



# Návrh konstrukce open-source CNC frézky

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

*Autor práce:*

*Vedoucí práce:*

B0715A270008 Strojírenství

**Filip Svatý**

Ing. Andrii Shynkarenko, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace





## Zadání bakalářské práce

# Návrh konstrukce open-source CNC frézky

*Jméno a příjmení:* Filip Svatý  
*Osobní číslo:* S19000118  
*Studijní program:* B0715A270008 Strojírenství  
*Zadávací katedra:* Katedra výrobních systémů a automatizace  
*Akademický rok:* 2021/2022

### Zásady pro vypracování:

Primárním cílem bakalářské práce je vlastní návrh konstrukce počítačem řízené frézky. Návrh by měl být koncipovaný jako open-source projekt. Velký důraz je kladen na nízkou pořizovací cenu stroje s využitím základních konstrukčních prvků jako jsou hliníkové profily a technologie 3D tisku. V návrhu konstrukce stroje je nezbytné počítat s možností výměny nástrojové hlavy podle způsobu využití stroje. Jako frézka, gravírka nebo 3D tiskárna. Stroj musí umožňovat obrábění dřeva, plastů a hliníku. Součástí práce bude výkresová dokumentace, modely pro 3D tisk a technický list zařízení.

1. Proveďte rešerši dané problematiky (seznamte se s podobnými projekty, zhodnoťte výsledky a definujte motivační faktor realizace projektu).
2. Navrhněte model konstrukce počítačem řízené frézky. V návrhu konstrukce stroje počítejte s možností výměny hlavy.
3. Proveďte montáž, ladění a přípravu mechanické částí zařízení.
4. Zvolte vhodný řídicí software pro řízení frézky.
5. Zpracujte výkresovou dokumentaci, 3D modely a technický list zařízení.

Rozsah grafických prací:  
Rozsah pracovní zprávy:  
Forma zpracování práce:  
Jazyk práce:

dle potřeby  
cca 40 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### Seznam odborné literatury:

- [1] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled*. 1. díl. Vyd. 5., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-183-2.
- [2] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled*. 2. díl. Vyd. 5., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-184-9.
- [3] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [4] SELECKÝ, Matúš. *Arduino: uživatelská příručka*. Přeložil Martin HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.
- [5] MORAVEC, V. *Konstrukce strojů a zařízení II – Čelní ozubená kola*. Teorie, výpočet, konstrukce, výroba, kontrola. Montanex, a.s., Ostrava, 2001. ISBN 80-7225-051-5.
- [6] SHIGLEY, J. E., Ch. R. MISCHKE, R. G. BUDYNAS, M. HARTL a M. VLK. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [7] ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 – 1. díl – Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1
- [8] SANDVIK Coromant, Sandviken. *Technická příručka obrábění – soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*. 2005. 601 s.
- [9] ŘASA, J., POKORNÝ, P., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 – 2. díl – Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 1. vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o., 2001. 221 s. ISBN 80-7183-227-8.

Vedoucí práce:

Ing. Andrii Shynkarenko, 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

## 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.

20. května 2022

Filip Svatý

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Andrii Shynkarenkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci dokončit. V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině, bez které bych tuto práci nemohl dokončit.

# Návrh konstrukce open-source CNC frézky

## Abstrakt

Práce se zabývá studií konstrukce CNC frézky, nazývané i jako CNC router. V práci je provedena analýza trhu se sestavenými zařízeními a s různými druhy komponentů pro stavbu CNC frézek. Hlavní náplní práce je návrh a počítačové testování nosných a pohyblivých prvků stroje. Při návrhu konstrukce je kladen důraz zajištění open-source funkce a na pořizovací cenu stroje. Sledováním nákladů lze dostat i CNC frézky do malých dílen.

**Klíčová slova:** Frézování, frézka, CNC, lineární vedení, vřeteno, fréza, krokový motor

# Design of open-source CNC milling machine

## Abstract

The thesis deals with the study of the design of a CNC milling machine, also called a CNC router. In the thesis, the market analysis of assembled devices and different types of components for the construction of CNC routers is carried out. The main focus of the work is the design and computer testing of the machine's load-bearing and moving elements. In the design of the structure, the focus is on providing open-source features and on the acquisition cost of the machine. By keeping an eye on the cost, CNC milling machines can also be brought into small workshops.

**Keywords:** Milling, milling machine, CNC, linear guide, spindle, milling machine, stepper motor

# Obsah

Seznam zkratek . . . . .	9
<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2 Teoretická a řešeršní část</b>	<b>11</b>
2.1 CNC frézky . . . . .	11
2.2 Open-source CNC frézky . . . . .	11
2.2.1 Průmyslové CNC routery . . . . .	12
2.2.2 Neprůmyslové CNC routery . . . . .	14
2.2.3 Homemade CNC router . . . . .	14
2.3 Základní mechanické prvky CNC frézek . . . . .	17
2.3.1 Rámy CNC frézek . . . . .	17
2.3.2 Lineární pohybové systémy . . . . .	19
2.3.3 Přenos točivého momentu . . . . .	22
2.3.4 Motory . . . . .	25
2.3.5 Vřetena . . . . .	26
2.4 Shrnutí řešeršní a teoretické části . . . . .	27
<b>3 Experimentální část</b>	<b>28</b>
3.1 Konstrukce rámu . . . . .	28
3.1.1 První návrh rámu . . . . .	29
3.1.2 Úprava rámu . . . . .	30
3.1.3 Shrnutí návrhu rámu . . . . .	34
3.1.4 Portál . . . . .	34
3.1.5 Konstrukce portálu pro posuv v ose Z . . . . .	37
3.2 Návrh lineárního vedení . . . . .	40
3.2.1 Základní parametry návrhu . . . . .	41
3.2.2 Návrh vedení pro posuv v ose Y . . . . .	41
3.2.3 Shrnutí návrhu lineárního vedení . . . . .	46
3.3 Návrh převodu z rotačního pohybu na přímočarý . . . . .	47
3.3.1 Výpočet axiálních sil . . . . .	47
3.3.2 Návrh kuličkového šroubu pro osu Y . . . . .	48
3.3.3 Shrnutí návržení rotačního převodu na přímočarý . . . . .	51
3.4 Návrh motorů . . . . .	52
3.5 Návrh vřetena . . . . .	53
3.6 Řízení stroje . . . . .	54

3.7 Open-source dostupnost . . . . .	54
<b>4 Diskuze a plány do budoucna</b>	<b>55</b>
<b>5 Závěr</b>	<b>56</b>
Seznam obrázků	58
Seznam tabulek	58
Bibliografie	61
Přílohy	62



## Seznam zkratek

<b>CAD</b>	computer-aided design (počítačem podporované projektování)
<b>CAM</b>	Computer aided manufacturing (počítačem podporovaná výroba)
<b>CNC</b>	computerized numerical control (počítačové číslicové řízení)
<b>HRC</b>	tvrdost podle Brinella
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>NEMA</b>	National Electrical Manufacturers Association
<b>PET-G</b>	polyetyléntereftalát – glykol
<b>PLC</b>	Programmable Logic Controller
<b>PU</b>	polyuretan

# 1 Úvod

Myšlenka navrhnout a postavit vlastní CNC frézku vznikla už před několika lety v malé truhlářské dílně. Z pouhého nápadu se stal projekt a z projektu následně téma této bakalářské práce. V průběhu let zájmem se o CNC stroje a převážně o CNC frézky bylo získáno mnoho zkušeností. V první řadě od odborníků, kteří denně pracují s průmyslovými CNC frézkami, tak od domácích kutilů, kteří se též věnovali stavbě CNC frézky. Po získání bohatých zkušeností se začal projekt realizovat. Tato práce je úvodem do celého projektu open-source CNC frézky. Celý projekt je zveřejněný na internetovém portálu GitHub.com. Postupem času přibývají rozšíření a drobné úpravy.

Motivací realizace tohoto projektu bylo věnování se práci se dřevem, kovem a 3D tiskem ve vlastní malé dílně. Získat CNC frézku do malé dílny je z finančního hlediska nadměrně nákladné. Ceny prodávaných CNC frézek jsou v řádech desetitisíc korun. Tato první část projektu má za úkol navrhnout konstrukci CNC frézky a zároveň využít základní modelářské prvky jako jsou hliníkové profily nebo 3D tisk, a tím získat co nejnižší pořizovací cenu, ale s ohledem na udržení kvality.

Důležitou součástí práce je rešerše a seznámení se s jednotlivými mechanickými prvky. Důležité je porozumět, jak jednotlivé mechanické prvky fungují a jaké mají výhody a nevýhody. Tato část je strukturována podle odborných zkušeností. Prakticky stejnou strukturu má pak i část, kde se práce věnuje návrhu konstrukce a jednotlivých mechanických prvků (například: rám, lineární pohybové systémy, prvky pro převod rotačního pohybu motoru na lineární pohyb portálu, motory a vřetena).

Pro úspěšné postavení CNC frézky je její samotný návrh konstrukce, kterému se věnuje kapitola 3. Pro realizaci návrhu je doporučeno využít jakýkoliv dostupný CAD software. Po dlouhodobých studijních zkušenostech byl zvolený software s nadstavbu pro numerické simulace modelů. Nejvíce namáhané prvky, které byly vybrány na základě zkušeností z předmětu pružnost a pevnost, byly podrobeny numerickým simulacím. Nejlepším způsobem, jak navrhnout mechanické prvky je podle katalogu výrobce. Výrobce udává způsoby jak jednotlivé prvky využít na maximum, a dokonce i přesný postup výpočtu.

Jelikož je projekt koncipován jako open-source, byly zde i zohledněny budoucí úpravy pro výměnu frézovací hlavy za laser nebo extruder pro 3D tisk. Po dokončení návrhu byla provedena montáž a ladění mechanických částí zařízení.

Důležitou součástí CNC frézek je řídicí software. Základem je vybrat vhodný řídicí testovací software.

## 2 Teoretická a řešeršní část

Tato kapitola se věnuje základnímu rozdělení CNC frézek. Dělí se na průmyslové a neprůmyslové. V druhé polovině se pak kapitola věnuje základním mechanickým prvkům, jejich stručnému popisu, četnosti využití a ceně na trhu.

### 2.1 CNC frézky

CNC frézky jsou počítačem řízené stroje, které se používají k frézování nebo obrábění různých materiálů. Obrobit lze všechny možné materiály jako například dřevo, plast, hliník, oceli a mnoho dalších. Na frézkách lze vyrobit závity, ozubená kola, drážky a různé tvarové plochy. Hlavní rotační pohyb koná nástroj, vedlejší pohyby koná obrobek pevně spojený se stolem. [4]

Souřadnice se načítají do řídicí jednotky stroje ze samostatného programu. CNC router se často používá se dvěma softwarovými aplikacemi — jednou k vytváření návrhu, modelu (CAD) a další k převodu tohoto návrhu do G-kódu, nebo M-kódového programu instrukcí pro stroj (CAM) kartézských souřadnicích. Stejně jako u CNC frézek lze CNC routery ovládat přímo ručním programováním, ale CAD/CAM umožňuje širší možnosti konturování, urychlení procesu programování a v některých případech vytváření programů, jejichž ruční programování by bylo nepraktické. [6]

### 2.2 Open-source CNC frézky

CNC frézky typu open-source<sup>1</sup> se vyrábí jak průmyslové, tak i neprůmyslové (home-made<sup>2</sup>). Většina takových frézek je koncipovaná pro velké plošné rozměry v osách X a Y. V ose Z je zdvih nástroje. Ten je navržený tak, aby se daly snadno měnit nástroje (frézy) a nástroj při přejezdech měl bezpečnou vzdálenost od obrobku.

Komerční open-source CNC frézky jsou stroje, které se dělají ve většině případů jako stavebnice. Hlavní předností je např. univerzálnost. Takové frézky se vyrábí pro hobby použití v domácích dílnách. Jejich hlavní výhodou je cenová dostupnost oproti CNC obráběcím centrům. Tyto frézky mají využití při obrábění především dřeva, hliníku a plastu. [4]

---

<sup>1</sup>projekt s volně dostupnými podklady na internetu

<sup>2</sup>vyrobena v domácích podmínkách

## 2.2.1 Průmyslové CNC routery

### CNC Router Raptor:

Jedná se o stroj českého výrobce Raptor Technologies. Byl vyvinut na základě požadavků zákazníků. Tato portálová frézka může sloužit jako CNC frézka na dřevo, překližku, plast, polykarbonát, hliník a jiné měkké materiály (viz obrázek 2.1). [11]

### Technické parametry stroje:

- pracovní prostor:  $3000 \times 1500 \times 200 \text{ mm}$ ,
- přesnost pozicování:  $\pm 0,05 \text{ mm}$ ,
- výkon vřetene portálové frézky:  $6 \text{ kW}$ ,
- maximální otáčky vřetene:  $24\,000/\text{min}$ ,
- výkon vývěvy:  $7,5 \text{ kW}$ ,
- maximální pracovní rychlost:  $20 \text{ m/min}$ ,
- maximální rychlost polohování:  $40 \text{ m/min}$ ,
- hmotnost CNC routeru: cca  $1400 \text{ kg}$ .



Obrázek 2.1: CNC Router Raptor [11]

### CNC Router Volter L8020:

Jedná se o evropského výrobce. Hlavní výhodou stroje je jeho tuhost. Stroj má svařený rám z ocelových profilů. Rám poté prošel žháním a obrobením. V základním vybavení se jedná o pětiosé frézovací centrum (viz obrázek 2.2).

### Technické parametry stroje:

- Pracovní prostor:  $8200 \times 2150 \times 160 \text{ mm}$ ,
- výkon vřetene portálové frézky:  $4,5 - 10 \text{ kW}$ ,
- maximální otáčky vřetene:  $24\,000 \text{ ot./min}$ ,
- maximální pracovní rychlost:  $500 \text{ mm/s}$ ,
- hmotnost CNC routeru: cca  $4000 \text{ kg}$ .



Obrázek 2.2: CNC Router Volter L8020 [7]

Frézka je vybavena velkým 15" dotykovým monitorem s podporou 6 jazyků. Je vybavená vřetenem od firmy HITECO. Jedná se o vzduchem chlazené vřeteno. Dále může být vybavena vakuovým stolem z hliníkových profilů. Čidlo nástroje umožňuje rychleji a přesněji zaměřit nástroj. Pro pohyb a přenos síly jsou použité ozubené hřebeny, které zajišťují větší přesnost a zároveň i snižují hlučnost. [7]

Dalším vybavením je ruční ovladač s pružným kabelem pro snadnější ovládání a pohyb okolo stroje a násada pro odsávání třísek. Díky odsávání odpadního materiálu se méně opotřebuje nástroj a zlepšuje se přesnost obrobku. [7]

### Konstrukce průmyslových CNC routerů

Konstrukce frézky je založena především na ocelové konstrukci stolu. Ten je vyroben z ocelových profilů a je dostatečně tuhý. Konstrukce je svařena a dokonale obrobena pro dosažení souběžné roviny. Konstrukce portálu frézky je vyrobena stejným způsobem. Pro přesné vedení se často používá lineární vedení značky HIWIN. Mazání pojezdů je řešeno převážně centrálně. Polohu stroje zajišťují servomotory, popřípadě výkonné krokové motory pro menší stroje. Pro převod síly se používají převážně ozubené hřebeny nebo kuličkové šrouby. Průmyslové stroje jsou dodávány s dostatečně výkonným vřetenem, záleží na typu použití stroje (dřevo, plast, kov).

Mezi dalšími přídatky od výrobců patří například odsávání třísek, karuselové vřeteno s automatickou výměnou nástrojů, nástrojová sonda a chlazení. Tyto přídatky nejsou součástí každého stroje.

Každý průmyslový stroj je opatřen kryty pojezdů, šroubů a hřebenů. Celé CNC routery jsou zakrytované i kvůli bezpečnosti.

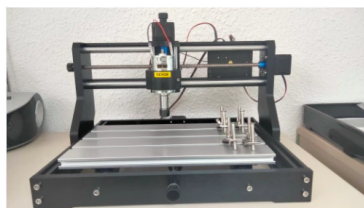
## Cena průmyslových CNC routerů

Minimální cena průmyslových CNC routerů se pohybuje zhruba od 250 000 Kč, stroje v této cenové kategorii jsou pro malé díly. Částka se odvíjí od celkového vybavení stroje. Jednou z nejdražších položek na stoji je jeho základní konstrukce. Všechny další doplňky cenu zvyšují o pár tisíc. Další hlavní parametr, který určuje cenu, je velikost pracovního prostoru. Levnější frézky mají pracovní prostor zhruba 300-500 mm ve směrech X a Y. [8]

### 2.2.2 Neprůmyslové CNC routery

Neprůmyslové, také nazývané homemade CNC routery, jsou stroje, které se vyrábí kusově a jsou tvořeny ze základních konstrukčních prvků. Patří mezi ně například hliníkové profily, dřevěné desky, plastové desky nebo díly vytvořené pomocí technologie 3D tisku.

Jednou možností je pořízení sériově vyráběné stavebnice z AliExpressu nebo jiného podobného obchodu, takové frézky mají malou pracovní plochu. Patří mezi nejjednodušší a slouží převážně pro drobné díly pro modeláře. Jsou schopné obrobit plasty, v lepších případech dřevo. Vyznačují se velmi nízkou tuhostí konstrukce. Jejich vřetena jsou malá, ale pro drobnou práci dostatečná. Řídící jednotkou je převážně základní deska Arduino UNO/MEGA s nadstavbou pro CNC (viz obrázek 2.3).



Obrázek 2.3: CNC z AliExpressu [38]

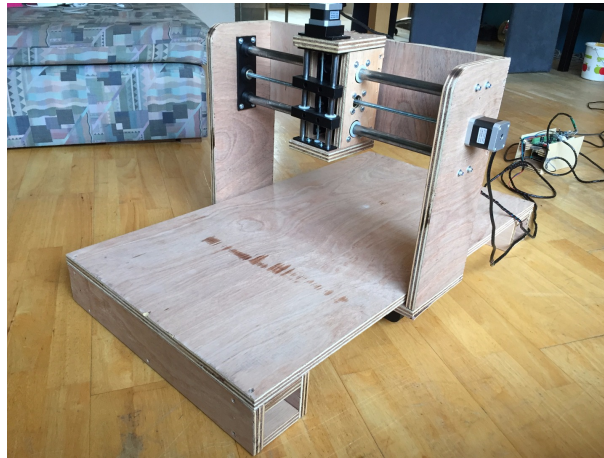
### 2.2.3 Homemade CNC router

Tato podkapitola se věnuje kusově vyráběným homemade CNC routerům. Jsou zde rozebrané konstrukce rámu a stručný pohled na výhody a nevýhody jednotlivých, již postavených, projektů.

#### CNC router s dřevěnou konstrukcí

Prvním homemade návrhem je frézka postavená za pomoci dřeva. V tomto návrhu je použita tvrdá překližka. Jako vedení je využito obyčejných ocelových trubek. Pro přenos kroutícího momentu z krokových motorů slouží závitové tyče s metrickým závitem. Jako obráběcí vřeteno slouží ruční frézka Dremel. Celá frézka je postavena na základní desce Arduino UNO. Program je do stroje posílán přes sériovou linku

z počítače. Přibližná cena na stavbu takového stroje je okolo 140 EUR , což je přibližně 3 700 Kč (viz obrázek 2.4).



Obrázek 2.4: Homemade CNC ze dřeva [10]

V závislosti na použitých součástech a konstrukčním materiálu je odvozena tuhost a přesnost polohování stroje. Opomeneme-li přesnost stroje a zaměříme se na cenu, je toto jedna z nejlevnějších možností, jak postavit CNC router.

### **CNC router s ocelovou konstrukcí**

Tento stroj slouží jako rozšíření malé dílny. Je určený pro zpracování drobných a jednoduchých dílů převážně z plastu a barevných kovů.



Obrázek 2.5: Homemade CNC s ocelovou konstrukcí [1]

Pro konstrukci jsou použity silnostěnné ocelové profily. Jelikož je rám svařovaný, musí se nechat vyžít proti vnitřnímu pnutí. Tato operace je v domácích podmínkách velice náročná. Rozměry stroje jsou  $500 \times 500 \times 200 \text{ mm}$ . Lineární vedení velikosti  $25 \text{ mm}$  je použité pro všechny osy. Pro převod kroučícího momentu jsou

využity kuličkové šrouby. Vřeteno je zde použito od značky ELTE s výkonem 2 kW. Cena celého stroje se pohybuje okolo 25 000-30 000 Kč (viz obrázek 2.5). [1]

Svařovaný rám je velice dobrá volba, ale v případě této možnosti je nutné zajistit přesné svaření a poté tepelnou úpravu ve formě žíhání pro snížení vnitřního pnutí. Pokud by byl rám pouze svařen a nežíhán, mohlo by docházet ke kroucení rámu a změně rozměrů. Tento proces je jeden z cenově náročnějších.

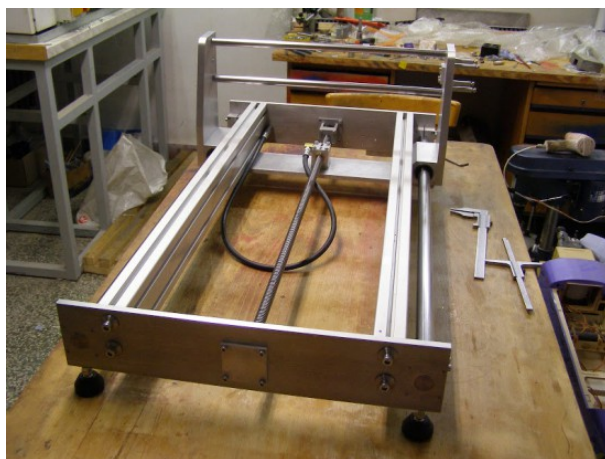
Použité lineární vedení je jedna z nejpřesnějších možností, druhou velice dobrou možností je použít podepřené tyče. Použití kuličkových šroubů je také jednou z nejpřesnějších možností. Jednotlivým komponentům se věnují následující podkapitoly.

Frézka postavená tímto způsobem bude mít dostatečnou tuhost, a dokonce i přesnost. Její nevýhodou je vysoká cena, závislost na tepelném zpracování ocelového rámu a pracovní prostor pouze 500x500x200 mm.

### CNC router z hliníkových profilů

K výrobě této frézky je potřeba frézka a soustruh. Frézka má pracovní prostor 708x408x57 mm. Celá konstrukce je vytvořena pomocí hliníku a hliníkových profilů. Rychlost posuvu vřetena na prázdno dosahuje až 1600 mm/min. [33]

Použité hliníkové profily zajistí relativně dobrou tuhost. Jejich hlavní výhody oproti předchozím zmíněným konstrukcím jsou hmotnost a variabilita. Pomocí těchto profilů lze rychle měnit konstrukci stroje nebo rozšiřovat o různé nové moduly nebo kryty. Rám postavený z hliníkových profilů a hliníkových výpalků lze snadno smontovat, není třeba žádná tepelná úprava. Jako vedení jsou použity hladké ocelové tyče a lineární ložiska. Pro přenos kroutícího momentu jsou použity trapézové šrouby TR 16x4 s bronzovou maticí. Řídícím softwarem je LinuxCNC. Cena této frézky se pohybuje od 20 000 Kč (viz obrázek 2.6). [33]



Obrázek 2.6: Homemade CNC s hliníkovou konstrukcí [33]



## 2.3 Základní mechanické prvky CNC frézek

Jakýkoliv CNC stroj (frézka, soustruh, plotter, bruska a další) sestavujeme z několika základních prvků. Každý prvek má svůj význam a je nezbytnou součástí stroje. Základními prvky jsou:

- konstrukční a rámové prvky,
- lineární pohybové systémy,
- přenos točivého momentu,
- motory,
- vřetena.

### 2.3.1 Rámy CNC frézek

Základem každé CNC frézky je rám. Materiálů, ze kterých může být rám vyroben, je mnoho. Pro profesionální stroje se ve většině případů využívá odlitků a svařenců. Pro neprofesionální stroje (domácí dílnu) postačí materiál jako jsou například dřevěné překližky, hliníkové desky, anebo hliníkové profily.

#### Odlévaný rám

V případě rámu jako odlitku je výrazně vyšší hmotnost oproti svařované konstrukci. Modul pružnosti litiny je menší než u oceli, a proto je nutno volit větší tloušťku stěny. Manipulace s takovým rámem je velmi složitá. Rám musí být po vyjmutí z formy dostatečně očištěn a přesně obroben. K výrobě takového rámu je zapotřebí několik dalších strojů. V domácích podmínkách je nadměrně náročné tento rám vyrobit.

#### Svařovaný rám

Pro výrobu svařovaného rámu se využívá ocelových profilů či válcovaných plechů. U těchto prvků je zaručena svařitelnost. Svary se musí volit tak, aby kvůli jejich směru a velikosti nedocházelo ke vzájemnému pnutí. Vnitřní pnutí se dá odstranit i pomocí následného tepelného zpracování (například žháním), proto se průběžné svary volí malé. Výhodou svařenců je výrazné snížení hmotnosti oproti odlitku. Výsledná tuhost celého svařence je stejná, a někdy dokonce vyšší než u odlitků, záleží na modulu pružnosti. Uzavřené profily mají výrazně vyšší tuhost v ohybu a v krutu. [21]

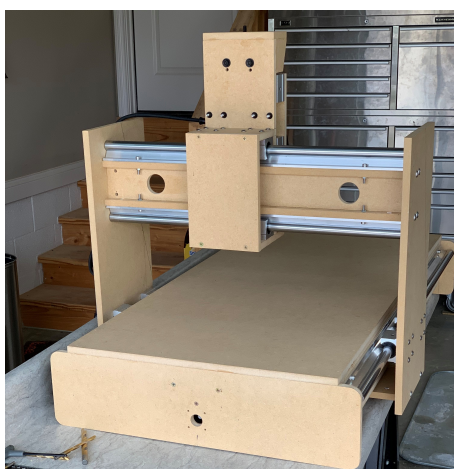
Pro výrobu takového rámu je také nutné vytvořit svařovací přípravky, aby rám byl svařen v přesných pozicích (viz obrázek 2.7).



Obrázek 2.7: Svařovaný rám [22]

### Dřevěný rám

Rám postavený ze dřeva nebo dřevěných materiálů se používá především u neprofesionálních homemade CNC frézek. Dřevěné překližky mají vysokou dostupnost. Pro práci s takovým materiálem postačí základní nářadí na zpracování dřeva. Pevnost a tuhost rámu z tohoto materiálu není srovnatelná s dvěma předchozími, ale lze takový rám sestavit v domácích podmínkách. Výhodami těchto materiálů jsou především cena a hmotnost. Nevýhodami je nepřesné ruční obrobení a odlamování třísek (viz obrázek 2.8).

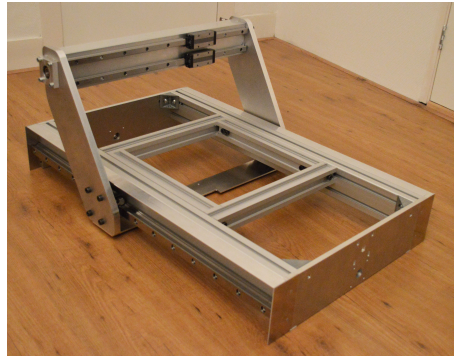


Obrázek 2.8: Dřevěný rám [3]

### Hliníkový rám

Hliníkové rámy se nejčastěji používají u jednoúčelových strojů a u prototypů. Základním prvkem jsou hliníkové profily, které je možné sestavit během několika minut do požadovaného tvaru (viz obrázek 2.9). Pro sestavování se používají T matice (kameny), pomocí kterých se profily spojují a díky kterým lze konstrukci nezávisle

modifikovat. Lze snadno přidávat nové prvky. Tuhost takovéto konstrukce je většinou nižší než u odlévané a svařené konstrukce, ale hmotnost je výrazně nižší. Při navržení dostatečného množství výtuh a podpor lze dosáhnout srovnatelné tuhosti s rámem svařovaným. Lze kombinovat i ocelové výpalky z plechu a hliníkové profily. Ocelové výpalky jsou cenově méně nákladné oproti hliníkovým.



Obrázek 2.9: Hliníkový rám [37]

### 2.3.2 Lineární pohybové systémy

Celkový lineární pohyb je zajištěný pomocí dvou základních systémů. Prvním systémem je lineární ložiskový systém, druhým systémem je hnací systém. Hnacímu systému se věnuje další podkapitola 2.3.3 a podkapitola 2.3.4. V této kapitole je rozebrán pouze lineární ložiskový systém.

Jeho primárním úkolem je podepření součásti stroje, druhým je vedení stroje přesným lineárním pohybem a posledním je zamezení vedlejšího zatížení vlivem obrábění (např. kroutícím moment či okolní zatížení). [5]

#### Podepření součástí stroje

Systém musí být navržený tak, aby dokázal zachytit hmotnost portálu a zároveň byla zachována linearita. Tento systém je navrhován pro jednotlivé osy X, Y a Z. [5]

#### Přesné vedení lineárním pohybem

Pro přesný lineární pohyb musí mít vedení nejmenší vůli a nejmenší tření. Pokud bude nízké tření, ale vůle v ložiskách bude příliš vysoká, přesnost celého stroje výrazně klesne. [5]

#### Zamezení vedlejšího zatížení

Při frézování vznikají síly, které musí být vedení schopné zachytit. Síly vznikají podle smyslu obrábění. Kroutící moment portálu vzniká rozložením hmotnosti dílů a vzdáleností vyložení nástroje od těžiště portálu. Každá z jednotlivých os má své zatížení.

## Válečková ložiska s pouzdem

První z možností pro lineární pohyb jsou kolečka (Track Rollers<sup>3</sup>). Kolečko se skládá z válečkového ložiska a pouzdra. Pouzdro bývá převážně z tvrdé gumy a slouží k odvalování se po hliníkovém profilu. Většinou je vloženo do drážky daného profilu. Profil zajišťuje linearitu, proto je vhodné zvolit profil s větším průřezem. Profil na určité vzdálenosti se bude prohýbat, pokud by došlo k výraznému průhybu, přesnost stoji by výrazně klesla (viz obrázek 2.10). [35]

Výhodami použití jsou převážně cena, vysoká životnost a hmotnost. Nevýhodami jsou nízká přesnost a tuhost.



Obrázek 2.10: Válečkové ložisko s kovovým pouzdem [34]

## Ocelové vodící tyče

Jedná se o tyče z vysoce legované oceli. Ocelové vodící tyče jsou povrchově kalené a broušené na přesnost h6, h7. Povrch tyčí je kalený, jádro zůstává pořád měkké a houževnaté (viz obrázek 2.11). [23]

Používají se pro vedení kuličkových a kluzných pouzder jako sloupcové vedení i vodorovné vedení. V případě použití jako vodorovné vedení při velké délce bude docházet k průhybu. V takovémto případě je pak lepší využít podepřené tyče.



Obrázek 2.11: Ocelová vodící tyč [9]

---

<sup>3</sup>kolečka s ložiskem pro lineární vedení

## Podepřené tyče

Podepřené tyče (viz obrázek 2.12), druh lineárního vedení, které poskytuje velmi dobrou přesnost a zároveň vysokou nosnost. Vedení je tvořeno klasickou hladkou tyčí s tolerancí h6, která je povrchově zakalena do hloubky 1 – 2 mm na tvrdost HRC65. Podepření tyče je zajištěné po celé délce z duralu. Spojení mezi tyčí a podepřením je pomocí šroubů ze spodní strany tyče. Podepření disponuje montážními otvory ke konstrukci stroje. [28]



Obrázek 2.12: Podepřená tyč [19]

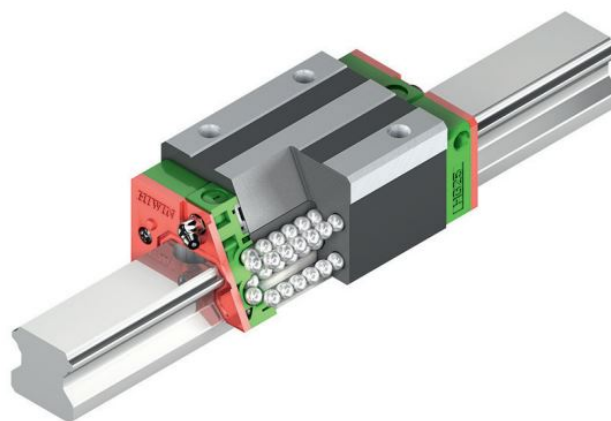
Pro kovoobráběcí stroje se používají tyče od průměru 16 mm (převážně 20 – 25 mm). Přesnost celého vedení je také dána vůlí vozíku lineárního ložiska. Výhodami použití jsou vysoká nosnost a přesnost, nevýhodami pak cena a hmotnost.

## Lineární vedení

Lineární vedení zobrazené na obrázku 2.13, je tvořené z profilové kolejnice a vozíku, který je opatřen zpravidla čtyřmi řadami kuliček či válečků. Ty zajišťují dokonale hladký a přesný lineární pohyb. Lineární vedení se využívá tam, kde je potřeba zajistit lineární pohyb v jedné ose. [20]

Kuličkové vedení disponuje průměrnou tuhostí a přesností. Pro extrémně vysokou zátěž je vhodnější použít válečkové vedení. Úhel mezi válečky svírající 45° eliminuje jakoukoliv deformaci. Dokáže tak snést obrovské zatížení ve všech směrech. [20]

Pro zvýšení životnosti lineárního vedení je vhodné kolejnice povlakovat (například chromování o tenké vrstvě několik mikronů). Zařízení je pak odolné vůči korozi a opotřebení. Díky použití těsnění před prachem pro ložiska se zachovává hladký chod. [20]



Konstrukce typů HG/EG

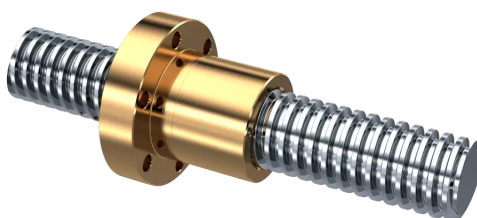
Obrázek 2.13: Lineární vedení HIWIN [20]

### 2.3.3 Přenos točivého momentu

#### Trapézový šroub

Trapézové šrouby se vyrábějí válcováním. Vysoká pevnost je dosažena válcováním závitu s lichoběžníkovým profilem. Vysoká kvalita povrchu závitu s maticí lichoběžníkového tvaru vede k výborným vlastnostem chodu (viz obrázek 2.14).

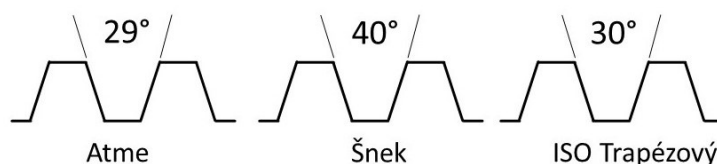
Matice se standardně vyrábí z bronzu. Tvar mají válcový nebo přírubový. Matice mohou být i plastové nebo ocelové. Šrouby jsou velice podobné šroubům Acme, rozdíl je pouze v úhlu závitu, ale použití a výroba je prakticky stejná. [36]



Obrázek 2.14: Trapézový šroub [36]

#### Vodící šroub Acme

Tvar závitu Acme je převážně spojovaný s vodícími šrouby pro CNC. Závity jsou širší než standardní závity ve tvaru V a jsou ideální pro přenos síly. Tento závit je nejrozšířenější ve spojených státech, u evropských CNC strojích jsou převážně používané šrouby s ISO metrickým lichoběžníkovým závitem. [2]



Obrázek 2.15: Lichoběžníkové závity [2]

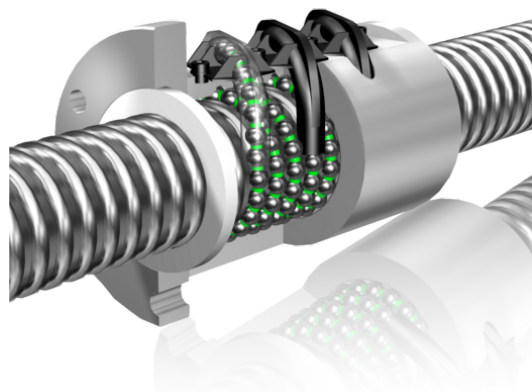
Obecně trapézové šrouby (obzvláště Acme) mají lepší vlastnosti (odolnost proti opotřebení, zatížitelnost a tolerance) než standardní závitové tyče s metrickým závitem, to je z důvodu tloušťky závitu a fungují i lépe v nečistém prostředí. [2]

Šrouby se vyrábí s jednochodým i vícechodým závitem, také je výrobou dané stoupání. Tento parametr je jeden z hlavních pro návrh takového šroubu. Na stoupání šroubu je závislý posuv, tedy o kolik se matice posune za otáčku. Úhel závitu je zobrazen na obrázku 2.15.

Účinnost Acme šroubů závisí na celé sestavě. Je určena vedením, materiálem matice a třením. Účinnost se pohybuje od 10 do 80 %.

### Kuličkové šrouby

Kuličkový šroub tvoří dvě součásti, a to samotný šroub (přesná závitová tyč) a matice. V matici je řada kuliček, které jsou naskládány do šroubovice, jsou uspořádány do uzavřeného okruhu, přičemž kuličky obíhají v závitě šroubu. Když šroub rotuje, matice se posouvá přímočarým pohybem v ose šroubu. Kuličky uvnitř matice zajišťují předpětí šroubu, a to má za následek vysokou přesnost a tuhost. Nevýhodou těchto šroubů je omezená délka. Kuličkový šroub je orientačně zobrazený na obrázku 2.16. [17]



Obrázek 2.16: Kuličkový šroub [18]

Podle požadované přesnosti se šrouby vyrábí v několika variantách, základní a nejdostupnější jsou válcované šrouby. Hodí se na použití kde není zapotřebí taková přesnost (v řádech desetin až setin milimetrů). Přesnější jsou okružované šrouby. Používají se tam, kde je potřeba vyšší přesnosti, a to do přesnosti třídy IT5. Nejpresnější jsou broušené šrouby, ty dosahují třídy přesnosti až IT1 a vkládají se do nejpresnějších sestav. Přesnost se pohybuje v tisícinách milimetrů. Nevýhodou broušených šroubů je doba dodání. [17]

## Ozubený hřeben

Ozubené hřebeny se nejčastěji využívají k převodu rotačního na lineární pohyb. Dráhu tvoří ozubený hřeben a jezdec je poháněn ozubeným kolem. Hlavní výhodou této technologie je neomezená délka. Používají se pro CNC stroje velkých rozměrů. [24]



Obrázek 2.17: Ozubený hřeben [26]

Vyrábí se s přímým ozubením a s šikmým ozubením, nejpoužívanější je ozubení šikmé. Výhodou je nízká hlučnost převodu, oproti tomu je cena vyšší než u přímého ozubení. Další nevýhodou je vznik axiálního zatížení, proto musí být pohon ozubeného kola v axiálním směru zajištěn. Ozubený pastorek se vyrábí z odolnějšího materiálu než hřeben, protože pastorek je více namáhán (viz obrázek 2.17). [24]

## Ozubený řemen

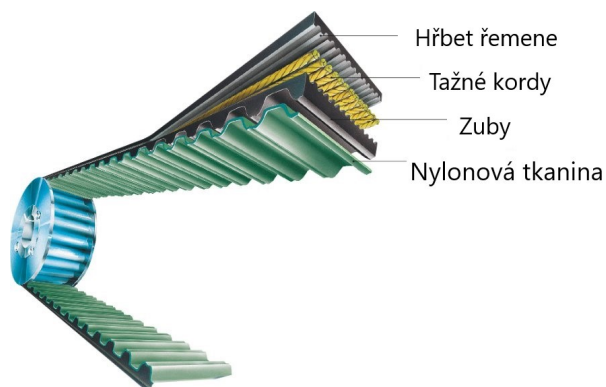
Ozubené řemeny jsou používány pro lineární pohyby nebo dopravní účely. Dělí se podle materiálu na polyuretanové (PU) a neoprenové. PU řemeny se využívají spíše pro speciální aplikace. Může se na ně nechat nanést povrchová úprava. Skladba ozubeného řemenu je znázorněna na obrázku 2.18. [25]

Jejich konstrukce je složena ze 4 základních prvků (hřbet, tažní kordy, zuby, nylonová tkanina). Hřbet zakrývá tažné kordy a je vyroben z vysoce odolné neoprenové směsi nebo PU. Tažné kordy jsou tvořeny skelnými vlákny, udávají pevnost, délkovou stabilitu a ohebnost. Tažné kordy se vyrábí i z oceli nebo kevlaru. Každý materiál má pak různé mechanické vlastnosti a hodí se pro jinou aplikaci řemenu. [25]

Hlavní výhodou řemenů je jejich teplotní stálost. Dají se používat ve velkém rozmezí teplot (cca od  $-20^{\circ}\text{C}$  až do  $100^{\circ}\text{C}$ ) aniž by měnily výrazně svou délku, další



výhodou je jejich cena. Oproti předchozím variantám je výrazně levnější a dostupnější.



Obrázek 2.18: Ozubený řemen [27]

### 2.3.4 Motory

Jako pohonné jednotky se používají pro CNC stroje především servomotory nebo krokové motory.

#### Servomotor

Servomotor je typ elektromotoru, u kterého lze nastavit přesnou polohu natočení. Používá se pro nastavení přesné polohy nebo jen vyvození síly bez pohybu. Běžný motor se využívá jako hnací. [30]

Na obrázku 2.19 je zobrazen servomotor značky Vevor.



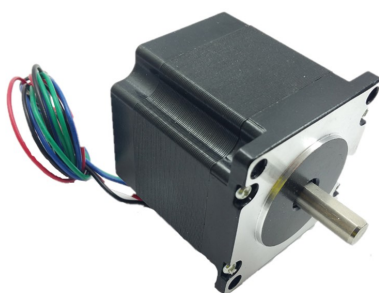
Obrázek 2.19: Servomotor Vevor [32]

Servomotor má rychlou zpětnou vazbu. Rotor motoru má velkou délku a malý průměr, setrvačnost motoru je díky tomu minimální. Používají se v radarech, počítačích, robotech nebo obráběcích centrech. [31]

Servomotor je vhodný pro použití ve vysokých otáčkách a velkém točivém momentu. Většina servomotorů má 4-12 pól párů, každý z nich nabízí polohu k zastavení. Malý počet pól páru nedovoluje přesně polohovat hřídel vycházející z motoru. Pro sledování přesné polohy motoru musí být součástí motoru rotační encoder. [15]

### Krokové motory

Jedná se o dvoufázový synchronní bezkartáčový motor (viz obrázek 2.20). Skládá se z permanentního magnetického rotoru a statoru s různým počtem elektromagnetických cívek. Pokud se na cívky statoru přivede napětí, přitahují nebo odpuzují segmenty na rotoru. Při rychlé změně napětí mezi cívkami pak dochází k roztočení motoru. Pravidelné střídání napětí na cívkách zajišťuje driver (ovladač, řídicí jednotka motoru). [12]



Obrázek 2.20: Krokový motor NEMA 23 [16]

Stator motoru je tvoří dvěma vinutími připojenými na stejnosměrný proud. Při převrácení proudu v jednom vinutí se rotor motoru otočí o jeden krok, který je daný konstrukcí motoru, většina motorů se vyrábí s krokem  $1,8^\circ$  (tvoří je 200 zubu).

Výběr krokového motoru je podle přidržného kroutícího momentu, což je maximální kroutící moment, který motor vyvine. Výhodami krokového motoru jsou flexibilita a vyšší výkon při nižších otáčkách [15]

### 2.3.5 Vřetena

Pro stavbu hobby open-source CNC frézky se ve většině případů využívají vřetena vyráběné s měničem napětí pro regulaci otáček, tyto vřetena jsou zapojitelná do řídicí jednotky stroje a lze je ovládat strojem. Vyrábí se s vodním chlazením, ale i chlazením vzduchem. Otáčky se pohybují okolo  $8\,000 - 30\,000 \text{ ot./min}$  (viz obrázek 2.21).



Obrázek 2.21: Vřeteno s řídicí jednotkou [40]

Další možností je použití kombinované frézky (viz obrázek 2.22), jedná se o ruční frézku. Připojení do řídicí jednotky stroje je velmi náročné, proto je velmi obtížné strojně řídit otáčky a spouštění. Výkon takových frézek je daleko menší než samotného vřetene, pohybuje se okolo 1 000 W, přičemž vřetena disponují výkonem od 1 kW až do několika desítek kW.



Obrázek 2.22: Kombinovaná frézka [14]

## 2.4 Shrnutí rešeršní a teoretické části

V této kapitole byly stručně rozebrány a vysvětleny rozdíly mezi open-source CNC frézky a klasickými CNC frézky. Bylo provedeno seznámení se s principy základních mechanických prvků, jejich použitím a výhodami. Těchto znalostí a informací bylo využito pro samotný návrh konstrukce.

## 3 Experimentální část

Tato část se věnuje samotné konstrukci celé CNC frézky. Hlavním cílem je vyřešení konstrukce rámu, návrh posuvů jednotlivých os a nadimenzování výkonu motorů. Konstrukce stroje je navržena tak, aby byla vyrobitelná se základním vybavením běžné dílny. Základem je využití plastových dílů vyrobených pomocí technologie 3D tisku. V některých případech vytištěné díly nelze použít z pevnostních důvodů.

Kapitola je rozdělena na několik dílčích podkapitol. Podkapitola 3.1 se věnuje konstrukci rámu a nosných prvků celé frézky. Obsahuje návrh hlavního rámu, portálu a supportu pro osu Z. Součástí i počítačové simulace nejvíce namáhaných prvků. Podkapitola 3.2 se věnuje návrhu lineárního vedení a výpočet trvanlivosti. V podkapitole 3.3 je návrh převodu rotačního pohybu na lineární posuv. Podkapitola 3.5 se věnuje výběru vhodného vřetene a v poslední podkapitole 3.6 je zvolený řídicí software.

### 3.1 Konstrukce rámu

Základem CNC routeru je rám. Od rámu se odvyjí všechny další části stroje. Pro zvolení optimální konstrukce rámu je důležité znát požadované parametry. Parametry pro rám jsou dány převážně obráběným materiálem a pracovním prostorem. V tomto návrhu je třeba, aby konstrukce byla dostatečně tuhá pro obrábění dřeva a hliníku. Rozměry pracovního prostoru musí být alespoň  $500 \times 500 \times 200 \text{ mm}$ . Rozměry rámu jsou předběžně zvolené na  $1000 \times 1000 \times 500 \text{ mm}$ . Zvolení větších rozměrů bude dosaženo většího pracovního prostoru, který lze využít například přidáním sklíčidla či pro výměnu nástrojů.

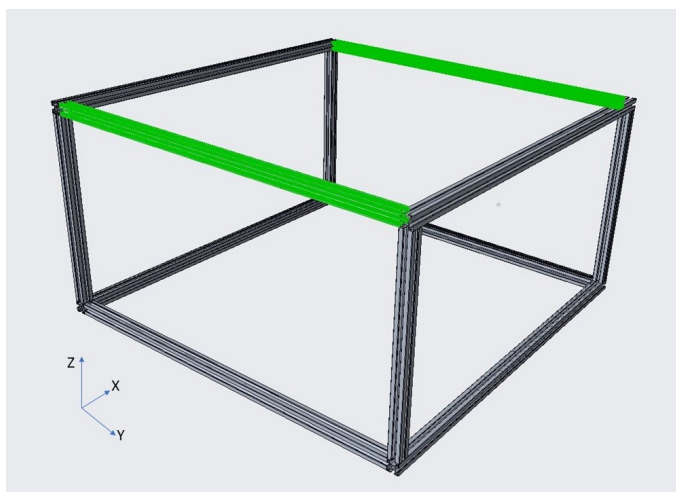
Celý rám je tvořený hliníkovými profily a sešroubovaný pomocí T matic v drážkách profilů. Hliníkové profily jsou jedna z nejlepších variant. Cena profilů je o něco vyšší než u ocelových, ale jsou výrazně lehčí. U ocelové konstrukce by mohlo docházet k deformacím díky hmotnosti profilu a svarům. Rám by se mírně kroutil a měnil rozměry.

Rám je v jednotlivých rozích spojený ještě pomocí zpevňovacích rohů. Tyto rohy mají za úkol, aby jednotlivé profily držely pravé úhly. Rohové vzpěry jsou vyrobeny z  $3 \text{ mm}$  hliníkového plechu. Hlavní důvod proč jsou z hliníku je hmotnost. Hliník je lehký a dostatečně pevný, aby byla zajištěna kolmost profilů. Další výhodou využití hliníku je jeho odolnost vůči korozi.

Při použití hliníkových profilů také vzniká možnost budoucí modifikace celého stroje. Lze pak snadno jednotlivé prvky nahradit kvalitnějšími nebo přidat nové.

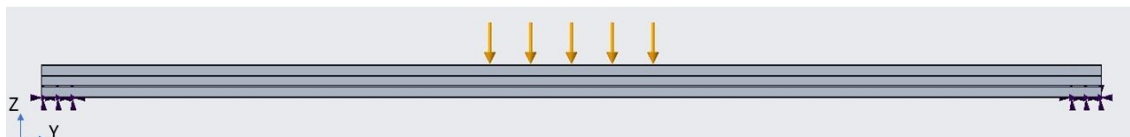
### 3.1.1 První návrh rámu

Pro základní konstrukci rámu jsou zvoleny hliníkové profily s označením 3030. Rozměry profilů jsou  $30 \times 30 \text{ mm}$ . Obrázek 3.1 zobrazuje dva nejvíce namáhané profily.



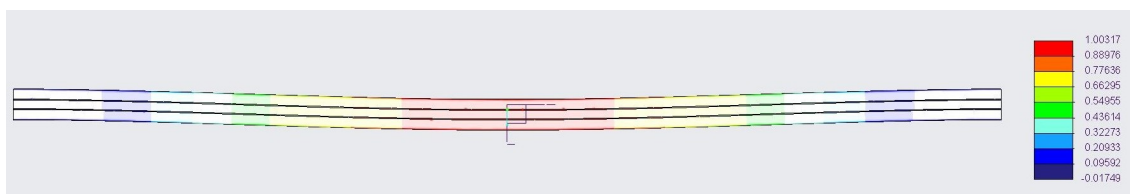
Obrázek 3.1: První návrh rámu

V tomto případě budou některé profily výrazně namáhány. Zeleně označené prvky nesou hmotnost, která přísluší portálu. Průběh průhybu nosníku je zjištěný pomocí simulace. Okrajové podmínky pro simulaci jsou dvě podpory, na každém okraji nosníku a zatěžující síla vyvolaná hmotností portálu. Sílu je zvolena vyšší a to  $400 \text{ N}$ . Tato síla odpovídá přibližně  $40 \text{ kg}$  na jeden profil. Hmotnost portálu se bude rozdělovat na polovinu, to z důvodu, že jsou dva nosné profily. Vazby a silové účinky profilu jsou na obrázku 3.2.

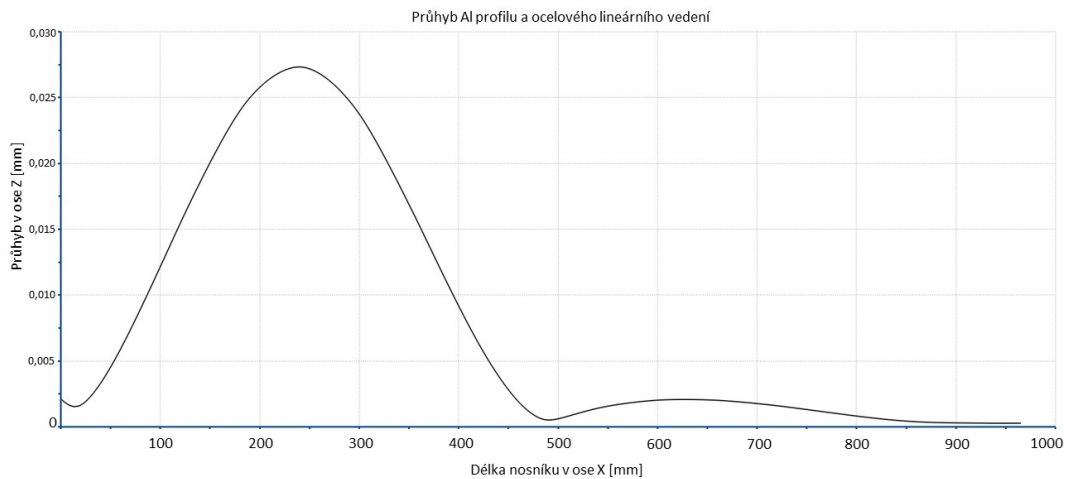


Obrázek 3.2: Zatížení profilu

Rozložení sil na obrázku 3.2 je z důvodu, že v tomto případě vznikne při zatížení největší průhyb. Pokud se zatížení, portál, bude posouvat směrem k jedné z podpor, bude se průhyb zmenšovat. V obrázku 3.3 je zobrazený průhyb v měřítku 1:10.



Obrázek 3.3: Průhyb s podporami na konci nosníku



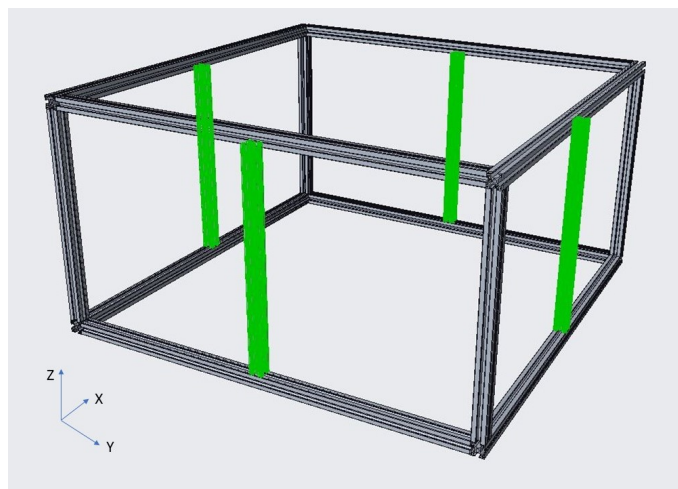
Obrázek 3.4: Graf průhybu s podporami na konci nosníku

Průhyb je znázorněn na obrázku 3.4. Ze simulace je patrné, že maximální průhyb je přibližně 1 mm. Z toho plyne, že je nutné provést úpravu konstrukce.

Nejjednodušším řešením je přidání dalšího profilu, vzpěry uprostřed nosníku.

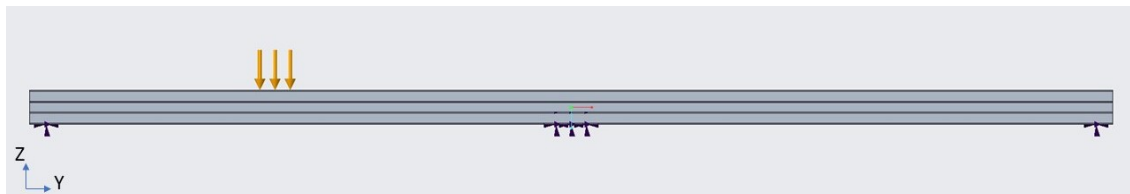
### 3.1.2 Úprava rámu

Pomocí simulace v první návrhu byly zjištěny nedostatky. Příliš velký průhyb hliníkového nosníku. Proto bylo potřeba udělat korekci. Přidáním svislých hliníkových profilů se průhyb několikanásobně zmenšil. Zelené prvky na obrázku 3.5 jsou nově přidané nosníky.



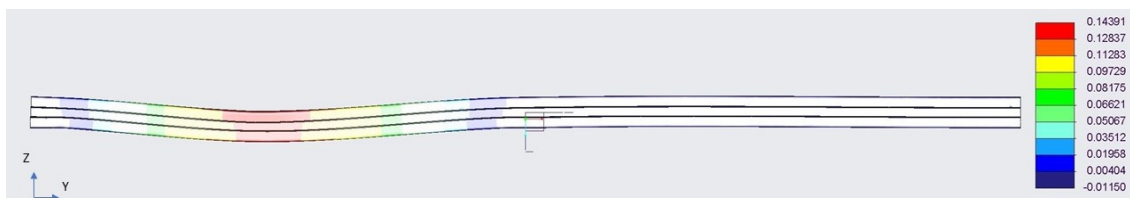
Obrázek 3.5: Modifikovaný rám

Síla působící na nosník zůstává  $400\text{ N}$ . Po přidání vzpěry zde vzniká 3. podpora. Síla, která působila v předchozí simulaci uprostřed, se přesune mezi dvě podpory. Přidaná podpora je přesně uprostřed zkoumaného nosníku, na kterou stranu se síla posune nemá na výsledek výrazný vliv, výsledek by byl téměř stejný. Okrajové podmínky jsou znázorněné na obrázku 3.6.

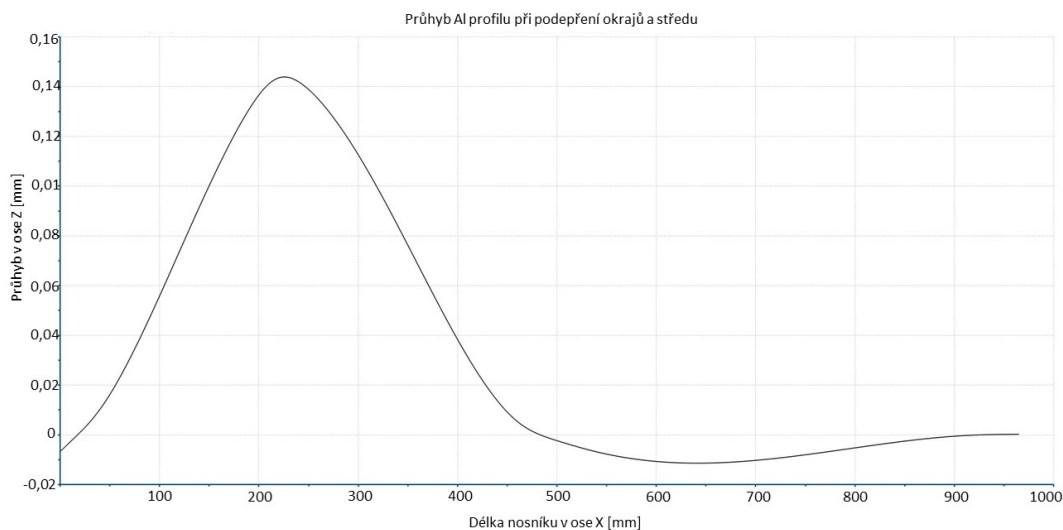


Obrázek 3.6: Zatížení profilu po úpravě

Výsledek simulace je na obrázcích 3.7 a 3.8. Z výsledků je patrné, že přidáním jedné podpory do poloviny nosníku se nám průhyb snížil skoro až  $10x$ . V obrázku 3.7 je zobrazen průhyb v měřítku 1:100. Hodnota největšího průhybu je  $0,144\text{ mm}$ .



Obrázek 3.7: Průhyb nosníku po úpravě



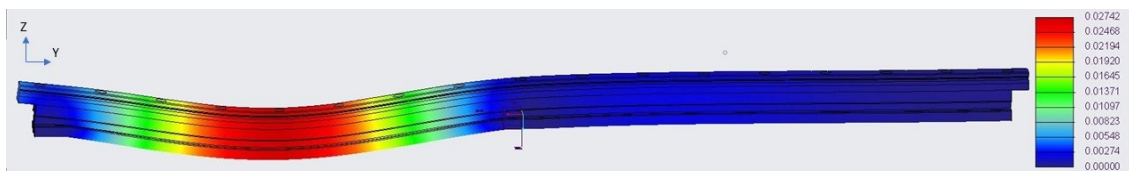
Obrázek 3.8: Graf průhybu nosníku po úpravě

Těmito simulacemi byl zjištěn průhyb samotného hliníkového profilu. Spojením hliníkového profilu a lineárního vedení se získá průhyb několikanásobně nižší. Průhyb je řešený v následující simulaci.

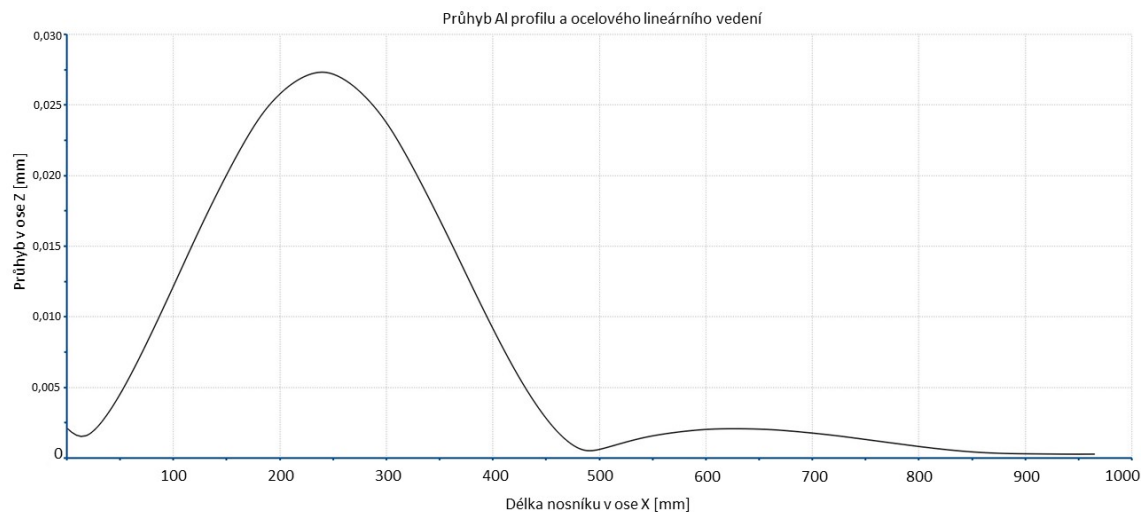


Obrázek 3.9: Okrajové podmínky sestavy Al profilu a lineárního vedení

Soustava pro simulaci je tvořena hliníkovým profilem a ocelovým lineárním vedením. Okrajové podmínky simulace jsou zobrazeny na obrázku 3.9. Zatěžující síla je 400 N. Zobrazená deformace na obrázku 3.10 je 1:1000.



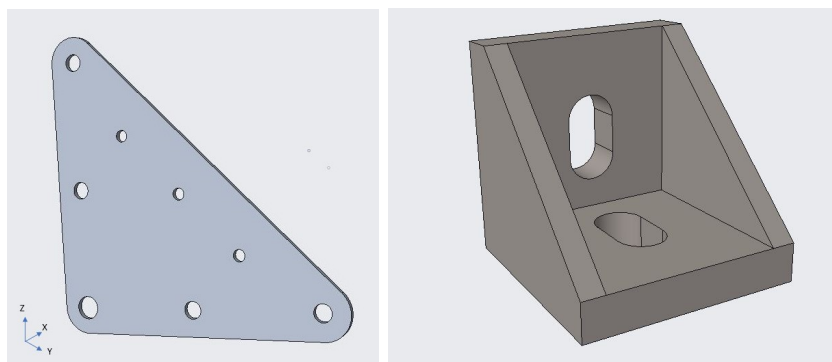
Obrázek 3.10: Průhyb nosníku s lineárním vedením



Obrázek 3.11: Graf průhyb nosníku s lineárním vedením

Výsledkem této simulace je teoretický průhyb hliníkového profilu a lineárního vedení zatížením, které vyvolá hmotnost portálu. Síla 400 N odpovídá přibližně 40 kg. Výsledný průhyb je 0,0274 mm (viz obrázek 3.11).





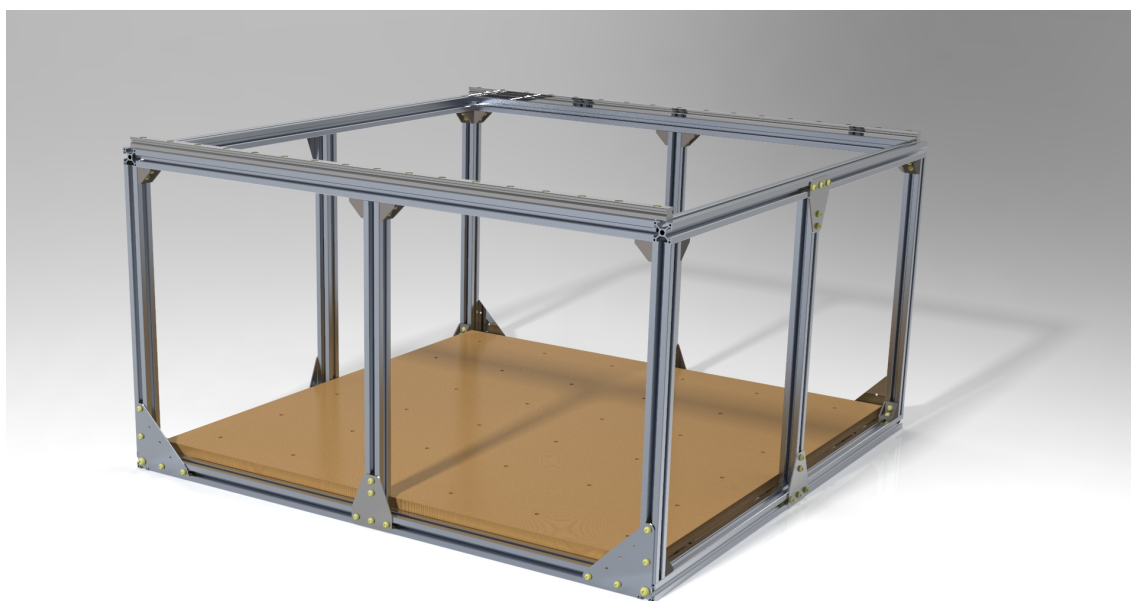
(a) Plošná vzpěra

(b) Roh 90°

Obrázek 3.12: Zpevňovací prvky rámu

Po spočítání průhybu hlavních nosníků už stačí konstrukci vhodně sešroubovat. Pro zajištění poloh jsou použité ploché hliníkové prvky. Důvodem, proč jsou z hliníku je ten, že díly vytištěné z plastu by sice zajistily přesnou polohu, ale plast je příliš pružný. Za klidového stavu stroje by vše fungovalo jak má, ale problém by nastal po rozběhnutí motorů. Při pohybu vznikají dynamické síly. Proto v tomto případě není vhodné díly tisknout, ale nechat vyřezat vodním paprskem.

Dalším vyztužovacím prvkem jsou kovové 90° rohy. Mají stejný význam jako hliníkové plechy. Vyrábí se velkosériovou výrobou a jejich cena je nízká oproti tištěným dílům z plastu.



Obrázek 3.13: Základní rám

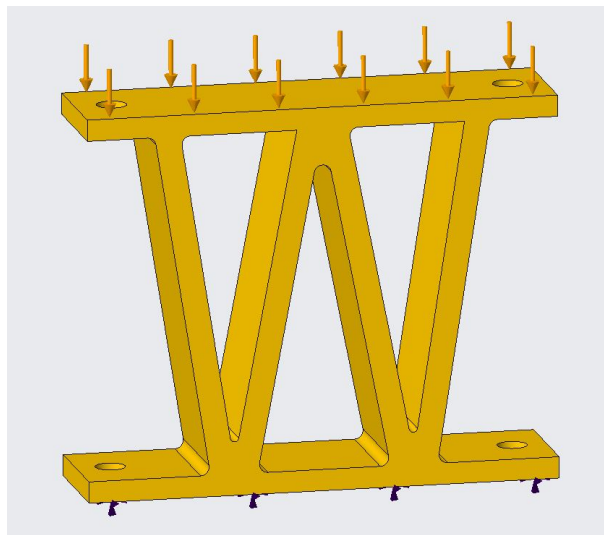
### 3.1.3 Shrnutí návrhu rámu

Hlavní přednosti a vlastnosti použitých prvků a technologií:

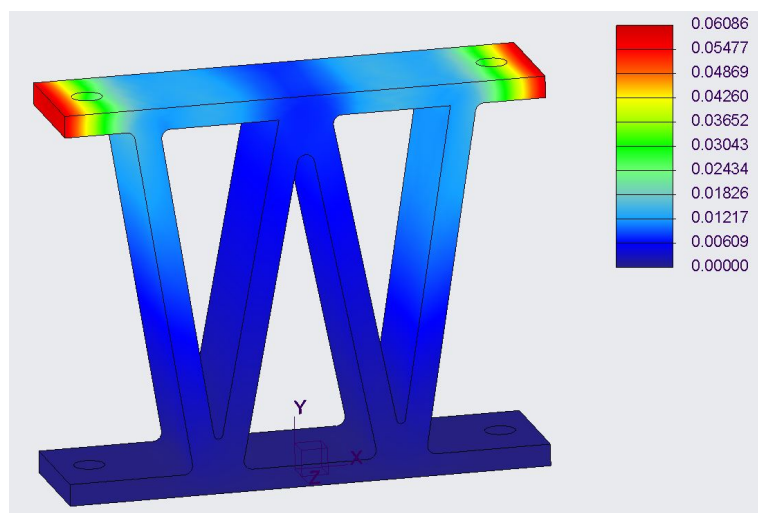
- základní konstrukční materiál je hliníkový profil 3030 z materiálu Al6060 T5,
- simulace průhybu profilu na 2 podporách. Výsledek průhybu cca 1 mm při zatížení 400 N,
- simulace průhybu profilu na 3 podporách. Výsledný průhyb cca 0,14 mm při zatížení 400 N,
- simulace sestavy Al profilu a ocelové kolejnice. Výsledný průhyb cca 0,027 mm při zatížení 400 N,
- odůvodnění, proč byly použity doplňující konstrukční prvky (cena, materiál),
- jako upínací deska je použita překližka z tvrdého dřeva,
- další možné úpravy: zadělání bočních stěn plexisklem nebo doplnění krytí drážek profilu.

### 3.1.4 Portál

Další částí celého stroje je návrh konstrukce portálu. Portál je pohyblivá část stroje. Pokud překročí hmotnost 40 kg, průhyb simulovaný v předchozí podkapitole 3.1 bude vyšší. Základem portálu je překlenutí pracovního prostoru stroje. Základními nosnými prvky jsou hliníkové profily 3030. Jejich hlavní důvod použití pro portál je jejich nízká hmotnost a relativně vysoká tuhost. Rám tedy tvoří dva 1 131 mm dlouhé profily spojené plastovými vzpěrami. Tvar vzpěry je navržen tak, aby odolávala na co největší tlak.



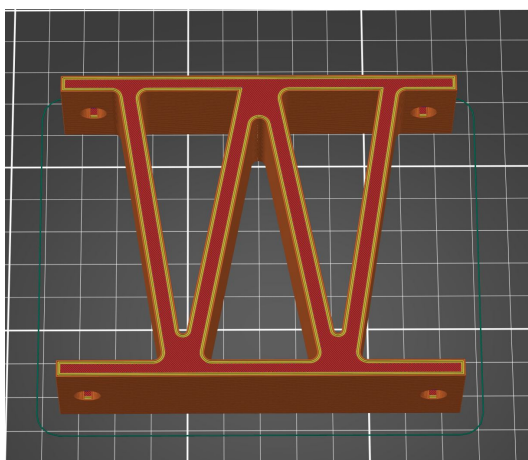
Obrázek 3.14: Vzpěra portálu



Obrázek 3.15: Vzpěra portálu - rozložení napětí

Simulací této vzpěry byla získána největší deformace od působící síly ( $300\text{ N}$ ). Posunutí dosahuje hodnoty  $0,06\text{ mm}$ , což je zcela vyhovující. Nutné je podotknout, že simulace byla provedena pro 100% výplň. Skutečné posunutí bude o něco málo vyšší.

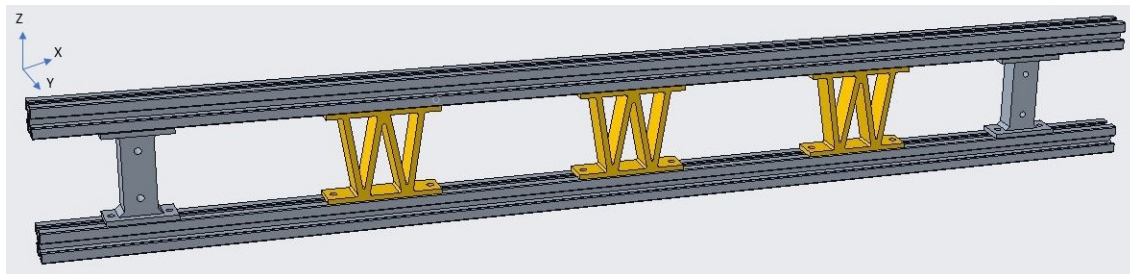
U vytištěných dílů záleží na poloze tisku. Takzvaně, výtisk vydrží daleko větší zatížení pokud je síla rovnoběžná s jednotlivými vrstvami. Pokud síla bude kolmo, k porušení dílu dojde mezi vrstvami.



Obrázek 3.16: Vzpěra portálu - poloha tisku

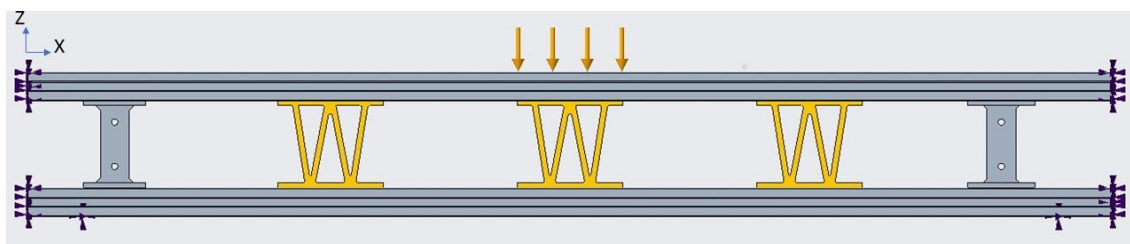
Na obrázku 3.16 je zobrazeno, jak se díl tisk. Parametry pro tisk nelze stanovit jednoznačně. Důležité je zvolit materiál, který bude dostatečně pevný a málo pružný. Dále nastavit výplň tisku alespoň na 30 %. Výška vrstvy je doporučena alespoň  $0,2\text{ mm}$ . Parametry nelze stanovit přesně, protože aditivní technologie se rozšiřují velice rychle, proto záleží na dostupné tiskárně. V tomto případě byl díl vytištěn na 3D tiskárně Průsa i3 Mk2.5S. Výška vrstev byla nastavena na  $0,2\text{ mm}$  a průměr trysky  $0,4\text{ mm}$ . Vnitřní výplň 30 %, materiál PET-G.

Dalším prvkem portálu jsou samotné hliníkové profily. Ty zajišťují nosnou část. Pro dostatečnou variabilitu a možnou následující modifikaci je zvoleno zatížení přibližně  $30 \text{ kg}$ . V předchozí simulaci plastové vzpěry bylo použité zatížení  $300 \text{ N}$ . Toto zatížení odpovídá, pokud by byla zatížena pouze jedna ze vzpěr, vzpěry jsou 3. Vyšší zatížení bylo zvoleno z důvodu částečné výplně tištěných dílů.



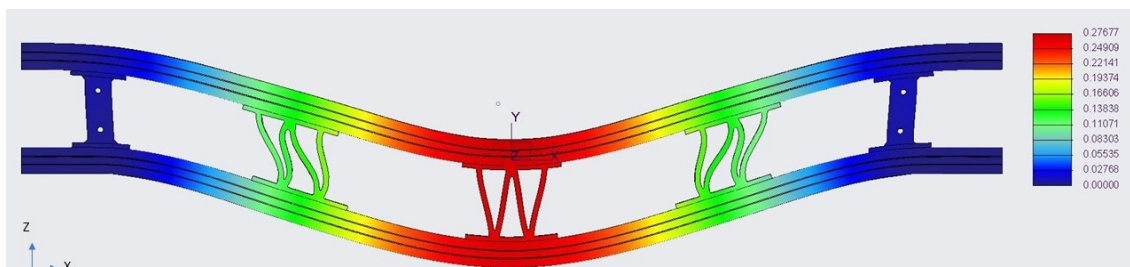
Obrázek 3.17: Nosná část portálu

Pro zjištění průhybu portálu byla provedena simulace celé nosné sestavy. Spodní hliníkový profil je zesponu podepřený, podepření zajišťuje ložiska lineárního vedení. Další vazbou je vetknutí čel jednotlivých profilů. Vazba vzniká díky bočním dílům, ve kterých jsou profily usazené. Zatížení působí uprostřed a to o velikosti  $300 \text{ N}$ . Na obrázku 3.18 jsou zobrazené vazby a dané zatížení.

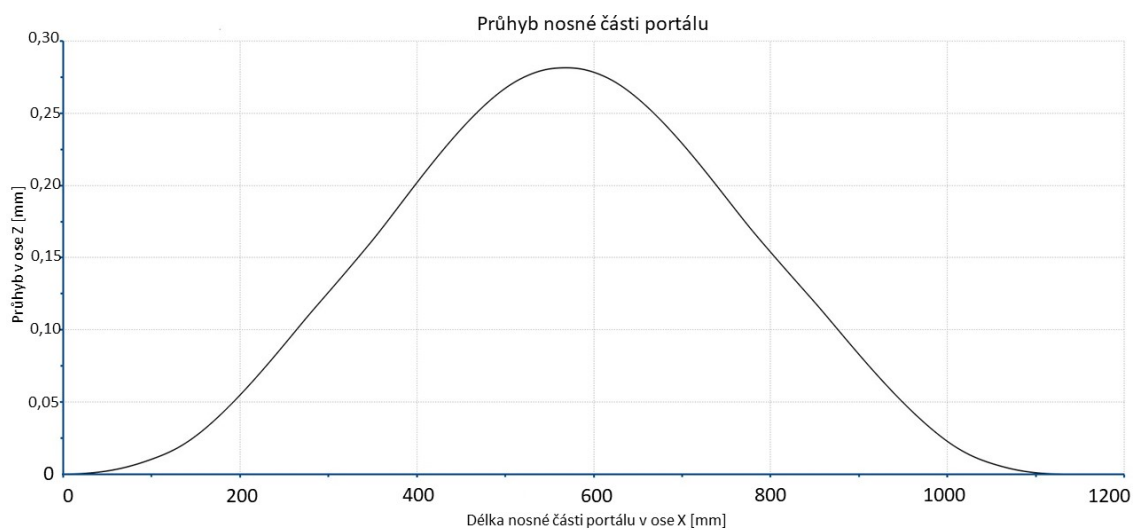


Obrázek 3.18: Silové účinky a vazby na nosné konstrukci portálu

Simulací byl zjištěn průhyb portálu  $0,276 \text{ mm}$ . Průhyb je na první pohled výrazný, ale po namontování lineárního vedení se průhyb zmenší. Další snížení průhybu by bylo dosaženo přidáním další vzpěry, či použit jiný materiál na vzpěry. Na obrázku 3.19 je zobrazený průhyb. Deformace profilu je v měřítku zhruba 1:1000.

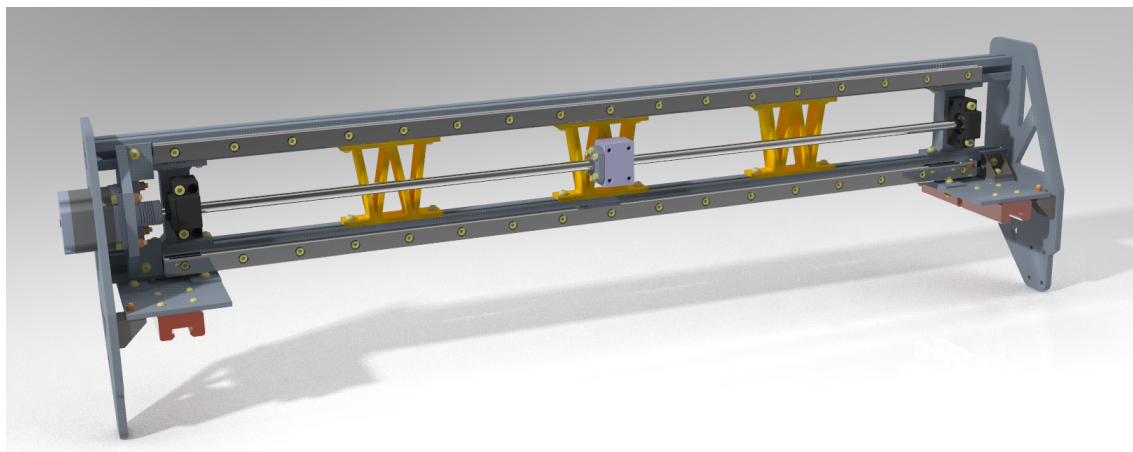


Obrázek 3.19: Simulace nosné konstrukce portálu



Obrázek 3.20: Graf průhybu portálu

Celý portál pak tvoří boční spojnice mezi pohyblivými šrouby, držák motoru, motor, pohybový šroub pro osu Z, ložiska lineárního vedení a další spojovací prvky (šrouby). Ostatním komponentům se budou věnovat následující podkapitoly. Na obrázku 3.21 je sestava celého portálu.

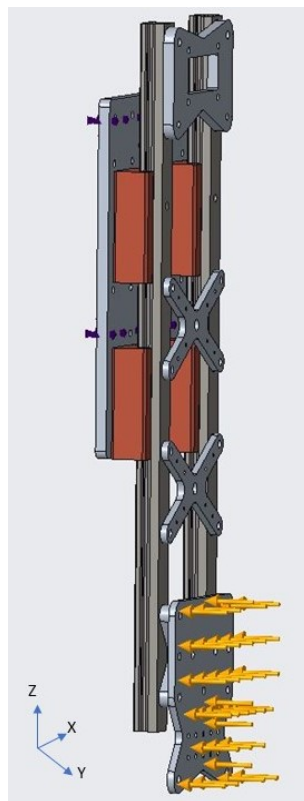


Obrázek 3.21: Sestava portálu

### 3.1.5 Konstrukce portálu pro posuv v ose Z

Základním nosným prvkem pro posuv v ose Z je základní deska. Tato základní deska má pohyb v ose X, posuv po lineárním vedení portálu. Pohyb v ose Z zajišťuje opět lineární vedení. Lineárnímu vedení se věnuje následující kapitola.

Základní deska odolává působení sil při obrábění. Proto je navržena z 8 mm tlustého hliníkové plechu. Další nosným členem jsou ocelové kolejnice lineárního vedení. Lineární vedení je zároveň vyztuženo hliníkovými plechy o tloušťce 5 mm. Na obrázku 3.22 je sestava navržena pro simulaci a zjištění nejvyššího napětí a přetvoření prvků.



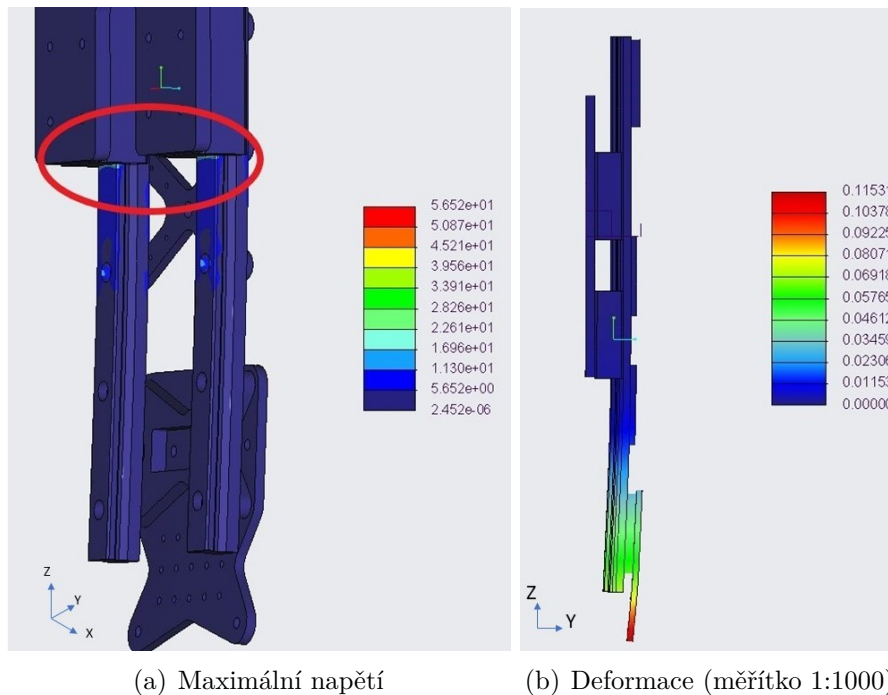
Obrázek 3.22: Sestava portálu pro osu Z s okrajovými podmínkami

Materiál, který je na jednotlivých komponentech použitý je barevně rozlišený. Šedá barva odpovídá hliníku, tmavě šedá odpovídá oceli a hnědá barva je materiál lineárních ložisek. Síla působící na spodní upínací desku nástroje je  $100\text{ N}$ . Vazby jsou v místech, kde jsou lineární ložiska na posuv v ose X. Síla působící na sestavu vyvolává kroutící moment.

Obrázek 3.23a znázorňuje místo s maximálním napětím. V místě, kde je maximální napětí, je i otvor, díky kterému napětí výrazně vzroste. Jednotky na stupnici jsou v  $MPa$ . Obrázek 3.23b zobrazuje největší průhyb. při zatížení  $100\text{ N}$  vychází průhyb na  $0,115\text{ mm}$ . Jednotky na stupnici jsou v  $mm$ . V tomto návrhu je to tento průhyb dostačující, pro budoucí úpravy a modifikace je toto jedna z částí, které bude třeba upravovat.

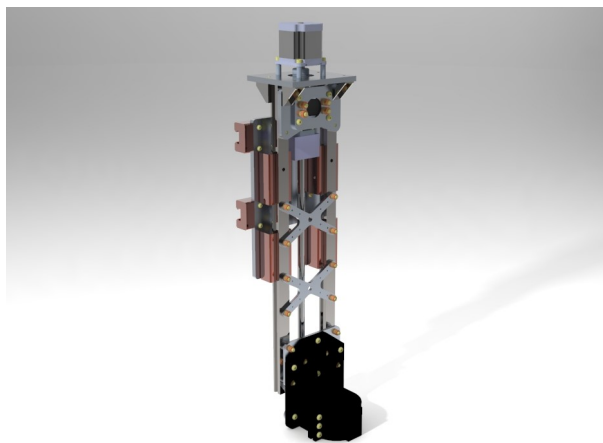
Pro funkčnost celé sestavy je doplněn o pohybový šroub, krokový motor umístěný v horní části a upínací modul pro vřeteno. Tato konstrukce byla navržena pro dosažení co největšího zdvihu. Díky pevným lineárním ložiskům získáme daleko větší zdvih v ose Z. Naopak hmotnost lineárního vedení musí vytahovat motor, musí zde být navržený motor s dostatečným točivým momentem nebo převod. Převod

lze realizovat za pomoci krátkého nekonečného ozubeného řemenu a kladek. Tyto komponenty se dají sehnat normalizované.



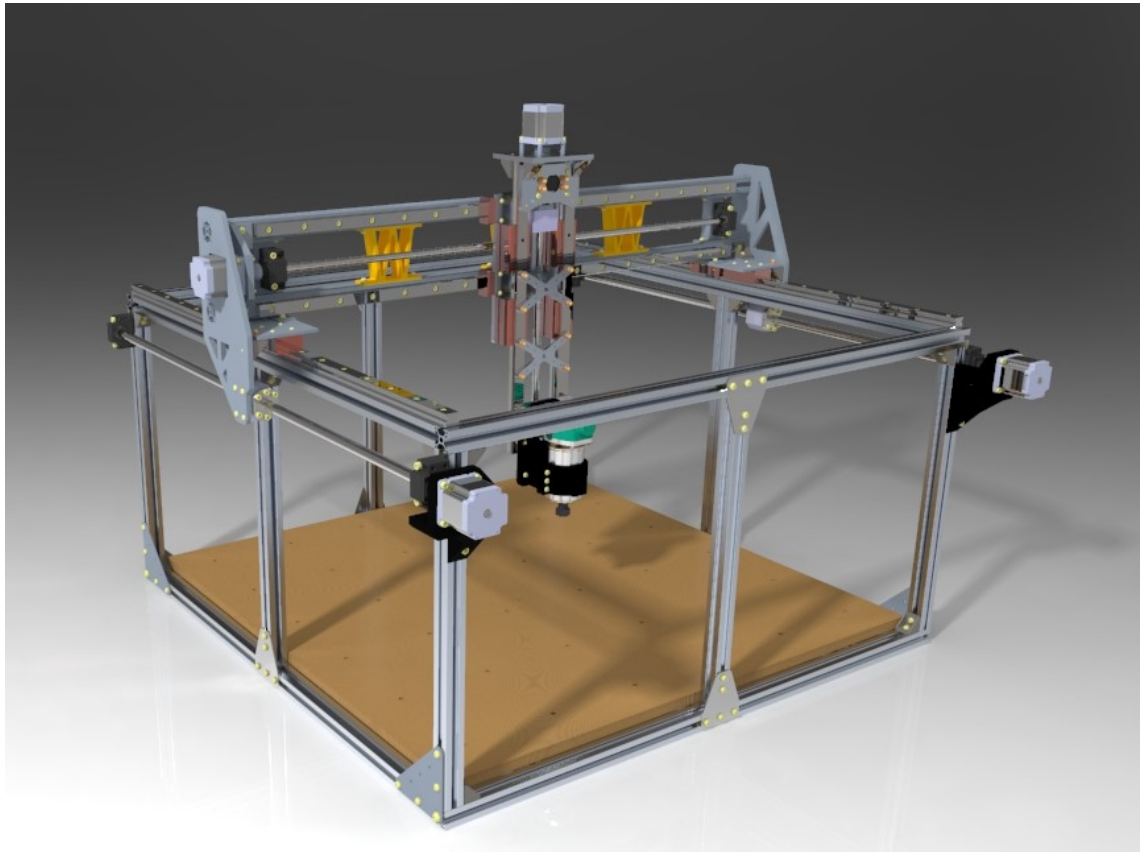
Obrázek 3.23: Simulace sestavy osy Z

Obrázek 3.24 zobrazuje sestavu po doplnění motoru, pohybového šroubu a spojovacích součástí, šroubů. Jedním z parametrů stroje je vyměnitelnost obráběcího vřetena na laser nebo extruder pro 3D tisk. Tato vlastnost je zajištěna pomocí 6 šroubů. K hliníkové upínací desce se pak mohou upevnit různé další moduly. Primárním modulem je frézovací upínka.



Obrázek 3.24: Support osy Z

Obrázek 3.25 zobrazuje kompletní model sestavy celého CNC frézky.



Obrázek 3.25: Kompletní sestava CNC frézky

## 3.2 Návrh lineárního vedení

Dalším prvkem, který je potřeba v návrhu CNC frézky rozebrat je návrh pojezdového ústrojí. Je mnoho možností jak zajistit přesné vedení ve směru jedné osy. Možnosti jaké jsou zde, jsou uvedeny v podkapitole 2.3.2.

Pro všechny jednotlivé osy, X Y a Z, je použito lineární vedení značky HIWIN. Jedná se o kolejnici s lineárními ložisky. Detaily jsou popsány v teoretické části.

Hlavními výhodami, proč je využito zrovna lineární vedení je především vysoká tuhost, vysoká přesnost polohování, vysoká rychlost a malá hnací síla, jednoduchá montáž a snadné mazání.



### 3.2.1 Základní parametry návrhu

Zde je základní postup návrhu lineárního vedení od společnosti HIWIN. Postup platí pro návrh všech možných vedení, je univerzální.[13]

#### Základní parametry

- délka posuvu,
- rychlost posuvů a zrychlení,
- instalační základna,
- zatížení,
- požadovaná tuhost,
- životnost,
- požadovaná přesnost,
- pracovní prostředí.

#### Dalším krokem je výběr řady

- řada HG a CG – menší obráběcí stroje,
- řada EG – automatizace, vysokorychlostní doprava, přesné měřicí stroje,
- řada EG – automatizace, vysokorychlostní doprava,
- řada MG – malá technika, lékařské zařízení,
- řada RG – obráběcí stroje, vstřikovací lisy, vysokohustotní stroje a systémy.

#### Definování rozměrů a počtu vozíků

- dle vypočítaných nebo jinak zjištěných hodnot,
- dle typu zátěže,
- za předpokladu použití kuličkových šroubů (jmenovité rozměry by měli být shodné)

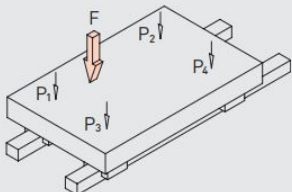
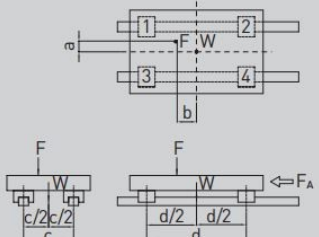
V dalších krocích je třeba vypočítat maximální zatížení vozíků, předepnutí, tuhost a životnost.

### 3.2.2 Návrh vedení pro posuv v ose Y

#### Vstupní parametry

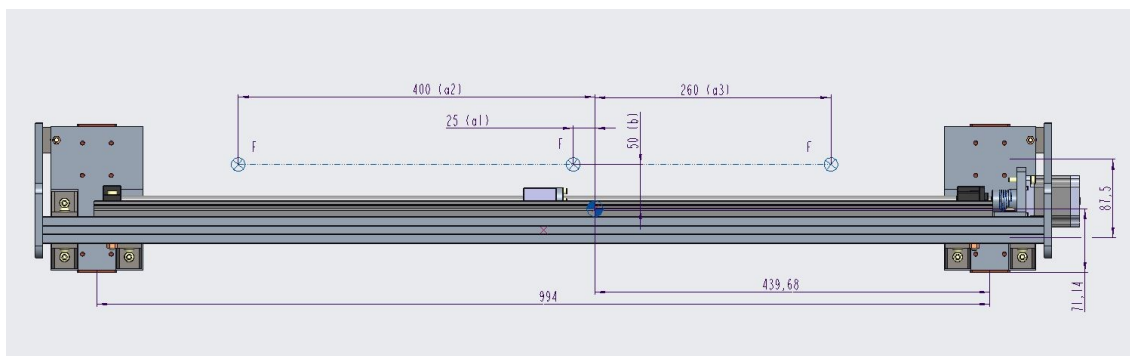
- celková hmotnost:  $m_c = 30 \text{ kg}$ ,
- rychlost:  $v = 25 \text{ m/min}$ ,
- zrychlení/zpomalení:  $a = 0,5 \text{ m/s}$ ,
- zatěžující síla vyvolaná hmotností od supportu osy Z:  $F = 200 \text{ N}$ .

V tomto případě se vychází z případu zatížení kolmo na vozíky.

Typické příklady	Rozmístění zátěže	Zatížení vozíku
		$P_1 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d}$ $P_2 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d}$ $P_3 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d}$ $P_4 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d}$

Obrázek 3.26: Schéma statického zatížení vozíků [13]

V tomto případě jsou rozměry zakresleny v obrázku 3.27. Podle známých rozměrů se vypočítají jednotlivé síly na vozíky. Síly s označením  $P_1, P_2, P_3, P_4$ .



Obrázek 3.27: Síla působící na jednotlivé vozíky

Jednotlivé síly nepůsobí všechny najednou, ale vždy pouze jedna. Jde o síly vyvolané hmotností svislého supportu osy Z.

### Výpočet zatížení na jednotlivé vozíky

Výpočet od síly  $F$  ve vzdálenosti  $-a_1$  a  $b$ . (viz obrázek 3.26 a obrázek 3.27)

$$P_{11} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a_1}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} - \frac{200 \cdot 0,025}{2 \cdot 0,994} + \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 180 \text{ N} \quad (3.1)$$

$$P_{12} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a_1}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} - \frac{200 \cdot 0,025}{2 \cdot 0,994} - \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 66 \text{ N} \quad (3.2)$$

$$P_{13} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a_1}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} + \frac{200 \cdot 0,025}{2 \cdot 0,994} + \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 185 \text{ N} \quad (3.3)$$

$$P_{14} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a_1}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} + \frac{200 \cdot 0,025}{2 \cdot 0,994} - \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 70 \text{ N} \quad (3.4)$$

Výpočet od síly  $F$  ve vzdálenosti  $-a_2$  a  $b$ . (viz obrázek 3.27)

$$P_{21} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a_2}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} - \frac{200 \cdot 0,4}{2 \cdot 0,994} + \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 142 \text{ N} \quad (3.5)$$

$$P_{22} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a_2}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} - \frac{200 \cdot 0,4}{2 \cdot 0,994} - \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 28 \text{ N} \quad (3.6)$$

$$P_{23} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a_2}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} + \frac{200 \cdot 0,4}{2 \cdot 0,994} + \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 223 \text{ N} \quad (3.7)$$

$$P_{24} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a_2}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} + \frac{200 \cdot 0,4}{2 \cdot 0,994} - \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 108 \text{ N} \quad (3.8)$$

Výpočet od síly  $F$  ve vzdálenosti  $a_3$  a  $b$ . (viz obrázek 3.27)

$$P_{31} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a_3}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} + \frac{250 \cdot 0,26}{2 \cdot 0,994} + \frac{250 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 230 \text{ N} \quad (3.9)$$

$$P_{32} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a_3}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} + \frac{200 \cdot 0,26}{2 \cdot 0,994} - \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 87 \text{ N} \quad (3.10)$$

$$P_{33} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a_3}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} - \frac{200 \cdot 0,26}{2 \cdot 0,994} + \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 164 \text{ N} \quad (3.11)$$

$$P_{34} = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a_3}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d} = \frac{300}{4} + \frac{200}{4} - \frac{200 \cdot 0,26}{2 \cdot 0,994} - \frac{200 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,0875} = 21 \text{ N} \quad (3.12)$$

Z katalogu společnosti HIWIN bylo vybráno vedení HGR20 a vozíky HGH20CA s předepnutím ZA 0,05–0,07  $C_{dyn}$ .

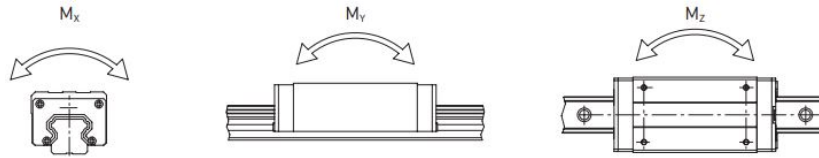
### Maximální statické zatížení

$$P_s = \max(P_{11} - P_{33}) = P_{31} = 230 \text{ N} \quad (3.13)$$

### Vlastnosti vozíku řady HGH20CA

- základní dynamická únosnost  $C_{dyn} = 17\,750 \text{ N}$ ,
- základní statická únosnost  $C_0 = 27\,760 \text{ N}$ ,
- dynamický moment  $M_x = 178 \text{ Nm}$ ,
- dynamický moment  $M_y = 126 \text{ Nm}$ ,
- dynamický moment  $M_z = 126 \text{ Nm}$ ,
- statický moment  $M_{0x} = 270 \text{ Nm}$ ,
- statický moment  $M_{0y} = 200 \text{ Nm}$ ,
- statický moment  $M_{0z} = 200 \text{ Nm}$ .

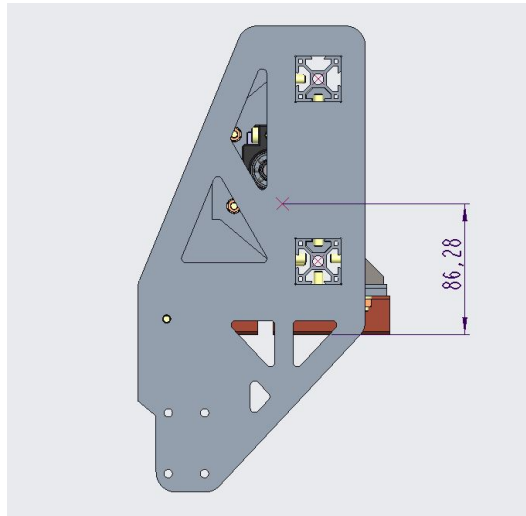
Působení jednotlivých momentů je zobrazeno na obrázku 3.28.



Obrázek 3.28: Momenty lineárního vozíku [13]

### Statický faktor bezpečnosti

$$f_s = \frac{C_0}{P} = \frac{27760}{230} = 120 \quad (3.14)$$



Obrázek 3.29: Poloha těžiště v ose Z - vzdálenost  $l$

### Setrvačnost hmoty a zatížení

Zrychlení:

$$P_{dyn13} = P_1 = P_3 = P_s + \frac{1}{2} \cdot m_c \cdot a \cdot \frac{l}{d} = 230 + \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,0863}{0,0875} = 304 \text{ N} \quad (3.15)$$

$$P_{dyn24} = P_2 = P_4 = \frac{W}{4} - \frac{1}{2} \cdot m_c \cdot a \cdot \frac{l}{d} = 230 + \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,0863}{0,0875} = 156 \text{ N} \quad (3.16)$$

Zpomalení:

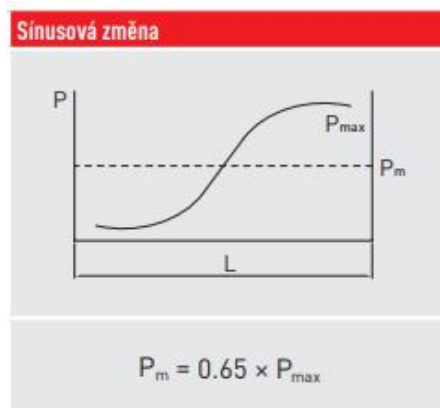
$$P_{dyn13} = P_1 = P_3 = \frac{W}{4} - \frac{1}{2} \cdot m_c \cdot a \cdot \frac{l}{d} = 230 + \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,0863}{0,0875} = 156 \text{ N} \quad (3.17)$$

$$P_{dyn24} = P_2 = P_4 = P_s + \frac{1}{2} \cdot m_c \cdot a \cdot \frac{l}{d} = 230 + \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,0863}{0,0875} = 304 \text{ N} \quad (3.18)$$

Maximální dynamické zatížení

$$P_{max} = P_{dyn13} = P_{dyn24} = 304 \text{ N} \quad (3.19)$$

### Ekvivalentní dynamické zatížení



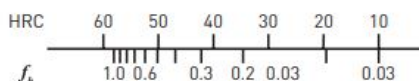
Obrázek 3.30: Ekvivalentní dynamické zatížení [13]

$$P_m = 0,65 \cdot P_{max} = 0,65 \cdot 304 \doteq 200 \text{ N} \quad (3.20)$$

### Jmenovitá životnost

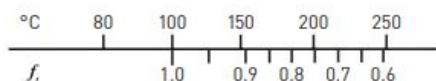
Základem pro návrh jmenovité životnosti jsou 3 základní ovlivňující faktory. Faktor tvrdosti, faktor teploty a faktor zatížení.

Faktor tvrdosti je bezrozměrné číslo. Běžná tvrdost kolejnic je 58 HRC. Pokud by byla tvrdost nižší musí se faktor upravit podle stupnice na obrázku 3.31. [13]



Obrázek 3.31: Faktor tvrdosti kolejnic [13]

Běžné použití kolejnice je v rozmezí teplot  $-10$  až  $80^\circ\text{C}$ . Pokud teplota překročí  $100^\circ\text{C}$  musí se opět upravit podle stupnice na obrázku 3.32. [13]



Obrázek 3.32: Faktor teploty [13]

Faktor zatížení zohledňuje vliv rázů, vibrací a vysoké rychlosti. Faktor zatížení je zvolený podle obrázku 3.33. [13]

Druh zátěže	Rychlost posuvu	$f_w$
Žádné rázy a vibrace	do 15 m/min	1.0 - 1.2
Normální zátěž	15 m/min až 60 m/min	1.2 - 1.5
Mírné rázy	60 m/min až 120 m/min	1.5 - 2.0
Rázy a vibrace	víc než 120 m/min	2.0 - 3.5

Obrázek 3.33: Faktor zatížení vozíků [13]

Zvolené faktory pro pracovní podmínky

- faktor tvrdosti  $f_h = 1$ ,
- faktor teploty  $f_t = 1$ ,
- faktor zátěže  $f_w = 2$  - mírné rázy.

Životnost  $L$  [m]

$$L = \left( \frac{f_h \cdot f_t \cdot C_{dyn}}{f_w \cdot P_m} \right)^3 \cdot 50000 = \left( \frac{1 \cdot 1 \cdot 17750}{2 \cdot 200} \right)^3 \cdot 50000 = 4,37 \cdot 10^9 \text{ m} \quad (3.21)$$

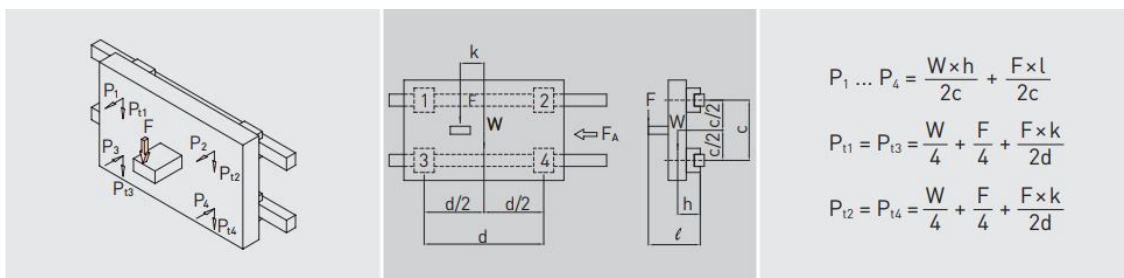
Životnost  $L$  [h]

$$L_h = \frac{L}{v \cdot 60} = \frac{4,37 \cdot 10^9}{25 \cdot 60} = 2,9 \cdot 10^6 \text{ hodin} \quad (3.22)$$

### 3.2.3 Shrnutí návrhu lineárního vedení

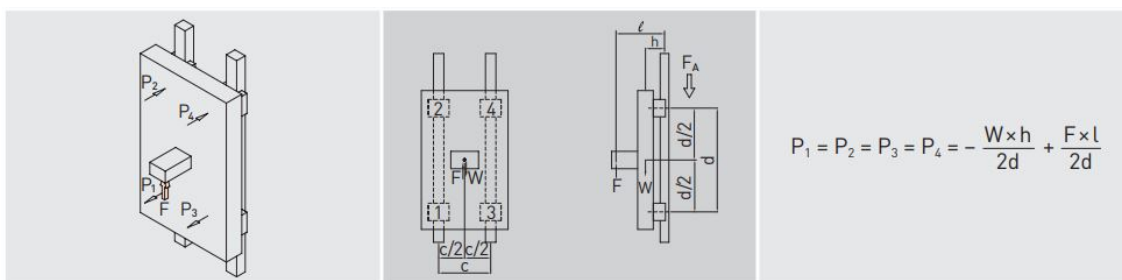
V předchozí kapitole bylo navrženo lineární vedení pro osu Y podle katalogu společnosti HIWIN. Poloha lineárních ložisek je vodorovná a nesou hmotnost portálu.

Návrh pro osy X a Y byl obdobný, rozdíl byl pouze v působení zatížení.



Obrázek 3.34: Směr zatížení osy X [13]

Obrázky 3.34 a 3.35 znázorňují schéma zatížení osy X a Z.



Obrázek 3.35: Směr zatížení osy Z [13]

Osa	X	Y	Z
Typ kolejnice	HGR20	HGR20	HGR20
Typ vozíku	HGH20CA	HGH20CA	HGH20CA
Statická bezpečnost [N]	397	120	1004
Dynamická bezpečnost [N]	183	58	520
Maximální statické zatížení [N]	70	230	28
Maximální dynamické zatížení [N]	97	304	34
Ekvivalentní zatížení [N]	63	200	22
Životnost [hod]	$9,31 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^6$	$8,15 \cdot 10^9$

Tabulka 3.1: Navržené lineární vedení

### 3.3 Návrh převodu z rotačního pohybu na přímočarý

Jakým způsobem vyřešit převod z rotačního pohybu na přímočarý je mnoho, metody byly již zmíněné v podkapitole 2.3.3.

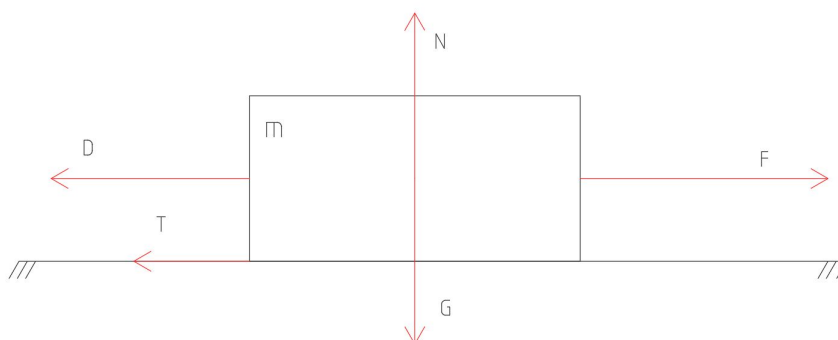
Pro získání vysoké přesnosti v polohování, je nejlepším řešením kuličkový šroub. Cena šroubu je poměrně vysoká, ale oproti ostatním je nejpřesnější a prakticky nejjednodušší. Kuličkové šrouby jsou navrženy pro všechny 3 osy. Jedním z hlavních důvodů, je vysoké stoupání a tím i snížený potřebný kroutící moment motoru.

#### 3.3.1 Výpočet axiálních sil

Pro návrh pohybových šroubů a motorů je třeba zjistit, jak velké síly jsou třeba pro pohyb tělesa. Návrhová hmotnost portálu je zhruba 30 kg, hmotnost supportu osy Z má navrhovanou hmotnost 20 kg. Hmotnosti jsou navrženy vyšší pro dostatečnou rezervu výkonu motoru.

### Síla pro pohyb v ose Y

Na obrázku 3.36 je zjednodušené schéma působících sil.



Obrázek 3.36: Rozložení sil v rovnoměrně zrychleném pohybu

Základní parametry:

- koeficient tření:  $f = 0,004$ ,
- hmotnost:  $m = 30 \text{ kg}$ ,
- gravitační zrychlení:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,
- zrychlení:  $a = 0,5 \text{ m/s}^2$ ,

Základem výpočtu je rovnováha sil. Do rovnováhy v ose  $X$  vstupuje síla  $F$ , síla kterou je potřeba vyvinout pro pohyb, dynamická síla  $D$  zohledňuje vliv zrychlení a síla  $T$  vyvolaná třením. V ose  $Y$  vstupuje síla tíhová  $G$  a reakce na sílu tíhovou, síla normálová  $N$ .

$$X : -D - T + F = 0 \quad (3.23)$$

$$Y : N - G = 0 \quad (3.24)$$

$$F = D + T \quad (3.25)$$

$$G = N \quad (3.26)$$

$$F = m \cdot a + N \cdot f \quad (3.27)$$

$$F = 30 \cdot 0,5 + 300 \cdot 0,004 = 17 \text{ N}$$

Výsledná síla pro pohyb v ose  $Y$  je  $17 \text{ N}$ , v ose  $X$  je  $11 \text{ N}$  a v ose  $Z$  je  $211 \text{ N}$

### 3.3.2 Návrh kuličkového šroubu pro osu Y

Návrh kuličkového šroubu byl provedený podle katalogu společnosti HIWIN. [13]



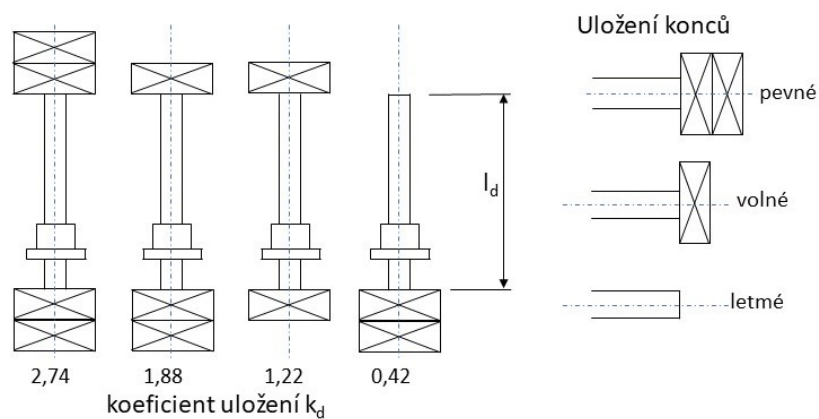
## Základními parametry pro návrh kuličkového šroubu jsou

- přesnost polohování - použití válcovaného,okružovaného nebo broušeného závitu,
- vůle a předpětí - základní matice jsou s vůlí max. 0,05 mm některé matice jsou dodávané předepjaté,
- otáčky,
- pracovní zátěž - vliv na životnost kuliček.

## Kontrola kritických otáček

V prvním kroku je třeba stanovit kritické otáčky. Maximální pracovní otáčky  $n_{max}$  by neměly překročit 80 % kritických otáček  $n_k$ . [13]

Koeficient uložení se určí podle obrázku 3.37.



Obrázek 3.37: Koeficient uložení [13]

Znamé hodnoty:

- koeficient uložení:  $k_d = 2,74$ ,
- průměr hřídele:  $d_k = 16 \text{ mm}$ ,
- vzdálenost mezi ložisky:  $l_d = 1\,000 \text{ mm}$ .

Kritické otáčky:

$$n_k = k_d \cdot \frac{d_k}{l_d^2} \cdot 10^8 = 2,74 \cdot \frac{16}{1000^2} \cdot 10^8 = 4\,384 \text{ ot/min} \quad (3.28)$$

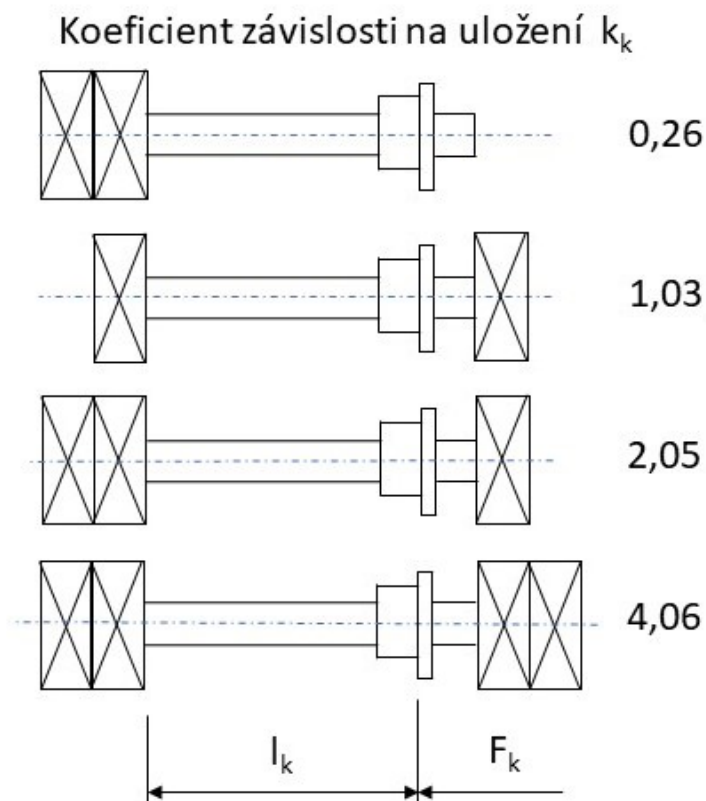
Maximální dovolené otáčky:

$$n_{max} = n_k \cdot 0,8 = 4384 \cdot 0,8 = 3\,502 \text{ ot/min} \quad (3.29)$$

## Kontrola tuhosti

Axiální síla na kuličkový šroub je omezená. Jinak by došlo k jeho deformaci. Maximální pracovní zatížení  $F_{max}$  může být nejvýše 50 % z teoretického zatížení. [13]

Koeficient závislosti na uložení:



Obrázek 3.38: Koeficient závislosti na uložení [13]

Známe hodnoty:

- koeficient závislosti na uložení:  $k_k = 4,06$ ,
- průměr hřídele:  $d_k = 16 \text{ mm}$ ,
- nepodepřená délka hřídele:  $l_k = 900 \text{ mm}$ .

Přípustné teoretické zatížení šroubu:

$$F_k = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_k^2} \cdot 10^5 = 4,06 \cdot \frac{16^4}{900^2} \cdot 10^5 = 32\,850 \text{ N} \quad (3.30)$$

Maximální axiální zatížení šroubu:

$$F_{kmax} = F_k \cdot 0,5 = 16\,425 \text{ N} \quad (3.31)$$

## Životnost

Vlastnosti zvoleného kuličkového šroubu:

- kuličkový šroub: R1605-FSI-1000-X-T5,
- matice: R16-05T3-FSIDIN,
- dynamická únosnost:  $C_{dyn} = 7\,320\text{ N}$ ,
- statický únosnost:  $C_0 = 12\,470\text{ N}$ ,
- axiální zatížení:  $\max \dots F = 20\text{ N}$ ,
- střední otáčky:  $n_s = 200\text{ ot./min}$ .

Životnost v otáčkách:

$$L = \left(\frac{C_{dyn}}{F}\right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{7320}{20}\right)^3 \cdot 10^6 = 4,9 \cdot 10^{13}\text{ ot} \quad (3.32)$$

Životnost v hodinách:

$$L_h = \frac{L}{n_m \cdot 60} = \frac{4,9 \cdot 10^{13}}{200 \cdot 60} = 4 \cdot 10^9\text{ hodin} \quad (3.33)$$

## Výpočet kroutícího momentu

Hnací moment pro převod kroutícího momentu na přímočarý pohyb. [13]

$$M = \frac{F \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} = \frac{20 \cdot 5}{2000 \cdot \pi \cdot 0,88} = 0,018\text{ Nm} \quad (3.34)$$

### 3.3.3 Shrnutí návržení rotačního převodu na přímočarý

Hlavním cílem bylo navrhnout převod mezi rotačním pohybem motoru a posuvem portálu. Jako nejlepší řešení bylo navrženo kuličkové šroubu. Přesnost polohování a minimální vůle v matici je za vyšší cenu nejvýhodnější.

OSA	X	Y	Z
Typ šroubu	R1605-FSI-1000-X-T5	R1605-FSI-1000-X-T5	R1205-FSI-500-X-T5
Typ matice	R16-05T3-FSIDIN	R16-05T3-FSIDIN	R12-05K4-FSIDIN
Kritické otáčky [ot./min]	4384	4384	3288
Maximální otáčky [ot./min]	3502	3502	2630
Maximální zatížení [N]	16425	16425	5197
Životnost [hod]	$3,27 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$	$1,71 \cdot 10^5$
Kroutící moment pro přenos síly [Nm]	0,01	0,018	0,19

Tabulka 3.2: Navržené kuličkové šrouby

Základem návrhu bylo určení kritických otáček, tuhost, životnost a kroutící moment pro vykonání požadované axiální síly.

V tabulce 3.3.3 jsou uvedené určené parametry pro všechny 3 osy.

### 3.4 Návrh motorů

Navržení motorů navazuje na předchozí kapitolu. Zjištěný krouticí moment pro uvedení jednotlivých částí do pohybu je uvedený v tabulce 3.3.3. Výběr motorů je proveden z nabídky firmy HIWIN. Nabízí motory typu Pro KK 40, tyto motory jsou pro malé aplikace, jako jsou pojezdy pro 3D tiskárny a podobná zařízení. Dále řada Pro KK 50, využití je podobné, výhodou je větší krouticí moment na výstupu. Řada Pro KK 60 už jsou motory větší, s vyšší kroutícím momentem (0,74 – 2,5 Nm). Poslední řada Pro KK 86 jsou motory s vysokým kroutícím momentem.

#### **Orientalmotor**

Označení	Max. moment [Nm]	Proud/fáze [A]	Úhel/krok [°]	Napětí [V]	Hmotnost [kg]	Délka L1 [mm]	Driver	Příruba
PKP264D28A2	0,74	2,8	1,8	24	0,45	39	CVD228B-K	KK-60-F4
PKP266D28A2	1,4	2,8	1,8	24	0,7	54	CVD228B-K	KK-60-F4
PKP268D28A2	2,5	2,8	1,8	24	1,1	76	CVD228B-K	KK-60-F4

Obrázek 3.39: Nabídka krokových motorů Pro KK60 [29]

V tomto případě je nejvýhodnější zvolit motory z řady Pro KK 60. Zvolený motor typu PKP266D28A2 (NEMA23) disponuje kroutícím momentem 1,4 Nm. Maximální krouticí moment je zhruba při 50 – 70 ot./min.

#### **Počet kroků pro posun o 1 mm**

Krokový motor je hardwarově rozdělený na 200 kroků. Softwarové rozdělení zajišťují ovladače motorů. Dělí jednotlivé kroky na 1/2, 1/4, 1/8, či 1/16. Pro polohování CNC strojů se používá mikrokrokování 1/8 nebo 1/16. [39]

Počet kroků pro posun o 1 mm:

- hardwarové kroky na otáčku:  $h = 200$ ,
- mikrokroky na 1 hardwarový krok:  $m = 8$ ,
- stoupání kuličkového šroubu:  $p = 5 \text{ mm}$ ,
- maximální efektivní otáčky motoru:  $n = 200 \text{ ot./min}$ .

$$k = \frac{h \cdot m}{p} = \frac{200 \cdot 8}{5} = 320 \text{ krok/mm} \quad (3.35)$$

Jelikož jsou všechny šrouby se stejným stoupáním a motory mají stejný počet hardwarových kroků, lze stanovit kroky na 1 mm pro všechny motory stejné.

#### **Stanovení maximální rychlosti**

Pro otočení krokového motoru o jednu otáčku je třeba  $200 \cdot 8 = 1600$  pulzů. Maximální počet pulzů  $p_{max}$  je:

$$p_{max} = h \cdot m \cdot n = 200 \cdot 8 \cdot 200 = 320\,000 \text{ krok/min} \quad (3.36)$$

Rychlost posuvu pak bude:

$$v_f = \frac{p_{max}}{k} = \frac{320000}{320} = 1000 \text{ mm/min} \quad (3.37)$$

Při otáčkách  $200 \text{ ot./min}$  bude maximální rychlost  $1000 \text{ mm/min}$ .

### Shrnutí krokových motorů

- typ motoru: NEMA23 (podle katalogu společnosti HIWIN: PKP266D28A2),
- maximální kroutící moment motoru:  $1,4 \text{ Nm}$  při otáčkách do  $70 \text{ ot./min}$ ,
- počet kroků při dělení kroku na  $1/8$ :  $320 \text{ krok./mm}$ ,
- maximální rychlost:  $v_f = 1000 \text{ mm/min}$

## 3.5 Návrh vřetena

Součástí celého návrhu konstrukce je i návrh vřetena. Jsou zde dvě možnosti, obě možnosti byly zmíněny už v podkapitole 2.3.5.

Jelikož se jedná o první verzi stroje, nejlepším řešením je použití klasické kombinované frézky. V tomto případě je použita kombinovaná frézka Makita RT0700CX2J s výkonem  $710 \text{ W}$  a maximálními otáčkami  $30\,000 \text{ ot./min}$ . Nevýhodou této frézky je její ovládání, které musí být manuální. Řízení otáček softwarově by bylo příliš náročné.

Maximální řezná síla vyvinutá výkonem motoru frézky a krokových motorů.

$$F_{os} = \frac{2000 \cdot M \cdot \pi \cdot \eta}{p} = \frac{2000 \cdot 1,4 \cdot \pi \cdot 0,88}{5} = 1\,548 \text{ N} \quad (3.38)$$

$$M_k = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{710 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 30000} = 0,226 \text{ Nm} \quad (3.39)$$

Minimální průměr používané frézy je  $D = 3 \text{ mm}$ .

$$F_t = \frac{2 \cdot M_k}{D} = \frac{2 \cdot 0,226}{0,003} = 151 \text{ N} \quad (3.40)$$

$$F_{vysledna} = F_{os} - F_t = 1548 - 151 = 1\,397 \text{ N} \quad (3.41)$$

Maximální řezná síla při použití výše uvedených součástí je  $1\,397 \text{ N}$ .

## 3.6 Řízení stroje

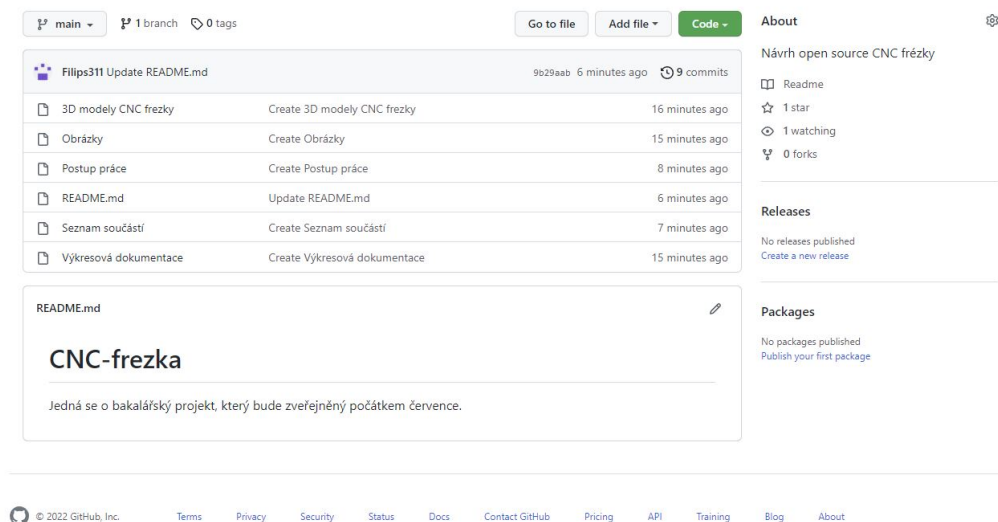
Jak stroj uvést do pohybu je hned několik možností. Základem řízení je počítač. Počítače mají různé formy, ať už se jedná o stolní počítače nebo minipočítače typu Arduino, Raspberry Pi a další. Pro obsluhu stroje není vyžadován velký výkon, proto jsou dostačující staré stolní počítače nebo malé minipočítače o velikosti několika cm. Další nutnou součástí jsou ovladače (drivery) krokových motorů. V poslední řadě je důležitý samotný zdroj napájení motorů a základní desky.

V tomto případě je základní deskou Arduino Mega s procesorem ATmega2560. Jedná se o jednu z nejlevnějších možností. Základní ovladače krokových motorů doporučené výrobcem jsou TB6600. Základní program pro testování je program volně dostupný a používaný ve spoustě podobných případech. Jedná se o open-source program GRBL navržený pro základní desky typu Arduino.

## 3.7 Open-source dostupnost

Pro zajištění, aby projekt byl open-source bylo potřeba založit projekt na stránkách GitHub.com, kde celý projekt bude volně dostupný ostatním uživatelům. Součástí je i otevřená diskuze, kde mohou ostatní uživatelé přidávat své poznámky k projektu. Projekt je na tomto odkazu <https://github.com/Filips311/CNC-frezka> průběžně aktualizován (viz obrázek 3.40).

Portál GitHub.com slouží především jako úložiště pro zálohování jednotlivých verzí (verzování), které zůstávají dostupné po celou dobu zveřejnění projektu a jsou volně dostupné. Ostatní uživatelé mohou navázat na jednotlivé verze.



Obrázek 3.40: Projekt na portálu GitHub.com

## 4 Diskuze a plány do budoucna

Konstrukce celého stroje je navržena na výrazně vyšší hmotnosti. Je to z důvodu budoucí modifikace a úpravy celého stroje.

Jedná se o první návrh celého stroje. Po sestavení a provedení i experimentálních zkoušek budou vlastnosti stroje jasnější. V aktuálním sestavení lze konstatovat, že konstrukce je předimenzovaná oproti navrženým motorům.

Celková cena stroje na českém trhu by zhruba vycházela na 30 000 – 40 000 Kč. Šetřením na komponentech jako jsou lineární vedení a kuličkové šrouby by výrazně došlo ke snížení kvality. S využitím objednáni komponentů ze zahraničí by se cena dala výrazně snížit přibližně na 20 000 Kč. V práci je kladený důraz na nízkou cenu, ale pro získání přesnosti polohování a tuhosti je tento důraz spíše orientační a v jistých případech zohledněný.

Návrh na další vylepšení, návrhy nových témat závěrečných prací:

- použití výkonnějších motorů pro zvýšení rychlosti pohybu,
- vyztužení portálu, snížení průhybu,
- upgrade řízení, například PLC, LinuxCNC nebo Mach3,
- otestování přesnosti polohování,
- designová úprava, zakrytování, bezpečnostní prvky,
- odolná ovládací stanice (klávesy a řídicí prvky jako Emergenci-STOP),
- nahrazení kombinované frézky za softwarově řízené vřeteno,
- návrh dalších dvou os obrábění, pěti osé polohování vřetena,
- rotačně polohovatelný svěrák,
- výška rámu je snadno upravitelná.

## 5 Závěr

V bakalářské práci bylo provedeno seznámení se s problematikou CNC frézování a s návrhem konstrukce. V první části práce je provedena rešerše v oblasti open-source CNC frézek. Součástí rešeršní části je i část teoretická, která se věnuje rozdělení jednotlivých mechanických prvků, vysvětlení jejich funkčnosti a přibližná cenová dostupnost. Jednotlivé podkapitoly se nejdříve věnovaly průmyslovým a neprůmyslovým CNC routerům. Poté se další podkapitoly věnovaly rámu, lineárním pohybovým systémům, přenosu točivého momentu, motorům a v neposlední řadě pracovnímu vřetenu.

V práci byl vyřešený návrh konstrukce celé počítačem řízené frézky. Pro celou konstrukci byly využity hliníkové profily, technologie 3D tisku a v posledním případě řezání vodním paprskem. Dílčím cílem bylo zjištění, kde lze využít technologii 3D tisku plastových dílů, a kde naopak tato technologie není vhodná. Základní profily slouží pro hlavní kostru a jsou i nosnými členy. Vytisknuté plastové díly jsou použité převážně jako designové prvky nebo méně namáhané prvky, například držáky motorů nebo pro koncové spínače. Ostatní prvky byly navrženy pro vyřezání vodním paprskem z hliníkového plechu o různých tloušťkách. V ohledu na dostatečnou pevnost a tuhost stroje byla tato technologie zvolena jako nejvhodnější. Návrh frézovacího ústrojí je navržen tak, aby se vřeteno dalo snadno odmontovat a vyměnit za jinou hlavici, například laser (3D modely obsahuje příloha A).

Využitím počítačového simulačního programu Creo 7.0 Simulate byly vypočteny průhyby namáhaných nosných prvků. Díky těmto simulacím byly jednotlivé konstrukční prvky nadimenzovány. K zhodnocení výsledků byly využity nabyté zkušenosti z předmětu pružnost a pevnost.

Po dokončení modelu konstrukce a odsimulování jednotlivých prvků byla provedena částečná montáž hliníkových profilů, plastových dílů a mechanických prvků. V průběhu montáže došlo k ladění a seřizování mechanických součástí.

V poslední části práce byl zvolen optimální řídicí software. Jelikož se jedná o první verzi open-source CNC frézky, tak pro testování a ladění byl zvolený jako nejvhodnější software GRBL. Teto software je volně dostupný a pro projekt typu open-source přímo navržený.

Po vytvoření projektu na portálu GitHub.com byla zajištěna open-source funkce.

Veškerá dokumentace, 3D modely všech komponentů, technický list a kusovník je doplněn v přílohách (viz přílohy).



## Seznam obrázků

2.1	CNC Router Raptor [11]	12
2.2	CNC Router Volter L8020 [7]	13
2.3	CNC z AliExpressu [38]	14
2.4	Homemade CNC ze dřeva [10]	15
2.5	Homemade CNC s ocelovou konstrukcí [1]	15
2.6	Homemade CNC s hliníkovou konstrukcí [33]	16
2.7	Svařovaný rám [22]	18
2.8	Dřevěný rám [3]	18
2.9	Hliníkový rám [37]	19
2.10	Válečkové ložisko s kovovým pouzdem [34]	20
2.11	Ocelová vodící tyč [9]	20
2.12	Podpěrná tyč [19]	21
2.13	Lineární vedení HIWIN [20]	22
2.14	Trapézový šroub [36]	22
2.15	Lichoběžníkové závity [2]	23
2.16	Kuličkový šroub [18]	23
2.17	Ozubený hřeben [26]	24
2.18	Ozubený řemen [27]	25
2.19	Servomotor Vevor [32]	25
2.20	Krokový motor NEMA 23 [16]	26
2.21	Vřeteno s řídicí jednotkou [40]	27
2.22	Kombinovaná frézka [14]	27
3.1	První návrh rámu	29
3.2	Zatížení profilu	29
3.3	Průhyb s podporami na konci nosníku	29
3.4	Graf průhybu s podporami na konci nosníku	30
3.5	Modifikovaný rám	30
3.6	Zatížení profilu po úpravě	31
3.7	Průhyb nosníku po úpravě	31
3.8	Graf průhybu nosníku po úpravě	31
3.9	Okrajové podmínky sestavy Al profilu a lineárního vedení	32
3.10	Průhyb nosníku s lineárním vedením	32
3.11	Graf průhyb nosníku s lineárním vedením	32
3.12	Zpevňovací prvky rámu	33

3.13	Základní rám . . . . .	33
3.14	Vzpěra portálu . . . . .	34
3.15	Vzpěra portálu - rozložení napětí . . . . .	35
3.16	Vzpěra portálu - poloha tisku . . . . .	35
3.17	Nosná část portálu . . . . .	36
3.18	Silové účinky a vazby na nosné konstrukci portálu . . . . .	36
3.19	Simulace nosné konstrukce portálu . . . . .	36
3.20	Graf průhybu portálu . . . . .	37
3.21	Sestava portálu . . . . .	37
3.22	Sestava portálu pro osu Z s okrajovými podmínkami . . . . .	38
3.23	Simulace sestavy osy Z . . . . .	39
3.24	Support osy Z . . . . .	39
3.25	Kompletní sestava CNC frézky . . . . .	40
3.26	Schéma statického zatížení vozíků [13] . . . . .	42
3.27	Síla působící na jednotlivé vozíky . . . . .	42
3.28	Momenty lineárního vozíku [13] . . . . .	44
3.29	Poloha těžiště v ose Z - vzdálenost $l$ . . . . .	44
3.30	Ekvivalentní dynamické zatížení [13] . . . . .	45
3.31	Faktor tvrdosti kolejnic [13] . . . . .	45
3.32	Faktor teploty [13] . . . . .	45
3.33	Faktor zatížení vozíků [13] . . . . .	46
3.34	Směr zatížení osy X [13] . . . . .	46
3.35	Směr zatížení osy Z [13] . . . . .	47
3.36	Rozložení sil v rovnoměrně zrychleném pohybu . . . . .	48
3.37	Koeficient uložení [13] . . . . .	49
3.38	Koeficient závislosti na uložení [13] . . . . .	50
3.39	Nabídka krokových motorů Pro KK60 [29] . . . . .	52
3.40	Projekt na portálu GitHub.com . . . . .	54

## Seznam tabulek

3.1	Navržené lineární vedení . . . . .	47
3.2	Navržené kuličkové šrouby . . . . .	51

## Bibliografie

- [1] *A Frezarko - cnc.info.pl*. URL: <https://www.cnc.info.pl/amatorska-frezarko-grawerka-500x500x200-t82110.html> (cit. 20.03.2022).
- [2] *Acme Šroub*. Proč se pro vodící šrouby používá tvar závitů Acme. URL: <http://www.cncroutersource.com/acme-thread.html> (cit. 31.03.2022).
- [3] BonJiba. *Build Your Own CNC Milling Machine*. Instructables. URL: <https://www.instructables.com/Build-Your-Own-CNC-Milling-Machine/> (cit. 28.03.2022).
- [4] Martin Buš. *Návrh hobby cnc frézky*. 2020. URL: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=213655](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=213655).
- [5] *CNC Linear Motion: Everything You Need to Know*. CNC Linear motion. URL: <http://www.cncroutersource.com/linear-motion.html> (cit. 05.04.2022).
- [6] *CNC router*. Wikipedia. 9. pros. 2021. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CNC\\_router&oldid=1059469836](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CNC_router&oldid=1059469836) (cit. 19.03.2022).
- [7] *CNC Router Volter L8020*. URL: [https://volter.com/cz/catalog/1\\_serie](https://volter.com/cz/catalog/1_serie) (cit. 19.03.2022).
- [8] *CNC routery a frézky | DOBRÉ STROJE*. URL: <https://www.dobrestroje.cz/dobrestroje/eshop/1-1-DREVOOBRABECI-STROJE/265-2-CNC-ROUTERY> (cit. 16.05.2022).
- [9] *CNC-hobby*. URL: <http://www.cnc-hobby.cz/cnc2.htm> (cit. 31.03.2022).
- [10] *Homebuilt (DIY) CNC Router - Arduino Based (GRBL)*. Instructables. URL: <https://www.instructables.com/Homebuilt-DIY-CNC-Router-Arduino-Based-GRBL/> (cit. 19.03.2022).
- [11] SKY Media s r o [www.skymedia.cz]; e-mail: info@skymedia.cz. *Kvalitní CNC Router*. Raptor CNC. URL: <https://www.raptor-cnc.com/router.html> (cit. 19.03.2022).
- [12] *Jak funguje krokový motor?* RAVEO s.r.o. 19. dub. 2021. URL: <https://www.raveo.cz/jak-funguje-krokovy-motor> (cit. 03.04.2022).
- [13] *Katalog Hiwintecnika, Lineární Vedení | Hiwin.Cz*. URL: <https://www.hiwin.cz/cz/download> (cit. 05.05.2022).
- [14] *Kombinovaná Frézka*. URL: [https://www.grandic.cz/photo/products/p23/p22623\\_1.jpg](https://www.grandic.cz/photo/products/p23/p22623_1.jpg) (cit. 03.04.2022).

- [15] *Krokové motory vs. servomotory - 2022*. Krokové motory vs. servomotory - 2022. 14. čvc. 2021. URL: <https://zivotdivny.com/krokovye-motory-vs-servomotory/> (cit. 03. 04. 2022).
- [16] *Krokový Motor Obr.* URL: [https://www.postavrobota.cz/fotky46704/fotos/\\_vyr\\_70220161028\\_121813.jpg](https://www.postavrobota.cz/fotky46704/fotos/_vyr_70220161028_121813.jpg) (cit. 03. 04. 2022).
- [17] *Kuličkové Šrouby*. Kuličkové šrouby | HIWIN s.r.o. - lineární technika, kuličkové vedení | hiwin.cz. URL: <https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby> (cit. 01. 04. 2022).
- [18] *Kuličkový Šroub obr.* csm\_HBN\_115\_Diary2.\_01\_97fc07fc61.png (525×525). URL: [https://www.hennlich.cz/fileadmin/\\_processed\\_/csm\\_HBN\\_115\\_Diary2.\\_01\\_97fc07fc61.png](https://www.hennlich.cz/fileadmin/_processed_/csm_HBN_115_Diary2._01_97fc07fc61.png) (cit. 01. 04. 2022).
- [19] *Lineární Vedení - Aliexpress*. aliexpress.com. URL: [//www.aliexpress.com/item/32919956707.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02&sk=&aff\\_platform=api-new-product-detail&aff\\_trace\\_key=fde75919264d41b39d411abdbe707d20-1648728720827-04289&af=&cv=&cn=&dp=321719-178832.3025957](https://www.aliexpress.com/item/32919956707.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=api-new-product-detail&aff_trace_key=fde75919264d41b39d411abdbe707d20-1648728720827-04289&af=&cv=&cn=&dp=321719-178832.3025957) (cit. 31. 03. 2022).
- [20] *Lineární Vedení | HIWIN s.r.o., Lineární Technika, Lineární Motory | Hiwin.Cz*. URL: <https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni> (cit. 31. 03. 2022).
- [21] Jiří Marek. *Materiály pro Stavbu Rámů*. URL: <https://docplayer.cz/17303971-Materialy-pro-stavbu-ramu.html> (cit. 26. 03. 2022).
- [22] Alexandr Mnchenko. *Projekt CNC Stroje - "Dexter"*. URL: <https://radiokot.ru/lab/hardwork/110/> (cit. 28. 03. 2022).
- [23] *Ocelová Vodící Tyč*. URL: <https://www.arkov.cz/p/tyc-w-14-h6-cf53-vodici-tyc-ocelova-ina-216393> (cit. 30. 03. 2022).
- [24] *Ozubené Hřebeny*. Ozubené hřebeny. URL: <http://www.ozubene-hrebeny.cz/> (cit. 02. 04. 2022).
- [25] *Ozubené Řemeny*. Ozubené řemeny - Haberkorn. URL: <https://eshop.haberkorn.cz/pohonne-elementy/ozubene-remeny/> (cit. 02. 04. 2022).
- [26] *Ozubený Hřeben Obr.* Ozubeny hřeben. URL: <https://www.apexdynaczech.cz/wp-content/uploads/2016/09/hreben.jpg> (cit. 02. 04. 2022).
- [27] *Ozubený Řemen Obr.* URL: <https://eshop.haberkorn.cz/modules/connector/abra/data/pictures/6/2Z50000101.jpg> (cit. 02. 04. 2022).
- [28] *Podepřená Tyč*. URL: <https://cnc.inshop.cz/kolejnice/podeprena-tyc-kolejnice-10mm> (cit. 30. 03. 2022).
- [29] *Pro KK 60 | Hiwin.Cz*. URL: [https://www.hiwin.cz/cz/produkty/motory/krokovye-motory/123\\_pro-kk-60](https://www.hiwin.cz/cz/produkty/motory/krokovye-motory/123_pro-kk-60) (cit. 10. 05. 2022).
- [30] *Servomotor*. Wikipedie. 1. čvn. 2021. URL: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Servomotor&oldid=19987259> (cit. 02. 04. 2022).
- [31] *Servomotor 1*. illustrationprize. URL: <https://illustrationprize.com/cs/561-servo-motor.html> (cit. 03. 04. 2022).

- [32] *ServoObr.* URL: <https://d2qc09r11gfuof.cloudfront.net/product/SFQDDJ0.75KWDJQDQ/m100-1.2.jpg> (cit. 03.04.2022).
- [33] *Stavba Cnc Frézky :: Z Bestíkova.* URL: <https://zbestikova.webnode.cz/stavba-cnc-frezky/> (cit. 22.03.2022).
- [34] *Track Roller.* URL: [https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1LRc3g0rpK1RjSZFhq6xSdXXaa/W4ZZ-W4-2RS-W4-V-Groove-Track-Roller-Bearing-Guide-Wheel-Track-Roller-Bearing-15x59-94x19.jpg\\_Q90.jpg\\_.webp](https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1LRc3g0rpK1RjSZFhq6xSdXXaa/W4ZZ-W4-2RS-W4-V-Groove-Track-Roller-Bearing-Guide-Wheel-Track-Roller-Bearing-15x59-94x19.jpg_Q90.jpg_.webp) (cit. 29.03.2022).
- [35] *Track Rollers | Emerson Bearings.* Emerson Bearing. URL: <https://www.emersonbearing.com/track-rollers/> (cit. 16.05.2022).
- [36] *Trapézové Šrouby.* TRAPÉZOVÉ ŠROUBY. URL: <https://www.mnsystems.cz/kulickove-trapezove-acme-srouby/trapezove-srouby> (cit. 31.03.2022).
- [37] Trochilidesign. *CNC Router/Milling Machine.* Instructables. URL: <https://www.instructables.com/Building-your-own-CNC-milling-machine/> (cit. 28.03.2022).
- [38] *VEVOR CNC Wood Router.* aliexpress.com. URL: [https://www.aliexpress.com/item/1005002869823825.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02&sk=&aff\\_platform=&aff\\_trace\\_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://www.aliexpress.com/item/1005002869823825.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=) (cit. 19.03.2022).
- [39] Vojtěch Štěpánek. “Návrh a Konstrukce Hobby Frézky”. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016.
- [40] *Vřeteno Řízené Obr.* URL: [https://pajtech.cz/images/00046510\\_1.jpg](https://pajtech.cz/images/00046510_1.jpg) (cit. 03.04.2022).

## Přílohy

**Příloha A** - 3D modely součástí a sestavy (CD)

**Příloha B** - Výkres celé sestavy s pozicemi










































**Příloha C** - Seznam použitých součástí

**Příloha D** - Technický list zařízení


































# Příloha C

## Bom Report : CNC\_FREZKA

### Assembly CNC\_FREZKA contains:

Quantity	Type	Name	Actions
1	Sub-Assembly	<u>RAM_V4</u>	  
2	Sub-Assembly	<u>BALL SCREW 1605</u>	  
1	Sub-Assembly	<u>PORTAL_V2</u>	  
1	Part	<u>MOTOR_SUPPORT_R</u>	  
1	Part	<u>MOROR_SUPPORT_L</u>	  
1	Sub-Assembly	<u>OSA_Z</u>	  
1	Part	<u>MAKITA</u>	  
8	Part	<u>ISO7380-1-M5X18-8_8</u>	  
16	Part	<u>DINENISO7092-5</u>	  
8	Part	<u>ISO4762-M5X28-8_8</u>	  
8	Part	<u>ISO4032-M5-6</u>	  
4	Part	<u>ISO4762-M6X35-8_8</u>	  
2	Part	<u>ISO4762-M6X20-8_8</u>	  
8	Part	<u>ISO4762-M6X40-8_8</u>	  
8	Part	<u>ISO7380-1-M5X14-8_8</u>	  

### Sub-Assembly RAM\_V4 contains:

Quantity	Type	Name	Actions
7	Part	<u>AL_3030_965</u>	  
4	Part	<u>AL_3030_1025</u>	  
8	Part	<u>AL_3030_495</u>	  
2	Part	<u>LINEARNI_VEDENI_1000MM</u>	  
16	Part	<u>AL_90UHEL_302828</u>	  
6	Part	<u>DESKA_VZPERA_STREDU</u>	  
4	Part	<u>RAM_VYZTUHA_ROH</u>	  
32	Part	<u>ISO7380-1-M6X14-8_8</u>	  
78	Part	<u>DINENISO7092-6</u>	  
34	Part	<u>ISO4762-M5X18-8_8</u>	  
46	Part	<u>ISO7380-1-M6X10-8_8</u>	  



4	Part	<u>ISO7380-1-M8X18-8_8</u>			
4	Part	<u>DINENISO7092-8</u>			
1	Part	<u>UPINACI_DESKA</u>			

**Sub-Assembly BALL\_SCREW\_1605 contains:**

Quantity	Type	Name	Actions		
1	Part	<u>SFU_1605_SCREW</u>			
1	Part	<u>SFU_1605_NUT</u>			
1	Part	<u>SFU_1605_HOUSING</u>			
1	Part	<u>BF10</u>			
1	Part	<u>BK12</u>			
1	Part	<u>SPOJKA</u>			
1	Part	<u>MOTOR_NEMA23</u>			
6	Part	<u>ISO4762-M5X20-8_8</u>			

**Sub-Assembly PORTAL\_V2 contains:**

Quantity	Type	Name	Actions		
2	Part	<u>AL_3030_1115</u>			
3	Part	<u>VZPERA_PRO_PORTAL</u>			
2	Part	<u>LINEARNI_VEDENI_1000MM</u>			
1	Part	<u>SPOJ BALL_SCREW_A</u>			
1	Part	<u>SPOJ BALL_SCREW_B</u>			
2	Part	<u>SPOJENI_VOZIKU</u>			
4	Part	<u>PODLOZKA_NAD_VOZIKY</u>			
4	Part	<u>LINEAR_CAR</u>			
1	Part	<u>SUP BALL_SCREW_1204</u>			
1	Sub-Assembly	<u>BALL_SCREW_1204</u>			
1	Part	<u>SPOJKA</u>			
1	Part	<u>SUP BALL_SCREW_1204_L</u>			
1	Part	<u>MOTOR_NEMA23</u>			
1	Part	<u>MOTOR_SUPP_2</u>			
7	Part	<u>AL_90UHEL_302828</u>			

34	Part	<u>ISO4762-M5X18-8 8</u>			
22	Part	<u>ISO7380-1-M6X12-8 8</u>			
22	Part	<u>DINENISO7090-6</u>			
16	Part	<u>ISO7380-1-M4X12-8 8</u>			
16	Part	<u>DINENISO7092-4</u>			
4	Part	<u>ISO7380-1-M6X18-8 8</u>			
25	Part	<u>DINENISO7092-6</u>			
5	Part	<u>ISO7380-1-M6X25-8 8</u>			
12	Part	<u>ISO4032-M6-6</u>			
3	Part	<u>ISO7380-1-M6X20-8 8</u>			
5	Part	<u>ISO7380-1-M6X14-8 8</u>			
6	Part	<u>ISO4762-M4X14-8 8</u>			
4	Part	<u>ISO4762-M6X60-8 8</u>			
2	Part	<u>ISO7380-1-M5X18-8 8</u>			
6	Part	<u>DINENISO7090-5</u>			
6	Part	<u>ISO4032-M5-6</u>			
2	Part	<u>ISO7380-1-M5X14-8 8</u>			
6	Part	<u>DINENISO7092-5</u>			
2	Part	<u>ISO4762-M5X25-8 8</u>			
2	Part	<u>ISO4762-M5X35-8 8</u>			

**Sub-Assembly BALL\_SCREW\_1204 contains:**






Quantity	Type	Name	Actions		
1	Part	<u>SFU 1204 SCREW 1000</u>			
1	Part	<u>SFU 1204 NUT</u>			
1	Part	<u>SFU 1204 HOUSING</u>			
1	Part	<u>BK10</u>			
1	Part	<u>BF10</u>			

**Sub-Assembly OSA\_Z contains:**

Quantity	Type	Name	Actions		
1	Part	<u>SPOJOVACI_DESKA_NA_PORTALU</u>			

8	Part	<u>LINEAR_CAR</u>			
1	Sub-Assembly	<u>BALL_SCREW_1204_500</u>			
2	Part	<u>LINEARNI_VEDENI_500MM</u>			
2	Part	<u>KRIZ_SPOJ_Z</u>			
1	Part	<u>KRIZ_SPOJ_SROUB_Z</u>			
1	Part	<u>SPOJ_LIN_VEDENI_OSY_Z</u>			
1	Part	<u>DRZAK_VRETENA</u>			
1	Part	<u>OSA_Z_HORNI</u>			
2	Part	<u>AL_90UHEL_302828</u>			
1	Part	<u>DESKA_MOTORU_Z</u>			
1	Part	<u>MOROT_PODLOZKA_Z</u>			
2	Part	<u>MOTOR_OSA_Z_90</u>			
4	Part	<u>MOTOR_DIST_SPOUPEK_Z</u>			
34	Part	<u>ISO7380-1-M4X14-8_8</u>			
34	Part	<u>DINENISO7092-4</u>			
4	Part	<u>ISO10642-M4X12-8_8</u>			
8	Part	<u>ISO4762-M5X25-8_8</u>			
37	Part	<u>DINENISO7092-5</u>			
25	Part	<u>ISO4032-M5-6</u>			
6	Part	<u>ISO4762-M4X16-8_8</u>			
4	Part	<u>ISO4762-M5X30-8_8</u>			
2	Part	<u>ISO7380-1-M5X10-8_8</u>			
2	Part	<u>DINENISO7090-5</u>			
2	Part	<u>ISO7380-1-M5X40-8_8</u>			
2	Part	<u>ISO4762-M5X20-8_8</u>			
4	Part	<u>ISO7380-1-M5X14-8_8</u>			
4	Part	<u>ISO4762-M6X45-8_8</u>			
4	Part	<u>DINENISO7092-6</u>			
4	Part	<u>ISO4032-M6-6</u>			
4	Part	<u>ISO4762-M5X35-8_8</u>			
6	Part	<u>ISO7380-1-M5X22-8_8</u>			
2	Part	<u>ISO4762-M5X45-8_8</u>			
3	Part	<u>ISO7380-1-M5X20-8_8</u>			





























































**Sub-Assembly BALL\_SCREW\_1204\_500 contains:**

Quantity	Type	Name	Actions
1	Part	<u>SFU_1204_SCREW_500</u>	  
1	Part	<u>SFU_1204_NUT</u>	  
1	Part	<u>SFU_1204_HOUSING</u>	  
1	Part	<u>BF10</u>	  
1	Part	<u>BK10</u>	  
1	Part	<u>SPOJKA</u>	  
1	Part	<u>MOTOR_NEMA23</u>	  

**Summary of parts for assembly CNC\_FREZKA:**

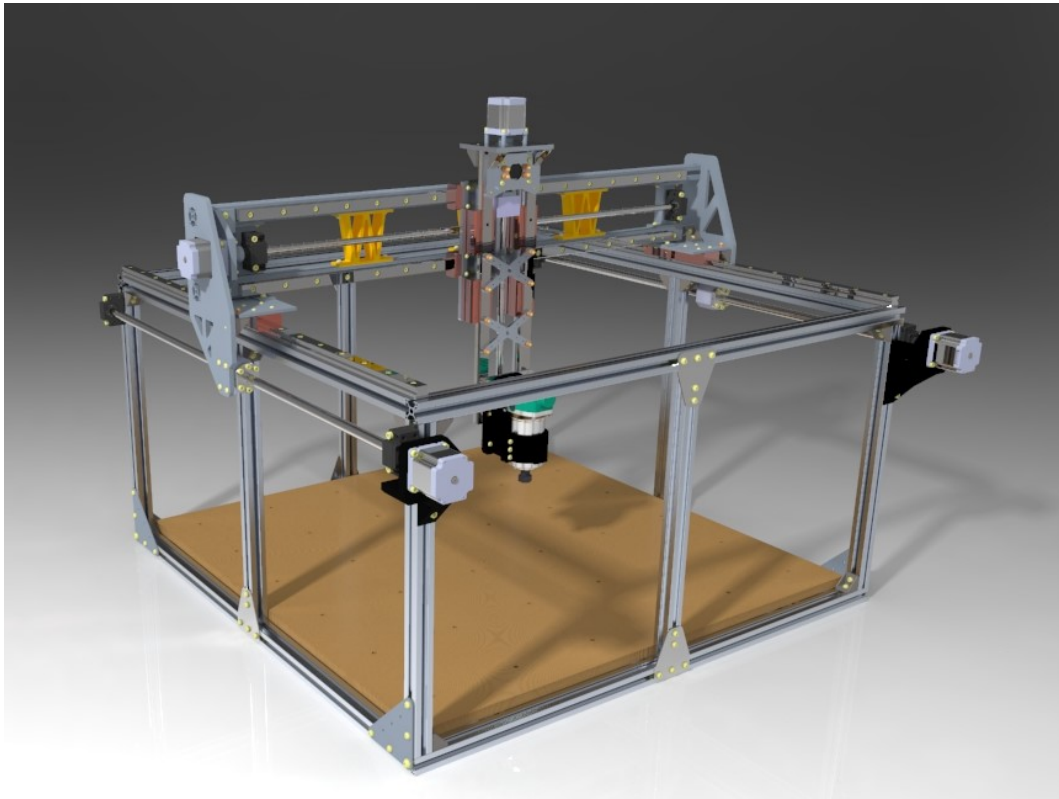
Quantity	Type	Name	Actions
7	Part	<u>AL_3030_965</u>	  
4	Part	<u>AL_3030_1025</u>	  
8	Part	<u>AL_3030_495</u>	  
4	Part	<u>LINEARNI_VEDENI_1000MM</u>	 
25	Part	<u>AL_90UHEL_302828</u>	 
6	Part	<u>DESKA_VZPERA_STREDU</u>	  
4	Part	<u>RAM_VYZTUHA_ROH</u>	  
37	Part	<u>ISO7380-1-M6X14-8_8</u>	 
107	Part	<u>DINENISO7092-6</u>	 
68	Part	<u>ISO4762-M5X18-8_8</u>	 
46	Part	<u>ISO7380-1-M6X10-8_8</u>	  
4	Part	<u>ISO7380-1-M8X18-8_8</u>	  
4	Part	<u>DINENISO7092-8</u>	  
1	Part	<u>UPINACI_DESKA</u>	  
2	Part	<u>SFU_1605_SCREW</u>	  
2	Part	<u>SFU_1605_NUT</u>	  
2	Part	<u>SFU_1605_HOUSING</u>	  
4	Part	<u>BF10</u>	 
2	Part	<u>BK12</u>	  

4	Part	<u>SPOJKA</u>			
4	Part	<u>MOTOR_NEMA23</u>			
14	Part	<u>ISO4762-M5X20-8_8</u>			
2	Part	<u>AL_3030_1115</u>			
3	Part	<u>VZPERA_PRO_PORTAL</u>			
1	Part	<u>SPOJ BALL SCREW A</u>			
1	Part	<u>SPOJ BALL SCREW B</u>			
2	Part	<u>SPOJENI_VOZIKU</u>			
4	Part	<u>PODLOZKA_NAD_VOZIKY</u>			
12	Part	<u>LINEAR_CAR</u>			
1	Part	<u>SUP BALL SCREW 1204</u>			
1	Part	<u>SFU_1204 SCREW 1000</u>			
2	Part	<u>SFU_1204 NUT</u>			
2	Part	<u>SFU_1204 HOUSING</u>			
2	Part	<u>BK10</u>			
1	Part	<u>SUP BALL SCREW 1204 L</u>			
1	Part	<u>MOTOR_SUPP_2</u>			
22	Part	<u>ISO7380-1-M6X12-8_8</u>			
22	Part	<u>DINENISO7090-6</u>			
16	Part	<u>ISO7380-1-M4X12-8_8</u>			
50	Part	<u>DINENISO7092-4</u>			
4	Part	<u>ISO7380-1-M6X18-8_8</u>			
5	Part	<u>ISO7380-1-M6X25-8_8</u>			
16	Part	<u>ISO4032-M6-6</u>			
3	Part	<u>ISO7380-1-M6X20-8_8</u>			
6	Part	<u>ISO4762-M4X14-8_8</u>			
4	Part	<u>ISO4762-M6X60-8_8</u>			
10	Part	<u>ISO7380-1-M5X18-8_8</u>			
8	Part	<u>DINENISO7090-5</u>			
39	Part	<u>ISO4032-M5-6</u>			
14	Part	<u>ISO7380-1-M5X14-8_8</u>			
59	Part	<u>DINENISO7092-5</u>			
10	Part	<u>ISO4762-M5X25-8_8</u>			

6	Part	<u>ISO4762-M5X35-8 8</u>		
1	Part	<u>MOTOR_SUPPORT_R</u>		
1	Part	<u>MOROR_SUPPORT_L</u>		
1	Part	<u>SPOJOVACI_DESKA_NA_PORTALU</u>		
1	Part	<u>SFU_1204_SCREW_500</u>		
2	Part	<u>LINEARNI_VEDENI_500MM</u>		
2	Part	<u>KRIZ_SPOJ_Z</u>		
1	Part	<u>KRIZ_SPOJ_SROUB_Z</u>		
1	Part	<u>SPOJ_LIN_VEDENI_OSY_Z</u>		
1	Part	<u>DRZAK_VRETENA</u>		
1	Part	<u>OSA_Z_HORNI</u>		
1	Part	<u>DESKA_MOTORU_Z</u>		
1	Part	<u>MOROT_PODLOZKA_Z</u>		
2	Part	<u>MOTOR_OSA_Z_90</u>		
4	Part	<u>MOTOR_DIST_SPOUPEK_Z</u>		
34	Part	<u>ISO7380-1-M4X14-8 8</u>		
4	Part	<u>ISO10642-M4X12-8 8</u>		
6	Part	<u>ISO4762-M4X16-8 8</u>		
4	Part	<u>ISO4762-M5X30-8 8</u>		
2	Part	<u>ISO7380-1-M5X10-8 8</u>		
2	Part	<u>ISO7380-1-M5X40-8 8</u>		
4	Part	<u>ISO4762-M6X45-8 8</u>		
6	Part	<u>ISO7380-1-M5X22-8 8</u>		
2	Part	<u>ISO4762-M5X45-8 8</u>		
3	Part	<u>ISO7380-1-M5X20-8 8</u>		
1	Part	<u>MAKITA</u>		
8	Part	<u>ISO4762-M5X28-8 8</u>		
4	Part	<u>ISO4762-M6X35-8 8</u>		
2	Part	<u>ISO4762-M6X20-8 8</u>		
8	Part	<u>ISO4762-M6X40-8 8</u>		

## Příloha D

# TECHNICKÝ LIST ZAŘÍZENÍ



### Vlastnosti zařízení:

- Rámcové rozměry stroje:  $1710 \times 1150 \times 1200 \text{ mm}$ ,
- rozměry pracovního prostoru:  $750 \times 830 \times 400 \text{ mm}$ ,
- rychlosti posuvu:  $\max 1000 \text{ mm/min}$  pro zachování kroutícího momentu  $1,4 \text{ Nm}$ ,
- výkon vřetene (frézky):  $710 \text{ W}$ ,
- maximální otáčky vřeten:  $30\,000 \text{ ot./min}$ ,
- rám stroje je tvořený Al profily 3030,
- technický list je nahraný na portál GitHub.com a je průběžně aktualizován s dalšími prvky stroje (viz odkaz: <https://github.com/Filips311/CNC-frezka>)
- investiční náklady: cca 25 000Kč