

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

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

CNC plazmová řezačka

**Ondřej Diviš
Olomoucký kraj**

Šumperk 2023

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

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

CNC plazmová řezačka

CNC plasma cutter

Autoři: Ondřej Diviš

Škola: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola, Šumperk

Kraj: Olomoucký kraj

Konzultant: Roman Fiala

Šumperk 2023

Prohlášení

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

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

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Bohdíkovicích dne 26.2.2023

Ondřej Diviš

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mě při tvorbě tohoto projektu morálně i intelektuálně podporovali. Zvlášť bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Romanu Unzeitigovi za odborné vedení při tvorbě technické dokumentace a také Mgr. Romanu Fialovi za odbornou pomoc při tvorbě textové dokumentace.

Děkuji.

Anotace

Ve své práci jsem se zabýval návrhem a výrobou CNC plazmového stolu. Cílem mojí práce bylo zkonstruovat funkční stroj pro plazmové řezání, který bude schopný konkurovat komerčním CNC plazmovým stolům. V mojí práci jsem provedl rešerši existujících řešení, návrh stolu včetně výpočtů a simulací výkonnosti stroje, konstrukci stroje a testování funkčnosti. Výsledkem této práce je funkční CNC plazmový stůl s vysokou přesností a spolehlivostí.

Klíčová slova

CNC, plazma, hořák, dělič

Annotation

In my work, I dealt with the design and production of a CNC plasma table. The aim of my work was to design a functional machine for plasma cutting. In the work, I conducted a research of existing solutions and designed a table, including calculations and simulations of the machine's performance. The result of the work is a design of a functional CNC plasma table with high accuracy and reliability.

Keywords

CNC, plasma, torch, divider

OBSAH

<i>Úvod</i>	6
1.1 Vymezení tématu a cílů práce	6
1.2 Význam plazmového řezání v průmyslu	6
1.3 Motivace a důležitost výroby vlastního CNC	6
<i>Rešerše</i>	7
2.1 Přehled CNC strojů na trhu	7
2.2 Analýza výhod a nevýhod jednotlivých řešení	7
2.3 Shromáždění informací o materiálech technologiích a komponentech.....	8
<i>Návrh stolu</i>	9
3.1 Volba vhodné konstrukční koncepce a rozměrů stolu	9
3.2 Návrh pohonů, řídicího systému a programovacího prostředí	12
3.3 Konstrukční výpočty a simulace výkonnosti stolu.....	17
3.4 Výběr vhodných materiálů a součástek pro výrobu	23
3.4.1 Výpočet objemového zvětšení	25
4.1 Srovnání výsledků s původními cíli práce	7
<i>Seznam použité literatury</i>	11
<i>Seznam obrázků</i>	13

ÚVOD

1.1 Vymezení tématu a cílů práce

Hlavním cílem práce bylo vytvořit funkční stroj s vysokou přesností a spolehlivostí, který bude možné použít v malých průmyslových aplikacích za účelem prototypové a doplňkové produkce kovových součástí. K dosažení tohoto cíle byly provedeny rešerše existujících řešení, návrh stolu včetně výpočtů a simulací výkonnosti, procesu výroby a testování funkčnosti stroje. Zaměřil jsem se především na technickou stránku návrhu a výroby a na průmyslové využití.

1.2 Význam plazmového řezání v průmyslu

Plazmové řezání je důležitý proces v průmyslové výrobě s mnoha aplikacemi. Používá se za účelem řezání kovových plechů, trubek a profilů, pro výrobu různých konstrukcí a zařízení, výrobu ozdobných kovových prvků a speciálních součástek pro stroje. [1] Využití plazmového řezání najdeme i v těžbě a zpracování surovin, kde se používá k řezání kovových dílů a zařízení pro těžbu a dopravu surovin. V mojí práci se zaměřuji pouze na aplikace řezání kovových plechů. [2]

1.3 Motivace a důležitost výroby vlastního CNC

Výroba vlastního CNC plazmového stolu nabízí uživatelům vysokou flexibilitu a kontrolu nad každým aspektem stroje, což umožňuje navrhnout stůl přesně podle konkrétních potřeb uživatele, včetně velikosti, kapacity, rychlosti a přesnosti. Tato možnost úprav umožňuje vyrábět kovové díly s různou přesností, velikostí a rychlostí. Vlastní výroba stroje také umožňuje úpravy software a hardware stroje dle konkrétních potřeb uživatele a tím dělá stroj univerzálnějším. Můžeme si povšimnout, že na trhu dosud není dostatečné množství plazmových stolů pro všechny druhy aplikací. Proto jsem se rozhodl zkonstruovat nový stroj, který bude řešením pro širokou škálu nedostatků u komerčních strojů.

REŠERŠE

2.1 Přehled CNC strojů na trhu

Na českém trhu je k dispozici široká škála CNC plazmových stolů od různých výrobců, včetně významných značek jako jsou *Hypertherm* a *Lincoln Electric*. Dále jsou zde k dostání CNC plazmové stoly od značek jako je *Baileigh Industrial* nebo *Langmuir Systems*, které nabízejí kvalitní a cenově dostupné stroje pro hobby a menší průmyslové výroby. Avšak po důkladné analýze jednotlivých CNC stolů zjistíme, že žádný z komerčně dostupných strojů není ideální pro nízkonákladové doplňkové aplikace.

2.2 Analýza výhod a nevýhod jednotlivých řešení

Jako první třeba pečlivě zvážit požadované vlastnosti a náklady na plazmový stůl v závislosti na konkrétních potřebách a rozpočtu uživatele. Pokud provedeme důkladnou analýzu jednotlivých plazmových stolů, můžeme zjistit, že existují různé varianty s různými specifikacemi a cenami. Například *Langmuir Crossfire pro* [3] je sice cenově dostupný, avšak jeho konstrukce není vhodná pro manipulaci s těžkými plechy. Na druhé straně, *Langmuir XR* disponuje vyšší únosností, ale je dostupný pouze ve velkoformátovém provedení. Stůl *Baileigh Industrial PT-22*[4] nabízí stůl s robustní konstrukcí, ale nedisponuje vysokým zrychlením, což může mít za následek nepřesné hrany a lokální tvorbu okují.

Pokud se podíváme na stroje od značky *Lincoln Electric*, narazíme na model *Torchmate 4400*, který nabízí praktické řešení většiny našich konstrukčních problémů. Stůl kombinuje robustní konstrukci s vysokou únosností a přesností řezu, má kompaktní rozměry a zrychlení jednotlivých os je více než dostatečné. Nicméně, cena tohoto stolu začíná na 235 474,05 Kč, což může být pro některá průmyslová odvětví nedostupné, zejména pro řemeslnické práce a doplňkové průmyslové aplikace.

2.3 Shromáždění informací o materiálech technologiích a komponentech

Rozhodl jsem se detailně prozkoumat existující CNC stoly a získat informace o jejich výhodách, nevýhodách, funkcích a parametrech. K tomuto účelu jsem se zaměřil na průzkum forem majitelů CNC stolů a řemeslnických forem. Podařilo se mi také setkat se s dlouhodobým majitelem CNC stolu, který byl ochotný podělit se o jeho nabyté zkušenosti s prací na CNC stolu. Díky tomuto setkání jsem byl schopen lépe určit, na které aspekty stroje se zaměřit. Dále jsem čerpal z mých předešlých zkušeností, které jsem získal při návrhu mého prvního CNC stolu. Pomocí získaných informací jsem začal tvořit nový návrh stolu, který splní většinu uživatelských požadavků.

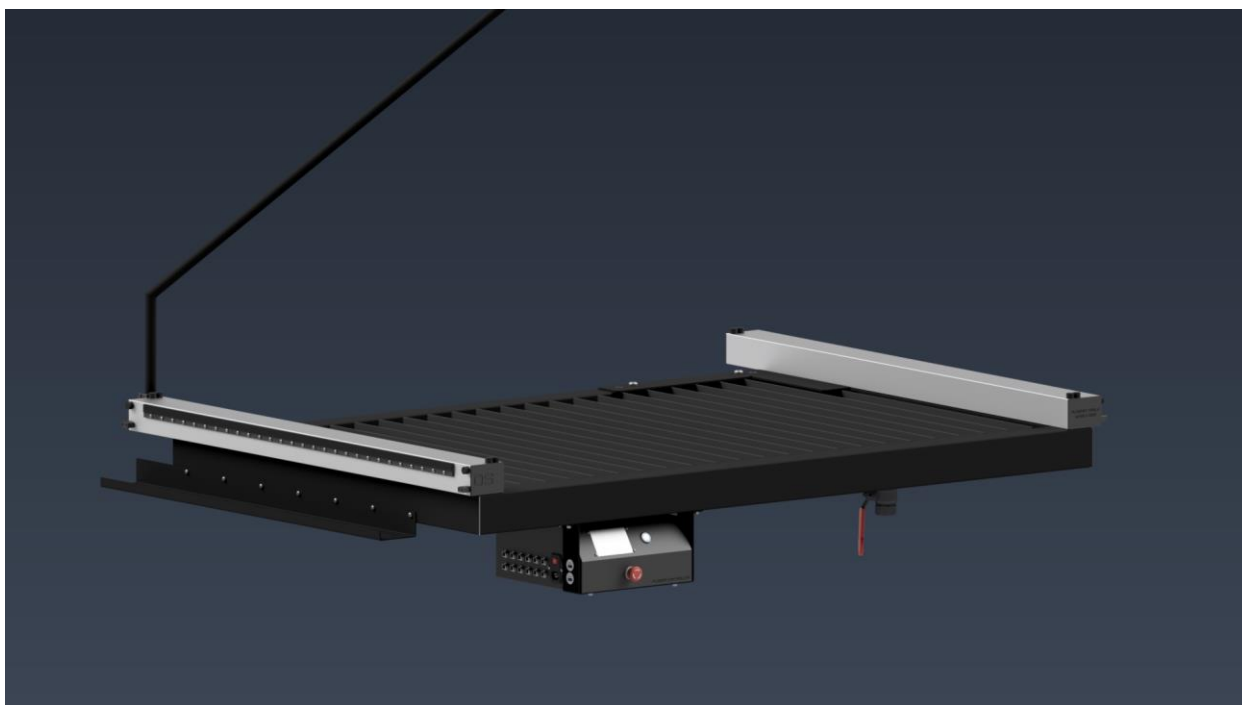
NÁVRH STOLU

3.1 Volba vhodné konstrukční koncepce a rozměrů stolu

Výběr konstrukční koncepce závisí na mnoha faktorech, jako jsou například dostupné materiály, očekávaná nosnost, požadavky na přesnost řezu, nebo úroveň finančních nákladů. Pro můj plazmový stůl jsem se rozhodl pro svařovanou konstrukci, která umožňuje dosáhnout dostatečné pevnosti a stability, v kombinaci se šroubenými spoji, které mi umožní v případě potřeby stroj rozebrat.

Rozměry pracovní plochy jsou dalším klíčovým faktorem při návrhu CNC stolu. Plocha musí být dostatečně velká pro práci s kusy materiálů různých rozměrů a zároveň dostatečně pevná pro přesné provedení řezu. Musíme také brát ohled na formáty plechů které jsou dostupné na trhu, abychom zbytečně nemuseli plechy zkracovat nebo naopak neplýtvali místem. Musíme také brát ohled na rozměry stroje samotného. Pro můj stůl jsem zvolil rozměry pracovní plochy 1260×850 mm. To znamená že docílíme kompaktních rozměrů stolu a zároveň zvládneme zpracovávat i větší formáty plechů.

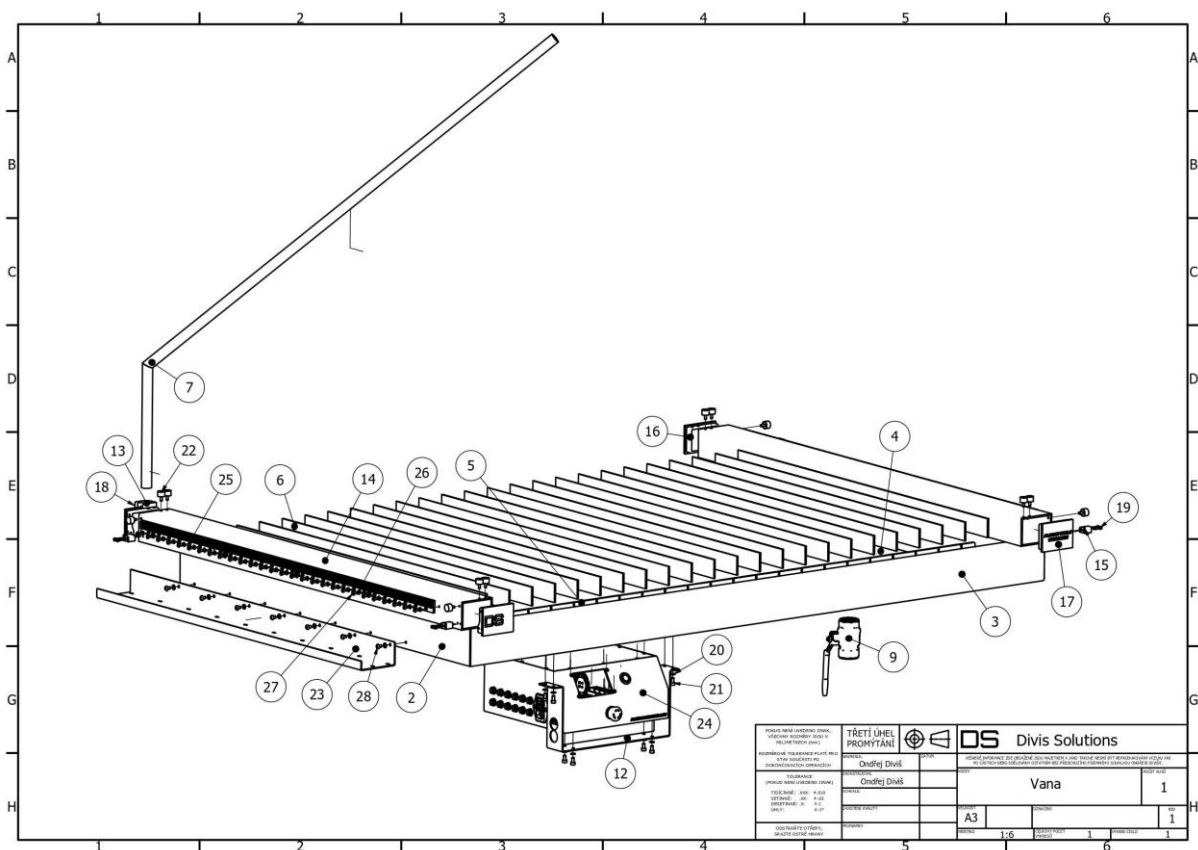
Dále jsem zvolil profily, ze kterých bude stůl zkonstruován. Pro dostatečnou stabilitu a únosnost jsem pro rám a nohy stolu zvolil ocelový profil o rozměrech $80 \times 60 \times 3$ mm. Pro spodní úložný prostor jsem zvolil profil $50 \times 50 \times 3$ mm. Takto navržený rám stolu bude dostatečně lehký pro snadnou manipulaci a zároveň dostatečně pevný pro práci s velkými řeznými rychlostmi a těžkými materiály.



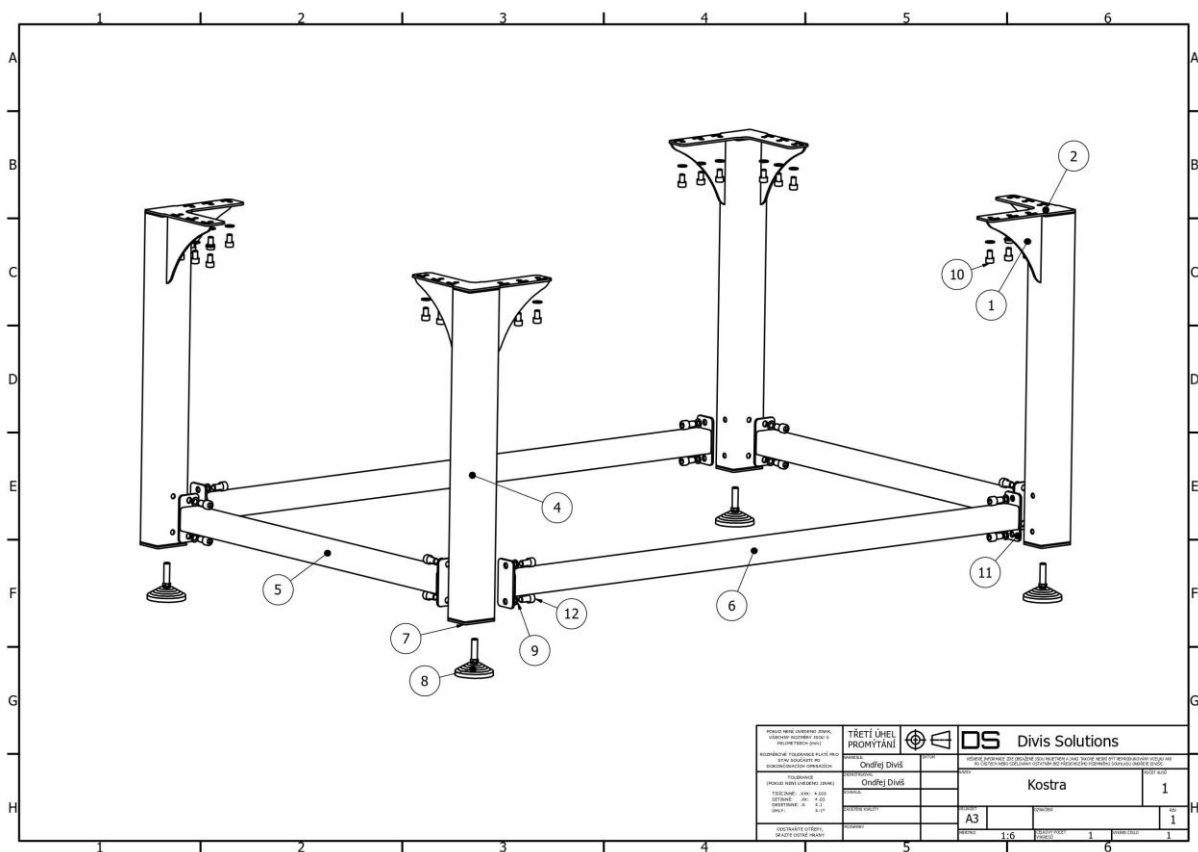
Obr. 1 Vodní Lázeň



Obr. 2 Konstrukce



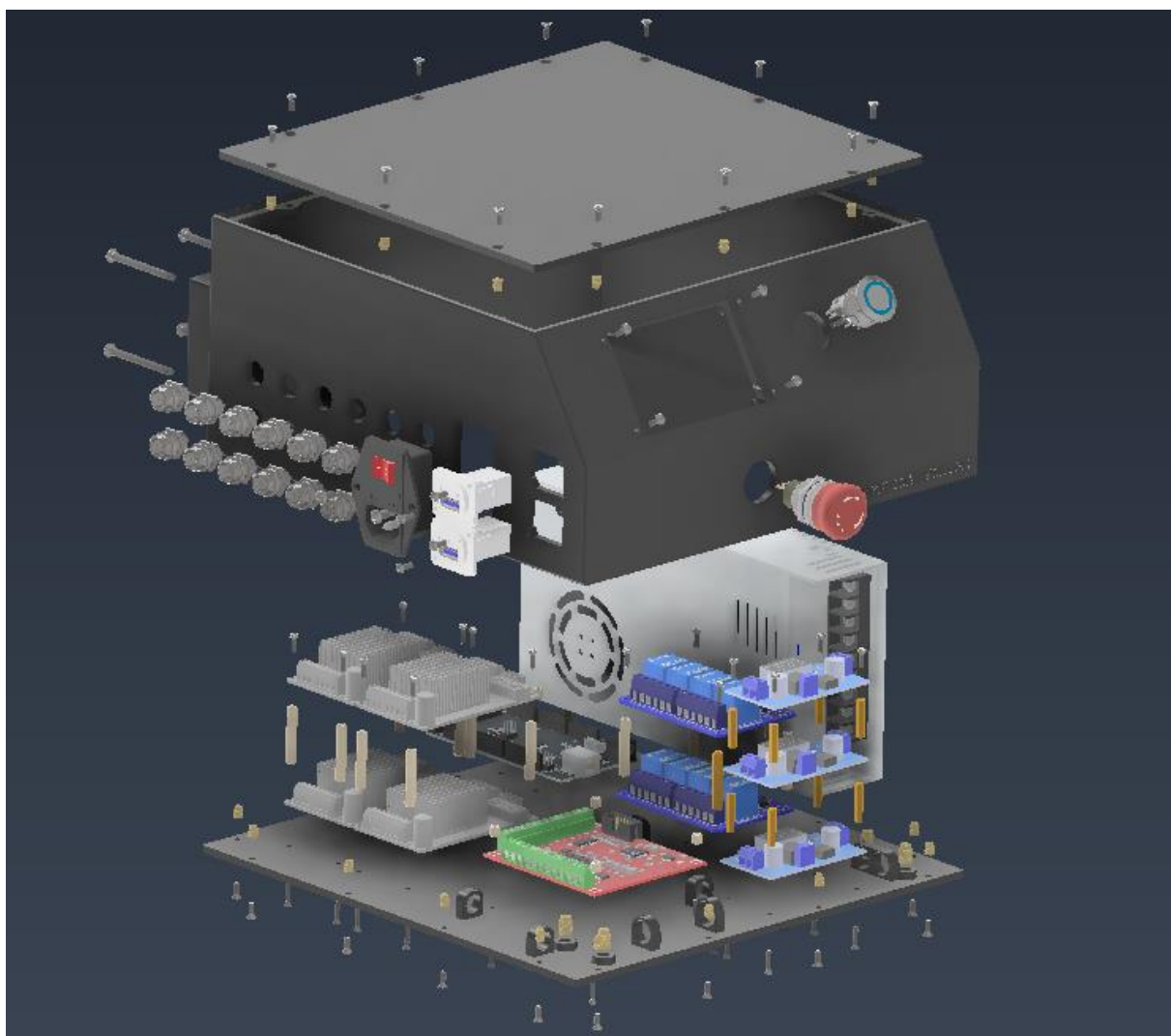
Obr. 3 Sestava – vodní lázeň



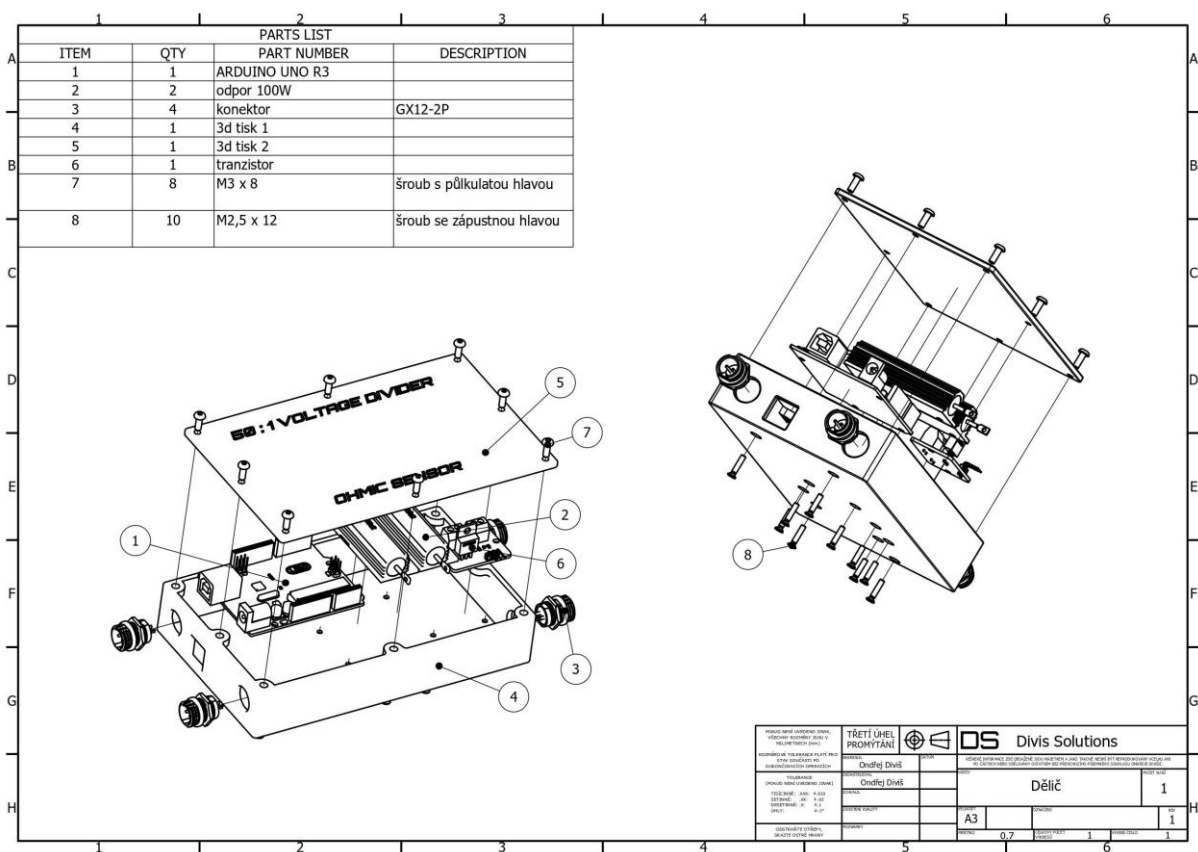
Obr. 4 Sestava – konstrukce

3.2 Návrh pohonů, řídicího systému a programovacího prostředí

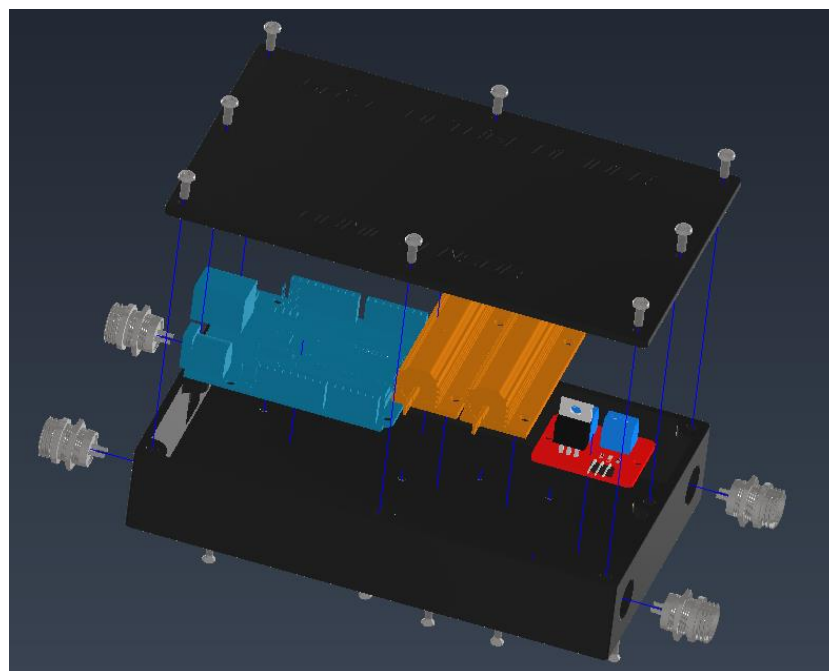
Pro pohony CNC stolu jsem zvolil kombinaci krokových motorů s plastovými ozubenými hřebeny a lineárními vozíky v kombinaci s hliníkovými profily. Pro programování a ovládání stroje je použit software Mach3, tento software nabízí veškeré funkce, které potřebuji. V budoucnu ale plánuji pro ovládání stroje použít GRBL software, který nabízí Bluetooth nebo WIFI připojení, nebo možnost připojení bezdrátového ovladače. [5] Výhodou GRBL softwaru je také jeho rozšířenost snadná úprava softwaru.



Obr. 5 Rozložení – rozvaděč



Obr. 8 Sestava – napěťový dělič



Obr. 9 Rozklad – napěťový dělič

3.3 Konstrukční výpočty a simulace výkonnosti stolu

Ve výpočtové části pro mě byly klíčové dva aspekty, a to rychlost a přesnost. Jako lineární vedení jsem zvolil hliníkové profily nejen kvůli jejich odolnosti vůči korozi, ale také proto, že v porovnání s obyčejnými ocelovými nebo nerezovými profily jsou mnohem přesnější a lehčí.

To znamená, že můžeme zvýšit zrychlení nebo snížit nároky na robustnost stroje z důvodu působení vibrací a chvění. Profil, který bude v pohybu je na mém stroji pouze profil osy Y. Profil je na každé straně ukotven a poháněn krokovými motory. Vzdálenost mezi zakotvenými body je 1350 mm. Na takové vzdálenosti nám při prudkém zrychlení může vznikat nežádoucí průhyb. Proto musíme provést kontrolu zatížení. [6]

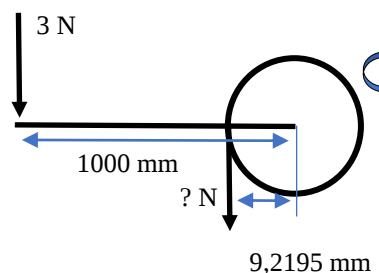
Výpočet:

1. Výpočet síly motoru

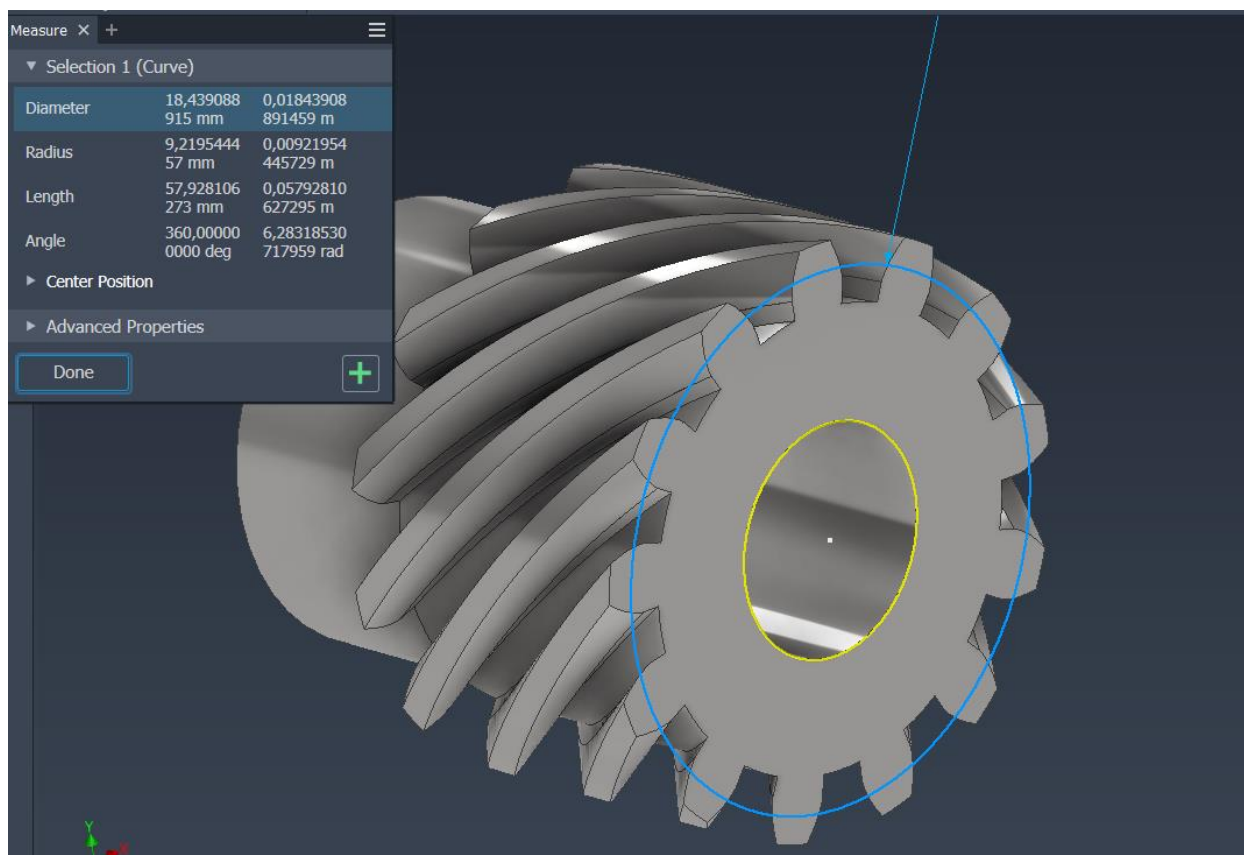
Pomocí grafického znázornění můžeme vytvořit jednoduchou rovnici, pomocí které vypočítáme Tlačnou sílu. (výpočet síly platí pouze pro jeden krokový motor)

Krouticí moment..... 3 Nm
Průměr odvalovací kružnice... 18,439 mm
Tlačná síla..... ? N

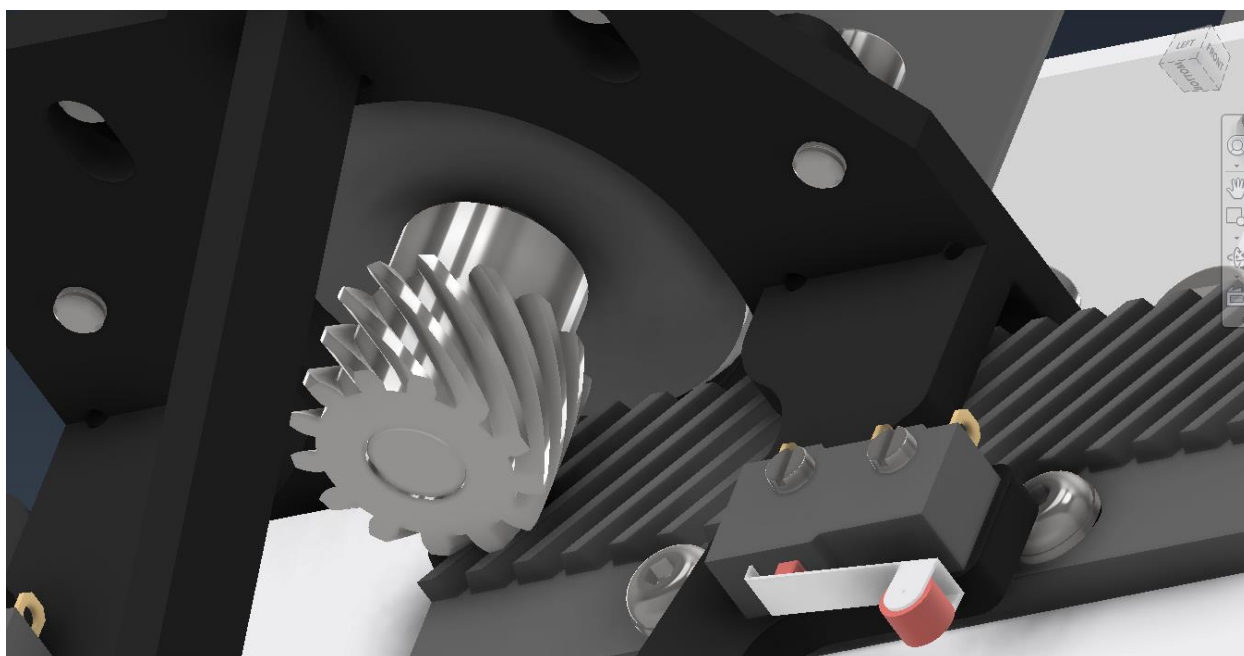
$$F_t = \frac{3 \text{ N} \times 1000 \text{ mm}}{9,2195 \text{ mm}} = 325,397 \text{ N}$$



Výsledná tlačná síla má hodnotu 325,397 N. Při použití dvou motorů na jedné ose může tlačná síla dosáhnout hodnoty až 650 N.



Obr. 13 Pastorek šikmého ozubení



Obr. 12 Sestava šikmého ozubení

2. Výpočet zrychlení

Pro výpočet zrychlení tělesa můžeme použít druhý Newtonův zákon, který říká, že síla působící na těleso je rovna jeho hmotnosti krát zrychlení. [7] Pomocí výpočtů a simulací v Inventoru a také v závislosti na předepsaných parametrech jednotlivých součástí jsem stanovil předpokládanou hmotnost komponentů.

Tlačná síla 650 N
Celková hmotnost hnané soustavy 9,803 kg
Zrychlení ?

$$F = m \times a$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{650 \text{ N}}{9,803 \text{ kg}} = 66,36 \text{ m/s}^2$$



Maximální zrychlení komerčních CNC plazmových stolů se pohybuje v rozmezí 15–25 mm/s². Pro svůj CNC stůl jsem stanovil minimální požadované zrychlení 30 mm/s² a to proto, abych mohl v budoucnu testovat, jakým způsobem můžou různé hodnoty zrychlení ovlivňovat kvalitu řezu. Podle kontrolního výpočtu můžeme porovnat, zda je toho stroj opravdu schopný.

Ted' když známe hodnoty deformačních sil, můžeme zkontrolovat, zda je profil dostatečně pevný a zda odolává deformačním silám tak, aby nedocházelo ke snížení přesnosti řezu.

3. Výpočet deformačních sil

Pro výpočet jednotlivých deformačních sil jsem použil jednoduché rovnice, které jsem vytvořil v závislosti na hmotnosti a tlačné síle pomocí 3. Newtonova zákona. [8]

Tlačná síla 650 N
Hmotnost osy Z 3,386 kg
Hmotnost hliníkového profilu 1,771 kg
Síla působící na osu Z ? (F1)
Síla působící na hliníkový profil ? (F2)
Celková hmotnost hnané soustavy 9,803 kg



$$F_1 = \frac{3,386 \text{ kg} \times 650 \text{ N}}{9.803 \text{ kg}} = 224,513 \text{ N}$$

$$F_2 = \frac{1,771 \text{ kg} \times 650 \text{ N}}{9.803 \text{ kg}} = 117,428 \text{ N}$$

Působící síly jsem musel vypočítat zvlášť, proto že síla F1 působící na osu Z má charakteristiku bodového zatížení, kdežto síla F2, působící na hliníkový profil má charakteristiku spojitého zatížení. To znamená, že buď budeme muset počítat se složeným namáháním anebo síly před výpočtem sjednotíme. Sjednotit síly ale můžeme pouze v případě, pokud síly mají jednotný bod působení.

$$F = F_1 + F_2/2$$

$$F = 224,513 \text{ N} + \frac{117,428 \text{ N}}{2} = 283,227 \text{ N}$$

4. Výpočet kvadratického momentu

Při výpočtu kvadratického momentu jsem použil strojnické tabulky a internetové zdroje. [9]

Výška profilu 60 mm

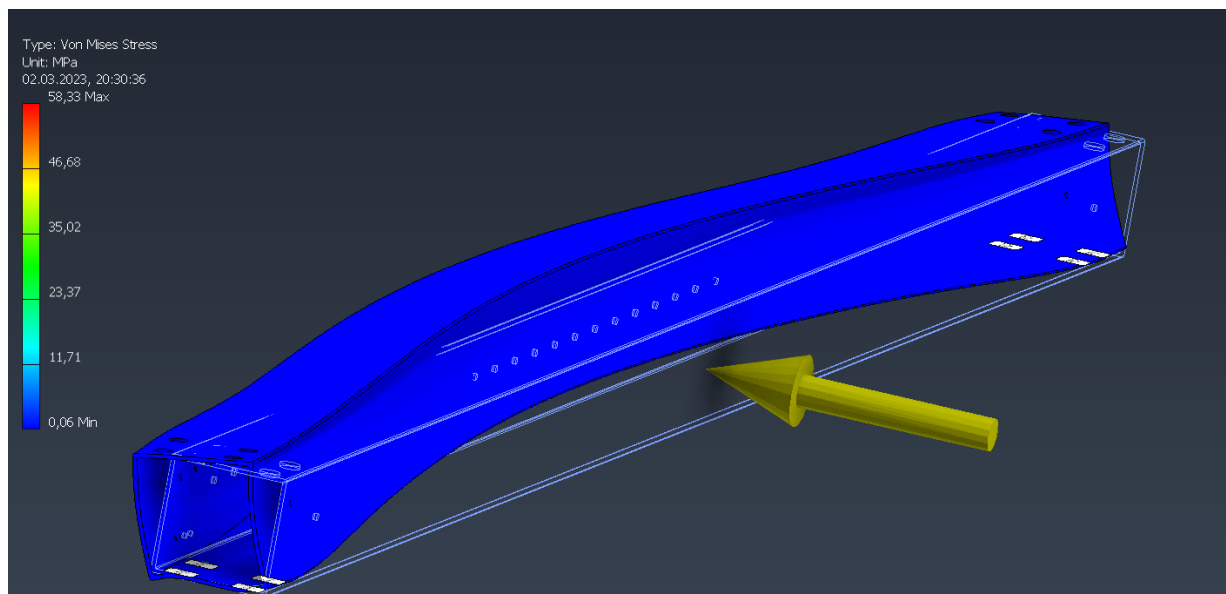
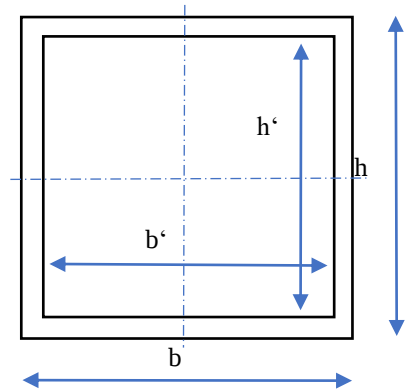
Šířka profilu 60 mm

Tloušťka stěny 2 mm

$$I = \frac{1}{12} \times (b \times h^3 - b' \times h'^3)$$

$$I = \frac{1}{12} \times (60 \times 60^3 - 56 \times 56^3)$$

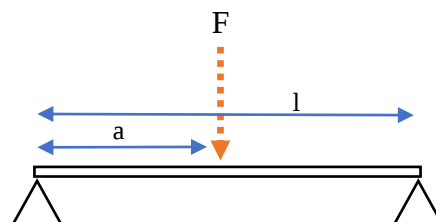
$$I = 260\,459 \text{ mm}^4$$



Obr. 14 Simulace deformace – osa Y

5. Výpočet ohybového momentu, průhybu nosníku a napětí v krajních vláknech

Deformační síla 283,227 N
Délka nosníku 1403,8 mm
Kvadratický moment 260 459 mm⁴
Modul pružnosti 71 000 MPa

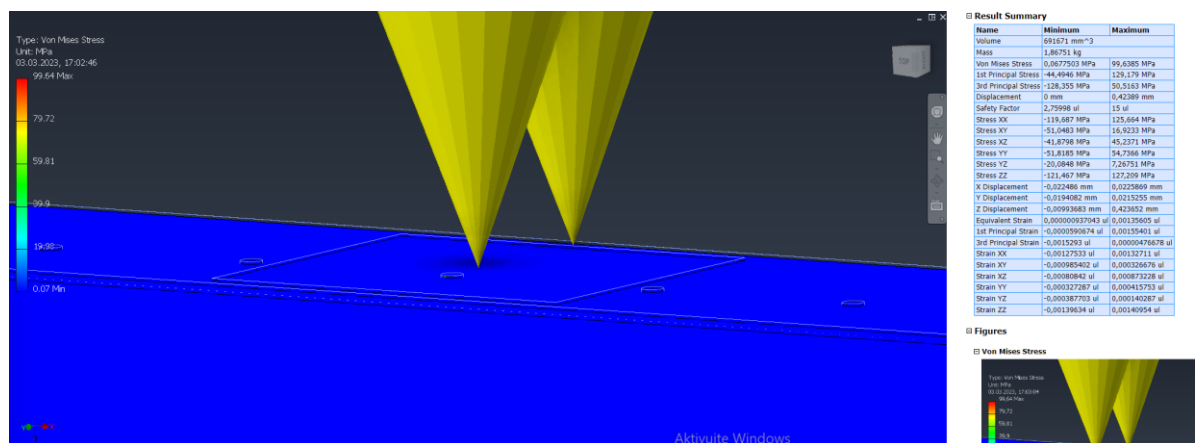


$$w = \frac{F \times l^3}{48 \times E \times I} = \frac{283,227 \times 1403,8^3}{48 \times 71000 \times 260\,459} = 0,882 \text{ mm}$$

$$M = \frac{F \times l}{4} = \frac{283,227 \times 1403,8}{4} = 99,4 \text{ Nm}$$

$$\delta = \frac{M \times h}{2 \times I} = \frac{99\,400 \times 1403,8}{4} = 11,45 \text{ MPa}$$

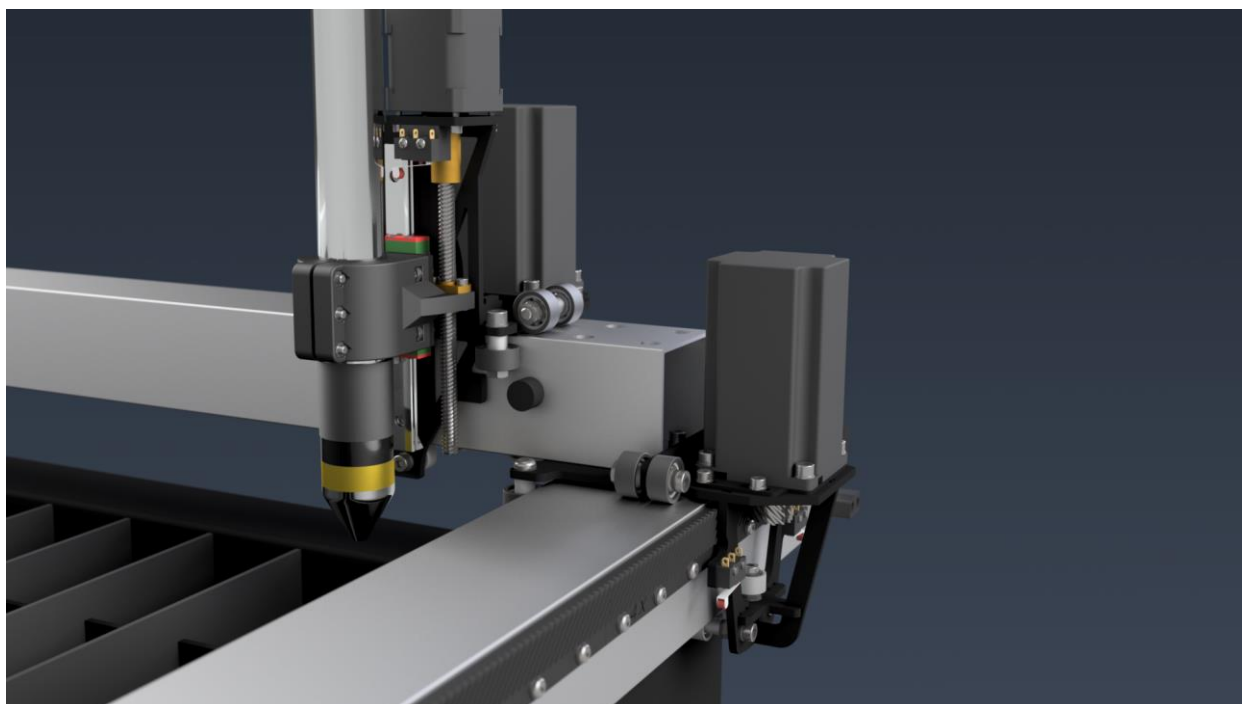
Maximální průhyb nosníku činí 0,882 mm při zrychlení 66,36 mm/s². Napětí v krajních vláknech dosahuje hodnoty 11,45 MPa a maximální ohybový moment má hodnotu 99,4 Nm. Toto je pouze kontrolní výpočet pro nosník na dvou podpěrách. [10] Pokud bychom počítali namáhání pro nosník oboustranně vetknutý, Průhyb byl roven 0,213 mm, ohybový moment 52,2 Nm a napětí v krajních vláknech 5,72 MPa. Náš nosník není ani vetknutý, ani na podpěrách. Podle vizuální kontroly nosníku však můžeme předpokládat, že výsledné hodnoty se budou pohybovat mezi vypočítanými hodnotami. Abych získal správnou hodnotu průhybu, provedl jsem simulaci deformace v programu Inventor. Maximální hodnota průhybu vypočítaná pomocí simulace byla 0,424 mm.



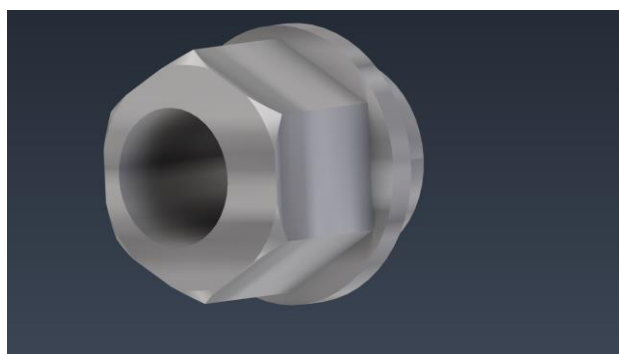
Obr. 15 Výsledné deformační hodnoty

3.4 Výběr vhodných materiálů a součástek pro výrobu

Při návrhu lineárních ložisek jsem se snažil vyřešit, jakým způsobem je možné docílit dostatečné přesnosti, aniž bych musel použít komerční lineární ložiska. Na místo lineárních kolejnic jsem se rozhodl použít čtyřhranné hliníkové profily, a to zejména proto, že dosahují mnohem přesnějších rozměrů než běžné konstrukční ocelové profily. Aby hliníkové profily nebyly poškozeny od kuličkových ložisek, jsou uloženy v Polyoxymetylenovém (POM) pouzdře. Pro dostatečné doléhání Ložisek k profilu jsem použil excentrické podložky.



Obr. 16 Konstrukce – lineární vedení



Obr. 17 Excentrická podložka – boční pohled

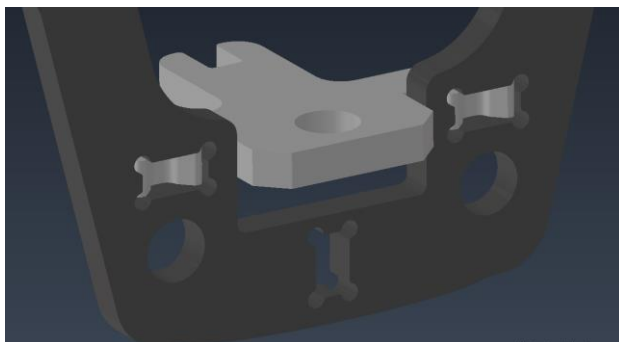


Obr. 18 Excentrická podložka – čelní pohled

Při konstrukci jsem navrhoval velké množství součástí z ocelového plechu, jako svařence. Proto jsem součásti navrhoval tak, aby sváry při chladnutí co nejméně deformovali materiál. Toho jsem docílil použitím tzv. zámečků. Zámečky mají tvar korýtka, které se zaplní svárem tak, aby bylo pnutí ve svarech rozloženo rovnoměrně všemi směry a svařenec tak zůstal nedeformován. Na následujícím obrázku můžeme vidět geometrii zámečkového spoje. Tvar zámečků se odvozuje od velikosti svařované plochy a tloušťky svařovaného materiálu. Na obrázku se jedná o zámečkový spoj pro plech o tloušťce 4 mm s délkou drážky 16 mm. Tato metoda svařování se běžně používá v průmyslu, a to zejména při výrobě jednoúčelových strojů.



Obr. 19 Profil zámečku



Obr. 21 Sestava zámečku



Obr. 20 Laserové výpalky

Přestože jsem se snažil stroj zkonstruovat co nejjednodušeji, při návrhu stroje takového rozsahu jsem se nevyhnul součástí s komplexní geometrií. Proto jsem při výrobě musel použít 3D tisk. Na základě shromážděných informací [5] jsem se rozhodl použít materiál ABS – akrylonitrilbutadienstyren pro všechny vytištěné součásti. Při návrhu jsem musel brát velký ohled na tepelnou roztažnost. [11] Proto je třeba model před samotným tištěním objemově zvětšit. Pro kompenzaci tepelné roztažnosti jsem použil následující výpočty. [12]

3.4.1 Výpočet objemového zvětšení

Tepelná roztažnost (ABS)	58 $\mu\text{m}/(\text{mK})$
Teplota trysky	245 $^{\circ}\text{C}$
Pokojová teplota	25 $^{\circ}\text{C}$
Změna délky	? (%)

$$d = 1 + \alpha \Delta t$$

$$d = \frac{1 + 58 \times (245 - 25)}{10\,000} = 1,2 \%$$

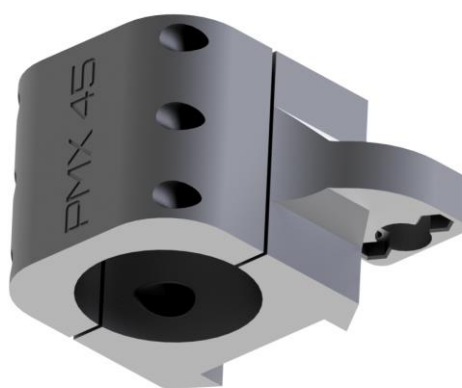


Obr. 22 Kalibrace 3D tisku

Podle výpočtů pro kompenzaci tepelné roztažnosti musíme model objemově zvětšit o 1.26 %. Testování v praxi však ukázalo, že ideální zvětšení pro tento materiál se pohybuje v rozmezí od 0.6 % do 0,8 %.



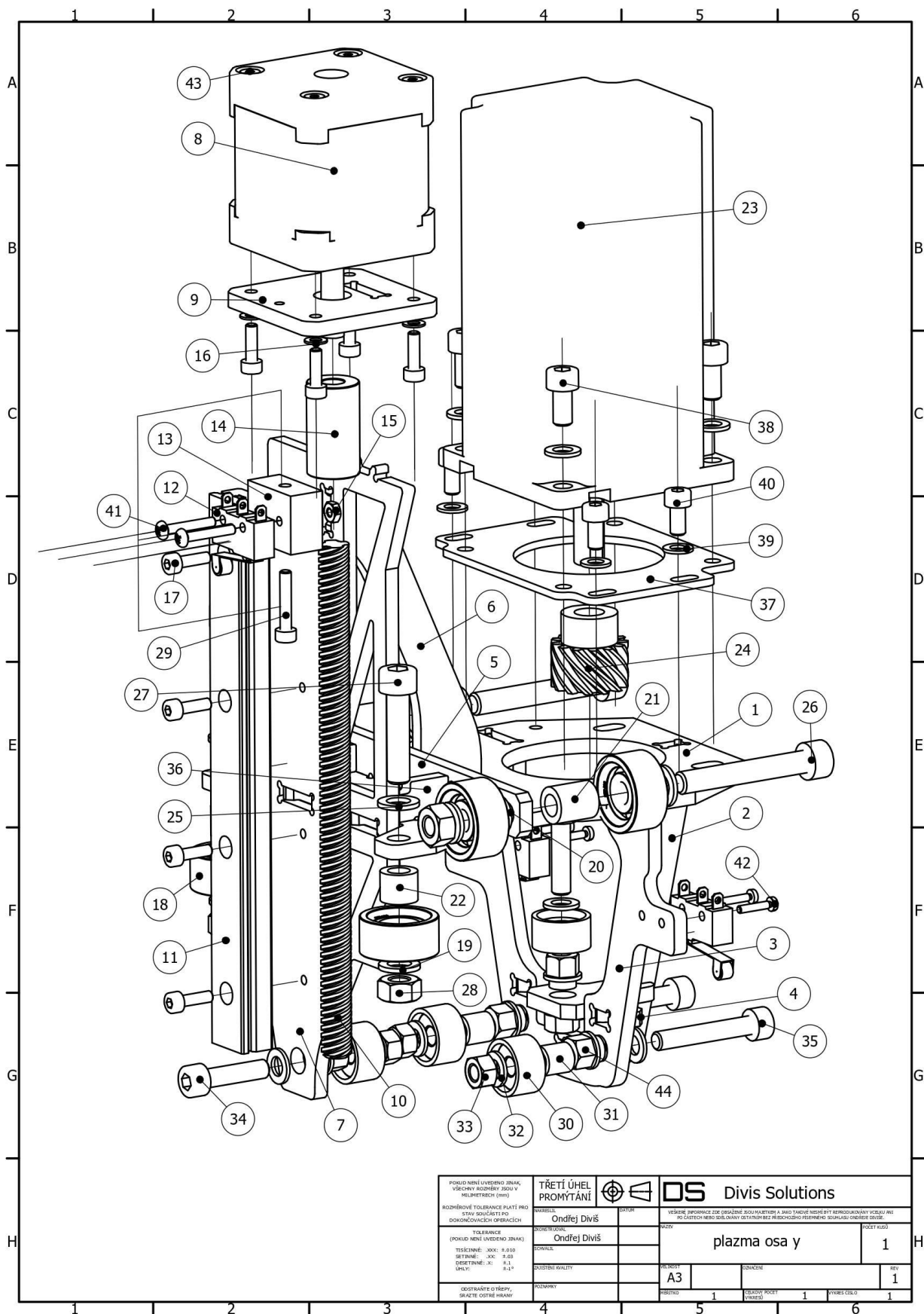
Obr. 23 Model 3D výtisku



Obr. 25 Model 3D výtisku



Obr. 24 Model 3D výtisku



Obr. 26 Sestava – osa Y

4.1 Srovnání výsledků s původními cíli práce

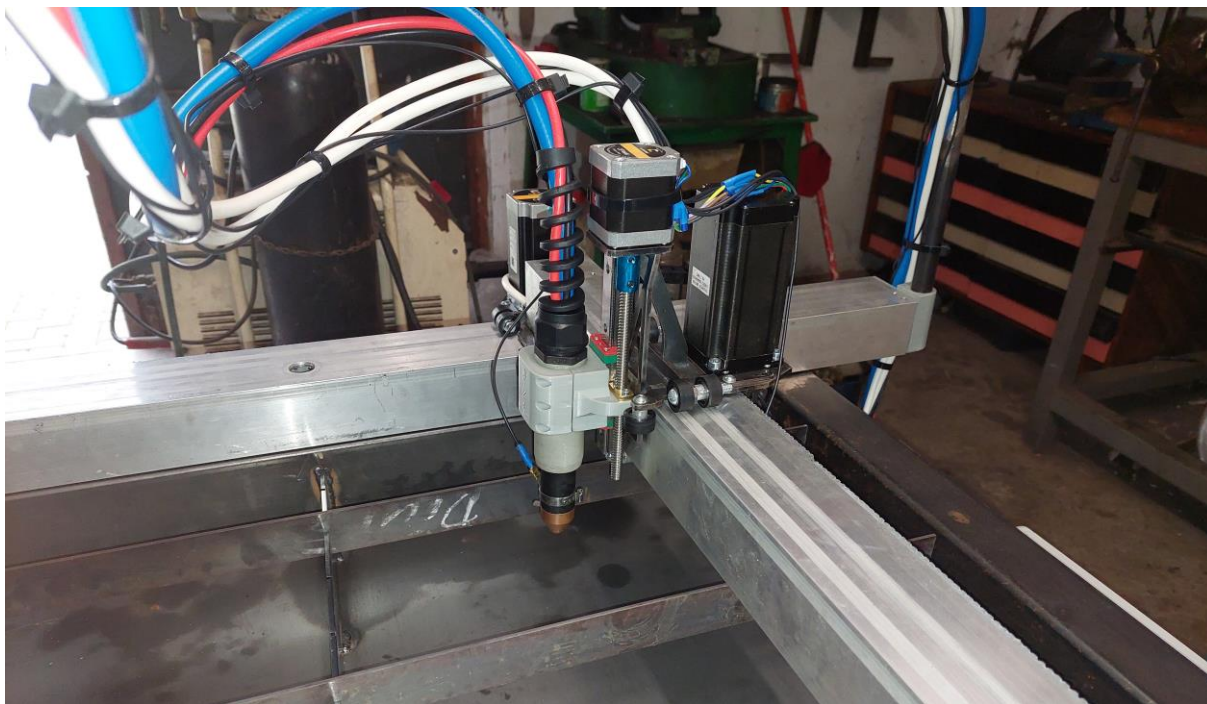
Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit plazmový stroj pro řezání materiálů s vysokou přesností a spolehlivostí. Práce se soustředila na řešení existujících řešení a na návrh plazmového stroje včetně konstrukčních výpočtů a simulací.

Původní cíle práce byly dosaženy. Navržený plazmový stroj je schopen spolehlivě řezat rychlostí 15 m/min při zrychlení až $66,36 \text{ mm/s}^2$ s minimální přesností $\pm 0,76 \text{ mm}$.

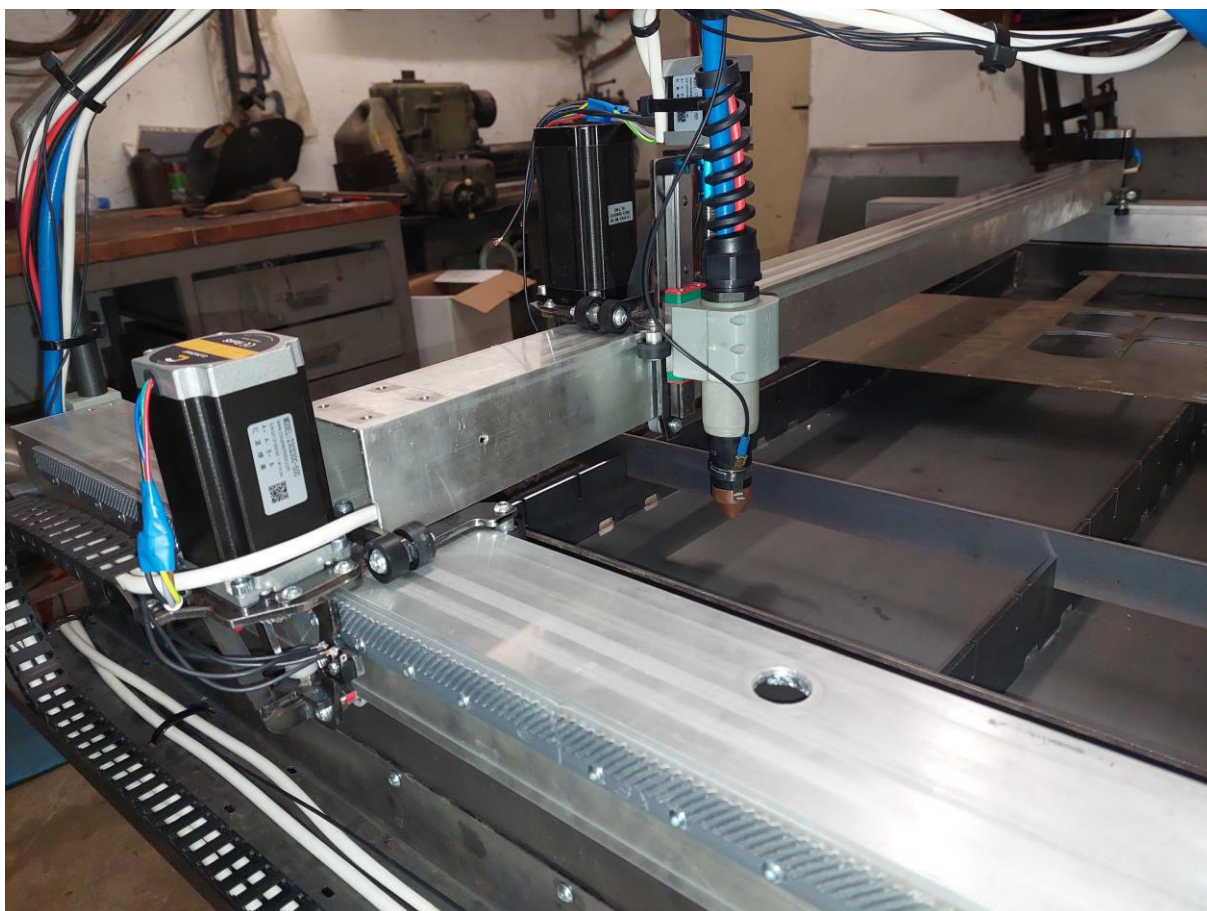
Závěrem lze konstatovat, že se mi podařilo úspěšně dosáhnout stanoveného cíle práce. Výsledný stroj může být využit v průmyslové výrobě, nebo v menších dílnách a závodech. Tento projekt mi poskytl nejen praktické zkušenosti v oblasti konstrukce a výroby, ale také rozšířil moje znalosti o řízení CNC strojů a technologií plazmového řezání. Celkově lze tuto práci označit jako úspěšnou a přínosnou pro další vývoj v oblasti strojírenství a průmyslové výroby.



Obr. 28 Sestava plazmového stolu



Obr. 29 Konstrukce osy Y – levý pohled



Obr. 30 Konstrukce osy Y – pravý pohled



Obr. 32 Konstrukce stroje – zadní pohled



Obr. 31 Konstrukce stroje – čelní pohled



Obr. 33 Výpalek 8 mm – horní pohled



Obr. 34 Výpalek 8 mm – spodní pohled

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Johnson, M. A. (2018). Advances in CNC Plasma Cutting Technology. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(5), 450-459. Dostupné z: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/21520>. Citováno: 2023-03-31.
- [2] Lee, J., & Kim, D. (2020). Development of a Small-Sized CNC Plasma Cutting Machine with 2-Axis Control. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(10), 4399-4404. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-020-0916-7>. Citováno: 2023-03-31.
- [3] Wang, J., & Ding, Y. (2019). Design and optimization of CNC plasma cutting machine based on finite element analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(4), 1703-1710. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-019-0337-3>. Citováno: 2023-03-31.
- [4] Raveendra, V., & Pandit, P. (2018). Development of a plasma cutting machine for industrial applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(3), 10025-10031. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318303127>. Citováno: 2023-03-31.
- [5] J. Smith and R. Johnson, "Implementing real-time motion control using Mach3 CNC software and Arduino programming," in *Journal of Control and Automation*, vol. 12, no. 1, pp. 45-54, 2022. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667019301983>
- [6] A. Brown and T. Lee, "Integration of Mach3 CNC software and Arduino-based custom hardware for precise cutting and milling," in *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 3-4, pp. 1111-1123, 2021. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07749-2>
- [7] Y. Chen, L. Wang, and Q. Yu, "Analysis of helical gear transmission error and optimization design," in *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 1343-1353, 2021. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-021-0224-4>
- [8] M. N. Akhtar and M. O. Tokhi, "Design of an efficient helical gear train for electric vehicle application," in *International Journal of Automotive Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 585-595, 2021. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12239-021-0057-6>
- [5] Shao, J., & Cheng, S. (2021). Research and development of high precision plasma cutting machine for small and medium-sized enterprises. *Journal of Physics: Conference Series*, 1907(1), 012004. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1907/1/012004>. Citováno: 2023-03-31.
- [1] Pokojný, Jiří; Pospíšil, Václav; Zelený, Martin. Výpočet ohybového momentu pomocí metody konečných prvků. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2017, roč. 65, č. 1, s. 293-300. Dostupné z: <https://acta.mendelu.cz/65/1/0293/>

- [9] Vyroubal, Antonín. Výpočet modulu průhybu pomocí difference metod. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada strojní, 2011, roč. 57, č. 2, s. 1-8. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/122266>
- [10] Kostka, Martin; Kolář, Jiří; Pospíšil, Václav. Výpočet zchléní trubek metodou konečných prvků. MM Science Journal, 2017, roč. 2017, č. 2, s. 1085-1089. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/march-2017/articles/vypocet-zchléní-trubek-metodou-konecných-prvku>
- [11] Johnson, M. A. (2018). Advances in CNC Plasma Cutting Technology. International Journal of Engineering and Technology, 10(5), 450-459. Dostupné z: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/21520>. Citováno: 2023-03-31.
- [12] Vykukal, O. (2020). Tisk s ABS filamentem. [online] NWT.cz. Dostupné z: <https://www.nwt.cz/cs/novinky/tisk-s-abs-filamentem>. Citováno: 2023-03-31.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vodní Lázeň	10
Obr. 2 Konstrukce	10
Obr. 3 Sestava – vodní lázeň	11
Obr. 4 Sestava – konstrukce	11
Obr. 5 Rozložení – rozvaděč	12
Obr. 6 Sestava – elektronika	13
Obr. 7 Kusovník – elektronika	14
Obr. 8 Sestava – napěťový dělič	15
Obr. 9 Rozklad – napěťový dělič	15
Obr. 10 Rozmístění elektronických komponent	16
Obr. 11 Sestava – elektronické komponenty	16
Obr. 12 Sestava šikmého ozubení	18
Obr. 13 Pastorek šikmého ozubení	18
Obr. 14 Simulace deformace – osa Y	21
Obr. 15 Výsledné deformační hodnoty	22
Obr. 16 Konstrukce – lineární vedení	23
Obr. 17 Excentrická podložka – boční pohled	23
Obr. 18 Excentrická podložka – čelní pohled	23
Obr. 19 Profil zámečku	24
Obr. 20 Laserové výpalky	24
Obr. 21 Sestava zámečku	24
Obr. 22 Kalibrace 3D tisku	25
Obr. 23 Model 3D výtisku	25
Obr. 24 Model 3D výtisku	25
Obr. 25 Model 3D výtisku	25
Obr. 26 Sestava – osa Y	5
Obr. 27 Kusovník – osa Y	6
Obr. 28 Sestava plazmového stolu	7
Obr. 29 Konstrukce osy Y – levý pohled	8
Obr. 30 Konstrukce osy Y – pravý pohled	8
Obr. 31 Konstrukce stroje – čelní pohled	9
Obr. 32 Konstrukce stroje – zadní pohled	9
Obr. 33 Výpalek 8 mm – horní pohled	10
Obr. 34 Výpalek 8 mm – spodní pohled	10