



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Konstrukce modelu CNC obráběcího stroje

Bakalářská práce

Studijní program:

Autor práce:

Vedoucí práce:

B0715A270008 Strojírenství

Jan Špringl

Ing. Petr Keller, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace





Zadání bakalářské práce

Konstrukce modelu CNC obráběcího stroje

Jméno a příjmení: **Jan Špringl**
Osobní číslo: S19000126
Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Zadávající katedra: Katedra výrobních systémů a automatizace
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je provést návrh konstrukce pohyblivého modelu tříosé CNC frézky s krokovými motory včetně jednoduchého řízení na bázi např. Arduina. Model stroje má být určen zejména pro prezentaci a demonstraci principu práce a řízení CNC strojů, nikoli pro vlastní obrábění. Většina částí stroje bude vyrobena pomocí aditivních technologií (3D tisku).

Zásady vypracování:

1. Seznamte se s podobnými projekty, a s možnostmi řízení takových modelů např. pomocí Arduina s příslušným firmwarem.
2. Navrhněte koncepci modelu tříosé CNC frézky s možností řízených pohybů v osách X, Y a Z pomocí miniaturních krokových motorků např. z DVD mechanik. Maximální rozměry modelu stroje jsou 200 x 200 x 200 mm.
3. Na základě tohoto konceptu proveďte vlastní konstrukci stroje s ohledem na možnosti výroby na KSA, zejména s využitím aditivních technologií.
4. Připravte podklady pro výrobu a nechte vyrobit (vytisknout) jednotlivé komponenty konstrukce stroje, smontujte jej a případně jej i oživte.
5. Proveďte zhodnocení vlastního konstrukčního řešení.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [2] ŠTULPA, M. *CNC: programování obráběcích strojů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2015, 240 s. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [3] KELLER, P. *Programování a řízení CNC strojů.: Prezentace přednášek*. Liberec, 2021.
- [4] NESVATBA, Vít. Mini 3D frézka. In: *StreTech*. Praha: Fakulta strojní ČVUT, 2017. ISBN 978-80-01-06162-6.

Vedoucí práce: Ing. Petr Keller, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání práce: 15. listopadu 2021
Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2021

Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

28. dubna 2022

Jan Špringl

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na konstrukci pohyblivého modelu CNC frézky. Model bude vyroben za pomoci 3D tisku. Textová část práce se zabývá obecně CNC stroji, jejich konstrukcí a řízením. Dále jsou rozebrány dostupné technologie pro tisk modelu a jeho možné řízení. V praktické části jsou popsány jednotlivé dílčí části stroje. Konstrukce těží především z vlastností technologie 3D tisku. Díky schopnosti tisknout tvarově složité díly, se stroj skládá z malého počtu součástí. Závěrem se řeší sestavení samotné frézky včetně popisu, jak je zapotřebí upravit vytištěné součástky, aby stroj bylo možné zprovoznit.

Klíčová slova

CNC frézka, Arduino, 3D tisk

Annotation

The bachelor thesis is focused on the construction of a moving model of a CNC milling machine. The model will be made using 3D printing. The text part of the thesis deals with CNC machines in general, their construction and control. Furthermore, the available technologies for model printing and its possible control are discussed. The practical part describes the individual parts of the machine. The design mainly benefits from the properties of 3D printing technology. Thanks to the ability to print complex parts, the machine consists of a small number of parts. Finally, the assembly of the milling machine itself is solved, including a description of how it is necessary to modify the printed parts in order for the machine to be put into operation.

Key words

CNC mill, Arduino, 3D printing

Poděkování

„Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kellerovi, Ph.D. za jeho pomoc, trpělivost a cenné rady při vypracovávání této práce. Děkuji své rodině za neustálou podporu při bakalářském studiu “

Obsah

Úvod	8
1. Obecně o CNC strojích.....	9
1.1. Historie	9
1.2. Co je CNC stroj.....	9
1.3. Základní konstrukční prvky stroje	10
1.4. Řízení CNC strojů	11
1.5. Podobné stroje	12
2. Dostupné technologie pro tisk součástí stroje.....	14
2.1. FFF - Fused Filament Fabrication.....	15
2.2. Polyjet.....	15
2.3. SLA - Stereolithography.....	17
3. Výběr komponentů	17
3.1. Arduino.....	18
3.2. Volba pohonu	21
3.3. Řídicí softwary pro CNC podporující Arduino.....	23
4. Konstrukce.....	25
4.1. Předlohový stroj Hermle C250	25
4.2. Konstrukce úvod.....	26
4.3. Rám.....	26
4.4. Přenesení výkonu mezi motorem uchyceným v rámu a pojezdem osy Y	30
4.5. Pojezd osy Y.....	34
4.6. První prototyp	37
4.7. Pojezd osy X.....	38
4.8. Pojezd osy Z a uchycení motoru vřetene.	40
4.9. Krytování stroje	42
5. Sestavení	45
Závěr.....	46
Použitá literatura.....	47
Obrázky	49

Úvod

Práce je zaměřena na konstrukci pohyblivého modelu tříosé CNC frézky, která bude vyrobena za pomoci 3D tisku. Model frézky není schopný samotného obrábění, protože cílem bylo vytvořit pouze prezentační model. Ten je konstruován tak, aby si případný pozorovatel vytvořil představu o tom, jak taková CNC frézka funguje případně i jak vypadá vzhledem k tomu, že se při konstrukci vychází z designu reálného stroje.

V první části práce bude pozornost věnována tomu, jaké jsou nároky na konstrukční prvky u reálných strojů. Tyto nároky budou dále řešeny v konstrukční části s přihlédnutím k tomu, že se bude jednat o stavbu modelu. Rozpracováno bude lineární vedení, nároky na konstrukci nosné soustavy a odměřování. Představí se základní dostupné technologie pro tisk 3D modelu. Dále budou uvedeny vývojové desky Arduino, což je srdcem celého modelu, které se bude starat o řízení veškeré další elektroniky strojem používané. Především pro Arduino je vytvořena spousta nejrůznějších řídicích systémů, které jsou určené pro řízení CNC strojů nebo 3D tiskáren. A neznámější z nich budou představeny.

V konstrukční části se nejprve začne uvedením předlohového stroje, podle kterého se inspiroval design CNC frézky v této práci. Poté se budou řešit jednotlivé součásti modelu, ať už se jedná o nosné části, vedení nebo krytování, a to především z pohledu 3D tisku. U modelu budou využita různá tvarově náročná řešení, která by se jinak, než 3D tiskem dala jen obtížně dosáhnout. Nakonec je umístěna kapitola popisující samotné sestavení stroje. V té je vysvětleno, co je zapotřebí udělat s vytištěnými součástkami, aby byly použitelné pro aplikaci na stroji.

1. Obecně o CNC strojích

1.1. Historie

Ačkoli tato myšlenka existovala již nějakou dobu, první koncept numerického řízení byl vyvinut až v roce 1949. John T. Parsons, první počítačový průkopník, jej vyvinul jako součást výzkumného projektu letectva prováděného na Massachusetts Institute of Technology. (MIT). Experimentální frézka byla postavena v laboratoři servomechanismů institutu s cílem používat motorizované osy k výrobě listů vrtulníků a tužších potahů pro letadla. Myšlenka byla dále rozvíjena a v roce 1952 představil Richard Kegg (ve spolupráci s MIT) Cincinnati Hydro-Tel, konturovou frézku s vertikálním vřetenem. Počáteční prototyp, ačkoli byl provozován pomocí osmisloupcové papírové pásky, čtečky pásky a elektronického elektronického řídicího systému, se stal středem zájmu budoucího vývoje. Rané CNC stroje ve 40. a 50. letech 20. století používaly děrnou pásku, která se pak běžně používala v telekomunikacích a ukládání dat. Tato technologie byla nahrazena analogovými výpočetními technologiemi. Od 60. do 70. let se objevily digitální technologie, díky nimž byl výrobní proces automatizován a efektivnější. V roce 1976 byly do CNC obrábění zahrnuty 3D Computer-Aided Design a Computer-Aided Machining. V roce 1989 se stroje řízené softwarem CAD a CAM staly průmyslovým standardem. [1.] [2.]

1.2. Co je CNC stroj

CNC obráběcí stroj je numericky řízené zařízení, vybavené jedním nebo více nástroji k odstraňování materiálů z polotovarů pro vytváření navržených dílů. CNC stroje provádí operace, jako je soustružení, frézování, vrtání, na základě programových instrukcí. Programovací jazyk CNC, který se používá k ovládní funkcí stroje, se nazývá G-kód. Je jím řízena například rychlost posuvu, otáčky vřetene nebo popis dráhy, po které se má nástroj pohybovat. [3]

1.3. Základní konstrukční prvky stroje

1.3.1. Nosná soustava

Při návrhu nosné soustavy je zapotřebí dbát na několik základních požadavků. Jedním z nich je použití kvalitního materiálu pro konstrukci rámu. Je třeba navrhnout rám tak, aby měl dostatečnou statickou tuhost. Zároveň musí být odolný proti deformacím, které mohou vzniknout při změnách teplot. Dalším důležitým bodem je odvod třísek při obrábění. Co se samotné konstrukce tyče, měla by být jednoduše reprodukovatelná a navržená pro efektivní výrobu. Robustní, ale zároveň lehká konstrukce bude též výhodou při manipulaci s ní. [4]

1.3.2. Vedení lineárních posuvových soustav

Vedení soustav slouží k realizaci požadovaného pohybu a je na ně kladeno zejména těchto několik požadavků. Mělo by být dostatečně tuhé a zároveň přesné, aby bylo schopné zaručit požadované vlastnosti. Průřez vedení by měl být složen s co možná nejmenšího množství ploch s tím, že vodící plochy by měly mít vynikající jakost povrchu. Povrch samotný je proveden jako velice odolný proti opotřebení. Pokud na vedení vzniknou vůle, mělo by být možné je vymežit. Jednoduchá výroba také patří mezi nedílné požadavky na vedení soustav.

Vedení soustav rozdělujeme na dva základní druhy - valivá a kluzná. Kluzná vedení mají hlavní nevýhodu v přechodech mezi klidovým stavem a pohybem. Dochází tam totiž ke změně velikosti třecí síly. Tato změna může vést k poskokům na začátku pohybu nebo trhanému pohybu za nízkých rychlostí. Řešením může být tužší konstrukce nebo lepší volba materiálů která povede k přiblížení hodnot tření za klidu a tření za pohybu. Třecí vedení jsou často vyrobená z těchto materiálů: šedá litina, kalená šedá litina, kalená ocel, plasty.

Valivá vedení k pohybu používají mezi jednotlivými plochami vedení valivá tělíška. Tento způsob má v celém rozsahu rychlostí relativně konstantní součinitel tření, čímž se eliminuje poskok nebo trhavý chod při nízkých rychlostech. Oproti kluzným vedením ale obecně méně tlumí vibrace a jsou náročnější na výrobu, s čímž může souviset i jejich vyšší cena. Valivá vedení také nejsou běžně dostupná v miniaturních velikostech a vyrobit takové vedení by bylo velice náročné. To je důvod proč na tomto stroji budou použita vedení kluzná. [4]

1.3.3. Odměrování

Odměrování je důležité kvůli průběžnému určování polohy stroje. Využívá se především u servo pohonů jako zdroj zpětné vazby pro řízení. U krokových motorů není úplně nutné, protože pro jejich řízení zpětná vazba není potřeba. Pokud se spolehne na to, že motor při chodu neztratí krok, můžeme pozici zjistit z počtu provedených kroků.

Odměrování dělíme podle toho, jestli se jedná o přímé nebo nepřímé odměrování, nebo je možné jeho dělení na absolutní a inkrementální odměrování. Přímé odměrování je takové, kde se jezdec pravítka pohybuje společně s daným posuvem. K nepřímému odměrování může být použit rotační inkrementální snímač. Bývá připevněn například v zadní části motoru, odkud je možné na základě pootočení dopočítat polohu pojezdu. Absolutní odměrování je takové, které je schopné uchovat pozici stroje po jeho vypnutí. U inkrementálního odměrování je vždy po zapnutí stroje zapotřebí načíst referenční bod tak, aby se stroj "našel".

U levných hobby strojů a 3D tiskáren bývá na konci každé osy koncový spínač, na který stroj najede a načte si svoji polohu v každé ose zvlášť. U průmyslových strojů mohou být použity pro načtení referenčního bodu například referenční značky, podle kterých stroj najede do referenčního bodu. Stroj v této práci bude pro jednotlivé posuvy využívat krokových motorů bez odměrování, protože není určený k obrábění a nebude překonávat jiné síly než ty, které vzniknou třením v jeho vlastním posuvovém ústrojí - nemělo by tedy docházet ke ztrátě kroku. Zároveň stroj nebude mít ani žádné koncové snímače pro najetí do referenčního bodu, a to především kvůli miniaturním rozměrům stroje. Pokud by bylo možné koncové spínače do konstrukce nějak vložit, pravděpodobně se nikam neschovají a naruší tím vzhled a měřítko stroje. Nájezd referenční pozice proto bude buď proveden ručně nebo se jednotlivé posuvy nechají dojet na jejich pevné dorazy s tím, že motor při najetí na doraz několikrát přeskočí. [4]

1.4. Řízení CNC strojů

Řídící systém CNC stroje zastřešuje několik základních funkcí. První z nich je řízení pohybu. Při řízení pohybu dochází k porovnávání nastavených hodnot se zpětnou vazbou například od odměrovacího zařízení. Další funkcí je zajištění

požadované geometrie pohybu. Jedná se o jednu z nejdůležitějších úloh řídicího systému. Dochází při ní k výpočtu a řízení trajektorie relativního pohybu mezi obrobkem a nástrojem. Výsledkem tohoto pohybu by měl být požadovaný tvar obrobku s přesnými rozměry a co možná největší opakovatelností stejného procesu. Nejjednodušším příkladem řízení trajektorie je polohování. Takto může být realizováno například vrtání, kdy si nástroj najede do určité pozice rychloposuvem po libovolné dráze a až poté je realizováno samotné vrtání. Tuto a mnohé další funkce je možné přímo na stroji naprogramovat. Tím se dostáváme k další funkci řídicího systému, kterou je programování. Struktura programů pro CNC stroje je mezinárodně normalizovaná a má předem danou architekturu jednotlivých řádků:

- Číslo instrukce N (Number)
- Druh pohybu G – rychloposuv, kruhová interpolace, korekce a souřadnice cíle pohybu
- Rychlost posuvu F (Feed)
- Otáčky vřetene S (Spindle speed)
- Nástroj T (Tool)
- Doplňková funkce M (Miscellaneous function) – výměna nástroje, přívod chladící kapaliny

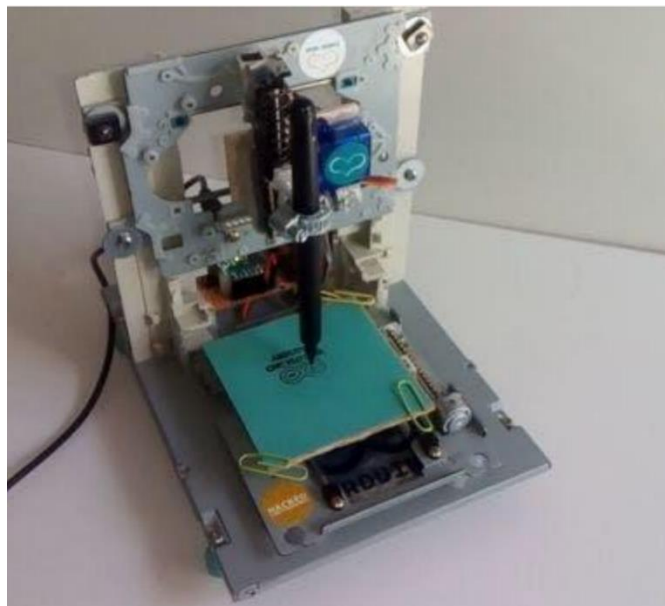
Aby bylo možné CNC stroj ovládat, je potřeba do jeho souřadného systému zavést určité body, protože jinak nemá informace o tom, v jaké vzdálenosti jsou od sebe nástroj s obrobkem. První bod je referenční bod. Referenční bod je bod pevně daný výrobcem, kde si systém načte aktuální souřadnice vzhledem k nulovému bodu stroje. Nulový bod stroje je neměnný, pevně daný výrobcem a nemůže být změněn. nulový bod obrobku - jeho umístění si programátor volí co možná nejvhodněji vzhledem k jeho vlastní potřebě. [4]

1.5. Podobné stroje

Na internetu jsou dohledatelné stroje, které jsou více či méně podobné se strojem, jehož konstrukce bude představena v této práci. Takových strojů je ale poměrně hodně, proto zde budou představeny pouze nějaké příklady

1.5.1. CNC mini frézka z ČVUT

Jeden z nejvíce podobných projektů, který se podařilo nalézt, vytvořili na ČVUT. Stejně jako v této práci se jedná o konstrukci modelu CNC frézky. Posuvy CNC frézky byly taktéž realizovány pomocí krokových motorů z vyřazených CD mechanik. Protože motory zůstaly namontovány na původních uloženích mechanik, mohly tyto plechové rámy posloužit zároveň jako základní konstrukční prvek rámu tohoto modelu. Stroj má také namísto vřetene na fotkách namontovaný pouze držák pro uchycení pera s modelářským servomotorem, který se stará o zvednutí pera při přejezdech a dotlačení pera k podložce při psaní. [5]

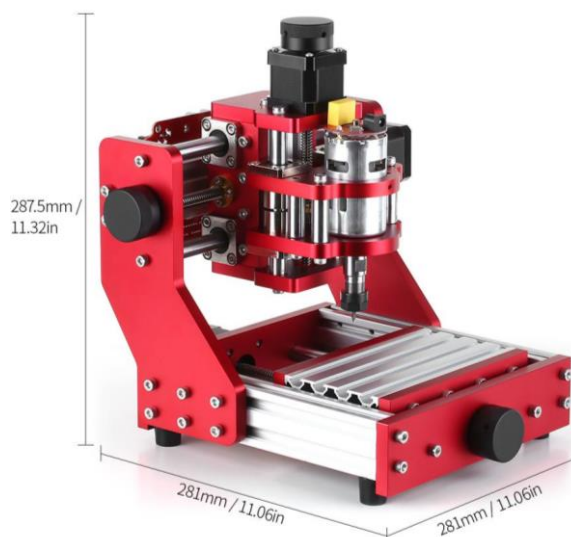


Obr. 1) CNC Frézka z ČVUT [5]

1.5.2. Další podobné stroje

Objevit lze i nejrůznější CNC obráběcí frézky. Tyto frézky ale neslouží pouze k prezentačním účelům, čímž se od zadání této práce oddalují. Nicméně jsou rozměrově i cenově v podobné kategorii jako stroj, který se bude konstruovat v této práci. Proto je dobré se o podobných strojích zmínit. Většinou se jedná o různé drobné obráběcí a gravírovací zařízení. Takovéto stroje se dají na internetu sehnat za cenu zhruba od tří tisíc korun (například VEVOR CNC 3018). Takto levné frézky jsou schopné lehkého obrábění nebo gravírování nápisů například do dřeva a jemu podobných materiálů. Rámy těchto strojů jsou spíše podobné rámcům levných 3D tiskáren, jako je například Creality Ender 3. Jsou tvořeny většinou párem hliníkových profilů, které jsou k sobě kolmo přišroubované. Poohlédneme-li se ve

vyšších cenových hladinách a rozměrově blíže k našemu zadání, je možné najít zařízení Mini CNC 1310 a Mini CNC 1310 PRO. Takovéto stroje už jsou po určitých úpravách použitelné například i pro obrábění hliníku. Největší slabinou těchto strojů je motor, který pohání vřeteno. Slabá hřídel motoru společně s drobnou vůlí v jeho ložiskách, z nich dělá v továrním osazení nepříliš použitelné obráběcí stroje. Také bronzové posuvové matice s vůlí, nutnou k jejich provozu, jsou slabé místo jinak zajímavých výrobků. Zkrátka je možné najít velké množství produktů které budou podobné zmíněným výše, je také možné dohledat stroje s lepší konstrukcí za vyšší cenu. Pokud se ale podíváme na český trh, hledání bude pravděpodobně marné. Naprostá většina těchto modelů pochází z Číny a jsou dostupné v hojné míře na stránkách jako například Aliexpress nebo Bangood.



Obr. 2) Mini cnc 1310 [7]



Obr. 3) VEVOR CNC 3018 [6]

2. Dostupné technologie pro tisk součástí stroje

Konstrukce stroje je vytvořena univerzálně tak, aby byla možná vytisknout za pomoci všech zde zmíněných technologií. Mezi limitující faktory pro některé tiskárny by mohla patřit velikost hlavního krytu, který má největší rozměr bez mála dvě stě milimetrů. Další problém by mohl nastat při tisku za pomoci SLA nebo Polyjet technologie. Některé materiály pro tyto technologie mají totiž velice nízkou teplotu zesklnění, a to už kolem čtyřiceti stupňů celsia. Takovéto materiály nejsou vhodné pro tisk posuvových hřebenů nebo součástek, které na sobě mají posuvová pouzdra.

2.1. FFF - Fused Filament Fabrication

Jedná se obecně o nejrozšířenější a nejdostupnější technologii 3D tisku. Je vhodná pro tisk funkčních modelů a prototypů. Stavebním materiálem je primárně roztavený plast. Ten je postupně nanášen tryskou na tiskovou podložku, čímž vzniká tištěný objekt vrstvu po vrstvě. Tiskovým materiálem je tisková struna (filament) nejčastěji průměru 1,75 mm. Filament je většinou dodáván namotaný na cívkách. Dříve se používal také filament s průměrem 3 mm, nevýhodou byla ale menší přesnost v jeho dávkování. Oproti pryskyřici či jemnému prášku, které se využívají u jiných technologiích je práce s filamentem jednoduchá a bezpečná. Na výtisku jsou patrné tiskové vrstvy. Jejich výška se při použití nejběžnější trysky průměru 0,4 mm pohybuje přibližně v rozsahu od 0,05 mm do 0,3 mm. [8]



Obr. 4) 3D tiskárna českého výrobce Prusa i3 MK3S [8]

2.2. Polyjet

Polyjet je jednou z nejrychlejších a nejpřesnějších technologií 3D tisku. Staví díly pomocí kapiček kapalného fotopolymeru, které se vytvrzují UV světlem. Protože se fotopolymerová pryskyřice před ztuhnutím rozstříkuje v kapičkách, Polyjet je

často přirovnáván k 2D inkoustovému procesu. Zatímco inkoustové tiskárny nanášejí pouze jednu vrstvu kapiček inkoustu, Polyjet vytváří vrstvu po vrstvě, dokud není díl dokončen. Také je docela podobný technologii SLA, protože používá zdroj UV světla k vytvrzení pryskyřice. Zde je rozdíl v tom, že Polyjet 3D tiskárny stříkají stovky drobných kapiček najednou, zatímco SLA 3D tiskárny drží celou vanu pryskyřice, která je bodově vytvrzována laserem. Polyjet tiskárny v podstatě stříkají pryskyřici z několika tiskových hlav podél nosiče osy X, který se pohybuje tam a zpět přes vyvíjející se tisk. [9][10]

Klady a zápory Polyjetu

Jak bylo zmíněno výše, rychlost tisku a rozměrová přesnost jsou dva parametry, díky kterým Polyjet skutečně vyniká. Díly vyrobené technologií Polyjet mají velmi hladký povrch, který je ideální pro výrobu estetických prototypů. Natolik, že díly z Polyjetu lze přirovnat k dílům vyrobeným vstřikováním (vzhledem). Plno-barevný a multi-materiálový 3D tisk je další dobrou vlastností Polyjetu, která dále přispívá k estetické kvalitě prototypů i koncových dílů. Omezením je pevnost tištěných dílů. Díly jsou konstrukčně slabé, což znamená, že nejsou ideální pro komponenty, které musí zvládnout nějaký druh zátěže. Ve skutečnosti Polyjet sdílí toto stejné omezení se SLA. Díly vytištěné pomocí obou technologií jsou křehké kvůli povaze pryskyřice. [9][10]



Obr. 5) Polyjet tiskárna Stratasys Objet 500 Connex 3 [10]

2.3. SLA - Stereolithography

SLA 3D tisk funguje tak, že se nejprve umístí stavební platforma do nádrže s kapalným fotopolymerem ve vzdálenosti jedné výšky vrstvy od povrchu tekutiny. UV laser vytváří další vrstvu selektivním vytvrzením fotopolymerní pryskyřice. Během tuhnutí části fotopolymerizačního procesu se monomerní uhlíkové řetězce, které tvoří kapalnou pryskyřici, aktivují světlem UV laseru a ztuhnou. Laserový paprsek je zaostřen v předem určené dráze pomocí sady zrcadel. Celá plocha průřezů modelu je naskenována, takže vyrobený díl je plně pevný. Po vytištění je díl v ne zcela vytvrzeném stavu. Vyžaduje další následné zpracování pod UV světlem, pokud jsou požadovány vyšší mechanické a tepelné vlastnosti. [11]



Obr. 6) SLA 3D tiskárna Prusa SL1S SPEED [12]

3. Výběr komponentů

V této části budou představeny jednotlivé komponenty nutné k provozu stroje jako například řídicí jednotka nebo výběr pohonů. Nepředstaví se zde komponenty, které byly vyrobeny na katedře za pomoci 3D tisku. Pro ty je připravená samostatná část.

3.1. Arduino

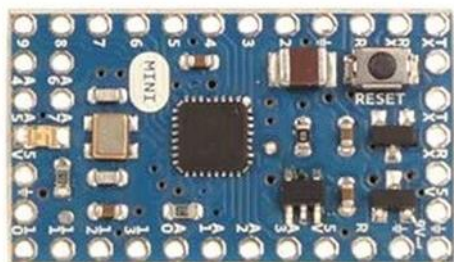
Arduino se stane srdcem celého projektu. Bude se starat o řízení krokových motorů, zobrazování údajů na displej, případně načítání kódu z SD karty nebo počítače. Krom Arduina by bylo možné použít nějaké specializované řídicí jednotky pro 3D tiskárny nebo malé CNC stroje už přímo s integrovanými drivery, slotem pro SD kartu a spoustou dalších věcí, které by stavbu lehce zjednodušily. Zároveň by ale sebraly stroji určitou flexibilitu, která se bude hodit při dalším přidávání funkcí do zařízení v nastávajících projektech. Dále budou představeny nějaké základní typy Arduina použitelné pro tento projekt s krátkým představením, co to Arduino vlastně je.

Každá vývojová deska Arduino je postavena na základu, který tvoří procesor od firmy Atmel a další elektronické komponenty. Mimo jiné i převodník, který se stará o komunikaci mezi počítačem a čipem Atmelu. Arduino však vyrábí i desky které převodník nemají, a to především kvůli úspoře místa. Existují i varianty desek, které mají převodník už jako součást čipu. U některých modelů je možné si všimnout zkratky revX nebo RX za názvem - jedná se o označení typu desky kde X je číslo označující verzi. Mezi jednotlivými verzemi však nejsou velké rozdíly, často jde pouze o design nebo drobné přeuspořádání součástek. Dále budou představeny jednotlivé desky použitelné pro tento projekt. [13]

3.1.1. Arduino Mini, Nano a Micro

Arduino Mini je asi nejmenší oficiální verze Arduina. Deska byla navrhnutá pro malé rozměry. Jedná se o jednu z verzí, která nemá zabudovaný převodník, takže pro její naprogramování je zapotřebí pořídit ještě externí převodník. Arduino Mini používá čip ATmega328 s taktem 16Mhz. Arduino Mini je tak výkonnostně srovnatelné s deskami Arduino Nano, Micro i UNO. Desky Nano a Micro jsou oproti Mini o trochu větší kvůli tomu, že v sobě mají zabudovaný převodník. Micro má oproti Nano a Mini výhodu za předpokladu, že by měly být použity jako základ pro stavbu klávesnice nebo myši. Tato výhoda je zde díky převodníku, který je součástí ATmega32u4. Ostatní desky je sice také možné použít k těmto účelům, ale vyžaduje to přeprogramování převodníku, které může být náročné. Ani jedna z těchto desek (Nano, Micro, Mini) není úplně nejvhodnější pro použití v tomto

projektu. Zmínit se zde o nich je ale dobré kvůli přehledu o tom, jaké možnosti Arduino nabízí. [13]



Obr. 7) Arduino Mini [13]



Obr. 8) Arduino Nano [13]



Obr. 9) Arduino Micro [13]

3.1.2. Arduino Uno

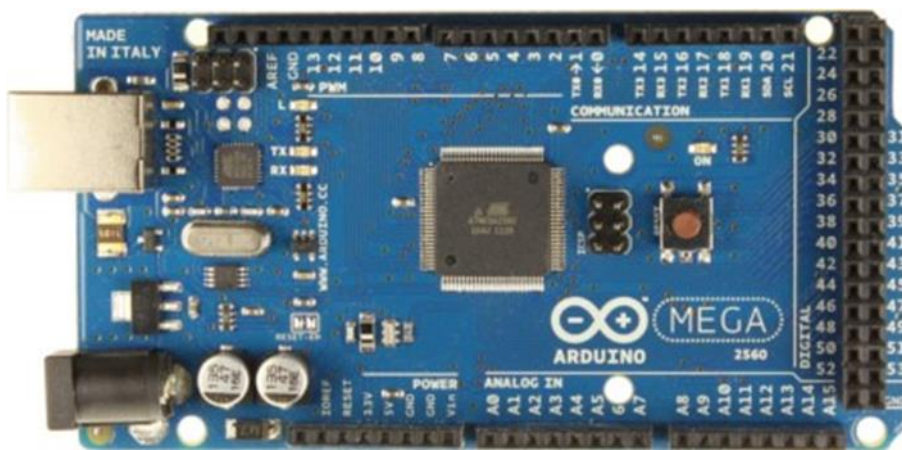
Uno je dnes nejspíše jedna z nejvíce používaných desek které Arduino vyrobilo. Arduino Uno je zároveň přímým pokračovatelem hlavní vývojové linie. Současné Uno bylo základem pro další dvě desky, a to Arduino Ethernet a Arduino Bluetooth. Arduino Ethernet je namísto USB portu vybaveno Ethernet portem, Také má oproti Unu a bluetooth verzi navíc slot na Micro SD kartu. Jinak všechny verze jsou založené na stejném chipu ATmega328.[13] Pro Arduino Uno se také vyrábí spousta shieldů, které mají za úkol zjednodušit používání některých komponentů. Krom mnohých jiných se vyrábí i shield přímo pro stavbu CNC stroje / 3D tiskárny, což je přesně to co by se hodilo pro tuto práci. Bohužel přímo k shieldu není možné připojit displej. [14]



Obr. 10) Arduino UNO [13]

3.1.3. Arduino Mega2560

Arduino Mega 2560 je deska, jejíž design byl dosažen protáhnutím Arduina Uno. Tím se vytvořila spousta místa pro větší a výkonnější čipy a také více pinů. [13] Pro Arduino Mega se také vyrábí CNC shield, který na rozdíl od shieldu na Uno, podporuje připojení displeje. Je též připravený pro připojení slotu na SD kartu a má o jeden slot pro krokový motor více. Toto jsou vlastnosti, které mohou být v budoucnu relevantní, a proto se při výběru řídicí jednotky upřednostní Mega před Unem.[14]

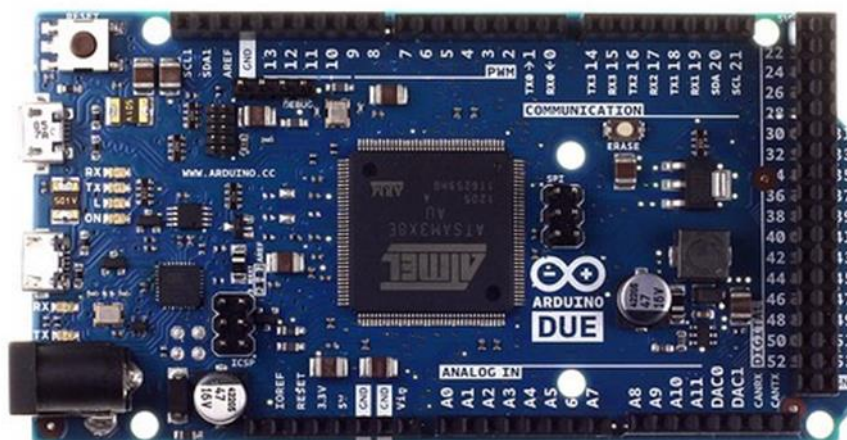


Obr. 11) Arduino Mega 2560 [13]

3.1.4. Arduino Due

Arduino Due je vyšší verze Arduino Mega. Na rozdíl od Megy, která má 8 bitový procesor s frekvencí 16Mhz, Due používá procesor Atmel SAM3X8E. 32 bitový s frekvencí 8Mhz má za následek velký výkonnostní rozdíl. Due je vybaven dvěma micro USB konektory. Jeden umožňuje připojení k počítači a programování

a druhý slouží pro připojení příslušenství jako jsou telefony, myši, klávesnice a další.
[13]



Obr. 12) Arduino Due [13]

3.1.5. Rozhodnutí

Na stroji bude použito Arduino Mega kvůli dostatečnému výkonu a příznivé ceně. K Arduino bude dokoupeno také další příslušenství jako už zmíněný shield Ramps 1.4 s drivery pro řízení krokových motorů. Také OLED displej 1.3 palce 128x64 I2C pro zobrazování informací.

3.2. Volba pohonu

V tuto chvíli už bylo rozhodnuto, že stroj bude poháněn krokovými motory z CD mechanik. Je to kvůli tomu, že jsou dostupné a je v nich už přímo integrovaný posuvový šroub. Navíc je vše připevněno na v celku robustním rámu s vyvrtnými otvory pro přitažení motoru ke konstrukci. Přes to bude níže uvedeno i servo, protože se pro pohon CNC strojů v běžné praxi používají.

3.2.1. Krokové motory

Krokové motory používají k polohování hřídele kroky. Při aplikacích na obráběcích strojích a 3D tiskárnách se často využívají motory, které mají dvě stě kroků rozložených do jedné otáčky. V závislosti na typu motoru se vytvoří určité napětí na cívce, čímž dojde k otočení o jeden krok. Některé motory jsou také schopné mikro kroků, kde je každý krok rozdělen na menší kroky, což umožňuje

pohyb s vyšším rozlišením. Krokové motory pracují v otevřené smyčce, což znamená, že jejich poloha je určena výhradně napětím, které přijímají, bez asistence snímačů, které by ovládacímu prvku poskytovaly informace o poloze. Jejich relativně jednoduchá montáž z nich dělá spolehlivou volbu, když jsou vybrány pro odpovídající aplikaci. [16]

Nedostatky a přednosti krokových motorů

Krokový motor je schopný přesné funkce při relativně snadném řízení. Motor je také kvůli své relativně jednoduché konstrukci poměrně levným řešením v různých velikostních provedeních. Nemá žádné komutátory což se kladně promítá do jeho velké životnosti. Vysoký kroutící moment při nízkých rychlostech podporuje rychlý start motoru. Rotory mají často malý moment setrvačnosti, což přispívá nejen k dobrým startům, ale také k brždění a změně směru otáčení. Krokový motor ovšem také není bez nedostatků. Mezi jeden z hlavních patří nutnost přísunu energie pro udržení stálé pozice. Motor je tedy u většiny aplikací zapotřebí napájet po celou dobu chodu. Krokový motor dosahuje svého nejvyššího kroutícího momentu při relativně nízkých úhlových rychlostech a s jejich zvyšováním ho postupně ztrácí. Toto je způsobeno rychlostí přepínání. Pokud motor není schopný překonat zátěž, která je po něm požadována, tak přeskočí - ztratí krok. Protože krokové motory jako takové pro svůj provoz nepotřebují zpětnou vazbu, většina menších motorů využívaných například v levných 3D tiskárnách ani zpětnou vazbu nemívá. Pokud by se ale požadoval spolehlivý provoz, při kterém by mohlo docházet ke ztrátě kroku, bylo by zapotřebí přidat nějaký způsob zpětné vazby, například na základě enkodéru nebo jiného čidla. Takové řešení však není zapotřebí v našem případě, protože motor nebude při svém chodu překonávat prakticky žádné odporové síly. Takže by nemělo docházet ke ztrátě kroků. [15]

3.2.2. Servo motor

Servomotory používají obvykle méně než dvanáct elektromagnetických pólů a spoléhají na komunikaci v uzavřené smyčce pro přesnost a řízení rychlosti, což znamená, že probíhá obousměrná komunikace mezi motorem a regulátorem. Rotační nebo úhlové kodéry jsou primární zpětnovazební zařízení používaná k umožnění tohoto pohybu. U servo pohonů máme možnost vybrat si kombinaci motoru a zpětnovazebního zařízení, které bude vyhovovat danému produktu nebo

rozpočtu. Pro vysoce přesné kovoobráběcí stroje jsou k dispozici motory s již integrovanými enkodéry. [16]

Krom servopohonů pro průmyslové aplikace jsou tu také modelářská serva. Ty se používají například u rádiem řízených modelů k vychýlení klapky letounu, zatočení kol auta a podobně. Pracují na podobném principu zpětnovazebního řízení jako velká serva pro průmyslové aplikace. Mají v sobě ale zpravidla navíc integrovanou převodovku pro zvýšení kroutícího momentu. Tato serva jsou také podstatně cenově dostupnější. Obvykle jsou dostupná v rozsahu 90 nebo 180 stupňů, vyrábějí se ale také s větším rozsahem. Většinu servomotorů je také možné upravit tak, aby jejich rozsah nijak omezený nebyl. [17]



Obr. 13) modelářské servo SG90 9g [18]

3.3. Řídicí softwary pro CNC podporující Arduino

3.3.1. Marlin

Firmware Marlin běží na hlavní desce CNC stroje nebo 3D tiskárny a řídí všechny činnosti stroje v reálném čase. Koordinuje ohříváče, krokové motory, senzory, světla, LCD displej, tlačítka a vše ostatní, co je součástí procesu 3D tisku. Ovládací jazyk pro Marlin je odvozen od G-kódu. Jakmile Marlin obdrží příkazy k pohybu, přidá je do fronty pohybu, která má být provedena v přijatém pořadí. Zpracovává frontu a převádí lineární pohyby na přesně načasované elektronické impulsy do krokových motorů. I při skromných rychlostech potřebuje Marlin každou sekundu generovat tisíce krokových pulzů (např. 80 kroků za mm x 50 mm/s = 4 000 kroků za sekundu). Protože rychlost CPU omezuje, jak rychle se může stroj

pohybovat, hledají se stále nové způsoby, jak optimalizovat přerušení krokování. [19]

Marlin byl od začátku vytvořen nadšenci RepRap a pro ně jako přímý, spolehlivý a adaptabilní ovladač především pro tiskárny. Marlin používá několik uznávaných komerčních 3D tiskáren. LulzBot, Průša Research, Creality3D, BIQU, Geeetech a Ultimaker jsou jen někteří z výrobců, kteří ve svých strojích používají firmware Marlin. Marlin je také schopen řídit CNC stroje a laserové gravírovací stroje. [19]

3.3.2. Reprap Firmware

RepRap Firmware je komplexní firmware pro řízení pohybu určený především pro ovládání 3D tiskáren, ale také s aplikacemi v laserovém gravírování/řezání a pro CNC. Na rozdíl od většiny ostatních firmwarů 3D tiskáren je zaměřen pouze na moderní 32bitové procesory, nikoli na zastaralé 8bitové procesory s omezeným výkonem CPU. Je tedy navržen tak, aby dobře využíval sílu moderních levných procesorů ARM k implementaci pokročilých funkcí. [20]

3.3.3. Repetier Firmware

Repetier je další software pro řízení 3D tiskáren CNC strojů. Je schopný pracovat prakticky se všemi verzemi Arduina, na kterých jde stroj postavit. Krom toho podporuje i spoustu dalších produktů. Také disponuje velice příjemným online konfiguratorem. [21]

3.3.4. Rozhodnutí

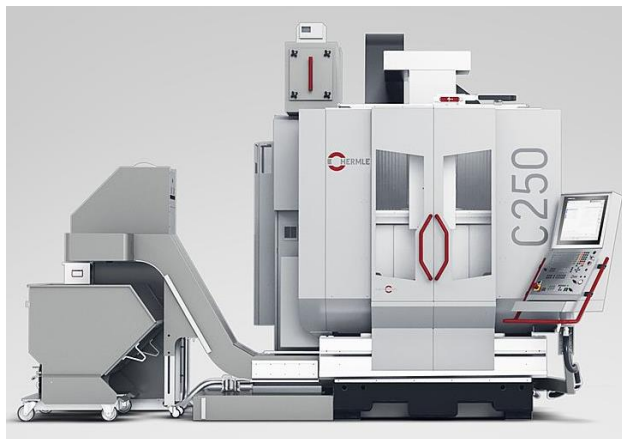
Pro základní fungování stroje, u kterého se neřeší nějaké pokročilé funkce, jsou všechny volby více než dostatečné. V podstatě všechny uvedené řídicí softwary jsou si dost podobné ve funkcích, které jsou důležité pro naši CNC frézku. Repetier má ale příjemnější prostředí pro nastavení stroje přímo ve webovém prohlížeči. U Marlinu se nastavení zařízení provádí například v Arduino IDE, kam se software nahraje a pomocí aktivace a deaktivace jednotlivých řádků kódu se upraví přímo na míru. Samozřejmě je tu na výběr z více možností jako například Prusa, Klipper, Smoothieware a dalších. V tomto případě se ale o řízení stroje bude starat Repetier Software. [22]

4. Konstrukce

4.1. Předlohový stroj Hermle C250

Pro zlepšení celkového dojmu z modelu CNC stroje by bylo dobré, aby stroj vypadal co možná nejrealističtěji. Ideální způsob, jak něčeho takového dosáhnout je vybrat si výrobek, podle kterého bude inspirován design modelu. Tímto zařízením je Hermle C250.

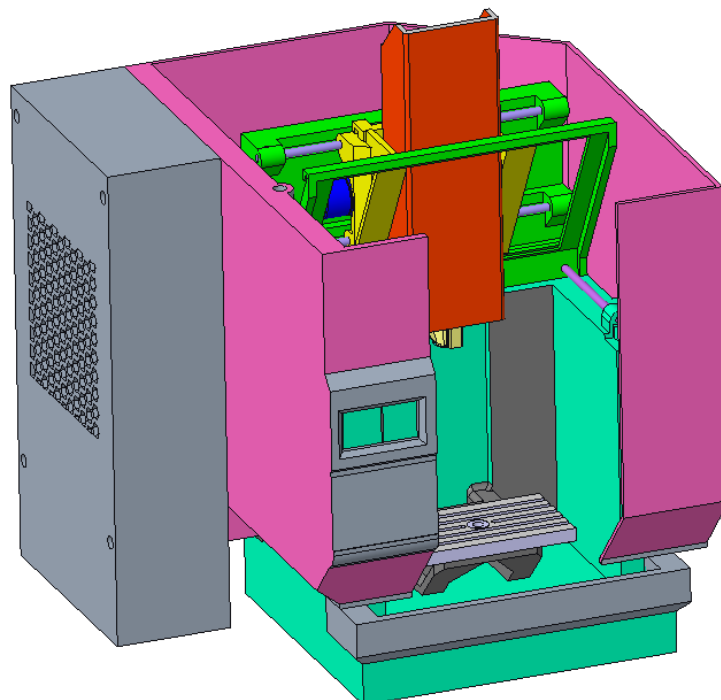
Hermle C250 je pětiosá CNC frézka s velkým rozsahem naklonění stolu. Stroj má zásobník, který pojme až třicet různých nástrojů a pokud by i to bylo málo Hermle vyrábí rozšiřující zásobník, který lze připojit k zadní části frézky. Výhodou je schopnost detekce kolizí. Pracovní stůl může pracovat s obrobkem, který váží i více než tunu s tím, že velikost pracovního prostoru je 600 x 550 x 450 mm a vřeteno je schopné dosáhnout až osmnácti tisíc otáček za minutu. [23]



Obr. 14) Hermle C250

4.2. Konstrukce úvod

Konstrukce započala ještě před tím, než bylo možné rozhodnout jakou metodou tisku bude nakonec vytisknuta. Proto je vytvořena univerzálně tak, aby byla použitelná jak pro normální FFF tiskárny, tak pro Polyjet tiskárny, které na univerzitě máme. V konstrukci jednotlivých součástí se následně bude věnovat pozornost tomu, proč bylo přistoupeno právě na použitá konstrukční řešení.

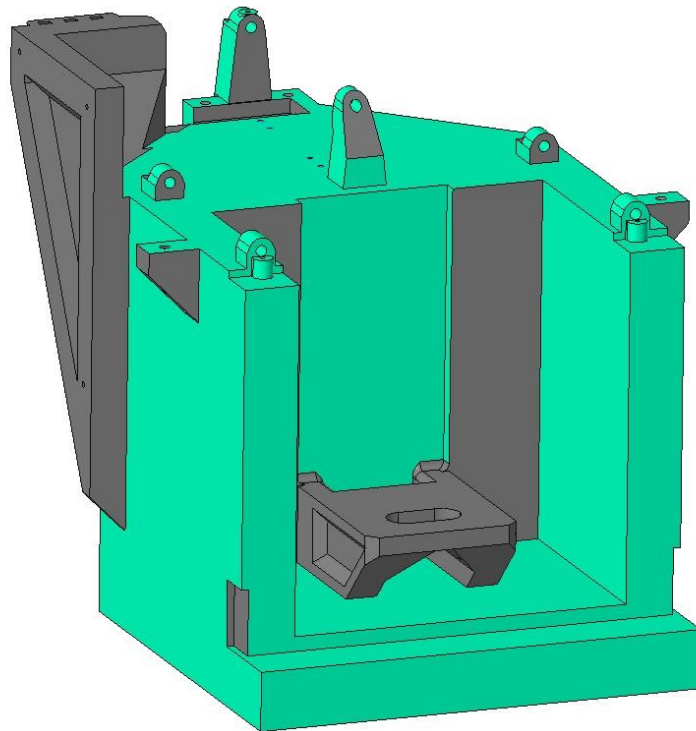


Obr. 15) výsledek konstrukční části stroje

4.3. Rám

Konstrukce rámu frézky je po designové stránce inspirována rámem předlohového modelu Hermle C250. Tento model slouží jako simulační nástroj pro detekci kolizí nových programů na skutečném stroji. Oproti originálu však bylo zapotřebí provést několik změn. Protože původní model je více méně schématický, bylo možné z něho odvodit jenom několik základních rozměrů.

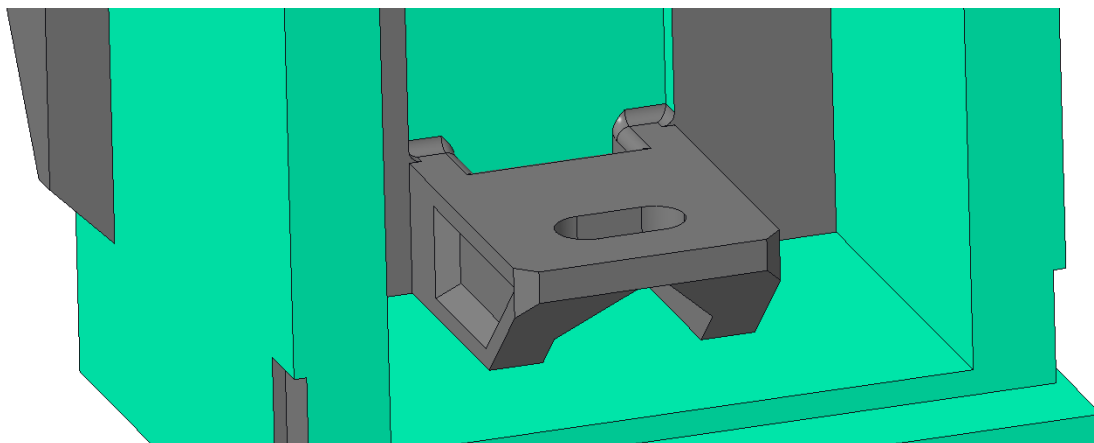
Nejvýraznější změnou oproti originálu je pracovní stůl, který nemá žádné stupně volnosti. Stůl je vetknutý k zadní stěně a dvěma podélnými nohama ke dnu pracovního prostoru.



Obr. 16) Rám CNC frézky

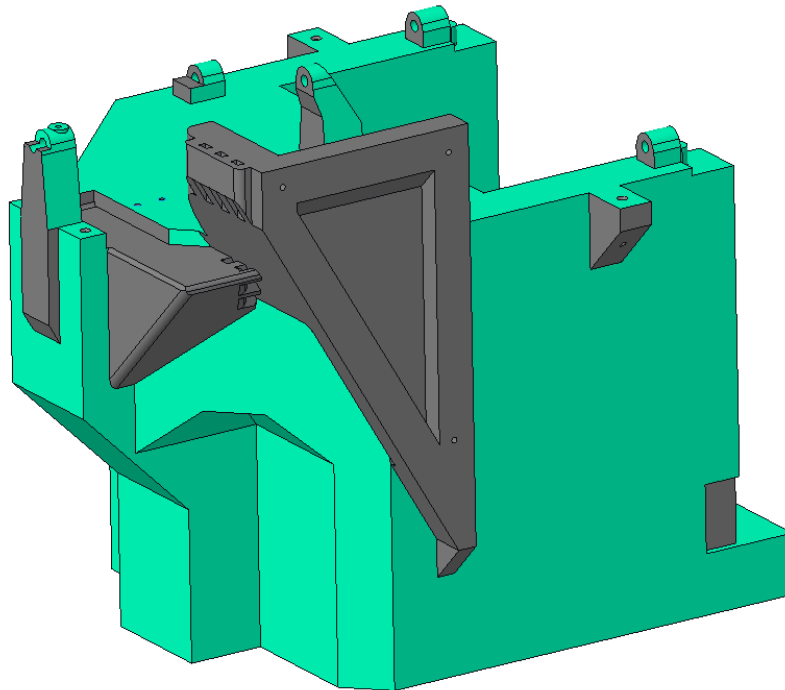
Každá z noh je z venkovní strany pro efekt odlehčena. Z vnitřní strany jsou realizována dvě sražení, která pomáhají při tisku přemostit nepodepřenou část stolu. Sražení se nesbíhají úplně do špičky, protože taková vzdálenost už při tisku na FFF tiskárně není jakkoli problematická. Pokud by se sražení potkala, úhel by se pravděpodobně zvětšil natolik, že by nadále svůj původní účel nebyl schopný plnit. Podobná sražení pro zajištění tisku bez podpor nebo jejich výrazné redukci jsou použita na všech tisknutých součástkách konstrukce, a ještě budou několikrát zmíněna. Stůl takto ale není kompletní, na jeho vrcholu ještě chybí upínací deska, která se svým čepem ze spodní strany zasune do otvoru ve stolu. Otvor je schválně oválný tak, aby rovnoběžné plochy oválu zajistily rovnoběžnost s hranami rámu. Zaoblené hrany na čepu také mají svůj důvod - některé tiskárny totiž nejsou schopné regulovat tlak v trysce hot endu a s redukcí rychlosti tisku (například když se chystá vytisknout ostrý roh) trocha materiálu ho přeteče. Také je na výtiscích potom vidět, kde došlo k začátku snižování rychlosti. Od tohoto místa se výtisk lehce začne rozšiřovat až k rohu, kde dojde k přetečení. Oba tyto jevy mají negativní vliv na rozměry a vzhled konečné součástky. To však řeší zaoblená hrana, ve které dojde k minimální nebo žádné změně tiskové rychlosti tím se eliminuje vliv obou nepříjemných vlastností. Pro řešení s tiskem upínací desky zvlášť bylo rozhodnuto především proto, že je potom možné desku tisknout upínací částí na tiskovou

podložku. To sebou nese jednu významnou výhodu. Upínací deska bude nehledě na nastavení tisku pěkně podle podložky hladká a dostatečně rovinná.



Obr. 17) rám s detailem na uchycení stolu

Další konstrukční část rámu, která bude rozebrána je levá zadní část s upínací konstrukcí pro Arduino. Původně se Arduino plánovalo uchytit ke krytu stroje nebo do samostatné krabičky na bok. To ale nejsou nejlepší řešení, protože pokud by se stroj někdy musel kvůli údržbě rozebrat, šlo by to těžko. Pakliže by se při opravě od Arduina neodpojila veškerá kabeláž, kryt zůstane spojený s rámem a při práci bude překážet. Ani jeden z těchto problémů ale nenastane, pokud Arduino připevníme k rámu. Arduino bude přišroubováno třemi šrouby M2 stranou se silovými konektory nahoru. Závity se vyříznou do předtisknutých otvorů konstrukce. Vzdálenost Arduina od rámu zajistí tištěné distanční podložky. Přičemž Arduino je krom motorů jediný elektrický prvek, který se ke konstrukci přišroubuje. Shield a drivery budou připevněny pouze třecí silou kontaktních pinů. K rámové konstrukci pro uchycení Arduina bude taktéž připevněna kabeláž několika zip pásky ještě před tím, než se zapojí do shieldu. Tímto se výrazně sníží pravděpodobnost toho, že se kabel o něco zachytne a vytrhne se ze shieldu, nebo bude dokonce poškozen. K této konstrukci budou dále připevněny kabely os X, Z a vodiče pohonu vřetene. Za držákem pro Arduino se nachází ještě patro pro podporu kabelů motoru osy Y s dvěma otvory pro uchycení kabelů zip páskami.



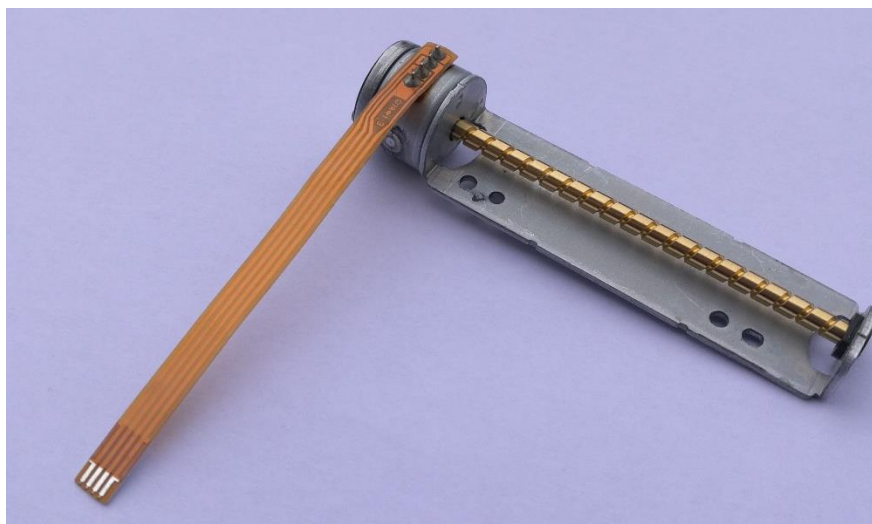
Obr. 18) rám s detailem na uchycení Arduina a kabeláže

Ukotvení posuvových tyčí a motoru. Tato část konstrukce patřila k náročnějším. Muselo se připravit uchycení, které by nezabíralo velké množství místa a zároveň poskytovalo dostatečně dlouhý chod. Toho by se obtížně dosahovalo pouze pomocí dvou posuvových tyčí, alespoň při této konfiguraci stroje. Pokud bychom použili jenom dvě tyče, jejich délka by musela být větší, a to by vadilo zadní části rámu pro Arduino. Ta již slouží pro uchycení kabelu, nemohla být ve stejné podobě jako teď, protože by do ní narazil pojezd osy Y, který by se směrem dozadu nemohl zužovat. Proto konečná konfigurace posuvových tyčí je dvě tyče směrem dopředu po stranách a jedna uprostřed vzadu nad uchycením krokového motoru. Na posuvové tyče budou použity vodící tyče z použitých CD mechanik. Jsou to hladké ocelové tyče o průměru 3 mm. Bohužel ve všech mechanikách, které byly k dispozici, jsou tyče příliš krátké na to, aby se dali použít na všech místech ve stroji. Pro potřeby na ose Y jsou však dostatečné. Krajní tyče budou usazeny do dvou výstupků. Zadní výstupek v sobě má slepou díru tak, aby se tyč nemohla vsunout dále. Na druhém výstupku je tyč pojištěna šroubem M1.4 před koncem otvoru. Toto řešení je inspirováno malými modely RC aut, které mají podobným způsobem řešené usazení čepů kyvných ramen zavěšení kola. Osa tyče od rámu je vzdálená 4.5 milimetru kvůli tomu, aby zbylo dost místa pro stěnu kluzného pouzdra pojezdu osy Y a alespoň půl milimetrovou mezeru mezi pojezdem

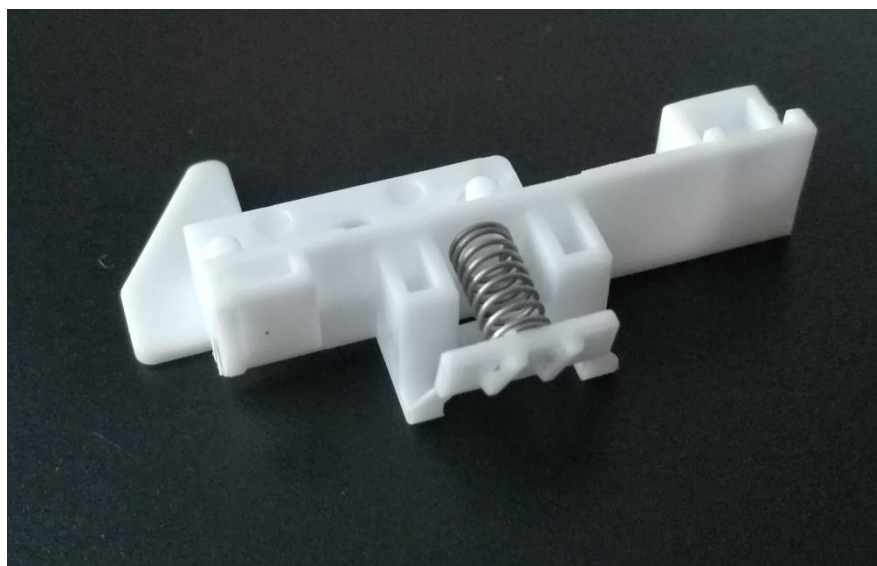
a rámem. U středového uchycení tyče je tato svojí osou vzdálena od rámu dvacet milimetrů, čímž se vytvoří dostatek místa pro krokový motor. Vzdálenost sloupů u jejich kořene je sedmdesát jedna milimetrů, což je také dostatečné. Sloup blíže k pracovnímu prostoru bylo zapotřebí srazit kvůli kolizím s pojezdem osy X v zasunutém stavu. Proto je celý zkosený směrem k zadní části stroje. Pro uchycení této tyče je zvolen trochu jiný způsob jejího zajištění. Zde ani jeden sloup nemá slepou díru. To je výhodné vzhledem k post processingu vytištěné součástky kvůli tomu, že otvor do dna takhle blízko podložky je velice obtížné obrobít. Mezi sloupky by se žádný nástavec ani žádná upínací hlava nevešla tak, aby byla schopná obrábět v ose díry. Tyč bude zajištěna šroubem M1.4 v zadním sloupku do předpřipraveného zápichu. Uchycení motoru je realizováno dvěma šrouby M2, které budou mít vyříznuté závit do předtištěných děr v rámu. V rámu jsou schválně čtyři otvory pro závit. To je kvůli tomu že ne všechny mechaniky používají stejné motory. Většinou mají velice podobný zdvih, ale vzdálenost mezi dvojicemi upínacích děr bývá rozdílná. Upínací otvory jsou proto univerzální pro motory použité z mechanik, které byly k dispozici. Aby se motor na rám dal pohodlně nasadit, je před zadním sloupkem vybrání, do kterého zapadne. Vybrání plynule navazuje na podpěrné patro pro kabely motoru.

4.4. Přenesení výkonu mezi motorem uchyceným v rámu a pojezdem osy Y

Pro přenesení výkonu bylo důležité vymyslet takové provedení, aby co možná nejméně zkracovalo dráhu pojezdu. Pohybový šroub zabudovaný do celkové konstrukce motorů má použitelnou délku závitu něco málo přes padesát jedna milimetrů, a to není mnoho. Ideální prvek by byla například posuvová matice, ale tu není možné na většinu motorů nasadit. Motory jsou totiž většinou v konstrukci zavařeny. Inspirací pro vytvoření prvku pro přenos výkonu bylo původní řešení jedné z CD mechanik. V ní se destička s dvěma lichoběžníkovými výstupky vtlačuje do závitu za pomoci pružinky. Destička s výstupky je k posuvovému celku připevněna dvěma slabými pásky. Pásky a destička jsou společně s posuvovým tělem jeden vstříkovaný díl.

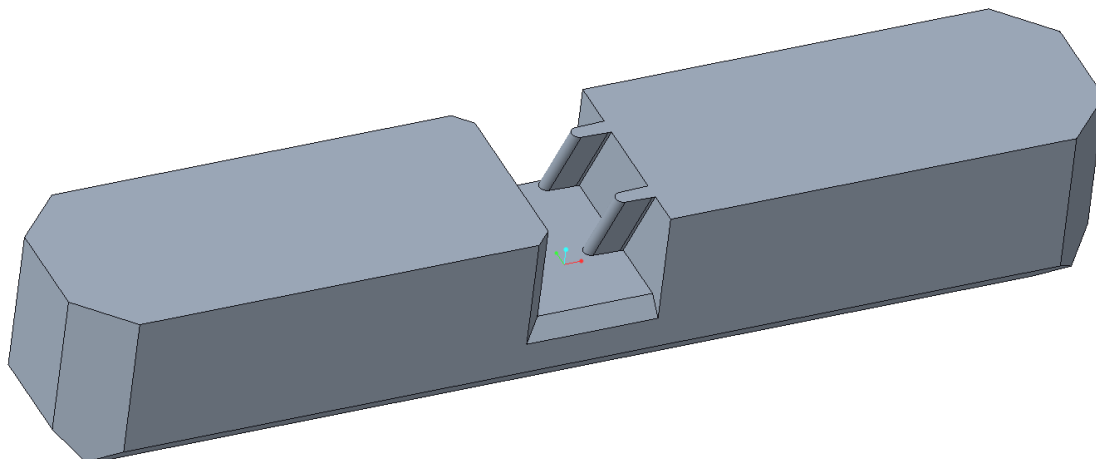


Obr. 19) Krokový motor používaný v CD mechanikách



Obr. 20) Původní řešení přenosu výkonu v CD mechanice

Vyrobít takovýto díl za pomoci 3D tisku je velice obtížné, a to především kvůli slabým ohebným páskům které mají tloušťku pouze čtyři desetiny milimetru. Takovýto design není pro tisk dobrý, navíc vnáší do konstrukce jistou komplexitu a je poměrně prostorově náročný. Přítlačný element se vyřadí a výstupky umístí na pevnou stěnu. Posuvový šroub z druhé strany bude zajištěn proti uhnutí další stěnou. Vznikne drážka pro posuvový šroub z jedné strany hladká a z druhé strany s výstupky pro přenos výkonu (tento prvek pro přenos výkonu budu dále nazývat pouze jako posuvový hřeben). Toto řešení je dobré, protože je prostorově nenáročné. Zároveň je jeho montáž jednoduchá - prostě se nasadí na závit a proti vypadnutí ho pojistí druhý posuvový prvek. V případě osy Y je to její pojezd. Posuvový hřeben ve směru posuvu měří jenom šest milimetrů.



Obr. 21) Konečné provedení posuvového hřebenu

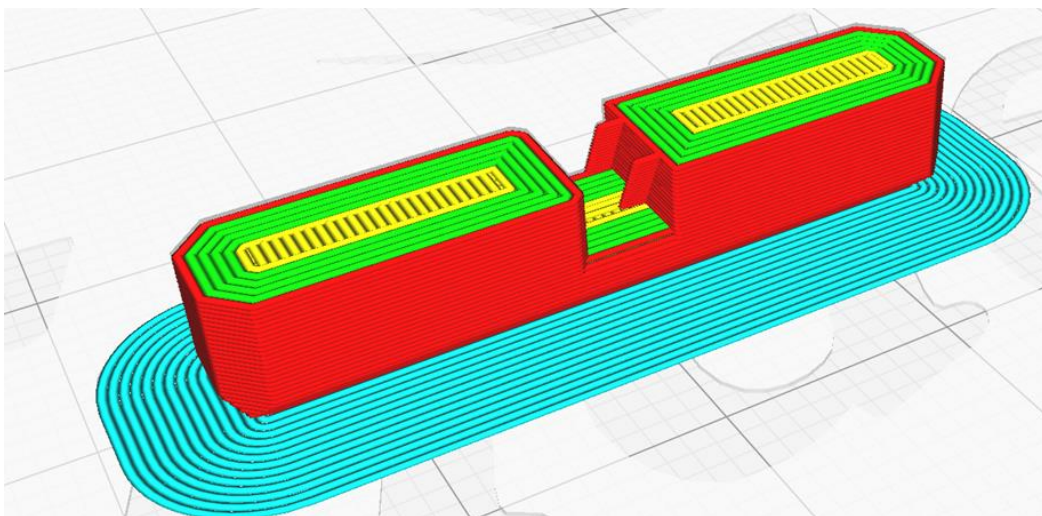
Před tím, než bylo dosaženo konečné použitelné verze hřebenu, který můžeme vidět na obrázku výše, bylo zapotřebí nejprve určit úhel stoupání šroubovice z jejího posunutí na otáčku a poloměru. Stoupání šroubovice vyšlo dvacet šest a půl stupně. Rozměry rovnoramenného lichoběžníku v jeho normálovém směru, vetknutá podstava jeden milimetr široká, druhá podstava je půl milimetru široká a jsou od sebe vzdálené osm desetin milimetru. Volba technologie tisku pro posuvový hřeben bude obtížná. SLA a FFF jsou na tom relativně vyrovnaně. SLA je schopné hřeben vytisknout s velice dobrým detailem a přesností, zatímco FFF je schopné v tomto případě schopné poskytnout rychlejší přístup k prototypovým dílům s trochu lepšími mechanickými vlastnostmi. Především dostupnost prototypů je důležitá pro následné spasování posuvového hřebenu s pojezdy jednotlivých os. Schopnost dodání rychlých prototypů je v této situaci klíčová. Proto se budou posuvové hřebeny tisknout na FFF tiskárně. Je jasné, že pokud budou vymodelovány přesné výstupky s hodnotami uvedenými výše, tak se výstupky nevytisknou přesně. Nastane stejný problém jako při řešení usazení pracovního stolu do rámu. Kvůli změně rychlosti výstupky přetečou. Zde ale není možné problém odstranit pomocí rádiusu. Konečný tvar výstupku se dosáhne jeho upravením po každém dalším výtisku zjednodušeného modelu hřebenu.



Obr. 22) Prototypy posuvových hřebenů

Takto se postupovalo, dokud nebylo dosaženo uspokojivého výsledku. Následně se pokračovalo přiděláním druhé opěrné stěny. Vzdálenost stěny od výstupků se také musela experimentálně ověřit. Použitelný rozsah vyšel zhruba tři a tři desetiny milimetru až tři a pět desetin milimetru s tím, že při třech celých třech desetinách milimetru hřeben pasuje naprosto ideálně bez vůle. Drobná vůle bude ale v budoucnu zapotřebí protože stěny drážky nebudou dokonale rovnoběžné s osou pohybového šroubu. Poslední, co zbývá, je instalace tohoto zjednodušeného mechanismu do jednotlivých os.

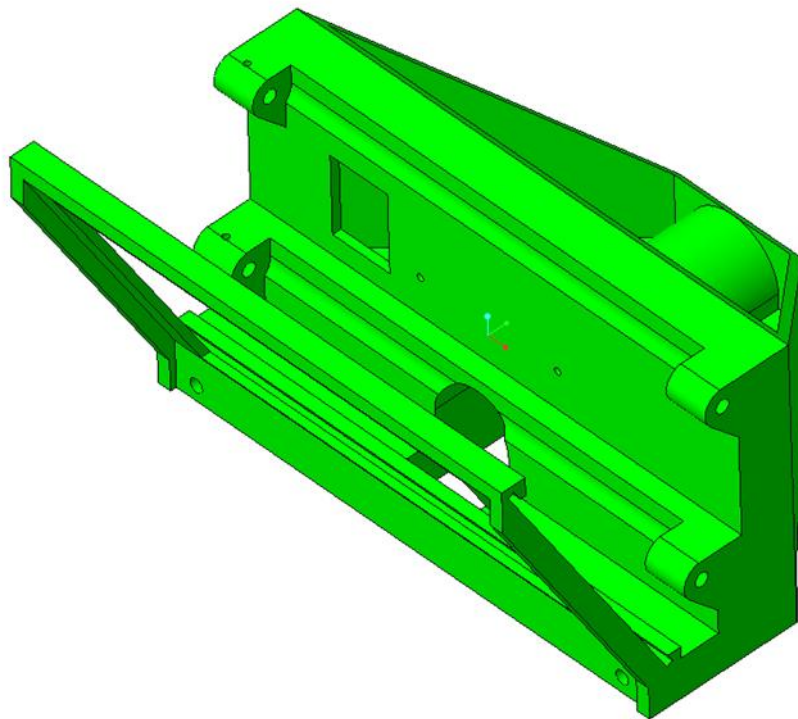
Tisk proběhne tím způsobem, že se hřeben na podložku položí největší plochou, která nebude narušena drážkou s výstupky a zároveň tak, aby výstupky byly součástí co možná nejvíce tisknutých vrstev. Toto je možné vidět na obrázku níže.



Obr. 23) Zobrazení posuvového hřebenu uloženého na tiskové podložce

Takovéto polohování výtisku na podložku zaručí maximální odolnost výstupků společně s jejich kvalitou. Pokud by se totiž hřeben tiskl obráceně snížila se šance na jeho úspěšné vytištění. Problém by mohl nastat u tisku první vrstvy, kde může dojít k odlepení zubu při zpětném pohybu trysky. Nebo pokud se pro lepší uchycení k podložce použije Brim, jako v předešlém obrázku, zhoršilo by se jeho následné odstranění v oblasti zubů ve fázi postprocesingu.

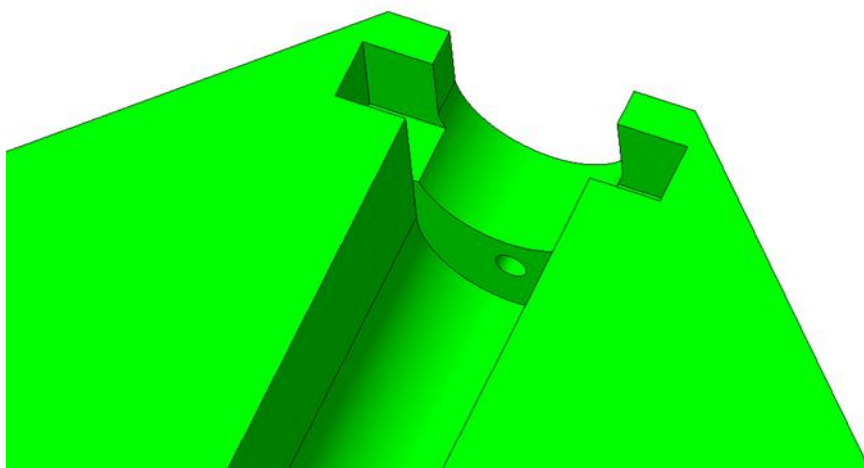
4.5. Pojezd osy Y



Obr. 24) Celkový pohled na pojezd osy Y

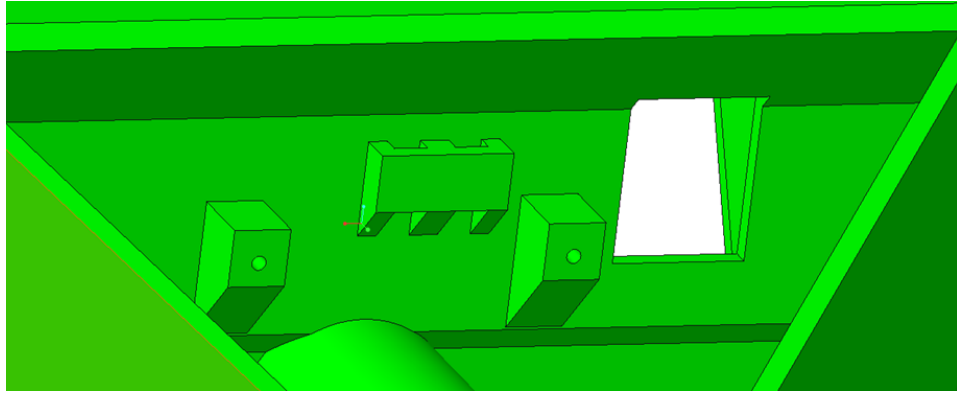
Pojezd osy Y, stejně jako všechny ostatní pohybové součástky, byl inspirován vzhledem předlohového stroje. První problém, který bylo potřeba vyřešit, se týkal kluzných ložisek. Tato musela bez vůle pasovat na posuvové tyče z mechanik. První návrh připadající v úvahu spočíval pouze ve vystružení předtíštěných děr. Řešení je to jednoduché a dobré, ale pouze do té doby, dokud se ložisko neopotřebuje. Pohodlný způsob, jak ložisko obměnit je vytisknout nový díl. Pravděpodobně by bylo možné opotřebované ložisko vylít tekutým kovem a následně znovu převrtat a vystružit. To je ale příliš pracné a mohlo by to být i nepřesné. Výroba ložisek vystružením do samotného dílu je ale ze všech

nejjednodušší, zpříjemní postprocessing a navíc tento stroj obsahuje pouze dvě součástky, které na sobě mají kluzná pouzdra. Jejich opětovné vytištění nezabere moc času, především proto, že se jedná o menší součásti stroje (pojezd osy X a Y). V zadní části pojezdu bylo zapotřebí dbát na to, aby zbylo dost místa jak pro posuvový hřeben, tak pro posuvové pouzdro. Uprostřed konstrukce je tunel z vrchní strany uzavřený půlkruhovým obloukem, který má za úkol zajistit tisk bez podpor. V tunelu se při chodu stroje bude pohybovat přední podpěra středové posuvové tyče. Odsazením tohoto oblouku v jeho zadní části se získá velice dobré místo pro předtištění otvoru pro posuvové pouzdro. Zároveň pod ním zbyde dostatek místa pro otvor na umístění posuvového hřebenu. Ten bude umístěn do obdélníkové kapsy. Dojde zde sice k nějakým nepřesnostem v rozích obdélníku, ale ty nebudou mít žádný vliv kvůli tomu, že hrany hřebenu budou dostatečně sražené.



Obr. 25) Obrázek s detailem na odsazený oblouk a uložení hřebenu

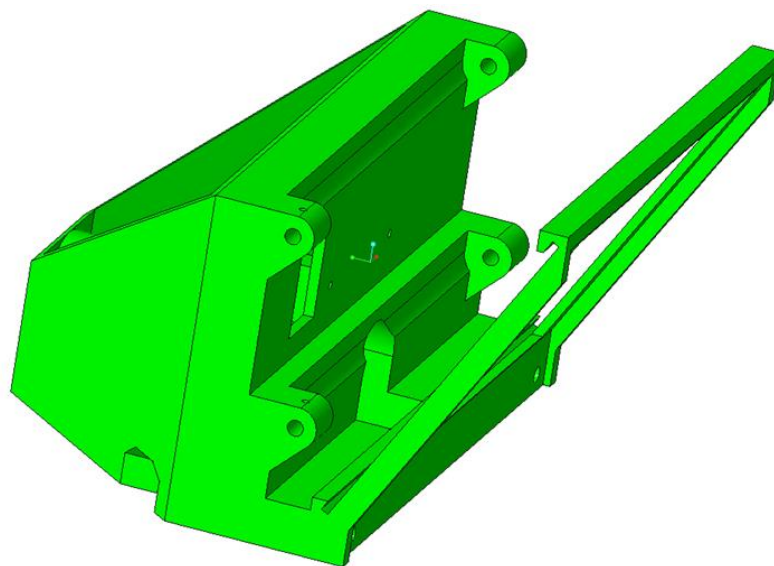
Motor pro posuv pojezdu osy X bude usazen z přední strany na pojezd osy Y. Pro tuto aplikaci byl vybrán motor, který měl vyvedené napájecí vodiče cívek ze spodní strany. V tomto případě je to výhodné, protože přesahující tělo motoru s vyvedenými kabely zapadne do předtištěného otvoru. Z druhé strany je na stěně připravená nástavba pro uchycení vodičů zip páskami k pojezdu. Zajistí se tím spolehlivé uchycení svazku a bude snížena pravděpodobnost jeho vytrhnutí z motoru nebo ze shieldu, protože na druhém konci se kabel uchyť k rámu Arduina.



Obr. 26) Konstrukce pro upevnění kabelů

Na tomto designu je dobře vidět jaké možnosti je schopen 3D tisk nabídnout. Navíc pokud budeme tisknout na FFF tiskárně, tak celý díl s výjimkou konstrukce pro zakrytování bude možné tisknout zcela bez podpor. Také je možné si všimnout výstupků s předtištěnými otvory pro uchycení motoru. Tunel je v přední části kvůli dodatečné tuhosti spojen. Spojení je ale pouze tak hluboké, aby při maximálním zasunutí nezkracovalo posuv osy Y. Tím se vytvoří dostatek místa pro drážku, která poslouží jako vedení zakrytování posuvového ústrojí.

Pro uchycení posuvových tyčí osy X byl zvolen stejný zajišťovací mechanismus jako pro středovou tyč rámu. Při jejich umisťování na pojezd osy Y bylo zapotřebí zvážit několik věcí. Ideální umístění pojezdu osy je takové, aby jeho síly nevytvářely pákové namáhání pojezdu osy Y. Zároveň musí být vytvořeno dostatek místa pro krokový motor. Ideální způsob, jak tohoto prostoru pro motor dosáhnout, je odsazení přední stěny nad spodními úchyty posuvových tyčí směrem dozadu.

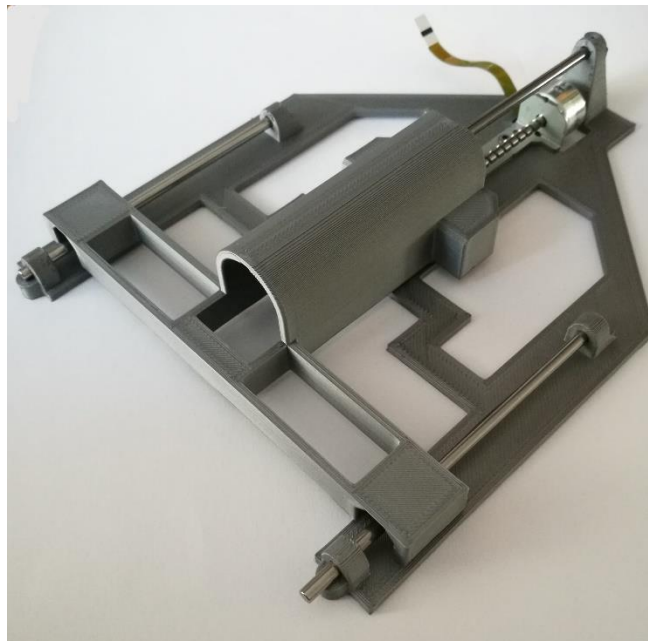


Obr. 27) Obrázek odsazené stěny s úchyty

Nejenom že vznikne více prostoru pro motor, bude také možné přiblížit pojezd osy X blíže k pojezdu osy Y pro zmenšení ramene páky. Výhoda tohoto řešení spočívá také v tom, že se od sebe posuvové tyče pro pojezd osy X vzdálí ještě více. Tím pádem se méně projeví vůle potřebné k provozu kluzných ložisek na celkové vůli pojezdu (v rozsahu vůle dojde k menší výchylce). Z tohoto pohledu se může zdát jako dobrý nápad posunout spodní úchyt tyče pojezdu osy X co možná nejnižší. Není tomu tak, už kvůli této výšce bylo zapotřebí zkosit přední úchyt středové tyče. A celkové posunutí motoru na rámu vzhledem k maximálním zadaným rozměrům nepřichází v úvahu.

4.6. První prototyp

Je dobré si uvědomit že konstrukce nepostupovala stejným sledem událostí jako jsou uvedené výše v popisu jednotlivých konstrukčních prvků. První vznikla kompletní posuvová soustava bez dořešeného rámu a krytování. Do posuvové soustavy se až následně zapracovaly úchytné prvky posuvových hřebenuů. I když se prototypové hřebeny na motoru pohybovali velice pěkně a bez citelné vůle usazení neodpovídalo tomu jaké bude na stroji. Také nebylo jisté, jestli bude možné obrobení otvorů pro posuvové tyče. Rozhodlo se proto pro tisk zjednodušeného prototypu rámu pojezdu osy Y a posuvového hřebenu. Co se ostatních součástí tyče prototyp není zapotřebí protože princip posuvu je na každé ose stejný.

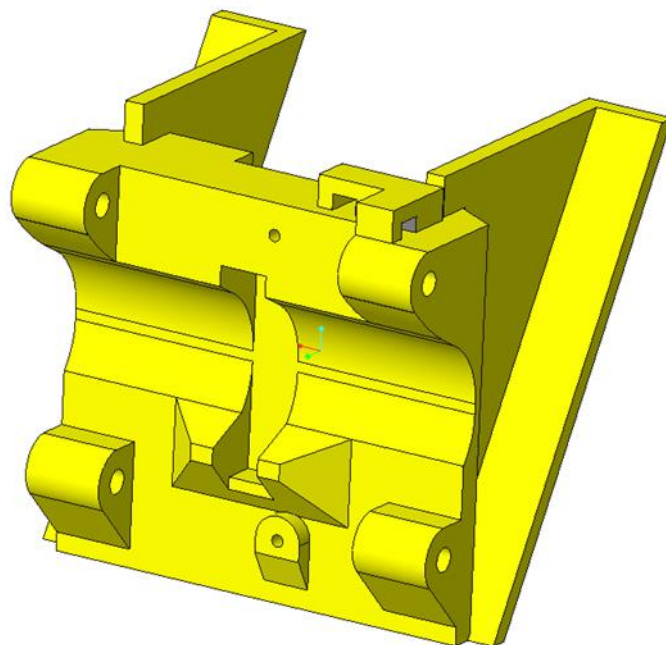


Obr. 28) První prototyp

Při opracování otvorů v rámu po tisku se jenom potvrdilo, že se jedná o proveditelný, ale obtížný proces. Obrobení samotných kluzných pouzder už kvůli jejich prostupnosti bylo mnohem jednodušší. Menší problém se přece jenom vyskytl. Jelikož kluzná pouzdra musí být přesná, pouze vystružení výstružníkem jmenovitého rozměru posuvové tyče nevytvořilo dostatečně velký otvor, aby se v něm tato tyč pohybovala volně. Naštěstí v dílně byl k dispozici výstružník s o desetinu milimetru větším průměrem, který vytvořil použitelný otvor. Usazení samotných tyčí proběhlo bez jakýchkoliv problémů. Při sesazení a odzkoušení prototypu se vše pohybovalo hladce a bez vůlí. Pouze u hřebenu bylo zapotřebí o desetinu milimetru oddálit stěny drážky, protože v zadní části pojezdu neměl plynulý chod.

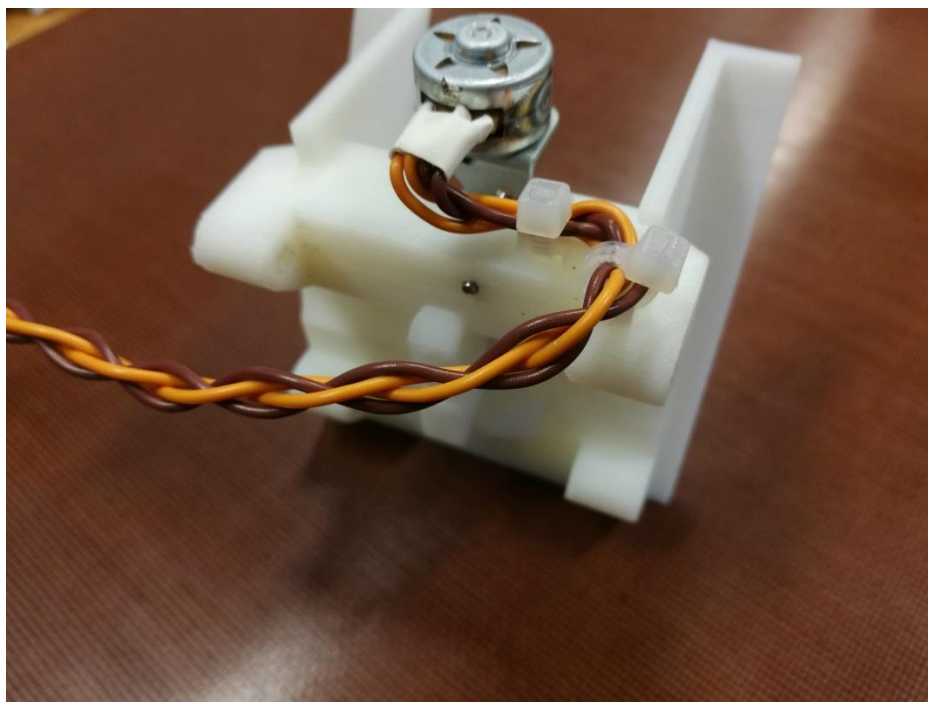
4.7. Pojezd osy X

U pojezdu osy X se myslelo na to, aby se všechny zbývající komponenty, které na něj budou navázány, byly co možná nejlíže k pojezdu osy Y. To je důležité kvůli tomu, aby se na zbytek konstrukce nevytvářela páka. Co se kluzných pouzder tyče, tak tento díl má na sobě pouzdra jak pro osu X, tak pro osu Z. Posuvová pouzdra pro osu X jsou umístěna tak, aby pasovala na posuvové tyče osy X. Zároveň jsou pouzdra vzdálena právě tak daleko od sebe, aby nedocházelo k omezení maximální délky posuvu tímto prvkem.



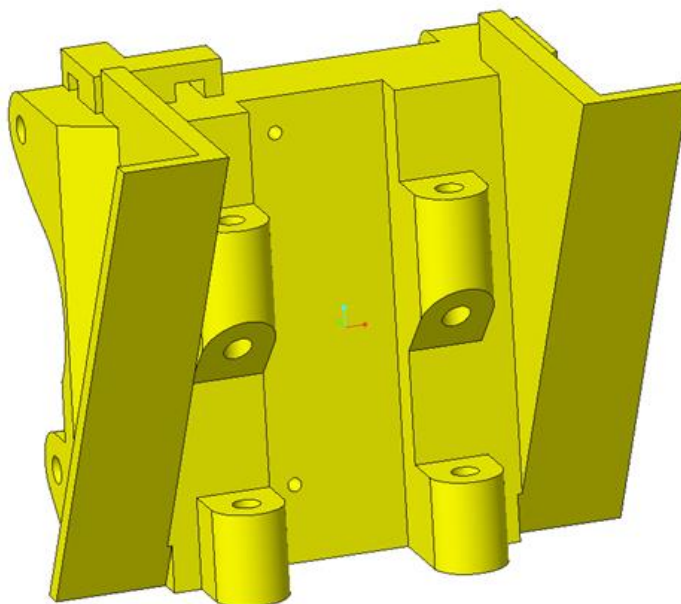
Obr. 29) Zadní část pojezdu osy X

Pouzdra jsou směrem ke spodní části zkosena kvůli zajištění tisku bez podpor. Zároveň zkosení spodních pouzder osy X nebylo možné protáhnout až ke spodní ploše součásti kvůli tomu, že při plném využití rozsahu osy Y směrem vzad, už při tomto sražení docházelo ke kolizi s předním uchycením prostřední posuvové tyče na rámu. Tento problém byl již řešen při konstrukci rámu a uchycení posuvových tyčí a motoru. Sražení vrchních kluzných pouzder také muselo být přizpůsobeno. Bylo zapotřebí vytvořit dostatek prostoru pro krokový motor osy X, který bude umístěn na pojezdu osy Y. V zadní části pojezdu osy X se také nachází uchycení pro posuvový hřeben osy X. V horní části je uchycení v otvoru ve výstupku, který byl umožněn posunutím vrchního uchycení posuvové tyče osy X na pojezdu osy Y dozadu. Ve spodní části se pro uchycení posuvového hřebenu musel vytvořit umělý výstupek. Otvor pro uchycení posuvového hřebenu zde byl omezen shora i zdola otvory pro uchycení konstrukce krokového motoru. Uchycení motoru zde už není univerzální stejně jako na pojezdu osy Y uchycení motoru pojezdu X. Zde bylo důvodem také to, že je mnohem výhodnější vést kabeláž k motoru zezadu, kde nejsou žádná prostorová omezení. Tomuto byla přizpůsobena také konstrukce. Uchycení kabeláže je realizováno opět dvěma zip pásky, které zapletený svazek přichytí k předtištěnému úchytu ve tvaru L na vrchu součásti



Obr. 30) Uchycení kabeláže motoru pro pohon osy Z

V přední části pojezdu je realizováno drážka s otvory pro uchycení motoru a kluzná pouzdra pojezdů osy Z. Pouzdra jsou opět vzdálená co možná nejvíce, ale ne tolik, aby omezovala maximální délku pojezdu. Vrchní pár pouzder je opatřen sražením pro tisk bez podpor a spodní pár se bude tisknout přímo na tiskovou podložku, takže sražení nepotřebuje. Pojezd je také opatřen úchyty pro případné posuvné krytování celého posuvového ústrojí.



Obr. 31) Pojezd osy X zepředu

4.8. Pojezd osy Z a uchycení motoru vřetene.

U pojezdu osy Z byl hlavní konstrukční požadavek z hlediska jeho nároků na prostor, aby se vešel mezi pojezd osy X a vedení posuvného krytování posuvového ústrojí na pojezdu osy Y. Pojezd osy Z je jediný, který na sobě nemá žádná kluzná pouzdra pouze posuvové tyče. Posuvové tyče jsou zde prakticky přes celou výšku pojezdu na obou koncích uloženy do průchozích otvorů a zajištěné z obou stran. V horní části pojezdu budou tyče zajištěny pomocí šroubků M2 zašroubovaných do předtištěných otvorů souosých s těmi pro posuvové tyče. O samotné zajištění se potom bude starat vytištěná podložka. Ze spodní strany jsou otvory pro dva šrouby velikosti M2, připravené pro uchycení vřetene. Vřeteník svojí vrchní stranou dosedne na otvory pro uchycení posuvových tyčí a tím je zaslepí. Samotné nasazení motoru s vřetenem a jeho upínací části, může zprvu působit nešikovně.

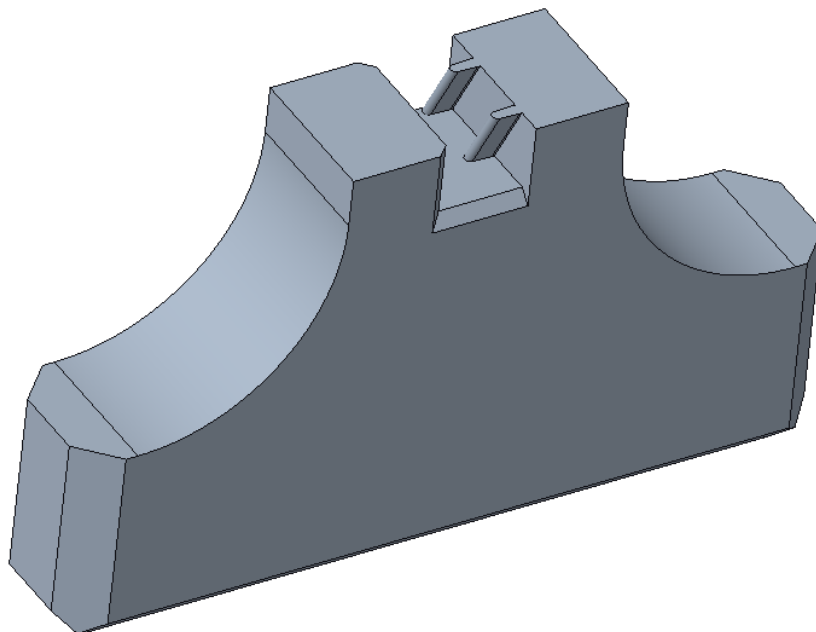
Je tomu tak proto, aby vřeteno šlo zkompletovat, ale zároveň nebylo z pohledu pozorovatele vidět žádné šroubové spoje. Motor pro pohon vřetene zde bude připevněn dvěma šrouby imbus k vodorovné příčce na pojezdu osy Z.



Obr. 32) uložení motoru a vedení kabeláže osy Z

Před zamontováním k němu musí být připájené kabely, které se povedou středovým tunelem do vrchní části pojezdu. Tam budou připevněny zip páskem k připravenému výstupku. Dále pokračují na konstrukci pro uchycení Arduina, ke které se připevní s ostatní kabeláží. Po zamontování motoru je možné na pojezd připevnit kryt vřetene, aby zakryl otvory pro uchycení posuvových tyčí. Potom se vloží rotační vložka vřetene, která má otvor se závitem pro stavěcí šroub. Vložka se stavěcím šroubem přitáhne za pomoci otvoru v zadní části vřeteníku. Touto konstrukcí vznikne velice esteticky dobře vypadající celek, který neruší žádné přebytečné součástky. Posuvový hřeben bude upevněn stejně jako posuvové hřebeny na jiných osách do drážky. Nutné však bude jej v tomto případě upravit tak, aby nekolidoval s posuvovými tyčemi a také s kluznými pouzdry na ose X. Hřeben je proto opatřen dvěma symetrickými vybráními profilu kruhové výseče, které kolizím předejdou. V horní části pojezdu je vytažený kryt tak, aby při maximálním přiblížení vřetene k pracovnímu stolu, pojezd stále zůstal nad úrovní vedení pro posuvný kryt posuvového ústrojí na ose Y. Podél celého pojezdu je směrem

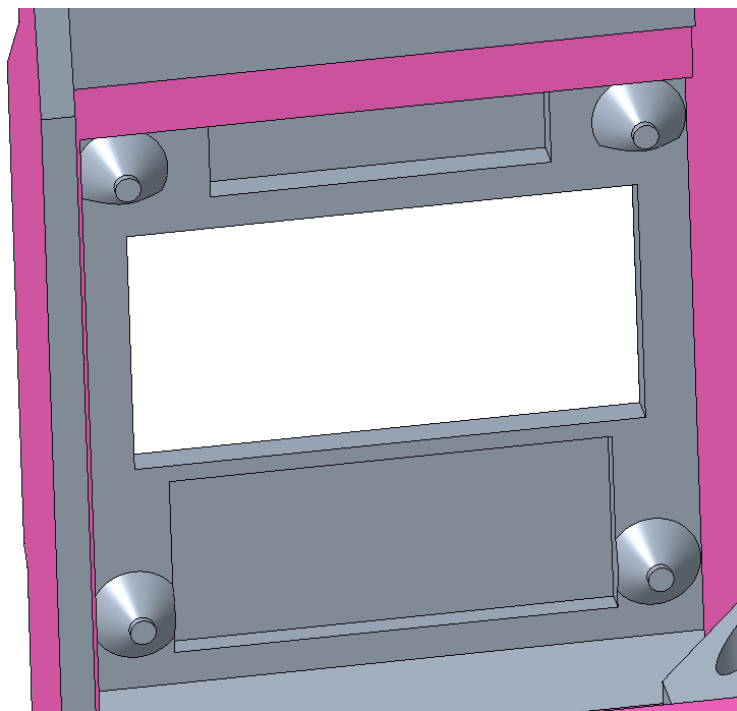
k pojezdu osy X výstupek, který má za úkol opticky k sobě pojezdy přiblížit pro vytvoření na pohled příjemnějšího celku.



Obr. 33) Upravený posuvový hřeben pro pohon osy Z

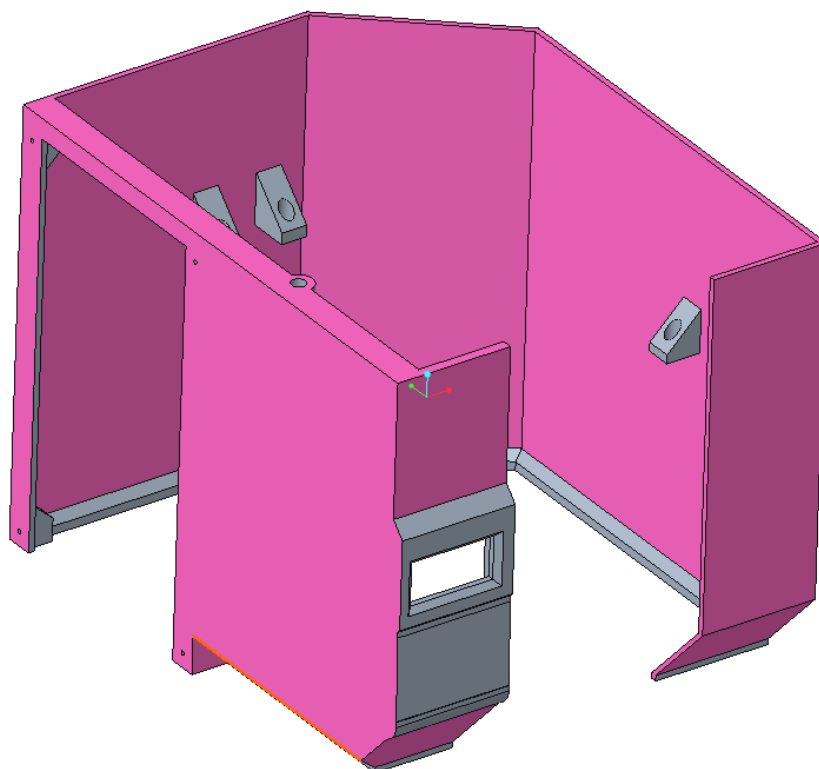
4.9. Krytování stroje

Vzhled hlavního krytu stroje byl inspirován předlohovým strojem Hermle C 250. Na rozdíl od předlohového stroje, kde je ovládací panel s displejem vyveden na panel mimo stroj se zde přistoupilo k možnosti umístění displeje přímo na hlavní kryt. Tato volba měla hned několik důvodů. Piny na vybraném displeji byly příliš dlouhé na to, aby umožnily esteticky štíhlý vzhled ovládacího panelu. Piny jde samozřejmě odpájet, ale dalším důvodem pro vybrání jiného řešení, se stal rozměr průřezu kabelového svazku, pro který by musela být přiměřeně mohutná konstrukce nosné nohy. Navazujícím potenciálním problémem tohoto řešení je uložení nohy v rámu. Musely by se zde nějakým šikovným způsobem vyvést kabely a zároveň vyřešit otočné uložení nohy. Proto bylo od této varianty ustoupeno. Pro uchycení displeje nebudou použity šrouby kvůli tomu, že by musely mít hodně mělké otvory. V opačném případě by došlo k přílišnému utopení displeje do konstrukce. Místo otvorů jsou pro displej připraveny centrovací výstupky, na které se usadí a následně přilepí například tavným lepidlem.

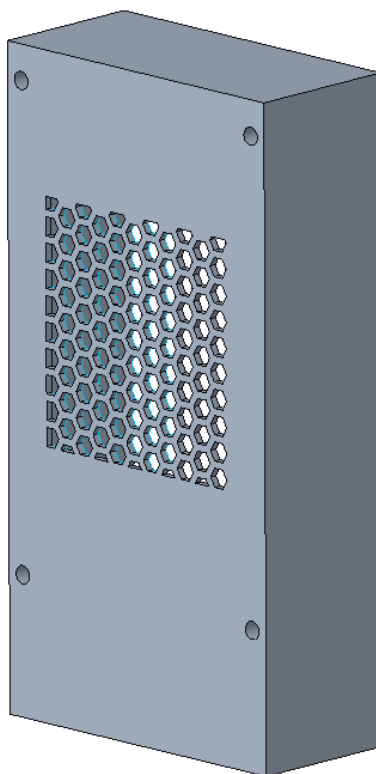


Obr. 34) Úchyty pro displej

Uchycení kabeláže od displeje je potom připraveno po levé straně krytu. Jako všude jinde i zde se kabeláž uchyť pomocí zip pásků. V levé části krytu je velký otvor, kterým se prostrčí Arduino a další elektronika. Kryt schválně nemá ve spodní části žádnou příčku. Je to kvůli dosažení co možná nejlepšího přístupu pro případnou údržbu. Úmysl tohoto řešení je ten, že pokud odšroubujeme kryt elektro instalace, uvolníme hlavní kryt pomocí čtyř šroubů v rámu a odpojíme kabeláž displeje, můžeme kryt pohodlně sundat. Je zřejmé, že v místě výřezu bude hlavní kryt výrazně oslaben. Spojení je proto patřičně zesíleno. Hlavní kryt se také zpevní po spojení s krytem pro elektroinstalaci a připevněním na rám. Kryty po spojení při pohledu shora mají ve svých maximálních rozměrech právě maximální přípustné rozměry dvě stě na dvě stě milimetrů. Kryt pro elektro instalaci je vybaven ve své zadní části mřížkou pro zlepšení chlazení elektroinstalace.



Obr. 35) Hlavní kryt stroje



Obr. 36) Kryt pro elektroinstalaci

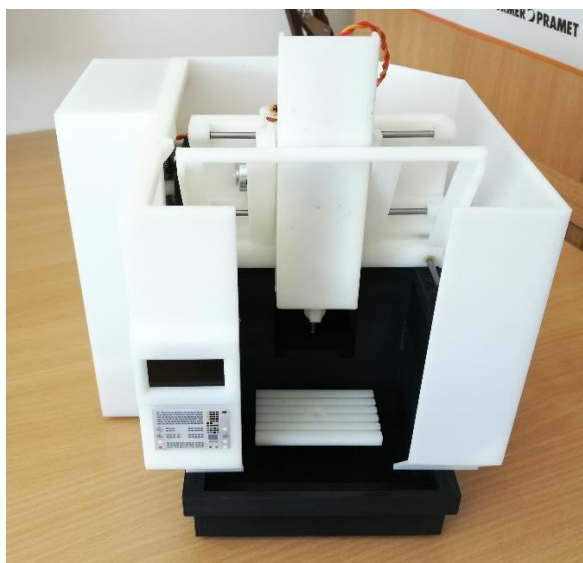
5. Sestavení

Pro tisk jednotlivých součástí stroje byla zvolena technologie FFF s tím, že rám byl vytištěn z materiálu ASA (akrylonitril-styren-akryl) a zbytek modelu z ABS (Akrylonitrilbutadienstyren). Po vytištění všech součástí je třeba ještě dodělat několik detailů, aby se model dal sestavit.

Prvně je nutné všechny vytištěné otvory pro šrouby M2 provrtat na průměr jedna celých pět milimetru a následně do nich závitníkem vyříznout závit. Pro pojistné šrouby M1.4 se otvory povedly vytisknout dostatečně velké, takže do nich lze šroubovat bez dalších úprav.

Při vystružování posuvových pouzder a úchytů posuvových tyčí se využilo dvou různých výstružníků. Pro posuvová pouzdra byl použit výstružník s rozměrem 3.1 H7, což ve výsledku zajistilo hladký chod jednotlivých tyčí v posuvových pouzdrech. Pro otvory, které mají za úkol posuvové tyče pouze zajistit, je žádoucí, aby byl spoj o něco těsnější. Proto byl použit výstružník s průměrem 3 H7. Posuvové tyče byly následně vsunuty do svých uložení s dostatečnou těsností, takže se upustilo od zajišťování tyčí pomocí šroubků M1.4.

Nakonec bylo možné k jednotlivým částem stroje připevnit motory a stroj sestavit. Po složení se připevnilo Arduino, nadsadil shield s drivery, zapojily se motory a vyzkoušelo se, jestli budou schopné manipulovat s jednotlivými posuvy. Vše je funkční, s nižšími proudy ale ze začátku občas došlo ke ztrátě kroku. S postupným navyšováním proudu, byly výpadky čím dále ojedinělejší. Při hodnotě proudu nula celá tři ampéry došlo ke hladkému chodu bez ztrát kroku.



Obr. 37) Sestavený stroj

Závěr

Výsledkem této práce je pohyblivý model tříosé CNC frézky, která je řízena za pomoci Arduina a krokových motorů z CD mechanik. Model je schopný samostatného pohybu bez dalších vnějších vlivů. Což je přesně to, co zadání požadovalo.

Vytížení motorů je však v celku hraniční. Za tímto pravděpodobně stojí nepřesnost výroby, protože se všechna posuvová pouzdra nepodařilo vystružit tak, aby měla úplně rovnoběžné osy. To stejné platí také o uložení posuvových tyčí. Výsledkem je to, že v průběhu posuvu na jednotlivých osách dochází k nekonstantnímu odporu. Tento problém by bylo možné řešit přeštroužením otvorů na větší rozměr, aby se ze všech míst odstranil přebytečný odpor. Tím ale na jiných místech naopak vzniknou nežádoucí vůle. V případě modelu by toto nemuselo být na závadu. Vzhledem k předpokládanému dlouhodobému provozu modelu, bylo rozhodnuto stávající vůle ponechat a počkat, zdali nedojde k záběhu stroje. Velice podobný problém je i s posuvovými hřebeny a uložení krokových motorů.

Zatímco uložení posuvových částí a motorů má své nedokonalosti, upevnění elektro instalace, především té mezi Arduinem a elektroinstalací na pojezdu osy Y, je velice dobré. Klade minimální odpor, kabely nikam neláme a zároveň je ani nenavádí někam, kde by mohly vadit. Na podložce kabelů pro pohon osy Y není úplně ideální prostor pro zip pásky, které se po sražené hraně pro usnadnění tisku mají tendenci posunovat.

Co se designu týče tak působí povedeně a realisticky. To je pro prezentační model velice dobrá vlastnost. Na celém modelu je obtížné najít nějaké šrouby nebo jiné spoje, které by celkový dojem ze stroje nějak narušovaly. Dobré je také krytování, které je po namontování na stroj výrazně zpevněno, a tak by nemělo za chodu vydávat žádné rušivé zvuky.

Použitá literatura

- [1] The History of CNC Machinery, 2019. Laszeray [online]. USA: Laszeray Technology, 28.11.2019 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://laszeray.com/blog/the-history-of-cnc-machinery/>
- [2] CNC History: The Origination and Evolution of CNC Machining, 2021. Rapiddirect [online]. China: rapiddirect, 12.1.2021 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.rapiddirect.com/blog/cnc-history/>
- [3] The-basics-characteristics-of-cnc-machining-lock-parts-cnc-machining, 2020. Cnclathing [online]. cnclathing, 1.10.2020 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.cnclathing.com/guide/the-basics-characteristics-of-cnc-machining-lock-parts-cnc-machining>
- [4] MAREK, Jiří, 2014. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. 3. Praha: MM publishing. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [5] StreTech: Fakulta strojní ČVUT, 2017. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN isbn978-80-01-06162-6. Stretech. ČVUT. Vedoucí práce Vít Nesvatba.
- [8] Základy 3D tisku s Josefem Průšou [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou_490/
- [9] MATERIAL JETTING, SIMPLY EXPLAINED. <https://all3dp.com/> [online]. ALL3DP, 2019 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>
- [10] How to design parts for material jetting 3D printing. HUBS [online]. Velká Británie: HUBS [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-material-jetting-3d-printing/>
- [11] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. What is SLA 3D printing?. Hubs [online]. hubs [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- [13] VODA, Zbyšek, 2017. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž. ISBN 978-80-87106-93-8. [cit. 2022-01-01]. Dostupné také z: <https://www.robotikabrno.cz/docs/arduino/Pr%C5%AFvodce-sv%C4%9Btem-Arduina-CZ.pdf>.

- [14] What is an arduino shield?. Programming electronics academy [online]. programming electronics academy [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.programmingelectronics.com/what-is-an-arduino-shield/>
- [15] KROKOVÝ MOTOR – DRUHY A PŘÍKLADY APLIKACÍ KROKOVÝCH MOTORŮ, 2020. TME [online]. Česká republika, 2020-09-08 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/41861/krokovy-motor-druhy-a-priklady-aplikaci-krokovych-motoru/>
- [16] Servo Motors for CNC Machines, 2019. Heidenhain [online]. USA: Heidenhain, 22.4.2019 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.us/resources-and-news/servo-motors-for-cnc-machines/>
- [17] JAVORSKÝ, Petr, 2021. *Konstrukce robotické ruky*. Praha. Bakalářská. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
- [19] What is Marlin?, 2022. *Marlinfw* [online]. Marlin [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>
- [20] RepRapFirmware. *RepRapFirmware* [online]. RepRapFirmware [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.reprapfirmware.org/>
- [21] Repetier-Firmware Documentation. In: Repetier [online]. Repetier [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.repetier.com/documentation/repetier-firmware/repetier-firmware-introduction/>
- [22] GHARGE, Pranav, 2021. 3D Printer Firmware: Best Options of 2021. All3dp [online]. all3dp [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-firmware-which-to-choose-and-how-to-change-it/>
- [23] Obráběcí centrum C250. In: Hermle [online]. Německo: Hermle [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.hermle.de/cs/obr%C3%A1b%C4%9Bc%C3%AD_centra/modely/obr%C3%A1b%C4%9Bc%C3%AD_centrum_c_250

Obrázky

[6] Cnc 3018 Router Kit With Laser Engraver 500mw Laser Engraver Grbl Injection.

In: Vevor [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z:

<https://image.vevor.com/us%2FDKJ3Z3018DKJ500MWV2%2Fsource-img%2Fm100-11.jpg>

[7] Mini CNC Router 1310 CNC Metal Engraving Milling Machine Kit PCB Wood Milling Laser. In: Joom [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z:

https://img.joomcdn.net/a10525a57bf4ae201a73dcb52f3d8eca5c2290dc_original.jpg

[12] Original Prusa SL1S SPEED 3D tiskárna. In: Prusa research [online]. Česká republika: Prusa research [cit. 2022-05-04]. Dostupné z:

<https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-sl1s-speed-3d-tiskarna/>

[18] Plastové micro servo SG90 9g, 180°. In: Láskakit [online]. Česká republika: láskakit [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: [https://www.laskakit.cz/plastove-micro-servo-sg90-9g--180/?gclid=Cj0KCQjwyMiTBhDKARIsAAJ-9Vub1rs2tDNMwZog45sPEINL2Hru-](https://www.laskakit.cz/plastove-micro-servo-sg90-9g--180/?gclid=Cj0KCQjwyMiTBhDKARIsAAJ-9Vub1rs2tDNMwZog45sPEINL2Hru-VDb5Zscv_gzNPXh6nOrrNKO3UEaAqzQEALw_wcB)

[VDb5Zscv_gzNPXh6nOrrNKO3UEaAqzQEALw_wcB](https://www.laskakit.cz/plastove-micro-servo-sg90-9g--180/?gclid=Cj0KCQjwyMiTBhDKARIsAAJ-9Vub1rs2tDNMwZog45sPEINL2Hru-VDb5Zscv_gzNPXh6nOrrNKO3UEaAqzQEALw_wcB)