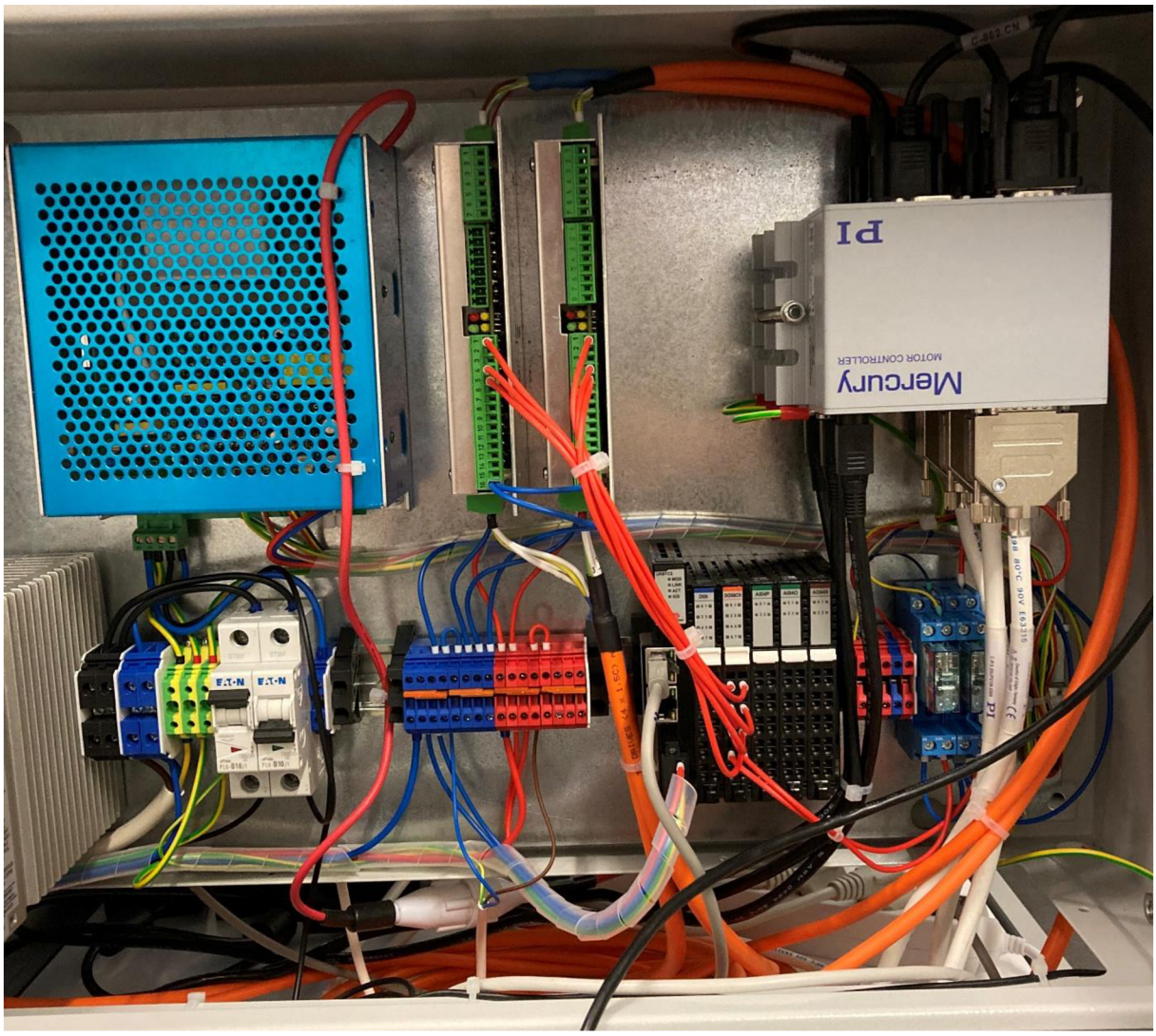


Obr. 33 Otevřená konstrukce 3D tiskárny



Obr. 34 Uzavřená (finální) konstrukce 3D tiskárny

V páté fázi bylo nutné provést elektrické zapojení jednotlivých komponent v rozváděči, aby bylo dosaženo funkčnosti celého zařízení. Zapojení spočívalo v přivedení zdrojového napětí ze sítě, které bylo následně rozvedeno v rozváděči přes elektrické komponenty. Jednotlivé elektrické komponenty byly voleny tak, aby bylo pro jednotlivé funkční elektrické součástky dosaženo požadovaného napětí a zároveň, aby bylo celkové zařízení bezpečné. Dále byly do rozváděče umístěny řídící kontroléry pro jednotlivé pohony firmy PI [44]. Elektrické zapojení je zobrazeno na *Obr. 35*.



Obr. 35 Elektrické zapojení rozváděče

Následně byl prováděn proces oživování, který je popsán v další kapitole.

9.2. Popis oživování 3D tiskárny

Proces oživování byl prováděn v oblasti rozpohybování především lineárních pohonů firmy PI pomocí kontrolérů C-663.12 od této firmy [45] a následně ovládání pomocí volně programovatelného automatu (PLC) USP-070-B10 od firmy Unitronics [46]. Postup spočíval ve studiu technických materiálů, které byly opatřeny od uvedených firem a podle uvedených

postupů uvedených v těchto materiálech byly realizovány konfigurace a následně prováděny jednoduché příkazy a pohyby. Řídící kontrolér a PLC jsou zobrazeny na *Obr. 36*.

Obr. 36 Řídící kontrolér a PLC [44 a 45]

9.2.1. Řízení pomocí kontroléru C-663.12

Jedná se o kompaktní kontrolér pro krokové motory, který je schopen řídit pouze jednu osu (nutnost tří kontrolérů pro tři osy *x*, *y* a *z*). Každý kontrolér je z přední strany (*Obr.* 37) vybaven dvěma vstupními konektory pro připojení k počítači buď přes mini-USB typu B, anebo sériovou linku RS-232, výstupním konektorem RS-232 pro připojení konektorů do řetězce a osm DIP přepínačů pro nastavení pro nastavení adresy a modulační frekvence (tzv. baud rate).

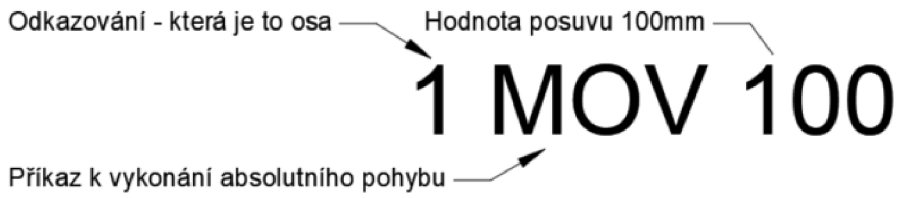
Obr. 37 Přední strana řídícího kontroléru [45]

Ze zadní strany (*Obr. 38*) je kontrolér opatřen konektorem pro vstup napájení, konektorem pro externí vstupy a výstupy, konektorem pro ovládání pomocí joysticku a konektorem HD D-sub 26 pro připojení k danému pohonu.

Obr. 38 Zadní strana řídícího kontroléru [45]

Aby bylo možné ovládat všechny tři osy najednou přes software PIMicroMove, který slouží k programování pohonů od firmy PI, bylo nutné zapojit jednotlivé konektory do řetězce (do série). Každý kontrolér zapojený v řetězci musí mít přes DIP přepínače originální adresu a stejnou modulační frekvenci s ostatními kontroléry v řetězci. První kontrolér je zapojen přímo do počítače přes jeden ze vstupních konektorů. Další kontrolér je následně zapojen z výstupního konektoru RS-232 předchozího kontroléru do vstupního konektoru RS-232 dalšího kontroléru, aby byl vytvořen řetězec.

Při použití tohoto zapojení lze ovládat jednotlivé osy odděleně nebo najednou pomocí macro programů. Programování je prováděno na principu assembleru, kdy první část je odkazování, o jakou osu se jedná, druhá část je příkazová (například absolutní pohyb – MOV) a třetí část udává hodnotu, které chceme dosáhnout (viz *Obr. 39*).



Obr. 39 Ukázka struktury příkazu

Pro názornost je zde uveden zkušební program, který má simulovat funkci tisknutí čtvercového výtisku (viz *Obr. 40*).

```
//## 1 - C-663 on USB DaisyChain: PI C-663 Mercury-Step  SN 0022550054, device 1 (axis 1)
//## 2 - C-663 on USB DaisyChain: PI C-663 Mercury-Step  SN 0022550054, device 2 (axis 2)
//## 3 - C-663 on USB DaisyChain: PI C-663 Mercury-Step  SN 0022550054, device 3 (axis 3)
1 VEL 1 20
2 VEL 2 20
3 VEL 3 10
1 MOV 1 100
2 MOV 2 100
3 FPL
1 VEL 1 40
2 VEL 2 40
3 VEL 3 15
255 WAC #5 = 0
0 LOOP 10
1 MOV 1 150
1 WAC ONT? 1 = 1
2 MOV 2 150
2 WAC ONT? 2 = 1
1 MOV 1 50
1 WAC ONT? 1 = 1
2 MOV 2 50
2 WAC ONT? 2 = 1
3 MVR 3 -10
3 WAC ONT? 3 = 1
0 ENDLOOP
```

Obr. 40 Zkušební program pro tisk

9.2.2. Řízení pomocí PLC USP-070-B10

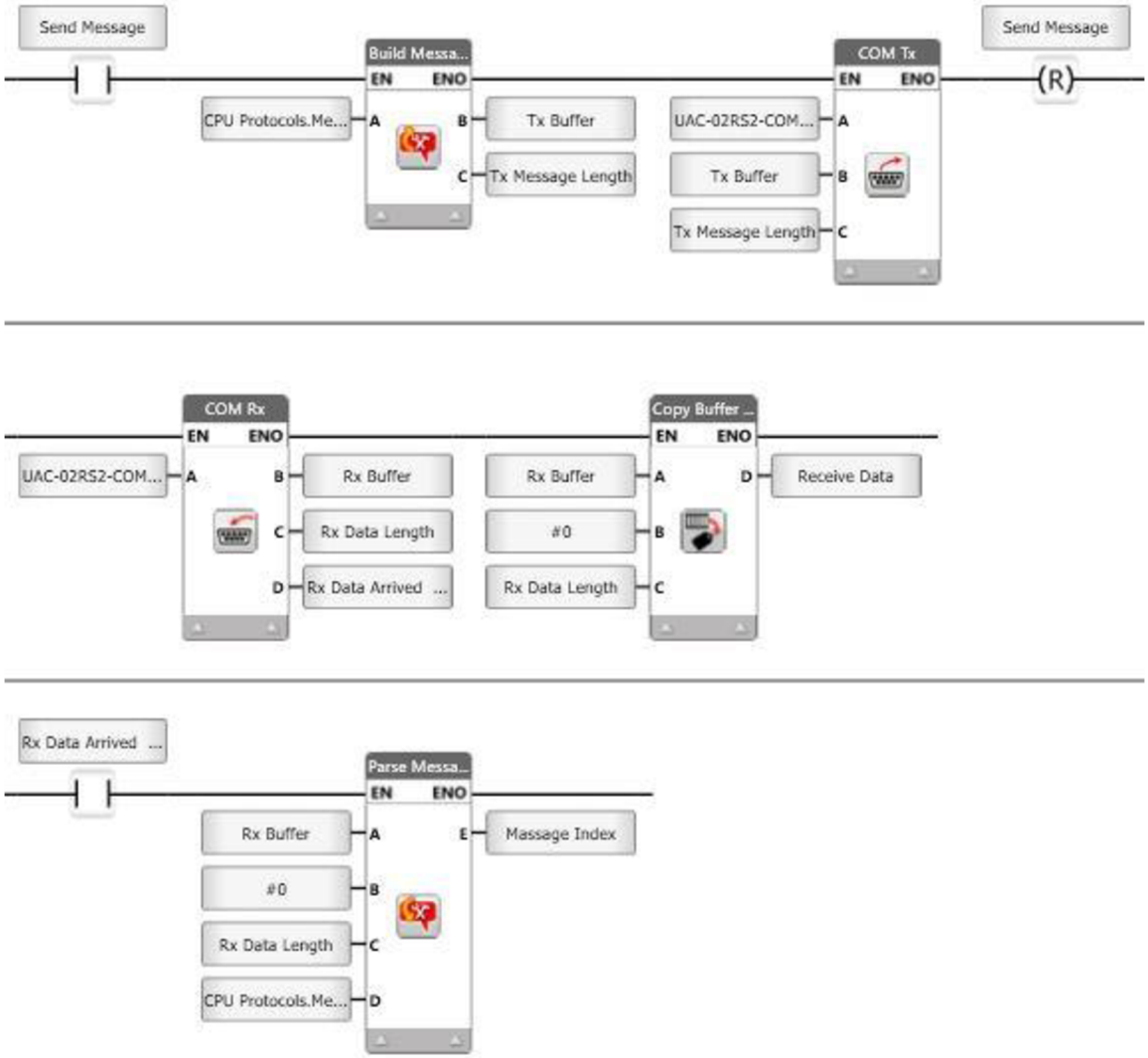
Jedná se o programovatelný automat od firmy Unitronics, který se skládá z HMI panelu, konektoru pro přívod elektrické energie a následně komunikační konektory. Jedná se o modulární systém, kdy se k zadní části HMI panelu připojuje modul CPU (centrální procesorová jednotka), který obstarává strojové instrukce a obsluhuje program. K CPU se následně připojují vstupo/výstupové (IO) moduly nebo komunikační moduly (COM) pro komunikaci po různých protokolech (*Obr. 41*). Programování bylo prováděno v programu UniLogic, který se programuje podle tzv. ladder diagramu.

Obr. 41 Modulární koncepce PLC firmy Unitronics [46]

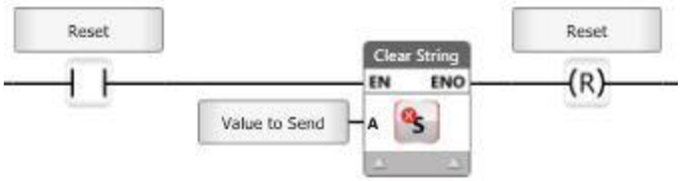
V této kapitole bylo realizováno rozpohybování pouze v jedné ose, kde jako první bylo nutné vytvořit komunikační program přes sériovou linku RS-232 tak, aby PLC posílalo příkazy do kontroléru, kterým bude "rozumět" a přepošle příkazy do dané osy. Tato část programu je zobrazena na *Obr. 42*. První řádek na obrázku převádí textové zadání příkazu, které bude zadáno v PLC na strukturu příkazu, kterou lze posílat sériovou linkou. Zbylé řádky převádí strukturu příkazu, která je posílána sériovou linkou na text, který bude možné následně přečíst v PLC.

Dále byly vytvořeny logické funkce pro zasílání příkazů, které budou nejvíce využitelné jako je referování, nastavení rychlosti, zrychlení a posuvu nebo vymazání. Funkce budou fungovat na principu napsaní hodnoty na displeji PLC a po stisknutí tlačítka vloženy do textového zadání příkazu, který bude posílán přes sériovou linku do kontroléru. První část příkazů symbolizuje tlačítko, které je zmáčknuto uživatelem a na konci každého řádku je resetováno. Druhá část příkazů (která je uprostřed) symbolizuje textovou strukturu příkazu, který je následně posílán přes sériovou linku. Všechny tyto části jsou zobrazeny na *Obr. 43-45*.

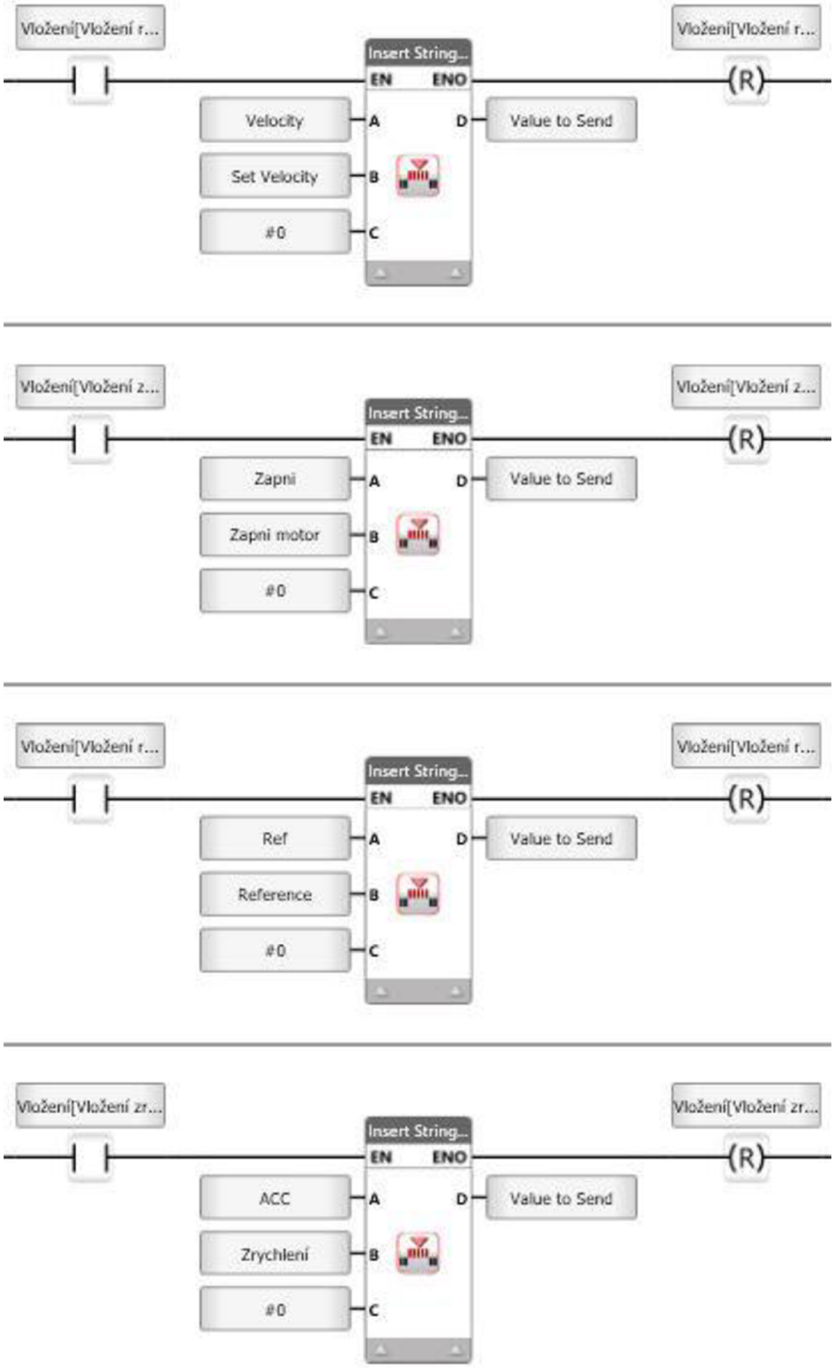
Jako poslední bylo vytvořeno prostředí displeje, které obsahovalo jednotlivé zadávající a posílající příkazy. Toto prostředí se následně zobrazuje na displeji HMI panelu jako ovládání daného pohonu osy. Na *Obr. 46* je zobrazeno prostředí, které bude zobrazeno na displeji PLC.



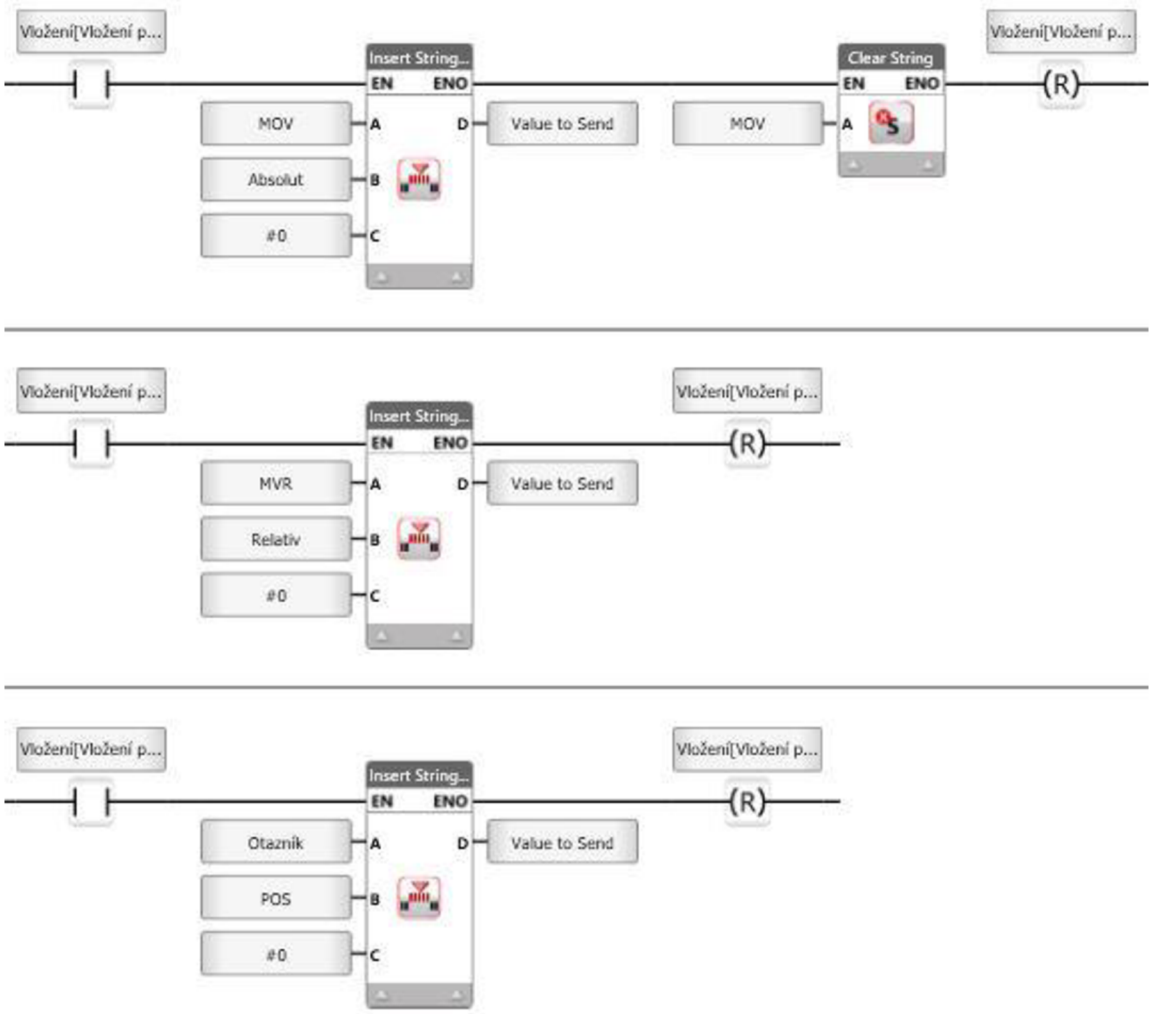
Obr. 42 Struktura programu pro komunikaci přes sériovou linku



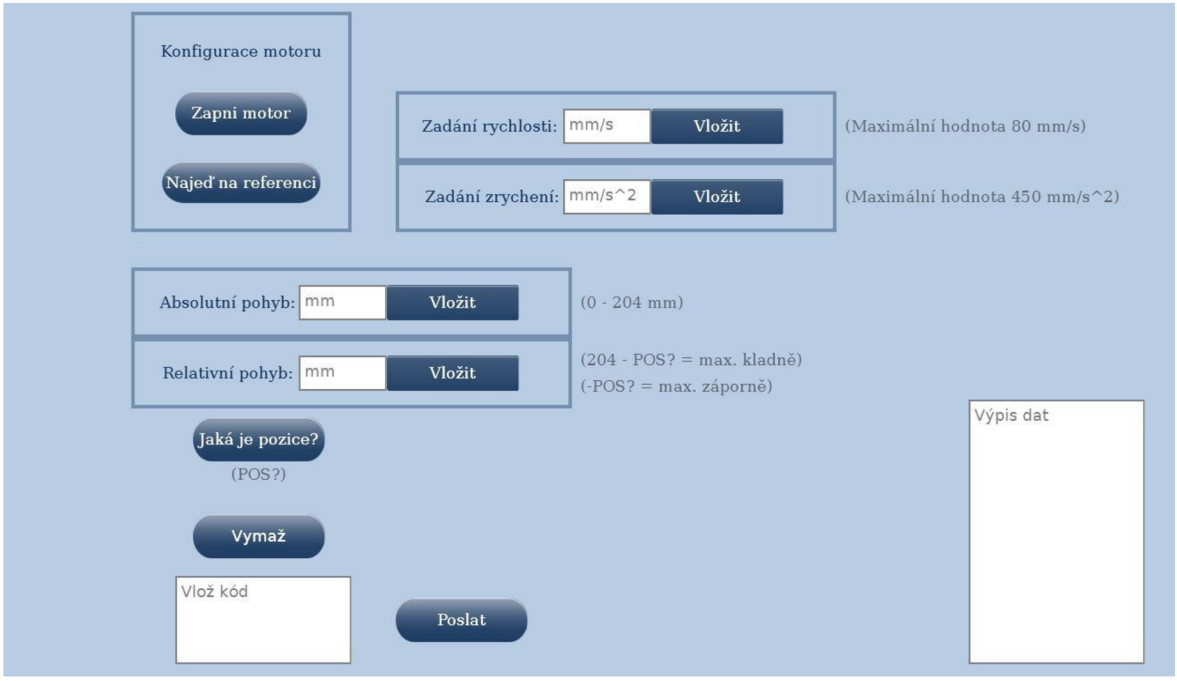
Obr. 43 Struktura programu pro vymazání textu



Obr. 44 Struktura programu pro vkládání příkazů k zaslání 1



Obr. 45 Struktura programu pro vkládání příkazů k zaslání 2



Obr. 46 Vytvořené rozhraní na display PLC

10. Závěr

Byla provedena podrobná rešerše v oblasti 3D tiskových technologií se zaměřením na sklo, kde technologie byly rozděleny podle normy ISO/ASTM 52900:2015(en) [5] podle principu výroby. Rozdělení bylo popsáno ze základního principiálního hlediska a následně z pohledu skelných výrobků, kde v závěru kapitoly 3. byly tyto technologie shrnuty a byl proveden výběr technologie, která byla následně využita v diplomové práci (Direct energy deposition – DED). V rámci rešerše byl proveden průzkum v oblasti laserových technologií, kde tyto technologie byly stručně popsány z pohledu základního principu a konstrukce. Následně byly laserové technologie rozděleny do jednotlivých skupin podle různých kritérií, kde následně bylo popsáno rozdělení podle typu aktivního prostředí. Závěrem kapitoly 4. byl specifikován laser využívající CO_2 plynové aktivní prostředí, který byl následně využit v diplomové práci.

Následoval návrh vlastní koncepce konstrukce 3D tiskárny, kde v první řadě byly vybrány a specifikovány pohony, které se budou využívat. Tyto lineární pohony byly vybrány od firmy Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG [36]. Mimo třech lineárních pohonů, které byly stanovené zadáním, byl navržen ještě přídavný rotační pohon z důvodu zvýšení pohyblivosti mechaniky, která je v rámci vybrané technologie DED výhodnější. Tento rotační pohon byl vybrán od firmy TG drives [37]. Po výběru jednotlivých pohonů byla vytvořena konstrukce, která spojuje jednotlivé pohony v manipulační zařízení. Pohony v prvních dvou osách (*x* a *y*) byly spojeny přímo na sebe vzhledem k jejich kompatibilnosti, kterou výrobce nabízel. Následně byly vytvořeny dvě příruby, kde první spojuje pohon v ose *y* s pohonem v ose *z* a druhá spojuje pohon v ose *z* s rotačním pohonem. Byl vytvořen tiskový stolek, který byl připojen na rotační pohon a plechové součásti pro připevnění energetických řetězců, které byly připojeny na pohon v ose *y*. Veškeré spojení byly tvořeny kolíkovými a šroubovými spoji.

Dále bylo provedena výpočtová část, která se týkala dimenzování mechaniky. Výpočty byly provedeny v oblasti opakovatelné přesnosti polohování, kde bylo počítáno, jak vysoká bude přesnost polohování kartézského systému pohonů. Poté byla počítána dynamická únosnost, která využívala Lagrangeovu rovnici 2. druhu, kde přes kinetické a potenciální energie byla specifikována únosnost jednotlivých pohonů kartézského systému. Výstupem únosnosti byla hmotnost skla, kterou jednotlivé pohony budou schopni maximálně unést vzhledem ke konstrukci manipulátoru. Následně byly pohony kontrolovány na klopný moment. Jako poslední byly provedeny výpočty zatížení motorů jednotlivých pohonů, kde podle zvolených průběhů rychlostí byly následně počítány momenty působící na hřídel motoru, které následně byly porovnávány s momentem, který je schopen motor vyvinout.

V návaznosti byla vytvořena celková konstrukce 3D tiskárny, která zahrnovala rámovou konstrukci z extrudovaných profilů od firmy MayTec [42] s danými komponentami od stejného

výrobce. Tato konstrukce se sestávala ze tří sekcí nad sebou. Ve spodní první sekci bylo uloženo technologické příslušenství (chladící agregát a rozváděč), druhá sekce obsahovala manipulační zařízení s tiskovým stolkem, kde bude prováděn tisk a třetí vrchní sekce obsahovala konstrukci laserové technologie, která byla vytvořena pro umístění zdroje laserového paprsku, který se bude přes soustavu zrcátek přivádět do druhé sekce. Dále byly vytvořeny ohýbané plechové díly, které budou oddělovat jednotlivé sekce mezi sebou a budou přišroubovány přímo na rámovou konstrukci. Závěrem byly vytvořeny vnější plechové a plastové kryty spolu s vrchním plechovým odklápěcím krytem a plastovými dvířky pro bezpečné zakrytování a vizuální stránku konstrukce. Po vytvoření konstrukce 3D tiskárny byla zhotovena výkresová dokumentace veškerých dílů, kde bylo využíváno sestavných a výrobních výkresů.

V rámci práce byla provedena i celková montáž konstrukce tiskárny s návazností na oživování pomocí řídících kontrolérů firmy Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG [36] a pomocí programovatelného automatu (PLC) od firmy Unitronics [46].

Navržené zařízení bude nadále výzkumně využíváno na Katedře sklářských a robotických strojů (KSR) v oblasti výzkumu 3D tisku, kde hlavní zaměření bude na vývoj podávacího modulu a vývoj softwarového vybavení pro ovládání zařízení a uživatelskou přívětivost. Dále se bude vývoj zaměřovat na výslednou kvalitu tisknutých objektů a jednotlivé vlivy okrajových podmínek jako nastavení rychlostí, teplot nebo celkové ustavení směru laserového paprsku.

Závěrem byl vytvořen koncepční návrh laboratorní 3D tiskárny, který byl zhotoven podle zadání a všechny cíle práce byly splněny.

Zdroje:

[1] XU, Yuanyuan, Xiaoyue WU, Xiao GUO, Bin KONG, Min ZHANG, Xiang QIAN, Shengli MI a Wei SUN. The Boom in 3D-Printed Sensor Technology. *Sensors* [online]. 2017, **17**(5) [cit. 2023-01-25]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s17051166

[2] ALFAIFY, Abdullah, Mustafa SALEH, Fawaz M. ABDULLAH a Abdulrahman M. AL-AHMARI. Design for Additive Manufacturing: A Systematic Review. *Sustainability* [online]. 2020, **12**(19) [cit. 2023-01-26]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su12197936

[3] Introduction to 3D printing - additive processes. *3D PRINTING - ADDITIVE* [online]. 2018 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: https://make.3dexperience.3ds.com/processes/introduction-to-additive-processes

[4] HOTAŘ, Vlastimil, Marie STARÁ, Veronika MÁKOVÁ a Barbora NIKENDEY HOLUBOVÁ. Present state of 3D printing from glass. *Pure and Applied Chemistry* [online]. 2022, **94**(2), 169-179 [cit. 2023-01-25]. ISSN 0033-4545. Dostupné z: doi:10.1515/pac-2021-0707

[5] ISO/ASTM 52900:2015(en). *Additive manufacturing—General principles—Terminology* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en

[6] ZHANG, Dao, Xiaofeng LIU a Jianrong QIU. 3D printing of glass by additive manufacturing techniques: a review. *Frontiers of Optoelectronics* [online]. 2021, **14**(3), 263-277 [cit. 2023-02-20]. ISSN 2095-2759. Dostupné z: doi:10.1007/s12200-020-1009-z

[7] WONG, Kaufui V. a Aldo HERNANDEZ. A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering* [online]. 2012, **2012**, 1-10 [cit. 2023-02-10]. ISSN 2090-5130. Dostupné z: doi:10.5402/2012/208760

[8] BAUDET, E., Y. LEDEMI, P. LAROCHELLE, S. MORENCY a Y. MESSADDEQ. 3D-printing of arsenic sulfide chalcogenide glasses. *Optical Materials Express* [online]. 2019, **9**(5) [cit. 2023-02-13]. ISSN 2159-3930. Dostupné z: doi:10.1364/OME.9.002307

[9] KLEIN, John, Michael STERN, Giorgia FRANCHIN, et al. Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2015, **2**(3), 92-105 [cit. 2023-02-13]. ISSN 2329-7662. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2015.0021

[10] *Glass I (G3DP)* [online]. Cambridge, 2014 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: https://kayserworks.com/053204149098

[11] INAMURA, Chikara, Michael STERN, Daniel LIZARDO, Peter HOUK a Neri OXMAN. Additive Manufacturing of Transparent Glass Structures. *3D Printing and Additive*

Manufacturing [online]. 2018, **5**(4), 269-283 [cit. 2023-02-13]. ISSN 2329-7662. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2018.0157

[12] DUDUKOVIC, Nikola A., Lana L. WONG, Du T. NGUYEN, et al. Predicting Nanoparticle Suspension Viscoelasticity for Multimaterial 3D Printing of Silica–Titania Glass. *ACS Applied Nano Materials* [online]. 2018, **1**(8), 4038-4044 [cit. 2023-02-13]. ISSN 2574-0970. Dostupné z: doi:10.1021/acsanm.8b00821

[13] NGUYEN, Du T., Cameron MEYERS, Timothy D. YEE, et al. 3D-Printed Transparent Glass. *Advanced Materials* [online]. 2017, **29**(26) [cit. 2023-02-13]. ISSN 0935-9648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201701181

[14] DESTINO, Joel F., Nikola A. DUDUKOVIC, Michael A. JOHNSON, et al. 3D Printed Optical Quality Silica and Silica–Titania Glasses from Sol–Gel Feedstocks. *Advanced Materials Technologies* [online]. 2018, **3**(6) [cit. 2023-02-13]. ISSN 2365-709X. Dostupné z: doi:10.1002/admt.201700323

[15] SASAN, Koroush, Andrew LANGE, Timothy D. YEE, et al. Additive Manufacturing of Optical Quality Germania–Silica Glasses. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. 2020, **12**(5), 6736-6741 [cit. 2023-02-13]. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.9b21136

[16] DYLLA-SPEARS, Rebecca, Timothy D. YEE, Koroush SASAN, et al. 3D printed gradient index glass optics. *Science Advances* [online]. 2020, **6**(47) [cit. 2023-02-13]. ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.abc7429

[17] KOTZ, Frederik, Karl ARNOLD, Werner BAUER, et al. Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. *Nature* [online]. 2017, **544**(7650), 337-339 [cit. 2023-02-14]. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/nature22061

[18] ONEY, Faye. Newest glass material 'Glassomer' is used to fabricate small glass structures. *The American Ceramic Society* [online]. Columbus, 2018 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: https://ceramics.org/ceramic-tech-today/biomaterials/newest-glass-material-glassomer-is-used-to-fabricate-small-glass-structures

[19] KOTZ, Frederik, Alexander S. QUICK, Patrick RISCH, Tanja MARTIN, Tobias HOOSE, Michael THIEL, Dorothea HELMER a Bastian E. RAPP. Two-Photon Polymerization of Nanocomposites for the Fabrication of Transparent Fused Silica Glass Microstructures. *Advanced Materials* [online]. 2021, **33**(9) [cit. 2023-02-14]. ISSN 0935-9648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.202006341

[20] KOTZ, Frederik, Norbert SCHNEIDER, Andreas STRIEGEL, et al. Glassomer-Processing Fused Silica Glass Like a Polymer. *Advanced Materials* [online]. 2018, **30**(22) [cit. 2023-02-14]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201707100

[21] LIU, Chang, Bin QIAN, Rongping NI, Xiaofeng LIU a Jianrong QIU. 3D printing of multicolor luminescent glass. *RSC Advances* [online]. 2018, **8**(55), 31564-31567 [cit. 2023-02-14]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C8RA06706F

[22] ARITA, Ryoya, Motoyuki IIJIMA, Yoko FUJISHIRO, Seitaro MORITA, Taichi FURUKAWA, Junichi TATAMI a Shoji MARUO. Rapid three-dimensional structuring of transparent SiO2 glass using interparticle photo-cross-linkable suspensions. *Communications Materials* [online]. 2020, **1**(1) [cit. 2023-02-14]. ISSN 2662-4443. Dostupné z: doi:10.1038/s43246-020-0029-y

[23] MOORE, David G., Lorenzo BARBERA, Kunal MASANIA a André R. STUDART. Three-dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins. *Nature Materials* [online]. 2020, **19**(2), 212-217 [cit. 2023-02-14]. ISSN 1476-1122. Dostupné z: doi:10.1038/s41563-019-0525-y

[24] FATERI, Miranda a Andreas GEBHARDT. Selective Laser Melting of Soda-Lime Glass Powder. *International Journal of Applied Ceramic Technology* [online]. 2015, **12**(1), 53-61 [cit. 2023-02-20]. ISSN 1546542X. Dostupné z: doi:10.1111/ijac.12338

[25] DATSIOU, Kyriaki Corinna, Ehab SALEH, Fiona SPIRRETT, Ruth GOODRIDGE, Ian ASHCROFT a Dave EUSTICE. Additive manufacturing of glass with laser powder bed fusion. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 2019, **102**(8), 4410-4414 [cit. 2023-02-20]. ISSN 0002-7820. Dostupné z: doi:10.1111/jace.16440

[26] DATSIOU, K.C., F. SPIRRETT, I. ASHCROFT, M. MAGALLANES, S. CHRISTIE a R. GOODRIDGE. Laser powder bed fusion of soda lime silica glass: Optimisation of processing parameters and evaluation of part properties. *Additive Manufacturing* [online]. 2021, **39** [cit. 2023-02-20]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2021.101880

[27] LUO, Junjie, Luke J. GILBERT, Chuang QU, Robert G. LANDERS, Douglas A. BRISTOW a Edward C. KINZEL. Additive Manufacturing of Transparent Soda-Lime Glass Using a Filament-Fed Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2017, **139**(6) [cit. 2023-02-21]. ISSN 1087-1357. Dostupné z: doi:10.1115/1.4035182

[28] VON WITZENDORFF, Philipp, Leonhard POHL, Oliver SUTTMANN, Peter HEINRICH, Achim HEINRICH, Jörg ZANDER, Holger BRAGARD a Stefan KAIERLE. Additive manufacturing of glass: CO2-Laser glass deposition printing. *Procedia CIRP* [online]. 2018, **74**, 272-275 [cit. 2023-02-21]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2018.08.109

[29] SIMPLE SEARCH. *WIPO IP Portal* [online]. Geneva: WIPO [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: https://patentscope.wipo.int/search/en/search.jsf

[30] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87240-65-6.

[31] HOMMER, Jan. *Lasery* [online]. 2009 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z:https://dspace.jcu.cz/bitstream/handle/123456789/27598/Lasery.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta.

[32] MARKOVÁ, Barbora. *LASERY A JEJICH BIOLOGICKÉ ÚČINKY* [online]. 2016 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z:https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/77140/BPTX_2014_1_11160_0_454643_0_159549.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové, Katedra biofyziky a fyzikální chemie.

[33] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Lasery. *Encyklopedie fyziky* [online]. c2006-2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/775-lasery

[34] VOJTA, Filip. *PRINCIP LASERU* [online]. 2009 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: https://old.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf. Semestrální práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích Pedagogická fakulta.

[35] WITTEMAN, W. J. *The CO2 Laser* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1987 [cit. 2023-03-24]. Springer Series in Optical Sciences. ISBN 978-3-662-13617-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-47744-0

[36] Stages with Stepper, DC & Brushless DC (BLDC) Motors. *PI - Physik Instrumente* [online]. Karlsruhe: Physik Instrumente (PI) GmbH & Co., © 1996-2023 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: https://www.physikinstrumente.com/en/products/linear-stages/stages-with-stepper-dc-brushless-dc-bldc-motors

[37] DriveSpin. *TG drives* [online]. Brno: TG drives, © 2006–2023 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: https://www.tgdrives.cz/prevodovky-a-linearni-jednotky/rotacni-aktuatory-drivespin/

[38] NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. *Konstrukce robotů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-216-7.

[39] SKALLA, Jan. *Návrh a dimensování polohových servomechanismů obráběcích strojů* [online]. Liberec, 1995 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/38668. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci.

[40] RUIDER, Pavel. *Krokové motory*. Náchod: ZSE MEZ Náchod koncernový podnik, 1985.

[41] Krokové motory. *Drátek.cz* [online]. Havlíčkův Brod: ECLIPSERA, 2023 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/48394-krokovy-motor-nema17-47mm-42hd6021-03.html

[42] Profilkatalog. *MayTec* [online]. Olching: MayTec, © 2023 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: https://maytec.com.de/index.php?id=24

[43] Laserová gravírovací plotry. *Pajtech* [online]. Polsko: DIOLUT sp.z o.o., 2022 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://pajtech.cz/laserov-gravrovac-plotry-c-785_775.html

[44] Kompaktní rozváděčová skříň AX Základní skříň AX z ocelového plechu. *Rittal* [online]. Rittershausen: Rittal, 2023 © Rittal s.r.o. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.rittal.com/cz-cs/products/PG0002SCHRANK1/PG0021SCHRANK1/PGRP30564SCHRANK1/PRO70743?variantId=1039000

[45] C-663.12 Mercury Step Stepper Motor Controller, 1 Axis. *PI - Physik Instrumente* [online]. Karlsruhe: Physik Instrumente (PI) GmbH & Co., © 1996-2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.physikinstrumente.com/en/products/controllers-and-drivers/motion-controllers-drivers-for-linear-torque-stepper-dc-servo-motors/c-66312-mercury-step-stepper-motor-controller-900553

[46] UniStream. *UNITRONICS* [online]. Izrael: Unitronics, © 2023 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: https://www.unitronicsplc.com/unistream-series-unistream7/

Seznam obrázků

Obr. 1 Základní metody 3D tisku A – FDM, B - SLA, C - SLS/SLM [1] 11

Obr. 2 Metoda FDM pro chalkogenidové sklo [4]. 14

Obr. 3 Metoda G3DP [4] 15

Obr. 4 Metoda DIW [4] 16

Obr. 5 Metoda SLA [4] 18

Obr. 6 Metoda SLS [4] 19

Obr. 7 Metoda DED [4] 20

Obr. 8 Emise záření a) absorpce záření, b) spontánní emise záření, c) stimulovaná emise záření [29] 21

Obr. 9 Základní konstrukce laseru [30] 22

Obr. 10 Kinematické schéma polohovacího periferie 24

Obr. 11 Pohon L812.091400 (osy x a y) 25

Obr. 12 Pohon L-406.40SD00 (osa z) 26

Obr. 13 Pohon DS 50 (rotace stolku) 27

Obr. 14 Příruba mezi pohony y a z 28

Obr. 15 Příruba mezi pohonem v ose z a rotačním aktuátorem 29

Obr. 16 Tiskový stolek 29

Obr. 17 Plechy s energetickými řetězy 30

Obr. 18 Konstrukce manipulátoru 31

Obr. 19 Závislost maximální hmotnosti na vzdálenosti od osy prvního a druhého pohonu [36] 37

Obr. 20 Průběh rychlosti prvního pohonu v ose x 38

Obr. 21 Průběh rychlosti třetího pohonu v ose z 41

Obr. 22 Konstrukce 3D tiskárny (zakrytovaná) 45

Obr. 23 Konstrukce 3D tiskárny (odkrytovaná) 46

Obr. 24 Rámová konstrukce 3D tiskárny od firmy MayTec [41] 47

Obr. 25 Komponenty rámové konstrukce od firmy MayTec [41] 48

Obr. 26 Rámová konstrukce 3D tiskárny s vnitřními plechy 49

Obr. 27 Rámová konstrukce 3D tiskárny s obvodovými plechy 49
Obr. 28 Laserová technologie 3D tiskárny 50
Obr. 29 Technologické příslušenství 3D tiskárny 51
Obr. 30 Montáž rámové konstrukce 52
Obr. 31 Montáž manipulačního zařízení 53
Obr. 32 Montáž laserové technologie 53
Obr. 33 Otevřená konstrukce 3D tiskárny 54
Obr. 34 Uzavřená (finální) konstrukce 3D tiskárny 54
Obr. 35 Elektrické zapojení rozváděče 55
Obr. 36 Řídící kontrolér a PLC [44 a 45] 56
Obr. 37 Přední strana řídícího kontroléru [45] 56
Obr. 38 Zadní strana řídícího kontroléru [45] 56
Obr. 39 Ukázka struktury příkazu 57
Obr. 40 Zkušební program pro tisk 57
Obr. 41 Modulární koncepce PLC firmy Unitronics [46] 58
Obr. 42 Struktura programu pro komunikaci přes sériovou linku 59
Obr. 43 Struktura programu pro vymazání textu 59
Obr. 44 Struktura programu pro vkládání příkazů k zaslání 1 60
Obr. 45 Struktura programu pro vkládání příkazů k zaslání 2 61
Obr. 46 Vytvořené rozhraní na display PLC 61

Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry pohonu L-812.091400 [36] 25

Tab. 2 Parametry pohonu L-406.40SD00 [36] 26

Tab. 3 Parametry pohonu DS 50 [37] 27

Tab. 4 Polohové odchylky jednotlivých os 32

Tab. 5 Hmotnosti jednotlivých částí systému manipulátoru 33

Tab. 6 Parametry pro výpočet zátěže motoru v ose x 39

Tab. 7 Parametry pro výpočet zátěže motoru v ose z 42

Seznam příloh (výkresová dokumentace)

- 3-DP S21000171-0-0 (sestavný výkres 3D tiskárny)
- 3-DP S21000171-0-1 (výrobní výkres krycího plechu 1)
- 3-DP S21000171-0-2 (výrobní výkres krycího plechu 2)
- 3-DP S21000171-0-3 (výrobní výkres krycí desky 1)
- 3-DP S21000171-0-4 (výrobní výkres krycí desky 2)
- 3-DP S21000171-0-5 (výrobní výkres krycí desky 3)
- 3-DP S21000171-0-6 (výrobní výkres desky dvířek)
- 3-DP S21000171-1-0 (sestavný výkres horního krytu)
- 3-DP S21000171-1-1 (výrobní výkres vrchního krytu)
- 3-DP S21000171-1-2 (výrobní výkres bočního pravého krytu)
- 3-DP S21000171-1-3 (výrobní výkres bočního levého krytu)
- 4-DP S21000171-1-4 (výrobní výkres bočního pravého krytu)
- 4-DP S21000171-1-5 (výrobní výkres bočního levého krytu)
- 3-DP S21000171-2-0 (sestavný výkres rámu s technologií a plechy)
- 4-DP S21000171-2-1 (výrobní výkres držáku rozváděče)
- 4-DP S21000171-2-2 (výrobní výkres trubky pro rozvod energie)
- 3-DP S21000171-3-0 (sestavný výkres rámu s vnitřními plechy)
- 3-DP S21000171-3-1 (výrobní výkres plechu k manipulátoru 1)
- 3-DP S21000171-3-2 (výrobní výkres plechu k manipulátoru 2)
- 3-DP S21000171-3-3 (výrobní výkres plechu k manipulátoru 3)
- 3-DP S21000171-3-4 (výrobní výkres plechu k manipulátoru 4)
- 3-DP S21000171-3-5 (výrobní výkres plechu k technologii 1)
- 3-DP S21000171-3-6 (výrobní výkres plechu k technologii 2)
- 3-DP S21000171-3-7 (výrobní výkres plechu k technologii 3)
- 3-DP S21000171-3-8 (výrobní výkres regálu)
- 3-DP S21000171-4-0 (sestavný výkres manipulátoru)
- 3-DP S21000171-4-1 (výrobní výkres základové desky)
- 3-DP S21000171-5-0 (sestavný výkres laserové technologie)
- 3-DP S21000171-5-1 (výrobní výkres krytu technologie)
- 3-DP S21000171-5-2 (výrobní výkres desky technologie)
- 4-DP S21000171-5-3 (výrobní výkres stojanu zrcátka)
- 4-DP S21000171-5-4 (výrobní výkres krytky)
- 3-DP S21000171-6-0 (sestavný výkres rámu)
- 3-DP S21000171-7-0 (sestavný výkres stojanu)
- 3-DP S21000171-7-1 (výrobní výkres desky k pohonu v ose *y*)

- 4-DP S21000171-7-2 výrobní výkres desky k pohonu v ose *z*)
- 3-DP S21000171-7-3 (výrobní výkres žebra)
- 3-DP S21000171-8-0 (sestavný výkres podpěry)
- 4-DP S21000171-8-1 (výrobní výkres desky k pohonu v ose *z*)
- 3-DP S21000171-8-2 (výrobní výkres žebra)
- 3-DP S21000171-8-3 (výrobní výkres desky k rotačnímu aktuátoru)
- 3-DP S21000171-9-0 (sestavný výkres tiskového stolku)
- 4-DP S21000171-9-1 (výrobní výkres desky tiskového stolku)
- 4-DP S21000171-9-2 (výrobní výkres menšího ráměčku)
- 4-DP S21000171-9-3 (výrobní výkres válečku)
- 4-DP S21000171-9-4 (výrobní výkres příruby k rotačnímu aktuátoru)
- 4-DP S21000171-9-5 (výrobní výkres většího rámečku)
- 4-DP S21000171-9-6 (výrobní výkres redukce)
- 3-DP S21000171-10-0 (sestavný výkres plechů s energetickými řetězci)
- 3-DP S21000171-10-1 (výrobní výkres plechového žlabu)
- 3-DP S21000171-10-2 (výrobní výkres držáku pro energetické řetězce *y* a *z*)
- 4-DP S21000171-10-3 (výrobní výkres držáku pro energetický řetězec *z*)
- 3-DP S21000171-11-0 (sestavný výkres laserové hlavy)
- 4-DP S21000171-11-1 (výrobní výkres trnu)
- 3-DP S21000171-11-2 (výrobní výkres držáku hlavy)
- 4-DP S21000171-11-3 (výrobní výkres distančního bloku)
- 4-DP S21000171-12-0 (sestavný výkres útlumu laserového paprsku)
- 4-DP S21000171-12-1 (výrobní výkres držáku trubky)
- 4-DP S21000171-12-2 (výrobní výkres tlumící trubky)
- 4-DP S21000171-12-3 (výrobní výkres kroužku trubky)