



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

## NÁVRH HOBBY CNC FRÉZKY

HOBBY CNC MILLING MACHINE DESIGN

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Buš

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Martin Buš</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	<b>Ing. Tomáš Marada, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Návrh hobby CNC frézky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat návrhem malé modelářské CNC frézky vhodné pro obrábění dřeva, plastu a lehkých slitin (Al, Zn, atd.). Rozměrové a výkonnostní charakteristiky budou součástí řešerše a návrhu stroje.

### Cíle diplomové práce:

Rešerše v oblasti hobby CNC frézek.

Rozbor řešené problematiky.

Návrh variant konstrukčního řešení včetně zdůvodnění výběru konkrétního řešení a stanovení jeho technických parametrů.

Konstrukční návrh stroje v 3D modelu.

Výpočtová zpráva.

Výkresová dokumentace, kusovník a min. 5 výkresů vyráběných dílů.

Komentář k přiložené výkresové dokumentaci.

Závěry a doporučení pro praxi.

### Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

BORSKÝ, Václav. Obráběcí stroje. Brno: VUT, 1992. ISBN 80-214-0470-1.

BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá konstrukčním řešením CNC hobby frézky. V úvodu diplomové práce jsou uvedeny základní informace o CNC frézkách spolu s různými typy frézek dostupnými na trhu. Následně je proveden výběr vhodných součástí stroje pro zvolené parametry. Dále práce zahrnuje výpočtové řešení součástí jednotlivých pracovních os stroje a konstrukční popis CNC frézky.

## **ABSTRACT**

This master thesis is focused on design of CNC hobby milling machine. In the first part of master thesis there are brief information about construction of CNC milling machines with various types of milling machines available on market. After that, is made a selection of suitable machine components for selected parameters. Furthermore, the master's thesis includes solutions of the components on all axes of CNC milling machines.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

CNC frézka, konstrukce stroje, pohybový mechanismus, lineární vedení, frézování

## **KEYWORDS**

CNC milling machine, machine design, movement mechanism, linear guideways, milling



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BUŠ, M. Návrh hobby CNC frézky, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2020, 75 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.



## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Maradovi, Ph.D, za odborné vedení, cenné rady, ochotu a trpělivost při vedení diplomové práce. Dále také rodině za trpělivost při celém studiu.





## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Marady, Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25.6.2020

.....

Buš Martin



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>CNC FRÉZKY</b>	<b>17</b>
2.1	Rozdělení a konstrukce CNC frézek	17
2.1.1	Konzolové frézky	17
2.1.2	Stolové frézky	18
2.1.3	Rovinné frézky	18
2.2	CNC Frézky dostupné na trhu	19
2.2.1	Kompas F600	19
2.2.2	Numco SHG 0404	20
2.2.3	HIGH-Z S-720/T	21
2.2.4	Stepcraft Q204	22
2.2.5	isel ICP 4030	23
2.2.6	Porovnání vybraných CNC frézek	24
<b>3</b>	<b>VOLBA TECHNICKÝCH PARAMETRŮ</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>NÁVRH KONSTRUKČNÍCH VARIANT</b>	<b>29</b>
4.1	Volba konstrukce frézky	29
4.1.1	Varianta 1: Stolová frézka	29
4.1.2	Varianta 2: Portálová frézka s posuvným stolem	29
4.1.3	Varianta 3: Portálová frézka s pevným stolem	29
4.1.4	Hodnocení návrhů	29
4.2	Přímočará vedení os frézky	30
4.2.1	Kluzná vedení	30
4.2.2	Valivá vedení	31
4.2.3	Hodnocení návrhů	31
4.3	Pohybové mechanismy os frézky	31
4.3.1	Kuličkový šroub s maticí	31
4.3.2	Pastorek s hřebenem	32
4.3.3	Šnek s hřebenem	32
4.3.4	Přímý posuv	32
4.3.5	Hodnocení návrhů	33
4.4	Pohon pracovních os frézky	33
4.4.1	Servopohony stejnosměrné	33
4.4.2	Krokové motory	33
4.4.3	Volba pohonu pracovních os stroje	34
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>35</b>
5.1	Návrh osy Z	35
5.1.1	Návrh vřetene	35
5.1.2	Volba vřetene	36
5.1.3	Posuvný mechanismus na ose Z	37
5.1.4	Motor osy Z	39
5.1.5	Lineární vedení osy Z	42
5.2	Návrh osy Y	43
5.2.1	Posuvový mechanismus osa Y	43
5.2.2	Motor osy Y	45
5.2.3	Lineární vedení osy Y	48

5.3	Návrh osy X.....	50
5.3.1	Posuvový mechanismus osa X.....	50
5.3.2	Pohon osy X.....	52
5.3.3	Lineární vedení osy X.....	54
<b>6</b>	<b>KONSTRUKCE FRÉZKY.....</b>	<b>57</b>
6.1	Základová deska.....	57
6.2	Sloupy.....	58
6.3	Příčník.....	59
6.4	Vřeteník.....	59
6.5	Lineární vedení.....	60
6.6	Kuličkové šrouby a pohony.....	61
6.7	Výsledné parametry stroje.....	63
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>69</b>
9.1	Seznam zkratk.....	69
9.2	Seznam symbolů.....	69
9.3	Seznam tabulek.....	71
9.4	Seznam obrázků.....	72
<b>10</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>75</b>

# 1 ÚVOD

CNC frézky jsou určeny k třískovému obrábění, konkrétně většinou frézování. Pro frézování se využívá nástroj fréza. Fréza vůči obrobku koná rotační pohyb. Pracovní pohyb může vykonávat stůl nebo nástroj frézky, záleží na typu použité konstrukce.

Malé CNC hobby frézky se vyskytují na trhu v různých provedeních. Díky celosvětovému trhu je dostupnost strojů na dobré úrovni. Trh nabízí varianty od levných řešení, které se spíše hodí pro lehké obrábění, až po kvalitní stroje určené pro profesionální využití.

Pro obrábění hliníku případně oceli je potřeba volit frézky s dostatečnými parametry stroje pro splnění požadavků zákazníka. Kvalitně provedená konstrukce je základem správného frézovacího stroje, který musí splňovat předepsané požadavky.

Obsah práce se bude zabývat úvodem do problematiky CNC frézek a dostupných variant frézek na trhu. Zmíněný přehled by měl posloužit při volbě parametrů stroje a představě o různých provedeních strojů.

V následující kapitole budou rozebrány konstrukční varianty stroje. Zaměření bude na celkový typ konstrukce frézky a použitých komponent v CNC frézkách. Jedná se o pohybové mechanismy, pohony a vedení os stroje. Varianty budou vyhodnoceny a následně zvolena vhodná varianta pro každou část stroje. Toto řešení se využije v další části práce.

Po volbě konstrukčních variant bude provedeno výpočtové zhodnocení zvolených komponent pro každou osu stroje. Z výsledků bude rozhodnuta vhodnost prvku a následně zpracování.

Následně bude v práci provedena realizace CNC hobby frézky formou 3D modelu s využitím předešlých informací a využití zvolených komponent stroje. V závěru práce budou zhodnoceny konečné parametry stroje.



## 2 CNC FRÉZKY

CNC frézky patří k velmi rozšířeným obráběcím strojům. Frézky slouží nejčastěji k obrábění rovinných ploch, závitů, zubů ozubených kol, drážek a tvarových ploch. Na frézkách lze pracovat protisměrným nebo souměrným frézováním, rozdělení podle hlavních pohybů, případně vykonávat další technologické operace např. vrtání. U frézování koná hlavní rotační pohyb nástroj, posuvné pohyby vykonává většinou obrobek případně u pevných stolů nástroj. [1, 2]

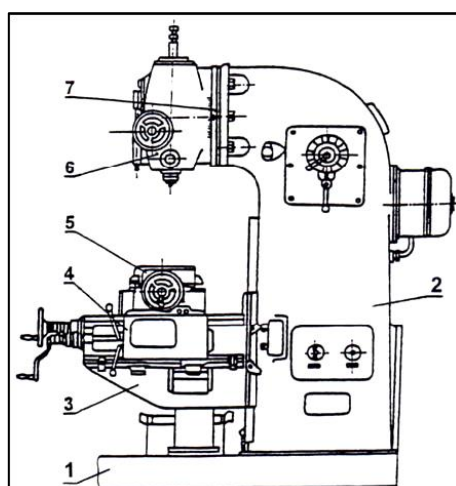
CNC hobby frézky jsou počítačem řízené stroje, které mohou být dodávány jako stavebnice nebo v sestaveném provedení. Vyznačují se univerzálností, tuhou konstrukcí a požadovanou přesností obrábění. Uplatnění nachází v malých podnicích, výrobě malých prototypů, domácích dílnách nebo ve školách. Frézky jsou velmi rozšířeny v domácích dílnách, kde splňují prostorové požadavky, jednoduchost sestavení a dobré vlastnosti frézování podle použité konstrukce frézky. V nabídce se nachází celá řada typů frézek od levnějších až po profesionální stroje. Tyto frézky se většinou uplatňují pro obrábění dřeva, hliníku a plastů. [6]

### 2.1 Rozdělení a konstrukce CNC frézek

Frézovací stroje dělíme podle konstrukční koncepce a druhu frézovacích operací na frézky konzolové, stolové, portálové (rovinné) a speciální. [2]

#### 2.1.1 Konzolové frézky

Konzolové frézky se využívají pro obrábění malých a středně velkých obrobků. Tyto frézky jsou charakteristické nastavitelnou konzolou v ose Z. Na konzole se nachází příčné saně s podélným stolem. Konstrukci stroje můžeme vidět na Obr.1. Podle polohy vřetene se dělí konzolové frézky na vodorovné, svislé, univerzální a s výsuvným vřeteníkem, které se dále dělí na vodorovné, svislé a s otočnou hlavou. [1,3, 7]



Obrázek 1: Konzolová frézka (1 – základny, 2-stojan, 3-konzola, 4-příčný stůl, 5-podélný stůl, 6- vřeteník, 7- základna vřeteníku) [7]

Konzolové frézky vodorovné obsahují vodorovnou osu pracovního vřetene rovnoběžnou s plochou stolu a kolmou na pohyb stolu. Využití nachází v obrábění ploch



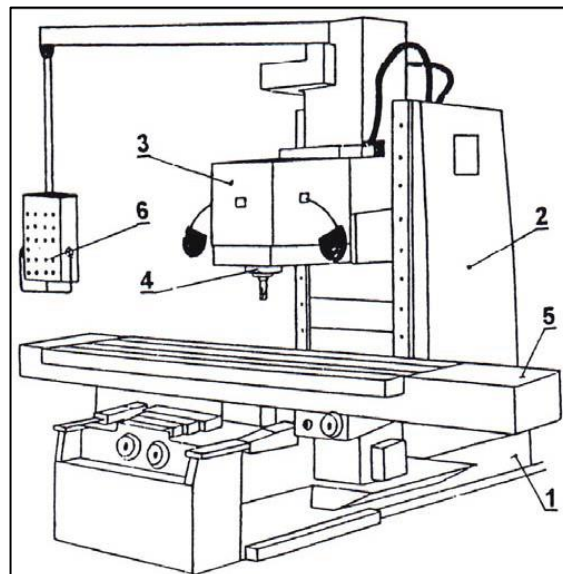
rovnoběžných s upínacím stolem. Pro obrábění se většinou používají válcové, kotoučové a tvarové frézy s podepřeným frézovacím trnem. [1,3, 7]

Konzolové frézky svislé obsahují osu vřetene kolmou na plochu upínacího stolu. Vřeteno je umístěno v otočné nebo pevné svislé hlavě uchyceno na stojanu. Při využití otočné hlavy můžeme s vřetenem obrábět svislou i vodorovnou stranu obrobku v jednom pracovním cyklu. [1,3, 7]

Univerzální konzolové frézky obsahují výhody vodorovných a svislých frézek. Obsahují možnost natočení pracovního stolu o 45°, výsuvné rameno pro upínání trnu s válcovou frézou a také možnost upnutí čelních fréz a frézovacích hlav. Tyto frézky nachází uplatnění při frézování šroubovic a zubových mezer. [1,3, 7]

### 2.1.2 Stolové frézky

Stolové frézky nachází uplatnění při frézování větších a těžších obrobků než konzolové frézky. V některých využitích nahradili konzolové frézky. Konstrukce stolové frézky je podobná vyvrtávacím strojům, obsahuje vřeteník, který koná pohyb v ose Z. Pohyb v ose X a Y je většinou zajištěn pomocí křížového stolu, který není výškově nastavitelný. Případně s pohyblivým stojanem v ose Y. Stolové frézky můžeme rozdělit na vodorovné, svislé, s revolverovou hlavou, s výsuvným vřeteníkem a posuvným stojanem. [1,2, 3, 7]



Obrázek 2: Stolová frézka

(1-základní deska, 2-stojan, 3-vřeteník, 4-vřeteno, 5-pracovní stůl, 6-ovládací panel) [7]

### 2.1.3 Rovinné frézky

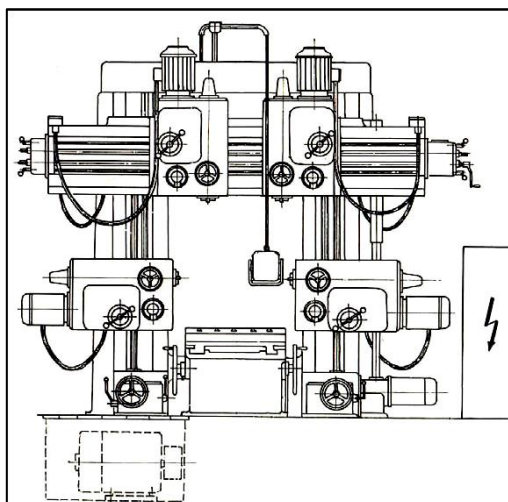
Rovinné frézky slouží k obrábění vodorovných a tvarových ploch. Frézky se skládají z lože, na kterém je uložen stůl, který koná podélný pracovní posuv. Rovinné frézky dělíme na vodorovné, s výložníkem a portálové. [1, 2, 3, 7]

Vodorovné rovinné frézky nachází uplatnění při frézování svislých ploch, kolmých k ploše stolu. Výložník koná pohyb v ose Z na pevném stojanu upevněném na loži stroje. Stůl vykonává pohyb v ose X a Y. Pro zvýšení tuhosti může být stojan s vřeteníkem spojen horním příčnickem k druhému stojanu. [1,3, 7]

Frézky s výložníkem obsahují oproti vodorovné frézce svislý vřeteník, který může být doplněn vodorovným vřeteníkem. U těchto frézek koná stůl pohyb v ose X, v ose Y se

pohybuje svislý vřeteník na výložníku, který je podepřen na konci posuvné dráhy. Podepření se provádí pro zvýšení tuhosti výložníku. [1,3, 7]

Portálové frézky se skládají ze dvou sloupů, spojenými příčnickem. Na sloupech a příčnicku se může nacházet více frézovacích hlav. Podle konstrukce portálové frézky vykonává v ose X pohyb stůl nebo celý portál. Pohyb na ose Y je zajištěn na portálu frézky. Při použití pouze svislého vřeteníku umístěného na portálu koná pohyb v ose Z vřeteník. [1,3, 7]



Obrázek 3: Portálová frézka

## 2.2 CNC Frézky dostupné na trhu

V této kapitole budou představeny komerční CNC frézky dostupné na trhu. Výběr frézek probíhal s ohledem na cenu a velikost frézky, kdy pro hobby účely se většinou využívají stroje menších rozměrů.

### 2.2.1 Kompas F600

Výrobce CNC portálové frézky je firma CauCau s.r.o. Firma se zabývá výrobou CNC strojů více jak 25 let. Ve výrobním portfoliu firmy nalezneme hobby CNC frézky, profesionální frézky, plazmové CNC, soustruhy CNC a manuální stroje.

Kompas F600 (viz. Obr. 4) se vyznačuje pevnou konstrukcí, která je vhodná na obrábění kovů, jako je hliník, mosaz, měď, dále také na dřevo a plast. Na stroji je možné také gravírovat, značit a vyřezávat. Stroj obsahuje HGR vedení a kuličkové šrouby pro lineární posuv. Stroj obsahuje vřeteno o výkonu 2200 W s kleštinou ER20, koncové snímače a snímač délky nástroje. Přesné parametry stroje jsou nastíněny v Tab. 1. [8]



Obrázek 4: Kompas F600 [8]

Tab 1) Tabulka technických parametrů stroje [8]

Parametry	Technické údaje
Pracovní plocha	400 x 600 x 150 mm
Maximální rychlost posuvu	2400 mm/min
Přesnost	0,03 mm
Otáčky vřetena / Výkon	Max. 24000 ot./min / 2,2 kW
Vedení X/Y/Z	Prizmatické HGR 20
Přenos síly X/Y/Z	Kuličkové šrouby
Pohon pracovních os	Krokové motory Nema34 5,1 Nm
Materiál konstrukce	Dural
Celkové rozměry	1000 x 1200 x 800 mm
Hmotnost	110 kg
Cena	3590 €

### 2.2.2 Numco SHG 0404

CNC portálový frézka Numco SHG 0404 (viz. Obr. 5) vyrábí firma První hanácká BOW. Firma byla založena v roce 1993 v Olomouci, zabývá se především výrobou obráběcích strojů.

Řada Numco SHG je určena pro obrábění neželezných kovů, plastů a dřeva. Uplatnění nalezne při různých aplikacích forem, elektrod nebo v nábytkářském průmyslu. Pohon os je zajištěn pomocí 2f krokových motorů. Na všech osách se nachází kuličkové šrouby. Osa Y je osazena kvalitním lineárním vedením HIWIN. Osa X a Y je osazena kluznými tyčemi. Frézování je zajištěno pomocí vysokootáčkového vřetene s výkonem 1,5 kW s kleštinou ER16. Rám, bočnice a portál jsou tvořeny hliníkovými odlitky, které zajišťují vysokou tuhost a stabilitu celého stroje. Podrobnější technické specifikace jsou znázorněny v Tab. 2. [9]



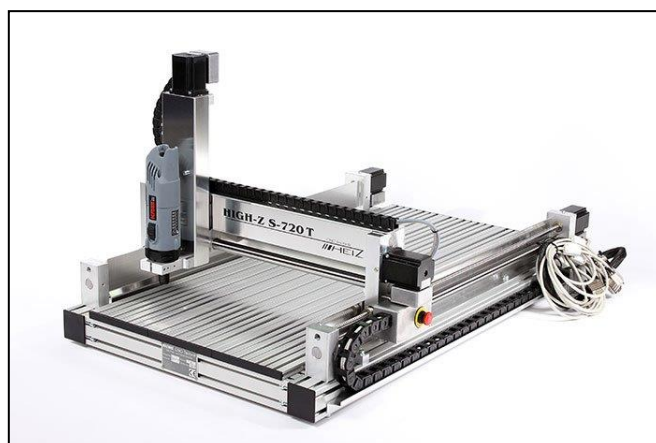
Obrázek 5: Numco SHG 0404 [9]

Tab 2) Tabulka technických parametrů [9]

Parametry	Technické údaje
Pracovní plocha	400 x 400 x 100 mm
Maximální rychlost posuvu	9000 mm/min
Opakovatelná přesnost	0,02 mm
Otáčky vřetena / Výkon	Max. 24000 ot/min / 1,5 kW
Vedení X/Y/Z	Lineární vedení HIWIN
Přenos síly X/Y/Z	Kuličkové šrouby
Pohon pracovních os	2f krokové motory
Materiál konstrukce	Hliníkový odlitek
Celkové rozměry	910 x 800 x 880 mm
Hmotnost	80 kg
Cena	266 000 Kč

### 2.2.3 HIGH-Z S-720/T

CNC portálová S-720 T (viz. Obr. 6) frézka od německého výrobce CNC-STEP. Tato frézka najde využití ve všech dílnách při obrábění lehkých slitin, dřeva a plastů. S váhou pouhých 41 kg a rozměry 1116x960x570 mm se jedná o velmi flexibilní frézku. Výrobce garantuje přesnost opakování 0,02 mm, která by měla být dostatečná pro každého kutila při obrábění dřeva. Vřeteno dosahuje rychlosti až 12000 ot·min<sup>-1</sup>. Pracovní prostor má rozměry 720x420x110 mm. Pohon os zajišťují krokové motory Nanotec, které pohání kuličkové šrouby o průměru 12 mm na jednotlivých osách. Přehledný výpis technických specifikací viz. Tab. 3. [10]



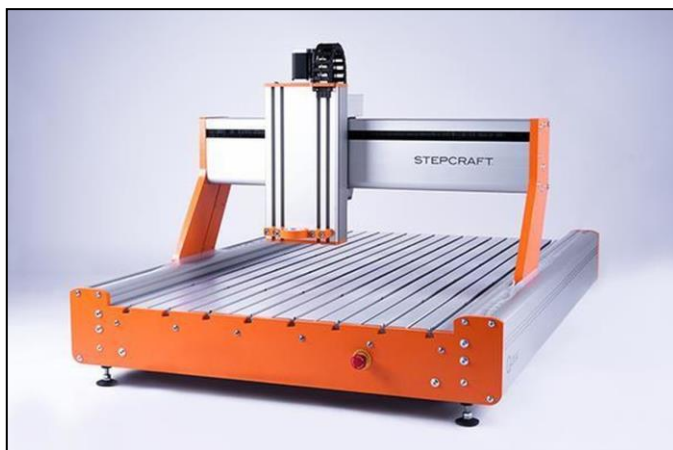
Obrázek 6: HIGH-Z S 720/T [10]

Tab 3) Tabulka technických specifikací [10]

Parametry	Technické údaje
Pracovní plocha	720 x 420 x 110 mm
Maximální rychlost posuvu	12000 mm/min
Opakovatelná přesnost	0,02 mm
Otáčky vřetene / výkon	Max. 5000-25000 ot/min / 1 kW
Vedení X/Y/Z	Lineární vodící tyče 22 mm
Přenos síly X/Y/Z	Kuličkové šrouby 12x10 mm
Pohon pracovních os	krokové motory Nanotec ST5918
Materiál konstrukce	Hliník
Celkové rozměry	1116 x 960 x 570 mm
Hmotnost	41 kg
Cena	3925 €

#### 2.2.4 Stepcraft Q204

Portálová CNC frézka Stepcraft Q204 (viz. Obr. 7) od zahraničního výrobce Stepcraft. Tato frézka vyniká svým jedinečným designem. Konstrukce frézky se skládá z hliníkových a ocelových prvků. Ocelové prvky zajišťují dostatečnou tuhost CNC frézky. Stůl frézky je vyroben z hliníku s použitými T drážkami pro uchycení obrobků. Horní příčnick je upevněn na ocelových komponentech, které jsou uchyceny na lineárních vedeních. Všechny osy obsahují pohybový mechanismus skládající se z kuličkového šroubu s maticí a krokových motorů. Podrobnější technické specifikace jsou znázorněny v Tab. 4. [11]



Obrázek 7: Stepcraft Q204 [11]

Tab 4) Tabulka technických parametrů [11]

Parametry	Technické údaje
Pracovní plocha	623 x 1223 x 145 mm
Maximální rychlost posuvu	14000 mm/min
Opakovatelná přesnost	0,015 mm
Otáčky vřetene / Výkon	Max. 24000 ot/min (HFS-2200-A) / 2 kW
Vedení X/Y/Z	Stepcraft Steel Motion
Přenos síly X/Y/Z	Kuličkové šrouby 16x10 mm
Pohon pracovních os	krokové motory Nemá 24
Materiál konstrukce	Hliník / ocel
Celkové rozměry	996 x 1501 x 870 mm
Hmotnost	145 kg
Cena	7689 €

### 2.2.5 isel ICP 4030

Portálová CNC frézka ICP 4030 (viz. Obr. 8) od německého výrobce isel Germany AG. Firma se zabývá výrobou mechanických částí, elektrických komponent, softwaru a CNC strojů, ke kterým poskytuje velkou škálu příslušenství.

Série ICP vychází z ověřené CPM série. CNC fréza je celo krytovaná s výsuvnými dveřmi. Rám stroje je oproti minulým sériím sešroubován oproti původně svařovaným konstrukcím. Sešroubovaná konstrukce zaručí snadnější seřizovatelnost a lehčí stavbu stroje. Podrobnější technická specifikace viz. Tab. 5. [12]



Obrázek 8: isel ICP 4030 [12]

Tab 5) Tabulka technických vlastností [12]

Parametry	Technické údaje
Pracovní plocha	400x 300 x 140 mm
Maximální rychlost posuvu	6000 mm/min
Přesnost opakování	0,02 mm
Otáčky vřetene / Výkon	Max. 24000 ot/min (iSA 750 W) / 750 W
Vedení X/Y/Z	Lineární vedení HIWIN
Posuvový mechanismus X/Y/Z	Kuličkové šrouby (16x10 mm)
Pohon pracovních os	Krokové motory
Materiál konstrukce	Hliník / ocel
Celkové rozměry	769 x 836 x 901 mm
Hmotnost	150 kg
Cena	-

### 2.2.6 Porovnání vybraných CNC frézek

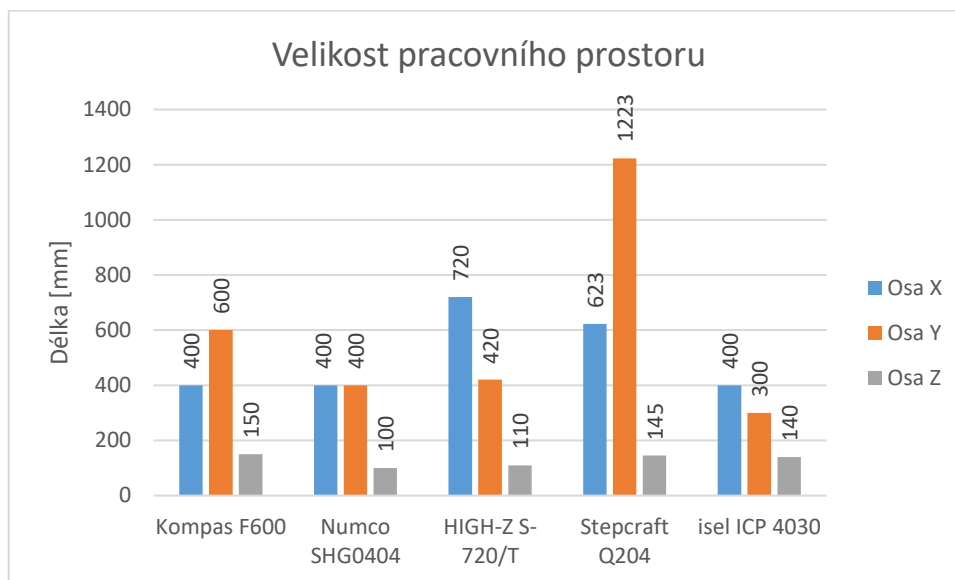
V přehledu komerčně dostupných CNC hobby frézek využitelných pro využití v běžných podmínkách bylo zobrazeno pět CNC frézek. Ke každé frézce je vytvořena tabulka technických vlastností se stručným popis každého stroje. Při volbě se kladl důraz na splnění požadavků obrábění hliníku, kde každý výrobce uvádí schopnost obrábět hliník, dřevo plast.

Frézky se vyznačují rozdílnou skladbou konstrukce a v použitých materiálech. V přehledu jsou zobrazeny portálové frézky s posuvným portálem, pouze jedna frézka je s pevným portálem a posuvným stolem. Frézka ICP4030 obsahuje také bezpečnostní krytování. Většina frézek je zkonstruována z hliníku, případně u dražších variant s použitím ocelových prvků ve stroji. Využití oceli zvyšuje tuhost celé konstrukce. Jeden stroj je vyroben z duralu, jedná se konkrétně o typ Kompas F600.

Vedení na jednotlivých osách je využito u frézky od firmy Stepcraft pomocí vlastního patentové systému. Ostatní frézky zvolily lineární vodící tyče nebo lineární vedení s

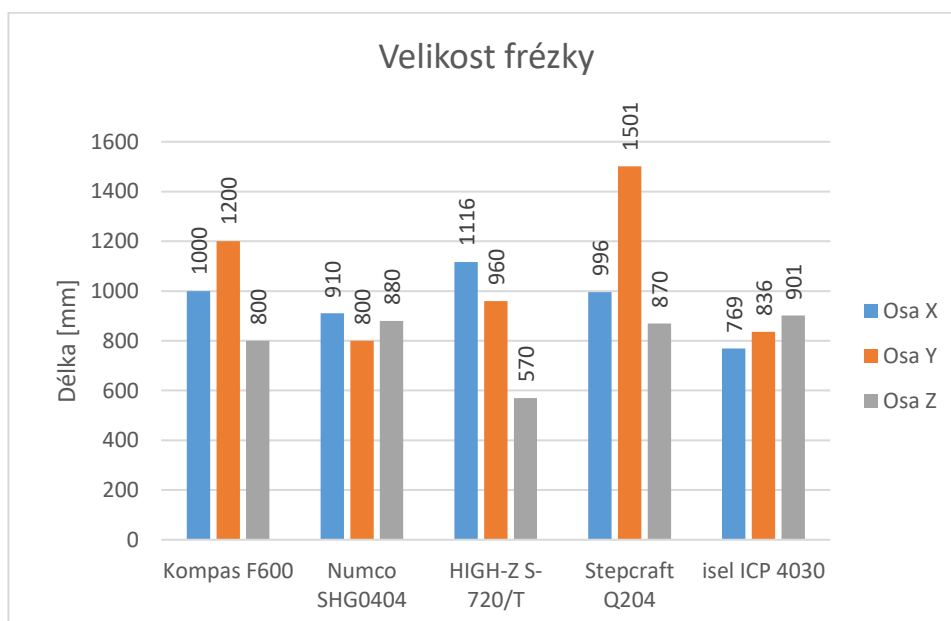
kolejnicemi od společnosti HIWIN. Všechny typy frézek obsahují posuvový mechanismus složený z kuličkového šroubu a krokového motoru.

Pracovní prostory se u jednotlivých typů liší podle uspořádání konstrukce a celkové velikosti strojů. Na Obr.9 jsou zobrazeny délkové rozměry pracovního prostoru. Velikost pracovního prostoru v ose Z se nachází v rozmezí 100–150 mm. Pracovní prostor v ose X a Y je daleko rozmanitější a jsou zde hodnoty 300 mm až po 1223 mm. Největší pracovní prostor dosahuje u CNC frézky Stepcraft Q204.



Obrázek 9: Porovnání pracovní plochy

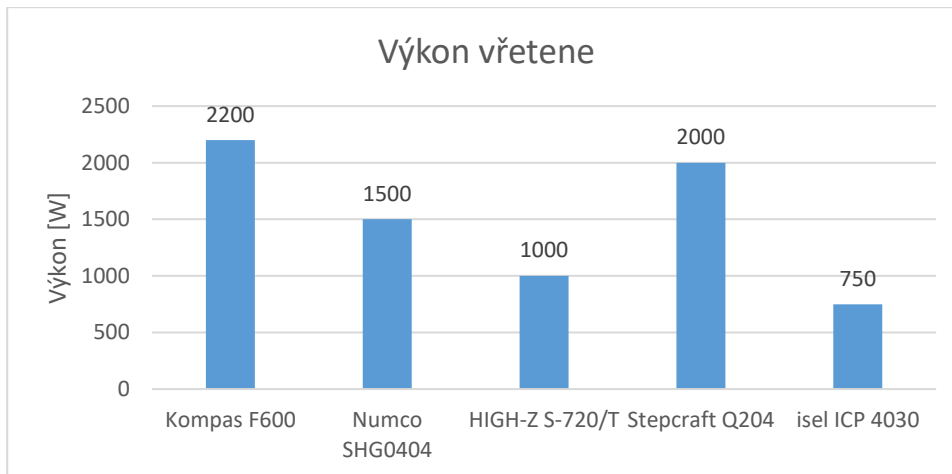
Celkové rozměry stroje se odvíjí od velikosti pracovní plochy. Obr.10 zobrazuje celkovou zástavbovou velikost strojů. Celková velikost je při využití CNC frézek jako hobby velmi důležitá. Stroje se většinou využívají v dílnách, kde je kladen důraz na rozměry a celkovou efektivitu zastavěného prostoru. Z výsledků jde pozorovat rozdílná využitelnost prostoru u každého výrobce. Nejlepší využitelnosti zastavěného místa v ose Z dosahuje frézka High-Z S-720, která bude výškově zabírat pouze cca. 570 mm.



Obrázek 10: Porovnání velikosti frézek

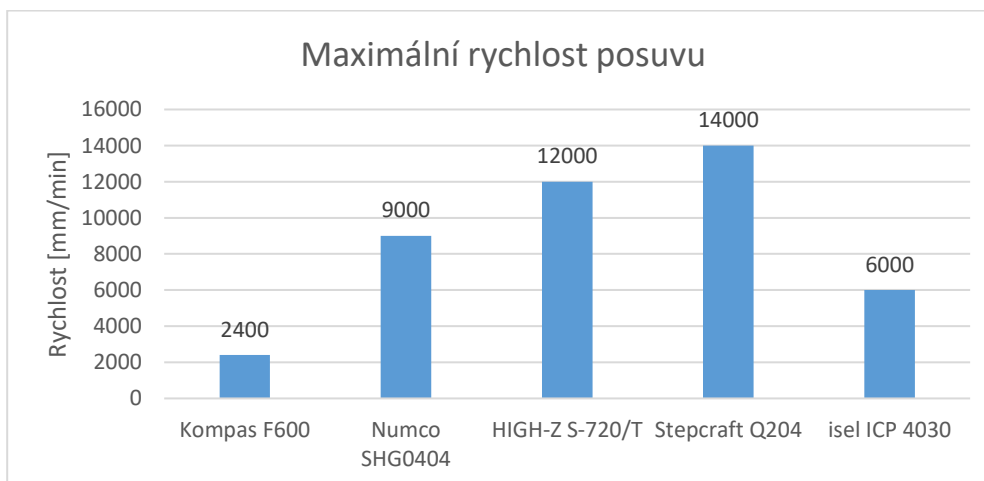


Dalším důležitým faktorem při výběru frézky je výkon vřetene. Výkon vřetene bude ovlivňovat parametry frézování. Pro plně využitelné možnosti vřetene bude potřeba kvalitně zpracovaný rám, který se dokáže vypořádat s větším zatížením při obrábění při dodržení zadaných parametrů přesnosti. Obr. 11 znázorňuje použité výkony vřeten v nastíněných strojích. Největšího výkonu dosahuje vřeteno u frézky Kompas F600 s výkonem 2,2 kW, následované vřetenem 2 kW u stroje Stepcraft Q204.



Obrázek 11: Porovnání výkonu vřeten

Jako poslední hodnotící prvek bude zmíněna maximální rychlost posuvu pracovních os strojů. Od rychlosti posuvu se odvíjí dimenzování pohybových mechanismů stroje a pohonů. U strojů je rozptyl rychlosti veliký. Maximální rychlost vychází z údajů od výrobců strojů. Porovnání je zobrazeno na Obr. 12., kde nejmenší hodnotou je 2400 mm/min. Nejvyšší maximální rychlost posuvu Dosahuje frézka Stepcraft Q204.



Obrázek 12: Porovnání max. posuvů os

Poznatky z celkové porovnání strojů budou využity při volbě parametrů navrhovaného stroje. Z porovnání strojů vyšel velmi dobře stroj Stepcraft Q 204, který vyniká v rychlosti posuvu, velikostí pracovního prostoru a výkonným vřetenem.

### 3 VOLBA TECHNICKÝCH PARAMETRŮ

Na základě rešerše a porovnání komerčně dostupných CNC hobby frézek od různých výrobců, která byla provedena v minulé kapitole, bude vycházeno, při volbě parametrů navrhovaného stroje. Tyto parametry budou využity v dalším postupu návrhu frézky.

Technické parametry budou voleny pro 3-osou frézku, která by měla sloužit k frézování kusových dílů ve standartních podmínkách. Pro frézování by se měly využít frézy do průměru 8 mm. Zvolené parametry budou vycházet z poznatků při porovnání komerčně dostupných strojů.

Při konstrukci frézky bude jako hlavní parametr konstrukce její tuhost. Pro konstrukci bude využita ocel, která se běžně využívá při konstrukci strojů. Rozsah pojezdů bude vycházet z využití lineárních vedení, které se použijí ze skladu fakulty. Frézovací vřeteno bude také využito ze skladu fakulty.

Rychlost maximálních posuvů při kusové výrobě není rozhodujícím faktorem, Při volbě bude brána konkurence schopnost vůči komerčním frézám. Všechny navrhované parametry jsou zobrazeny v Tab.6. Pro stavbu frézky budeme vycházet z hodnot velikostí lineárních vedení, které jsou dostupné na fakultě a měly by se v práci využít.

Tab 6) Základní parametry pro návrh frézky

Parametr	Hodnota	
Velikost lineárních vedení	Osa X	640 [mm]
	Osa Y	540 [mm]
	Osa Z	380 [mm]
Rychloposuv	Osa X	15 [m·min <sup>-1</sup> ]
	Osa Y	15 [m·min <sup>-1</sup> ]
	Osa Z	15 [m·min <sup>-1</sup> ]
Průměr nástroje	8 [mm]	
Přesnost	0,05 [mm]	
Elektrické připojení	230 [V]	
Obráběný materiál	Hliník, plast, dřevo	



## 4 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH VARIANT

V této kapitole budou rozebrány jednotlivé návrhové varianty řešení konstrukce stroje a komponent frézek. Jednotlivé varianty konstrukce budou porovnány a vyhodnoceny pomocí bodové multikriteriální analýzy. Rozhodovací kritéria budou seřazena od největší důležitosti s přiřazenou vahou. Následně bude provedeno seřazení návrhových variant ( $n$ ) od nejlepší (přidělena hodnota  $n$ ) po nejhorší (přidělena hodnota 1). Součtem výsledných hodnot u každé varianty získáme pořadí vhodnosti variant pro řešení CNC frézky. [13]

### 4.1 Volba konstrukce frézky

Pro analýzu budou zvoleny tři konstrukce frézek, které se nejčastěji využívají při stavbě CNC hobby frézek. Pro volbu variant konstrukce jsem vycházel z přehledu současného trhu, rešeršní části práce a z CNC fóra, kde jsou řešeny stavby CNC hobby frézek.

#### 4.1.1 Varianta 1: Stolová frézka

Varianta 1 je stolová frézka se svislým vřeteníkem. Konstrukce se skládá ze základní desky, na které je umístěn pohyblivý křížový stůl v osách X a Y. K základní desce frézky je upevněn pevný stojan, na kterém se nachází svislý vřeteník. Vřeteník koná pohyb v ose Z. Základní schéma viz. Obr. 13.

#### 4.1.2 Varianta 2: Portálová frézka s posuvným stolem

Varianta 2 je portálová frézka s pevným příčnickem a posuvným stolem. Konstrukce se skládá ze základní desky, na které jsou upevněny dva sloupy. Na desce se také nachází pohyblivý stůl v ose X. Sloupy jsou spojeny portálem, na kterém se nachází vedení osy Y. Portál je opatřen vřeteníkem pohyblivým v ose Y a Z.

#### 4.1.3 Varianta 3: Portálová frézka s pevným stolem

Varianta 3 je portálová frézka s pevným stolem a posuvným příčnickem. Konstrukce se skládá ze základní desky, na které je pevně uchycen pracovní stůl, který nekoná pohyb. V ose X se pohybuje celý portál, který je spojen se základní deskou pomocí lineárního vedení. Na portálu se nachází vřeteník, který koná pohyb v ose Y a Z.

#### 4.1.4 Hodnocení návrhů

Výsledky hodnocení jsou zobrazeny v tab. 7, která je uvedena níže. Kritéria pro hodnocení byly seřazena podle váhy kritéria:

- Tuhost konstrukce – z variant vyplývá jako nejlepší varianta 1, pokud bude správně konstruována, následuje varianta 2 a poté varianta 3.
- Poměr velikosti stroje k pracovní ploše – z variant nejhůře dopadá varianta 1, jelikož pro větší obrobky musí být vřetení více vyloženo a zlepšena celková tuhost stroje. Varianty 3 se jeví jako nejlepší varianta díky pohyblivému příčnicku.
- Přibližná cena stroje – jako nejvíce nákladná se jeví varianta 3, kde musíme počítat pro osu X dva kuličkové šrouby a pohony spolu s řešením stability. Následuje varianta 1, kde se předpokládá drahá konstrukce stroje. Jako nejlevnější se jeví varianta 2.
- Ergonomie a dostupnost obrobku – pro toto kritérium by měla nejlépe vyjít varianta 1 následovaná variantou 2 a 3, které mají stejnou velikost

- Sestavení stroje, složitost uvedení do provozu – sestavení stroje spolu s uvedením do provozu by mělo být nejobtížnější u varianty 3, kde se musí synchronizovat pohon pohyblivého příčnicku. Nejlépe pro sestavení vychází varianta 2.
- Zástavbový prostor – nejlépe vychází varianta 3, která nemá pohyblivý stůl. Následuje varianta 2, která obsahuje pohyblivý stůl v jedné ose. Nejhůře je hodnocena varianta 1, kde se nachází křížový stůl a velký stojan pro tuhé provedení stroje.
- Přesnost obrábění – nejvyšší přesnosti by měla dosahovat varianta 2, kde koná vřeteník pohyb pouze v ose Y a nemusí být vyložen od osy oproti variantě 1 kde pro větší obrobky musí být vřeteník vyložen od těžiště. Nejhůře vychází varianta 3, kde vřeteník koná pohyb ve dvou osách
- Předpokládaná váha stroje – při předpokladu velikosti zástavbového prostoru a použití stejných materiálů vychází nejlépe varianta 3 a nejhůře varianta 1.
- Odvod kapalin a třísek – pro odvod třísek a kapalin se nejlépe hodí varianta 3, která nemá posuvný stůl. Varianta 2 se jeví jako nejhorší díky posuvnému stolu.
- Manipulovatelnost – při manipulaci se strojem vycházím z konstrukce strojů, kde portálové frézky jsou snadno rozebíratelné oproti stolové frézce, kterou uvažují jako celek, stojan a lože pevně spojeny.

Tab 7) Výsledné hodnocení návrhů konstrukce

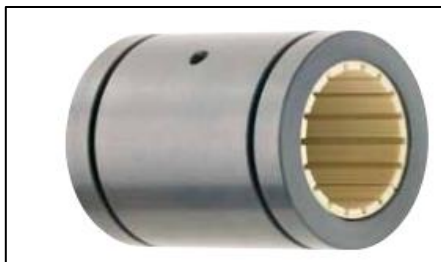
Váha	Kritérium	Var. 1	Var. 2	Var. 3
10	Tuhost konstrukce	3	2	1
9	Poměr velikosti stroje k pracovní ploše	1	2	3
8	Přibližná cena stroje	2	3	1
7	Ergonomie a dostupnost obrobku	3	2	2
6	Sestavení stroje	2	3	1
5	Zástavbový prostor	1	2	3
4	Přesnost obrábění	2	3	1
3	Předpokládaná váha stroje	1	2	3
2	Odvod kapalin a třísek	2	1	3
1	Manipulovatelnost	2	3	3
<b>Výsledný součet:</b>		74	78	76

## 4.2 Přímočará vedení os frézky

### 4.2.1 Kluzná vedení

Vedení jsou vhodná pro přenášení vysokých zatížení a dobře tlumí vibrace. Kluzná vedení dělíme na hydrodynamická a s polosuchým třením, které neobsahuje tlakové vedení maziva. Nevýhoda vedení nastává při malých rychlostech, kde díky zvýšenému tření může docházet k trhavému pohybu. Klasickým představitelem kluzných vedení je spojení kalenou lištou s kalenou lištou s vnitřní lepenou protiotěrovou hmotou a mazacími otvory. U CNC

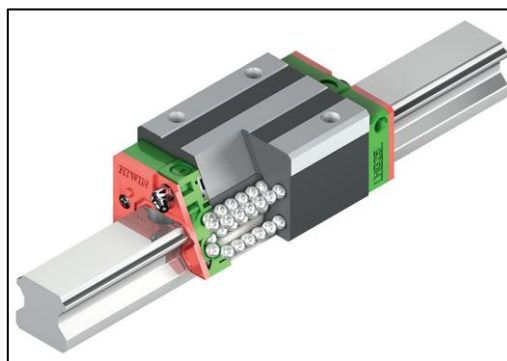
hobby frézek se můžeme setkat s kombinací vodící tyče a kluzného pouzdra s materiály odolnými proti opotřebení. Zobrazeno na Obr.15. Kluzná vedení dosahují oproti valivým vedením vyšší únosnosti, vyššího radiálního a axiálního zatížení. [3, 15]



Obrázek 13: Pouzdro kluzného vedení [15]

#### 4.2.2 Valivá vedení

Vyznačují se malým třením, vysokou tuhostí a dlouhou životností. Dosahují vysoké přesnosti pohybu i při malých rychlostech. Valivá vedení můžeme rozdělit na válečková a kuličková. Kuličková vedení mají menší tuhost a únosnost. Výhodou u těchto vedení je menší citlivost na přesnost pojezdových ploch. Vedení se skládá z kolejničky, která je dostupná v několika variantách (kruhová tyč, profilová kolejnička), která je upevněna pomocí šroubů na připravenou přesně stanovenou plochu a vozíku obsahující valivé elementy. Valivé elementy mohou být válečky, jehly nebo kuličky. [3, 16]



Obrázek 14: Kuličkové vedení [16]

#### 4.2.3 Hodnocení návrhů

Z výše uvedených informací byla zvolena varianta s valivým vedením, která dosahuje lepšího tření a životnosti. Zároveň je kuličkové lineární vedení dostupné na fakultě. Pro realizaci se nebudou muset vynaložit finanční prostředky na koupi nového vedení. Vybrané vedení nese označení HGR15 od společnosti HIWIN, jedná se o nejmenší dostupnou kolejničku. Vozík nese označení HGH15. Vedení HGR15 se využije na osy Y a Z. Pro osu X je na fakultě dostupná varianta od firmy THK, vedení THK SR20.

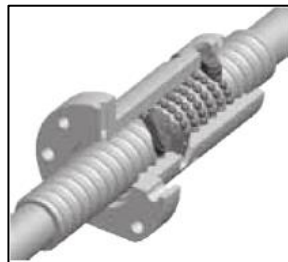
### 4.3 Pohybové mechanismy os frézky

Tyto mechanismy slouží pro převod rotačního pohybu motoru na lineární pohyb. Pro analýzu jsem zvolil základní mechanismy používané v obráběcích strojích.

#### 4.3.1 Kuličkový šroub s maticí

Mechanismus je tvořen šroubem a kuličkovou maticí. Realizace šroubu a matice bývá dvěma možnými způsoby. První varianta je matice umístěna pevně, šroub se otáčí nebo druhá varianta matice se otáčí a šroub je napevno. Kuličkový šroub vytváří valivé tření, které má

větší účinnost a menší opotřebení závitů než šroub s kluzným třením. Mechanismus umožňuje přesné odměřování polohy, díky odvození dráhy z pootočení a stoupání šroubu. Pro vymezení vůle se matice předepínají pomocí dvou matic nebo dělené matice. Tento mechanismus se využívá u většiny hobby CNC frézek. [1, 17]



Obrázek 15: Schéma kuličkového šroubu s maticí [17]

#### 4.3.2 Pastorek s hřebenem

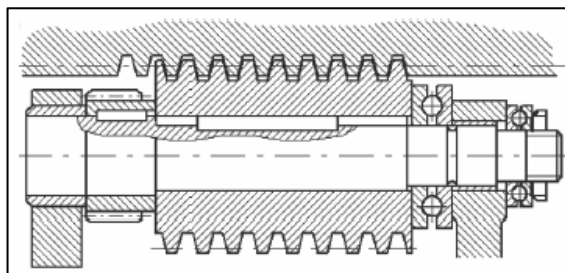
Mechanismus pro přeměnu rotačního pohybu na lineární pohyb. Mechanismus dosahuje lepší účinnosti a menší tuhosti než posuvové šrouby. Při realizaci musíme provést vymezení vůle mezi pastorkem a hřebenem např. přidáním druhého pastorku. Nachází využití u pracovních stolů s dlouhými zdvihy, kde je použití šroubů nevhodné nebo už nemáme výrobní možnosti kuličkového šroubu. Případně pro přesouvání velkých hmot. [3, 4]



Obrázek 16: Pastorek a hřeben [18]

#### 4.3.3 Šnek s hřebenem

Mechanismus nachází využití u pohybových soustav s vysokou hodnotou převodu nebo u velkých portálových frézek. Výhody jsou v minimálním tření a vysoké tuhosti. Pro přesné aplikace se využívá v provedení hydrostatickém. [3, 4]



Obrázek 17: Schéma mechanismu šnek a hřeben [3]

#### 4.3.4 Přímý posuv

Lineární motory využívají přímého působení elektromagnetických sil na posouvanou součást. Při využití lineárních motorů odpadá vložený převod, motory vyvozují sílu přímo. Nevýhoda je zmagnetizované prostředí, nutnost krytí magnetických částí a tvorba tepla, které se snadno přenáší do rámu stroje, je nutné aktivní chlazení. Motory mají vysokou přesnost a dynamickou tuhost, životnost a dosahují vysoké posuvové rychlosti. [4, 19]



Obrázek 18: Lineární motor [19]

#### 4.3.5 Hodnocení návrhů

Pohybové mechanismy os frézek mohou být řešeny různými způsoby provedení. Z výše provedené analýzy možných variant bude využita varianta kuličkový šroub s maticí. Jedná se o variantu využívanou ve velkém množství CNC hobby frézek. Plánovaná frézka je malých rozměrů, kde nebude potřeba dosahovat velkých rozměrů, které jsou výhodou u použití mechanismu hřeben-pastorek. Pro konstrukční řešení byl vybrán kuličkový šroub o průměru 16 mm od výrobce HIWIN.

### 4.4 Pohon pracovních os frézky

#### 4.4.1 Servopohony stejnosměrné

Pro servopohony se většinou využívají stejnosměrné motory s buzením permanentními magnety ve statoru. Jako magnety se většinou využívají zejména ferity a spékané materiály ze vzácných zemin. Aktivní částí stejnosměrného motoru jsou stator, permanentní magnety, rotor s vinutím, kde jsou cívky vyvedeny na komutátor, kde spolu s uhlíkovými kartáči a držáky tvoří sběrné ústrojí. Motor ještě obsahuje pólové nástavce z měkkého železa pro zachycování magnetického toku ve vzduchové mezeře. Servopohon je oproti krokovému motoru vybaven snímačem polohy, díky kterému máme zpětnou vazbu na polohu motoru a můžeme nastavit přesnou hodnotu natočení. [20]

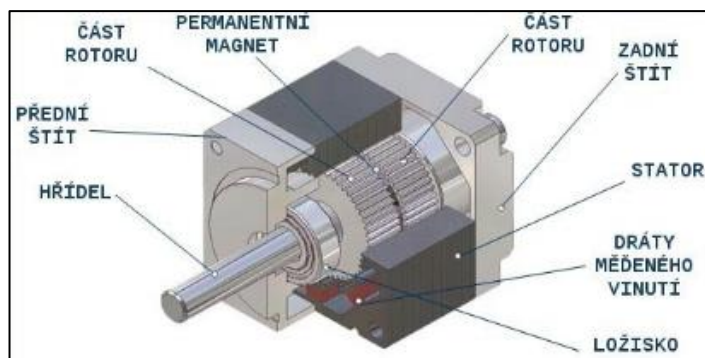
#### 4.4.2 Krokové motory

Jedná se o speciální druh synchronního motoru. Obsahující buzení permanentními magnety a od synchronních motorů se liší v nespojitém pohybu. Motor umožňuje dobré řízení bez použití enkodérů. Díky vhodné momentové charakteristice při malých rychlostech lze využít motory pro přímé ovládání zátěže bez převodovky. Motory mohou zaujímat určitý počet definovaných poloh. Krokový motor můžeme řídit podle nejčastěji využívaných metod řízení podle napájení na unipolární a bipolární. [20, 21]

Unipolární řízení budí v jednom okamžiku pouze jednu statorovou cívku. Díky tomu dosahuje motor menší odběr, ale se ztrátou kroutícího momentu. [20, 21]

Bipolární řízení budí nejméně jedno ze statorových vinutí. Motor dosahuje větších kroutících momentů, ale s vyšší spotřebou a složitějším napájením a řízením obvodů. [20, 21]





Obrázek 19: Schéma krokového motoru [21]

#### 4.4.3 Volba pohonu pracovních os stroje

Z rešeršní části vyplývá větší podíl zastoupení krokových motorů než servomotorů u CNC hobby frézek. U servopohonu je výhodná zpětná vazba od snímače polohy. U krokových motorů je výhodná momentová charakteristika při malých rychlostech. Výhodou krokových motorů je jejich cena, níže porovnání dvou motorů

- Krokový 2-fázový motor 57HS22 (2,2 N·m)...1270 Kč bez DPH
- DC servomotor DCM50207 120W (2,9 N·m)...3970 Kč bez DPH
- Krokový 2-fázový motor SX23-2727 (2,7 N·m)...cca 1600 Kč bez DPH [22, 28]

Z cenového porovnání motorů dostupných v internetovém obchodě CNCschop.cz jde pozorovat cca 3-násobný cenový rozdíl mezi motory.

Pro konstrukční řešení byla zvolena varianta s krokovým motorem. Pro výpočty bude uvažován krokový motor SX23-2727 s momentem 2,7 N·m, který je dostupný na fakultě a bude využit při konstrukci stroje, pokud splní požadavky dané z konstrukčního řešení.

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Kapitola konstrukční řešení bude zaměřena na ověření komponentů, které byly zvoleny v kapitole návrh konstrukčních variant. Rám stroje je zvolen podle výsledků analýzy v Tab.7 v kapitole 4.1.4. Pro komponenty jednotlivých os bude provedeno ověření vhodnosti použití s potřebnými výpočty.

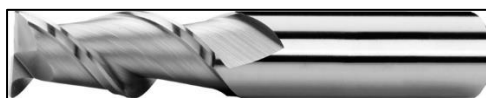
V úvodu budou vypočteny parametry od frézování, které budou využity v následných výpočtových operacích. Z výsledků následně vybereme vhodné vřeteno, které se bude využívat na stroji. Poté bude provedeno ověření pro osy X, Y a Z.

### 5.1 Návrh osy Z

CNC frézka by měla zvládnout obrábět plast, dřevo a hliník. Pro následující výpočty bude uvažován materiál, který nejvíce klade nároky na zatěžování vřetene stroje a klade nejvyšší požadavky na celkový stroj. [24]

Ve výpočtech bude uvažována slitina hliníku obsahující méně než 12-13% křemíku. Jedná se o hojně využívaný typ hliníkového materiálu. Materiál nachází využití v celé řadě aplikací, díky svým vlastnostem. Měrná řezná síla dosahuje  $600 \text{ N/mm}^2$ , která je proti hliníku s příměsí křemíku menší než 6% větší o jednu třetinu. [24]

Nástroj byl zvolen od českého výrobce ZPS, jedná se o čelní frézu se dvěma břity. Typ frézy se označuje jako W. Výrobce doporučuje tuto frézu k obrábění měkkých materiálů, hliníku a neželezných kovů. Fréza má průměr 8 mm. [23]



Obrázek 20: Čelní fréza [23]

#### 5.1.1 Návrh vřetene

Při návrhu vřetene budou vypočteny otáčky, posuvy, potřebný moment a výkon. Z výsledků bude určeno vhodné vřeteno. V Tab. 8 jsou zobrazeny vstupní hodnoty pro výpočty. Hodnoty vychází z katalogu výrobce frézy a doporučených parametrů pro tuto frézu. Výpočtové vztahy jsou využity z doporučených definic pro frézování ve zdrojích (23,25). [23, 25]

Tab 8) Základní hodnoty frézování [23]

Veličina	Velikost
Řezná rychlost ( $v_c$ )	220 m/min
Průměr nástroje ( $D_{cv}$ )	8 mm
Posuv na zub ( $f_z$ )	0,053 mm
Počet zubů ( $z$ )	2 [-]
Hloubka řezu ( $a_p$ )	2 mm
Šířka záběru ( $a_e$ )	8 mm

<b>Materiálová měrná řezná síla (<math>k_{c1}</math>)</b>	600 N/mm <sup>2</sup>
<b>Nárůst měrné řezné síly (<math>m_c</math>)</b>	0,25 [-]
<b>Úhel nastavení ostří (<math>\kappa_r</math>)</b>	90°

### Výpočet otáček vřetena

$$n_v = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_{cv}} = \frac{220 \cdot 1000}{\pi \cdot 8} = 8753 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_v$  [min<sup>-1</sup>] jsou otáčky vřetena pro nástroj o šířce 8 mm.

### Rychlost posuvu

$$v_f = f_z \cdot n_v \cdot z = 0,067 \cdot 8753 \cdot 2 = 927,87 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

kde  $v_f$  [mm·min<sup>-1</sup>] je rychlost posuvu při frézování.

### Průměrná tloušťka třísky

$$h_m = \frac{\sin(\kappa_r) \cdot 180 \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot D_{cv} \cdot \arcsin\left(\frac{a_e}{D_{cv}}\right)} = \frac{\sin(90) \cdot 180 \cdot 8 \cdot 0,053}{\pi \cdot 8 \cdot \arcsin\left(\frac{10}{10}\right)} = 0,034 \text{ mm}$$

kde  $h_m$  [mm] je průměrná tloušťka třísky při čelním frézování se záběrem celou šířkou nástroje.

### Měrná řezná síla

$$k_{cv} = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} = \frac{600}{0,034^{0,25}} = 1397,3 \text{ N/mm}^2$$

kde  $k_{cv}$  [N·mm<sup>2</sup>] je měrná řezná síla

### Výkon vřetene

$$P_c = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f \cdot k_{cv}}{60 \cdot 10^6} = \frac{8 \cdot 2 \cdot 927,87 \cdot 1397,3}{60 \cdot 10^6} \cdot 1000 = 0,345 \text{ kW}$$

kde  $P_c$  [W] je potřebný výkon vřetene pro frézování.

### Kroutící moment vřetene

$$M_c = \frac{P_c \cdot 30 \cdot 10^3}{\pi \cdot n_v} = \frac{0,231 \cdot 30 \cdot 10^3}{\pi \cdot 8753} = 0,377 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_c$  [N·m] je kroutící moment vřetene potřebný pro frézování.

### Řezná síla

$$F_c = \frac{2 \cdot M_c}{D_{cf} \cdot 10^{-3}} = \frac{2 \cdot 0,377}{8 \cdot 10^{-3}} = 94,29 \text{ N}$$

kde  $F_c$  [N] je řezná síla vyvozená při frézování.

## 5.1.2 Volba vřetene

Vřeteno uděluje nástroji přesný otáčivý pohyb, kde osa nástroje a vřetena musí být v přípustných mezích tolerance. Na vřeteno jsou kladeny náročné požadavky:

- Přesnost chodu – určena velikost radiálního a axiálního házení
- Dokonalé vedení – vřeteno nesmí měnit polohu v prostoru.
- Vymezení vůle v uložení vřetena vzniklou opotřebením
- Ztráty v uložení vřetena musí dosahovat co nejmenších hodnot
- Požadavek na velikou tuhost vřetene

Vřetena obráběcích strojů rozdělujeme podle použitého náhonu na vřetena s vloženým převodem, elektrovřetena a vřetena s přímým náhonem. [1]

### Vřetena s vloženým převodem

Pohon vřetena zajišťuje motor s vloženým převodem (řemen, ozubená kola, převodovka). Výhodou uspořádání s vloženým převodem je v možnosti přenosu vysokého kroutícího momentu a při využití převodovky ve vysokých převodových poměrech. Nevýhodou těchto strojů je větší zástavbová plocha, hmotnost a možnost vzniku rezonance při kritických otáčkách. Při využití řemenu má vřeteno lepší schopnost tlumit kmity.

### Přímý náhon

Pohon vřetena je zajištěn pomocí elektromotoru, který je umístěn přímo na vřeteno bez využití převodu. Ke spojení motoru a vřetena je využita spojka. Výhodou pohonu je jednodušší výměna motoru, údržba a náklady na chlazení.

### Elektrovřeteno

Konstrukce vřetena implementuje elektromotor do vlastního vřetena, výsledkem je velmi kompaktní řešení vřetena. Rotor vřetene je nalisován na vřeteno a stator umístěn v těle vřetena. Díky tomuto uspořádání se minimalizuje chvění a dostaneme velmi dobrou možnost pružně měnit otáčky. Při provozu dochází v elektrovřetenu k tvorbě tepla, které přímo působí na vřeteno a může docházet k tepelným deformacím. Proto je vřeteno chlazeno vzduchem nebo chladicí kapalinou. [26]

Vřeteno bylo vybráno na základě poznatků z porovnání komerčních strojů a vypočtených parametrů pro obrábění. Velkou váhu ve výběru zahrnoval požadavek využití dostupného vřetena na fakultě, kdy budou nulové pořizovací náklady. Na druhou stranu vřeteno musí splňovat veškeré požadavky vyplývající z vypočtených hodnot pro operaci frézování.

Vřeteno je voleno od firmy ATAS, typové označení FT4C52R. Společnost ATAS je firma s dlouholetou tradicí působící na trhu od roku 1928. Firma se zaměřuje na výrobu elektro motorů, ventilátorů a střížnými nástroji. V jejich nabídce se nachází program hobby, který obsahuje hobby brusky a vřetena. Vybraný model vřetena obsahuje třífázový asynchronní motor o výkonu 500 W. Z porovnání dostupných produktů vyplývá menší výkon zvoleného vřetene oproti komerčně dostupným strojům. Z tohoto důvodu není při operaci frézování využitý potenciál použité frézy na 100 %. Zvolený výběr rezných podmínek pro šířku a záběr řezu byl volen pro optimalizaci na vřeteno FT4C52R. Vřeteno umožňuje upnutí nástrojů do šířky 10 mm pomocí kleštiny ER16. Vlastnosti vřetene viz. Tab. 9. [27]

Tab 9) Vlastnosti zvoleného vřetene

Typ	Měnič [V/Hz]	Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	Krytí	Výkon [W]	Kleština
FT4C52R	230/400	23700	IP44	500	ER16

### 5.1.3 Posuvný mechanismus na ose Z

V kapitole 4.3.5 byla vyhodnocena varianta řešení použití kuličkového šroubu s maticí o průměru 16 mm. Při výpočtech bude vycházeno z informací od výrobce HIWIN a s podporou literatury. Základní parametry pro výpočty jsou uvedeny v Tab. 10. [5, 16]

Tab 10) Vstupní parametry pro výpočet šroubu v ose Z

Veličina	Velikost
Průměr kuličkového šroubu (d)	16 mm
Malý průměr kuličkového šroubu (d <sub>k</sub> )	12,9 mm
Stoupání šroubu (P)	5 mm
Dynamická únosnost (C <sub>dyn</sub> )	7320 N
Statická únosnost (C <sub>o</sub> )	12470 N
Maximální otáčkový faktor (D <sub>nmax</sub> )	70000
Koeficient uložení (k <sub>d</sub> )	1,88
Koeficient závislosti na uložení (k <sub>k</sub> )	2,05
Vzdálenost mezi ložisky (l <sub>d</sub> )	313 mm
Nepodepřená délka hřídele (l <sub>k</sub> )	229 mm
Gravitační zrychlení (g)	9,81 m/s <sup>2</sup>
Rychloposuv (v <sub>r</sub> )	15 m/min
Doba rozběhu (t <sub>r</sub> )	0,2 s

### Výpočet maximálních otáček šroubu

$$n_r = \frac{v_r \cdot 10^3}{P} = \frac{15 \cdot 10^3}{5} = 3000 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_r$  [min<sup>-1</sup>] jsou maximální otáčky kuličkového šroubu pro zvolené parametry stroje.

### Kontrola maximálních otáček

$$n_k = \frac{k_d \cdot d_k}{l_d^2} * 10^8 = \frac{1,88 \cdot 12,9}{313^2} * 10^8 = 24754,77 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_k$  [min<sup>-1</sup>] jsou kritické otáčky kuličkového šroubu.

### Maximální otáčky

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 24754,77 = 19803,82 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_{max}$  [min<sup>-1</sup>] jsou maximální otáčky kuličkového šroubu, které by neměli přesáhnout 80% kritických otáček.

Pro posouzení vhodnosti šroubu musí platit  $n_r < n_{max} = 3000 < 19803,82 \Rightarrow$  kuličkový šroub VYHOVUJE

### Kontrola vzpěrné tuhosti

$$F_{ks} = m_i \cdot g = 15,2 \cdot 9,81 = 149,11 \text{ N}$$

kde  $F_{ks}$  je axiální statická síla působící na kuličkový šroub.

$$F_{kd} = m_i \cdot \left( g + \frac{v_r}{t_p} \right) = 15,2 \cdot \left( 9,81 + \frac{15}{0,2} \right) = 1289,1 \text{ N}$$

kde  $F_{kd}$  je axiální síla působící při rozběhu motoru na hodnotu rychloposuvu.

### Statická axiální síla na šroub

$$F_k = \frac{k_k \cdot d_k^4}{l_k^2} \cdot 10^5 = \frac{2,05 \cdot 12,9^4}{229^2} \cdot 10^5 = 108250 \text{ N}$$

kde  $F_k$  [N] je maximální teoretická dovolená axiální síla.

#### Maximální axiální zatížení šroubu

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k = 0,5 \cdot 108250 = 54127 \text{ N}$$

kde  $F_{kmax}$  [N] je maximální dovolená provozní axiální síla

Z výsledků vychází že  $F_{kd}$  a  $F_{ks} < F_{kmax} \Rightarrow$  kuličkový šroub splňuje požadavky na axiální zatížení.

#### Kontrola otáčkového faktoru

$$d_n = d \cdot n_r = 16 \cdot 3000 = 48000$$

kde  $d_n$  [-] je otáčkový faktor kuličkového šroubu.

Musí platit  $d_n < D_{nmax} = 48000 < 70000 \Rightarrow$  kuličkový šroub VYHOVUJE

#### Kontrola životnosti

$$L = \left( \frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot 10^6 = \left( \frac{7320}{520} \right)^3 \cdot 10^6 = 2,78 \cdot 10^9 \text{ otáček}$$

kde  $L$  [otáčky] je životnost kuličkového šroubu v otáčkách.

$F_m$  [N] je střední zatížení kuličkového šroubu. Hodnota odhadnuta.

$$L_h = \left( \frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_m \cdot 60} = \left( \frac{7320}{520} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{3000 \cdot 60} = 15497 \text{ h}$$

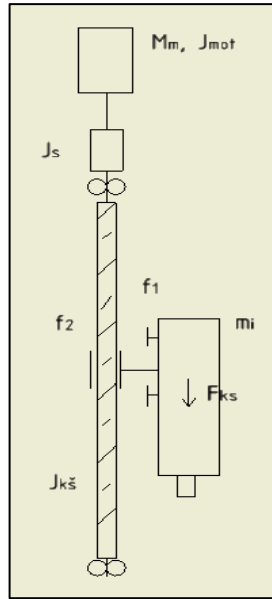
kde  $L_h$  [h] je životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách.

$n_m$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou střední otáčky různých provozních režimů. Hodnota odhadnuta.

Z vypočítaných hodnot vyplývá, že zvolený kuličkový šroub odpovídá návrhovým kritériím a splňuje zadané požadavky. Výsledné hodnoty životnosti šroubu jsou dostatečné. Nicméně reálné hodnoty mohou být odlišné z důvodu rozdílných hodnot střední síly a otáček. Dalším faktorem životnosti je závislost na čistotě prostředí a mazání šroubu.

#### 5.1.4 Motor osy Z

Návrh pohonu motoru bude vycházet z literatury uvedené níže. Při řešení bude posouzeno statické, dynamické a kinematické hledisko motoru. Na závěr bude provedeno zhodnocení výsledných parametrů s parametry motoru a doporučena vhodnost využití. [5]



Obrázek 21: Schéma uspořádání pohonu osy Z

Tab 11) Vstupní parametry pro výpočet motoru Z osy

Veličina	Velikost
Účinnost valivého vedení ( $\eta_1$ )	0,98 [-]
Účinnost uložení kuličkového šroubu ( $\eta_2$ )	0,94 [-]
Účinnost kuličkového šroubu s maticí ( $\eta_3$ )	0,92 [-]
Součinitel tření ve vodících plochách ( $f_1$ )	0,005 [-]
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukováný na poloměr šroubu ( $f_2$ )	0,003[-]
Úhel sklonu ( $\alpha$ )	0°

### Výpočet statického hlediska

#### Výpočet celkové účinnosti

$$\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,98 \cdot 0,94 \cdot 0,92 = 0,85$$

Kde  $\eta_c$  [-] je celková účinnost pohybového mechanismu na ose Z.

#### Určení statického momentu

$$M_{ms} = \frac{F_{ks} \cdot P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{149,11 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} = 0,14 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_{ms}$  [N·m] je moment motoru ze statického hlediska.

### Kinematické hledisko

#### Lineární zrychlení

$$a = \frac{v_r \cdot 60^{-1}}{t_p} = \frac{15 \cdot 60^{-1}}{0,2} = 1,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

kde  $a$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] je lineární zrychlení stolu.

## Úhlové zrychlení motoru

$$\varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{P \cdot 10^{-3}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,25}{5 \cdot 10^{-3}} = 1570,8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

kde  $\varepsilon_m$  [rad·s<sup>-2</sup>] je úhlové zrychlení motoru.

### Dynamické hledisko

#### Moment od přesouvaných hmot

$$M_g = \frac{m_i \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{15,2 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos(0) \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c \cdot 10^3} = 0,00069 \text{ Nm}$$

kde  $M_g$  [N·m] je ztrátový moment od přesouvaných hmot.

#### Síla předeprnutí kuličkového šroubu

$$F_p = 0,35 \cdot F_k = 0,8 \cdot 149,11 = 52,19 \text{ N}$$

kde  $F_p$  [N] je síla od předeprnutí kuličkového šroubu.

#### Ztrátový moment kuličkového šroubu

$$M_{zks} = \frac{F_p \cdot P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \cdot (1 - \eta_1^2) = \frac{52,19 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} \cdot (1 - 0,92^2) = 0,0075 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_{zks}$  [N·m] je ztrátový moment kuličkového šroubu.

#### Celkový moment redukovaný na hřídeli motoru

$$M_{crm} = M_g + M_{zks} = 0,00069 + 0,0075 = 0,0082 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_{crm}$  [N·m] je celkový redukovaný moment na hřídeli motoru.

#### Redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot

$$J_m = m_i \cdot \left( \frac{P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 15,2 \cdot \left( \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 9,625 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

kde  $J_m$  [kg·m<sup>2</sup>] je redukovaný moment setrvačnosti od posuvných hmot.

#### Celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídeli motoru

$$\begin{aligned} J_{rhm} &= J_{mot} + J_{kš} + J_s + J_m = 53 \cdot 10^{-6} + 1,66 \cdot 10^{-5} + 3,5 \cdot 10^{-6} + 9,625 \cdot 10^{-6} \\ &= 8,27 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

kde  $J_{rhm}$  [kg·m<sup>2</sup>] je celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru

$J_{mot}$  [kg·m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti motoru. Hodnota zjištěna od výrobce motoru.

$J_{kš}$  [kg·m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti kuličkového šroubu. Hodnota zjištěna z modelu.

$J_s$  [kg·m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti hřídelové spojky. Hodnota zjištěna z modelu.

#### Potřebný moment motoru z dynamického hlediska

$$M_m = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{crm} = 8,27 \cdot 10^{-5} \cdot 1570,8 + 0,0082 = 0,138 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_m$  [N·m] je potřebný moment motoru.

$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{7,77 \cdot 10^{-5}}{48 \cdot 10^{-6}} = 1,72$$

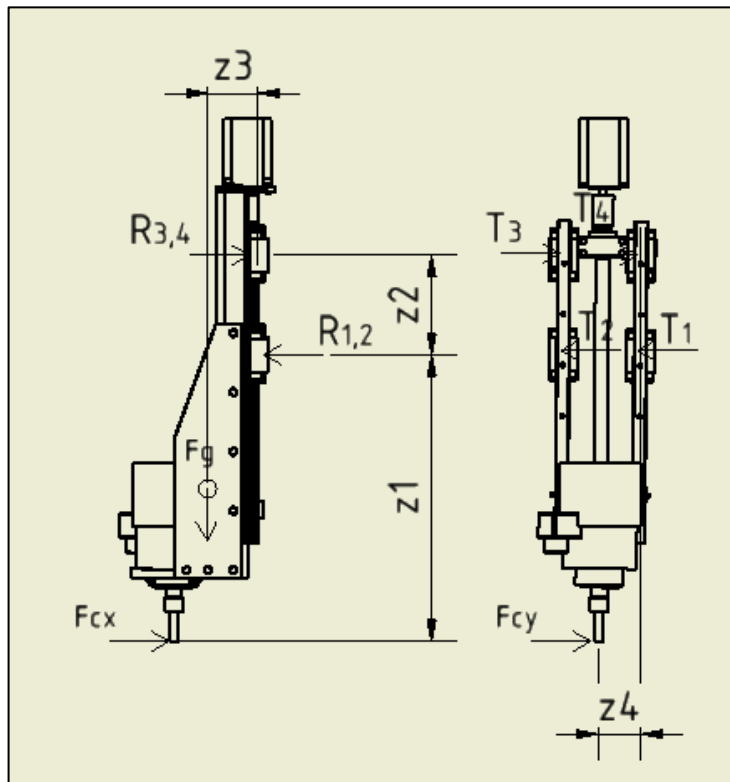
Kontrola dynamických poměrů motoru, kdy se výsledná hodnota musí nacházet v intervalu od 1,5 do 3. Navržený motor vyhovuje zadaným podmínkám dynamického



poměru. Z uvedených výsledků vyplývá vhodnost využití motoru SX23-2727 pro využití na ose Z. Motor SX-2727 dosahuje statického výkonu 2,7 Nm a hmotnosti 1,18 Kg. [28]

### 5.1.5 Lineární vedení osy Z

Výpočet bude proveden dle katalogu výrobce HIWIN a bude vycházet ze schématického znázornění (Obr. 22) s vyznačeným silovým zatížením. Velikost vzdáleností z je volena ze 3D modelu tak aby bylo vedení co nejvíce namáháno. Vysunutí je maximální. [16]



Obrázek 22: Schéma zatížení lineárního vedení osy Z

Tab 12) Vstupní parametry pro výpočet vedení v ose Z

Veličina	Velikost
Vzdálenost z <sub>1</sub>	337 mm
Vzdálenost z <sub>2</sub>	118 mm
Vzdálenost z <sub>3</sub>	60 mm
Vzdálenost z <sub>4</sub>	50 mm
Statická únosnost C <sub>v0</sub>	16970 N
Dynamická únosnost C <sub>vdyn</sub>	11380 N

#### Radiální zatížení vozíku

$$R_1 = R_2 = \frac{F_g \cdot z_3 + F_{cx} \cdot z_1}{2 \cdot z_2} + \frac{F_{cx}}{2} = \frac{15,2 \cdot 9,81 \cdot 0,005 + 94,3 \cdot 0,337}{2 \cdot 0,118} + \frac{94,3}{2} = 219,7 \text{ N}$$

$$R_3 = R_4 = \frac{F_g \cdot z_3 + F_{cx} \cdot z_1}{2 \cdot z_2} = \frac{15,2 \cdot 9,81 \cdot 0,005 + 94,3 \cdot 0,337}{2 \cdot 0,118} = 172,6 \text{ N}$$

### Tečné zatížení vozíku

$$T_1 = T_2 = \frac{F_{cy} \cdot z_1 - F_g \cdot z_4}{2 \cdot z_2} + \frac{F_{cy}}{2} = \frac{94,3 \cdot 0,337 - 15,2 \cdot 9,81 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,118} + \frac{94,3}{2} = 150,2 \text{ N}$$

$$T_3 = T_4 = \frac{F_{cy} \cdot z_1 - F_g \cdot z_4}{2 \cdot z_2} = \frac{94,3 \cdot 0,337 - 15,2 \cdot 9,81 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,118} = 103,05 \text{ N}$$

kde  $F_{cy}$  [N] je řezná síla.  $F_g$  [N] je gravitační zatížení hmot v ose Z a radiální a tečné síly [N] jsou odvozeny z Obr.22.

### Staticky ekvivalentní zatížení

$$P_e = R_1 + T_1 = 219,7 + 150,2 = 369,9 \text{ N}$$

kde  $P_e$  [N] je staticky ekvivalentní zatížení, vypočítané z maximálních hodnot radiální a tečné síly.

### Statický bezpečnostní faktor

$$f = \frac{C_{vo}}{P_e} = \frac{16970}{369,9} = 45,8$$

kde  $f$  [-] je statický ekvivalentní faktor, která je určována výrobcem a pro normální zatížení by měla dosahovat minimální hodnoty 3. Z porovnání je zjištěno že vedení vyhovuje.

### Trvanlivost vozíku v délkové jednotce

$$L_v = \left( \frac{f_t \cdot f_H \cdot C_{vdyn}}{f_w \cdot P_e} \right)^2 = \left( \frac{1 \cdot 1 \cdot 11380}{1,2 \cdot 369,9} \right)^2 = 8,4 \cdot 10^8 \text{ m}$$

kde  $L_v$  [m] je trvanlivost nejvíce zatíženého vozíku v délkové jednotce,  $f_t$  [-] faktor teploty (hodnota 1 pro normální podmínky),  $f_H$  [-] faktor tvrdosti (normovaná hodnota 1 pro běžné tvrdosti),  $f_w$  [-] faktor zatížení, pro rychlosti posuvu do  $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  je hodnota stanovena na 1,2.

### Trvanlivost vozíku v časové jednotce

$$L_{vh} = L_v \cdot \frac{100000}{v_f \cdot 60} = 8,4 \cdot 10^8 \cdot \frac{100000}{927,87 \cdot 60} = 1,51 \cdot 10^9 \text{ h}$$

kde  $L_{vh}$  [h] je hodnota trvanlivosti vozíku v časové jednotce.

Z vypočítaných hodnot jde vidět, že lineární vedení je předimenzované. Nicméně reálné hodnoty stejně jako u návrhu kuličkového šroubu budou nižší z důvodu čistoty prostředí a kvalitou mazání. V katalogů výrobce HIWIN se jedná o nejmenší možný rozměr lineárního vedení. Lineární vedení bude zvoleno i z důvodu vlastnění těchto vedení a využití ze skladu.

## 5.2 Návrh osy Y

V následující kapitole budou výpočetně ověřena vhodnost využití posuvového mechanismu, motoru a lineárního vedení pro osu Y.

### 5.2.1 Posuvový mechanismus osa Y

Pro posuvový mechanismus bude uvažováno stejně jako na ose Z s mechanismem kuličkový šroub s maticí. Kuličkový šroub bude zvolen o průměru 16 mm. Při výpočtech

bude vycházeno z informací od výrobce HIWIN a s podporou literatury. Základní parametry pro výpočty jsou uvedeny v Tab. 13. [5, 16]

Tab 13) Vstupní parametry pro výpočet šroubu v ose Y

Veličina	Velikost
Průměr kuličkového šroubu (d)	16 mm
Malý průměr kuličkového šroubu ( $d_k$ )	12,9 mm
Stoupání šroubu (P)	5 mm
Dynamická únosnost ( $C_{dyn}$ )	7320 N
Statická únosnost ( $C_o$ )	12470 N
Maximální otáčkový faktor ( $D_{nmax}$ )	70000
Koeficient uložení ( $k_d$ )	1,88
Koeficient závislosti na uložení ( $k_k$ )	2,05
Vzdálenost mezi ložisky ( $l_d$ )	475 mm
Nepodepřená délka hřídele ( $l_k$ )	400 mm
Gravitační zrychlení (g)	9,81 m/s <sup>2</sup>
Rychloposuv ( $v_r$ )	15 m/min
Doba rozběhu ( $t_r$ )	0,2 s

### Výpočet maximálních otáček šroubu

$$n_r = \frac{v_r \cdot 10^3}{P} = \frac{15 \cdot 10^3}{5} = 3000 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_r$  [min<sup>-1</sup>] jsou maximální otáčky kuličkového šroubu pro zvolené parametry stroje.

### Kontrola maximálních otáček

$$n_k = \frac{k_d \cdot d_k}{l_d^2} * 10^8 = \frac{1,88 \cdot 12,9}{475^2} * 10^8 = 10749 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_k$  [min<sup>-1</sup>] jsou kritické otáčky kuličkového šroubu.

### Maximální otáčky

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 10749 = 8599 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_{max}$  [min<sup>-1</sup>] jsou maximální otáčky kuličkového šroubu, které by neměly přesáhnout 80% kritických otáček.

Pro posouzení vhodnosti šroubu musí platit  $n_r < n_{max} = 3000 < 8599 \Rightarrow$  kuličkový šroub VYHOVUJE

### Kontrola vzpěrné tuhosti

$$F_{ks} = F_{cf} = 94,29 \text{ N}$$

kde  $F_{ks}$  je axiální statická síla působící na kuličkový šroub.

$$F_{kd} = m_i \cdot \left(\frac{v_r}{t_p}\right) = 21,5 \cdot \left(\frac{15}{0,2}\right) = 1575 \text{ N}$$

kde  $F_{kd}$  je axiální síla působící při rozběhu motoru na hodnotu rychloposuvu.

## Statická axiální síla na šroub

$$F_k = \frac{k_k \cdot d_k^4}{l_k^2} \cdot 10^5 = \frac{2,05 \cdot 12,9^4}{400^2} \cdot 10^5 = 35481 \text{ N}$$

kde  $F_k$  [N] je maximální teoretická dovolená axiální síla.

### Maximální axiální zatížení šroubu

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k = 0,5 \cdot 35481 = 17740 \text{ N}$$

kde  $F_{kmax}$  [N] je maximální dovolená provozní axiální síla

Z výsledků vychází že  $F_{kd}$  a  $F_{ks} < F_{kmax} \Rightarrow$  kuličkový šroub splňuje požadavky na axiální zatížení.

### Kontrola otáčkového faktoru

$$d_n = d \cdot n_r = 16 \cdot 3000 = 48000$$

kde [-] je otáčkový faktor kuličkového šroubu.

Musí platit  $d_n < D_{nmax} = 48000 < 70000 \Rightarrow$  kuličkový šroub VYHOVUJE

### Kontrola životnosti

$$L = \left( \frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot 10^6 = \left( \frac{7320}{600} \right)^3 \cdot 10^6 = 1,8 \cdot 10^9 \text{ otáček}$$

kde  $L$  [otáčky] je životnost kuličkového šroubu v otáčkách.

$F_m$  [N] je střední zatížení kuličkového šroubu. Hodnota odhadnuta.

$$L_h = \left( \frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_m \cdot 60} = \left( \frac{7320}{520} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{800 \cdot 60} = 3,78 \cdot 10^4 \text{ h}$$

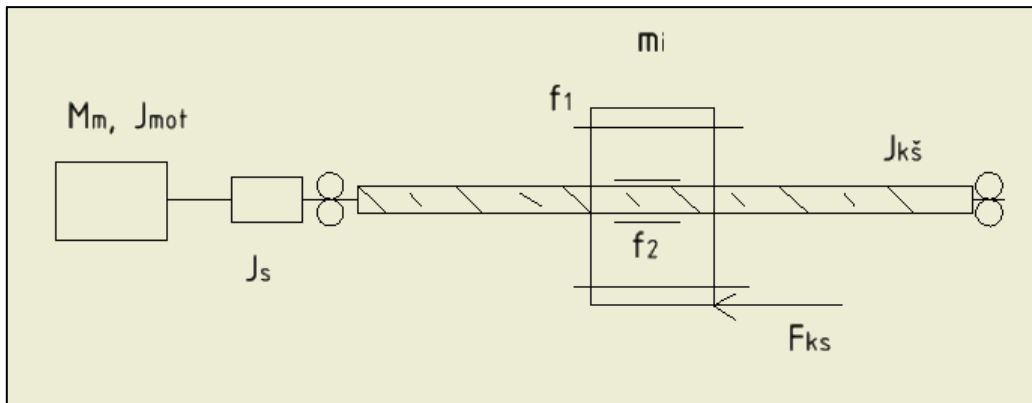
kde  $L_h$  [h] je životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách.

$n_m$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou střední otáčky různých provozních režimů. Hodnota odhadnuta.

Z vypočítaných hodnot vyplývá, že zvolený kuličkový šroub odpovídá návrhovým kritériím a splňuje zadané požadavky. Výsledné hodnoty životnosti šroubu jsou dostatečné. Nicméně reálné hodnoty mohou být odlišné z důvodu rozdílných hodnot střední síly a otáček. Dalším faktorem životnosti je závislost na čistotě prostředí a mazání šroubu.

## 5.2.2 Motor osy Y

Návrh pohonu motoru bude vycházet z literatury uvedené níže a z poznatků při výpočtu osy Z. Při řešení bude posouzeno statické, dynamické a kinematické hledisko motoru. Na závěr bude provedeno zhodnocení výsledných parametrů s parametry motoru a doporučena vhodnost využití. Schéma osy Z je zobrazeno na Obr.23. [5]



Obrázek 23: Schéma spojení motoru na ose Y

Tab 14) Vstupní veličiny pro výpočet motoru osy Y

Veličina	Velikost
Účinnost valivého vedení ( $\eta_1$ )	0,98 [-]
Účinnost uložení kuličkového šroubu ( $\eta_2$ )	0,94 [-]
Účinnost kuličkového šroubu s maticí ( $\eta_3$ )	0,92 [-]
Součinitel tření ve vodících plochách ( $f_1$ )	0,005 [-]
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukováný na poloměr šroubu ( $f_2$ )	0,003[-]
Úhel sklonu ( $\alpha$ )	0°

### Výpočet statického hlediska

#### Výpočet celkové účinnosti

$$\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,98 \cdot 0,94 \cdot 0,92 = 0,85$$

Kde  $\eta_c$  [-] je celková účinnost pohybového mechanismu na ose Y.

#### Určení statického momentu

$$M_{ms} = \frac{F_{ks} \cdot P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{94,2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} = 0,083 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_{ms}$  [N·m] je moment motoru ze statického hlediska.

### Kinematické hledisko

#### Lineární zrychlení

$$a = \frac{v_r \cdot 60^{-1}}{t_p} = \frac{15 \cdot 60^{-1}}{0,2} = 1,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

kde  $a$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] je lineární zrychlení stolu.

#### Úhlové zrychlení motoru

$$\varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{P \cdot 10^{-3}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,25}{5 \cdot 10^{-3}} = 1570,8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

kde  $\varepsilon_m$  [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$ ] je úhlové zrychlení motoru.

## Dynamické hledisko

### Moment od přesouvaných hmot

$$M_g = \frac{m_i \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{21,5 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos(0) \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c \cdot 10^3} = 0,00069 \text{ Nm}$$

kde  $M_g$  [N·m] je ztrátový moment od přesouvaných hmot.

### Síla předepnutí kuličkového šroubu

$$F_p = 0,35 \cdot F_{ks} = 0,8 \cdot 94,2 = 33 \text{ N}$$

kde  $F_p$  [N] je síla od předepnutí kuličkového šroubu.

### Ztrátový moment kuličkového šroubu

$$\begin{aligned} M_{zks} &= \frac{F_p \cdot P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \cdot (1 - \eta_1^2) + \frac{m_i \cdot g \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \cos(\alpha) \cdot d_k \cdot 10^{-3}}{2} \\ &= \frac{52,19 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} \cdot (1 - 0,92^2) \\ &\quad + \frac{21,5 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos(0) \cdot 0,0129 \cdot 0,003 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,0048 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

kde  $M_{zks}$  [N·m] je ztrátový moment kuličkového šroubu.

### Celkový moment redukováný na hřídeli motoru

$$M_{crm} = M_g + M_{zks} = 0,00069 + 0,0048 = 0,0057 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_{crm}$  [N·m] je celkový redukováný moment na hřídeli motoru.

### Redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot

$$J_m = m_i \cdot \left( \frac{P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 21,5 \cdot \left( \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

kde  $J_m$  [kg·m<sup>2</sup>] je redukováný moment setrvačnosti od posuvných hmot.

### Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídeli motoru

$$\begin{aligned} J_{rhm} &= J_{mot} + J_{kš} + J_s + J_m = 53 \cdot 10^{-6} + 1,66 \cdot 10^{-5} + 3,5 \cdot 10^{-6} + 1,32 \cdot 10^{-5} \\ &= 8,63 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

kde  $J_{rhm}$  [kg·m<sup>2</sup>] je celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru

$J_{mot}$  [kg·m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti motoru. Hodnota zjištěna od výrobce motoru.

$J_{kš}$  [kg·m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti kuličkového šroubu. Hodnota zjištěna z modelu.

$J_s$  [kg·m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti hřídelové spojky. Hodnota zjištěna z modelu.

### Potřebný moment motoru z dynamického hlediska

$$M_m = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{crm} = 8,63 \cdot 10^{-5} \cdot 1570,8 + 0,0057 = 0,143 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_m$  [N·m] je potřebný moment motoru.

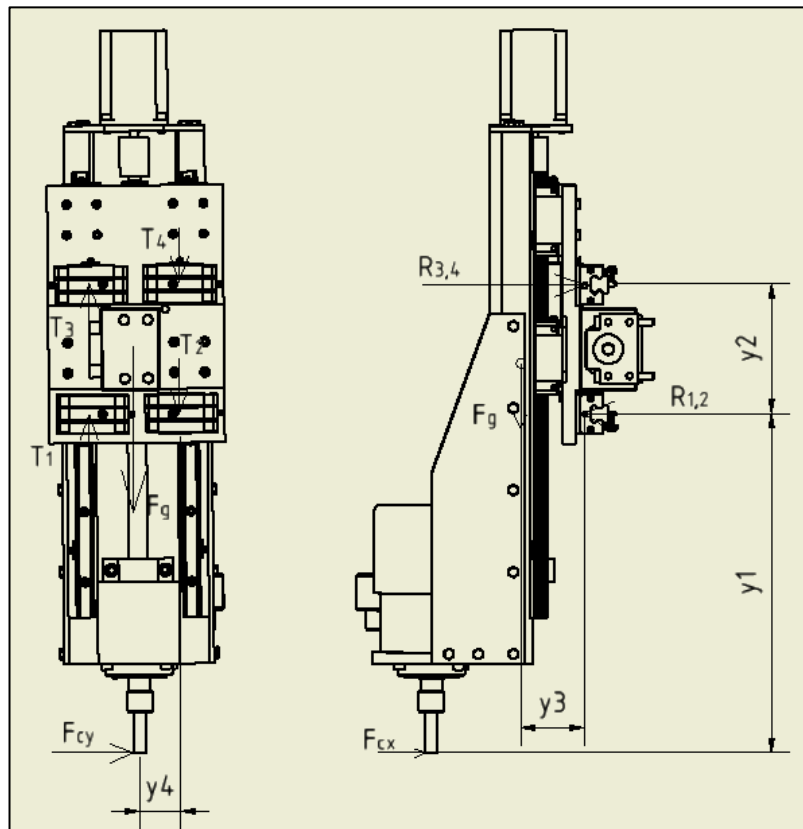
$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{8,63 \cdot 10^{-5}}{48 \cdot 10^{-6}} = 1,8$$

Kontrola dynamických poměrů motoru, kdy se výsledná hodnota musí nacházet v intervalu od 1,5 do 3. Navržený motor vyhovuje zadaným podmínkám dynamického

poměru. Z uvedených výsledků vyplývá vhodnost využití motoru SX23-2727 pro využití na ose Y. Motor SX-2727 dosahuje statického výkonu 2,7 Nm a hmotnosti 1,18 Kg. [28]

### 5.2.3 Lineární vedení osy Y

Výpočet bude proveden dle katalogu výrobce HIWIN a bude vycházet ze schématického znázornění (Obr.) s vyznačeným silovým zatížením a z poznatků z výpočtů osy Z. Velikost vzdáleností z je volena ze 3D modelu tak aby bylo vedení co nejvíce namáháno. [16]



Obrázek 24: Schéma zatížení lineárního vedení osy Y

Tab 15) Vstupní parametry pro výpočet vedení v ose Y

Veličina	Velikost
Vzdálenost $y_1$	288 mm
Vzdálenost $y_2$	110 mm
Vzdálenost $y_3$	70 mm
Vzdálenost $y_4$	32 mm
Statická únosnost $C_{v0}$	16970 N
Dynamická únosnost $C_{v\text{dyn}}$	11380 N

### Radiální zatížení vozíku

$$R_1 = R_2 = \frac{F_g \cdot y_3 + F_{cx} \cdot y_1}{2 \cdot y_2} + \frac{F_{cx}}{2} = \frac{21,5 \cdot 9,81 \cdot 0,07 + 94,3 \cdot 0,288}{2 \cdot 0,11} + \frac{94,3}{2} = 211,9 \text{ N}$$

$$R_3 = R_4 = \frac{F_g \cdot y_3 + F_{cx} \cdot y_1}{2 \cdot y_2} = \frac{21,5 \cdot 9,81 \cdot 0,07 + 94,3 \cdot 0,288}{2 \cdot 0,11} = 164,8 \text{ N}$$

### Tečné zatížení vozíku

$$T_1 = T_3 = \frac{F_{cy} \cdot y_1 - F_g \cdot y_3}{2 \cdot (y_4 + y_4)} + \frac{F_g}{2} = \frac{94,3 \cdot 0,288 - 21,5 \cdot 9,81 \cdot 0,032}{2 \cdot 0,118} + \frac{21,5 \cdot 9,81}{2} = 158,1 \text{ N}$$

$$T_2 = T_4 = \frac{F_{cy} \cdot y_1 - F_g \cdot y_3}{2 \cdot (y_4 + y_4)} = \frac{94,3 \cdot 0,288 - 21,5 \cdot 9,81 \cdot 0,07}{2 \cdot (0,032 + 0,032)} = 52,6 \text{ N}$$

kde  $F_{cy}$  [N] je řezná síla.  $F_g$  [N] je gravitační zatížení hmot v ose Y a radiální a tečné síly [N] jsou odvozeny z Obr.24.

### Statically ekvivalentní zatížení

$$P_e = R_1 + T_1 = 211,9 + 158 = 370 \text{ N}$$

kde  $P_e$  [N] je staticky ekvivalentní zatížení, vypočítané z maximálních hodnot radiální a tečné síly.

### Statický bezpečnostní faktor

$$f = \frac{C_{vo}}{P_e} = \frac{16970}{370} = 45,8$$

kde  $f$  [-] je statický ekvivalentní faktor, která je určována výrobcem a pro normální zatížení by měla dosahovat minimální hodnoty 3. Z porovnání je zjištěno že vedení vyhovuje.

### Trvanlivost vozíku v délkové jednotce

$$L_v = \left( \frac{f_t \cdot f_H \cdot C_{vdyn}}{f_w \cdot P_e} \right)^2 = \left( \frac{1 \cdot 1 \cdot 11380}{1,2 \cdot 369,9} \right)^2 = 8,4 \cdot 10^8 \text{ m}$$

kde  $L_v$  [m] je trvanlivost nejvíce zatíženého vozíku v délkové jednotce,  $f_t$  [-] faktor teploty (hodnota 1 pro normální podmínky),  $f_H$  [-] faktor tvrdosti (normovaná hodnota 1 pro běžné tvrdosti),  $f_w$  [-] faktor zatížení, pro rychlosti posuvu do  $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  je hodnota stanovena na 1,2.

### Trvanlivost vozíku v časové jednotce

$$L_{vh} = L_v \cdot \frac{100000}{v_f \cdot 60} = 8,4 \cdot 10^8 \cdot \frac{100000}{927,87 \cdot 60} = 1,51 \cdot 10^9 \text{ h}$$

kde  $L_{vh}$  [h] je hodnota trvanlivosti vozíku v časové jednotce.

Z vypočítaných hodnot jde vidět, že lineární vedení je předimenzované. Nicméně reálné hodnoty stejně jako u návrhu kuličkového šroubu budou nižší z důvodu čistoty prostředí a kvalitou mazání. Výsledky stejně jako v případě osy Z dosahují vysokých hodnot trvanlivosti. V katalogů výrobce HIWIN se jedná o nejmenší možný rozměr lineárního vedení. Lineární vedení bude zvoleno i z důvodu vlastnění těchto vedení a využití ze skladu.



### 5.3 Návrh osy X

V následující kapitole budou výpočetně ověřena vhodnost využití posuvového mechanismu, motoru a lineárního vedení pro osu X. Při návrhu bude využíváno zkušeností získaných při realizaci osy Z a Y.

#### 5.3.1 Posuvový mechanismus osa X

Pro posuvový mechanismus bude uvažováno stejně jako na osách Z a Y s mechanismem kuličkový šroub s maticí. Kuličkový šroub bude zvolen o průměru 16 mm. Při výpočtech bude vycházeno z informací od výrobce HIWIN a s podporou literatury. Základní parametry pro výpočty jsou uvedeny v Tab. 13. [5, 16]

Tab 16) Vstupní parametry pro výpočet šroubu v ose X

Veličina	Velikost
Průměr kuličkového šroubu (d)	16 mm
Malý průměr kuličkového šroubu (d <sub>k</sub> )	12,9 mm
Stoupání šroubu (P)	5 mm
Dynamická únosnost (C <sub>dyn</sub> )	7320 N
Statická únosnost (C <sub>o</sub> )	12470 N
Maximální otáčkový faktor (D <sub>nmax</sub> )	70000
Koeficient uložení (k <sub>d</sub> )	1,88
Koeficient závislosti na uložení (k <sub>k</sub> )	2,05
Vzdálenost mezi ložisky (l <sub>d</sub> )	720 mm
Nepodepřená délka hřídele (l <sub>k</sub> )	530 mm
Gravitační zrychlení (g)	9,81 m/s <sup>2</sup>
Rychloposuv (v <sub>r</sub> )	15 m/min
Doba rozběhu (t <sub>r</sub> )	0,2 s

#### Výpočet maximálních otáček šroubu

$$n_r = \frac{v_r \cdot 10^3}{P} = \frac{15 \cdot 10^3}{5} = 3000 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_r$  [min<sup>-1</sup>] jsou maximální otáčky kuličkového šroubu pro zvolené parametry stroje.

#### Kontrola maximálních otáček

$$n_k = \frac{k_d \cdot d_k}{l_d^2} \cdot 10^8 = \frac{1,88 \cdot 12,9}{720^2} \cdot 10^8 = 4678,2 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_k$  [min<sup>-1</sup>] jsou kritické otáčky kuličkového šroubu.

#### Maximální otáčky

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 4678,2 = 3742 \text{ min}^{-1}$$

kde  $n_{max}$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou maximální otáčky kuličkového šroubu, které by neměli přesáhnout 80% kritických otáček.

Pro posouzení vhodnosti šroubu musí platit  $n_r < n_{max} = 3000 < 3742 \Rightarrow$  kuličkový šroub VYHOVUJE

### Kontrola vzpěrné tuhosti

$$F_{ks} = F_{cf} = 94,29 \text{ N}$$

kde  $F_{ks}$  je axiální statická síla působící na kuličkový šroub.

$$F_{kd} = m_i \cdot \left( \frac{v_r}{t_p} \right) = 100 \cdot \left( \frac{15}{0,2} \right) = 7500 \text{ N}$$

kde  $F_{kd}$  je axiální síla působící při rozběhu motoru na hodnotu rychloposuvu.

### Statická axiální síla na šroub

$$F_k = \frac{k_k \cdot d_k^4}{l_k^2} \cdot 10^5 = \frac{2,05 \cdot 12,9^4}{530^2} \cdot 10^5 = 20210 \text{ N}$$

kde  $F_k$  [N] je maximální teoretická dovolená axiální síla.

### Maximální axiální zatížení šroubu

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k = 0,5 \cdot 20210 = 10105 \text{ N}$$

kde  $F_{kmax}$  [N] je maximální dovolená provozní axiální síla

Z výsledků vychází že  $F_{kd}$  a  $F_{ks} < F_{kmax} \Rightarrow$  kuličkový šroub splňuje požadavky na axiální zatížení.

### Kontrola otáčkového faktoru

$$d_n = d \cdot n_r = 16 \cdot 3000 = 48000$$

kde [-] je otáčkový faktor kuličkového šroubu.

Musí platit  $d_n < D_{nmax} = 48000 < 70000 \Rightarrow$  kuličkový šroub VYHOVUJE

### Kontrola životnosti

$$L = \left( \frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot 10^6 = \left( \frac{7320}{1200} \right)^3 \cdot 10^6 = 2,26 \cdot 10^8 \text{ otáček}$$

kde L [otáčky] je životnost kuličkového šroubu v otáčkách.

$F_m$  [N] je střední zatížení kuličkového šroubu. Hodnota odhadnuta.

$$L_h = \left( \frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_m \cdot 60} = \left( \frac{7320}{1200} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{600 \cdot 60} = 6,3 \cdot 10^3 \text{ h}$$

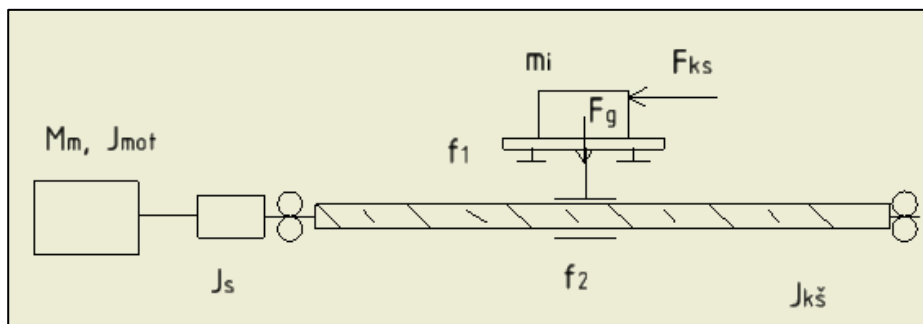
kde  $L_h$  [h] je životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách.

$n_m$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou střední otáčky různých provozních režimů. Hodnota odhadnuta.

Z vypočítaných hodnot vyplývá, že zvolený kuličkový šroub odpovídá návrhovým kritériím a splňuje zadané požadavky. Výsledné hodnoty životnosti šroubu jsou dostatečné. Nicméně reálné hodnoty mohou být odlišné z důvodu rozdílných hodnot střední síly a otáček. Dalším faktorem životnosti je závislost na čistotě prostředí a mazání šroubu.

### 5.3.2 Pohon osy X

Návrh pohonu motoru bude vycházet z literatury uvedené níže a z poznatků při výpočtu osy Z a Y. Při řešení bude posouzeno statické, dynamické a kinematické hledisko motoru. Na závěr bude provedeno zhodnocení výsledných parametrů s parametry motoru a doporučena vhodnost využití. Schéma osy X je zobrazeno na Obr.23. [5]



Obrázek 25: Schéma pohonu na ose X

Tab 17) Vstupní veličiny pro výpočet motoru osy X

Veličina	Velikost
Účinnost valivého vedení ( $\eta_1$ )	0,98 [-]
Účinnost uložení kuličkového šroubu ( $\eta_2$ )	0,94 [-]
Účinnost kuličkového šroubu s maticí ( $\eta_3$ )	0,92 [-]
Součinitel tření ve vodících plochách ( $f_1$ )	0,005 [-]
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukovaný na poloměr šroubu ( $f_2$ )	0,003[-]
Úhel sklonu ( $\alpha$ )	0°

#### Výpočet statického hlediska

##### Výpočet celkové účinnosti

$$\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,98 \cdot 0,94 \cdot 0,92 = 0,85$$

Kde  $\eta_c$  [-] je celková účinnost pohybového mechanismu na ose X.

##### Určení statického momentu

$$M_{ms} = \frac{F_{ks} \cdot P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{94,2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} = 0,083 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_{ms}$  [N·m] je moment motoru ze statického hlediska.

#### Kinematické hledisko

##### Lineární zrychlení

$$a = \frac{v_r \cdot 60^{-1}}{t_p} = \frac{15 \cdot 60^{-1}}{0,2} = 1,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

kde  $a$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] je lineární zrychlení stolu.

## Úhlové zrychlení motoru

$$\varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{P \cdot 10^{-3}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,25}{5 \cdot 10^{-3}} = 1570,8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

kde  $\varepsilon_m$  [rad·s<sup>-2</sup>] je úhlové zrychlení motoru.

### Dynamické hledisko

#### Moment od přesouvaných hmot

$$M_g = \frac{m_i \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos(0) \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c \cdot 10^3} = 0,0046 \text{ Nm}$$

kde  $M_g$  [N·m] je ztrátový moment od přesouvaných hmot.

#### Síla předepnutí kuličkového šroubu

$$F_p = 0,35 \cdot F_{ks} = 0,35 \cdot 94,2 = 33 \text{ N}$$

kde  $F_p$  [N] je síla od předepnutí kuličkového šroubu.

#### Ztrátový moment kuličkového šroubu

$$\begin{aligned} M_{zks} &= \frac{F_p \cdot P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \cdot (1 - \eta_1^2) + \frac{m_i \cdot g \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \cos(\alpha) \cdot d_k \cdot 10^{-3}}{2} \\ &= \frac{33 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} \cdot (1 - 0,92^2) \\ &\quad + \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos(0) \cdot 0,0129 \cdot 0,003 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,0049 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

kde  $M_{zks}$  [N·m] je ztrátový moment kuličkového šroubu.

#### Celkový moment redukovaný na hřídeli motoru

$$M_{crm} = M_g + M_{zks} = 0,0046 + 0,0049 = 0,0095 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde  $M_{crm}$  [N·m] je celkový redukovaný moment na hřídeli motoru.

#### Redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot

$$J_m = m_i \cdot \left( \frac{P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 100 \cdot \left( \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 6,33 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

kde  $J_m$  [kg·m<sup>2</sup>] je redukovaný moment setrvačnosti od posuvných hmot.

#### Celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídeli motoru

$$\begin{aligned} J_{rhm} &= J_{mot} + J_{kš} + J_s + J_m = 53 \cdot 10^{-6} + 1,66 \cdot 10^{-5} + 3,5 \cdot 10^{-6} + 6,33 \cdot 10^{-5} \\ &= 1,364 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

kde  $J_{rhm}$  [kg·m<sup>2</sup>] je celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru

$J_{mot}$  [kg·m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti motoru. Hodnota zjištěna od výrobce motoru.

$J_{kš}$  [kg·m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti kuličkového šroubu. Hodnota zjištěna z modelu.

$J_s$  [kg·m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti hřídelové spojky. Hodnota zjištěna z modelu.

#### Potřebný moment motoru z dynamického hlediska

$$M_m = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{crm} = 1,364 \cdot 10^{-4} \cdot 1570,8 + 0,0095 = 0,22 \text{ N} \cdot \text{m}$$

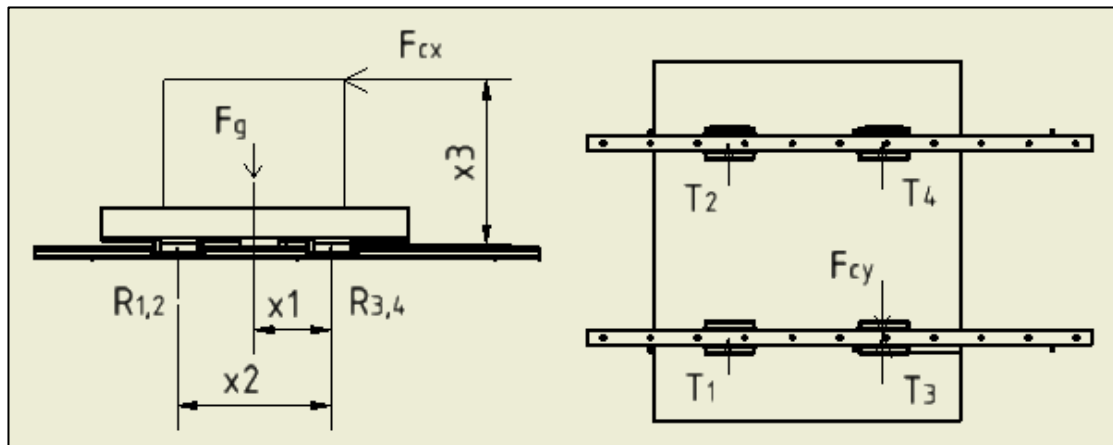
kde  $M_m$  [N·m] je potřebný moment motoru.

$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{1,364 \cdot 10^{-4}}{48 \cdot 10^{-6}} = 2,8$$

Kontrola dynamických poměrů motoru, kdy se výsledná hodnota musí nacházet v intervalu od 1,5 do 3. Navržený motor vyhovuje zadaným podmínkám dynamického poměru. Z uvedených výsledků vyplývá vhodnost využití motoru SX23-2727 pro využití na ose Y. Motor SX-2727 dosahuje statického výkonu 2,7 Nm a hmotnosti 1,18 Kg. [28]

### 5.3.3 Lineární vedení osy X

Výpočet bude proveden stejně jako u předešlých os a bude vycházet ze schématického znázornění (Obr.24) s vyznačeným silovým zatížením a z poznatků z výpočtů osy Z a Y. Velikost vzdáleností x je volena ze 3D modelu tak aby bylo vedení co nejvíce namáháno. Lineární vedení pro tuto osu bylo zvoleno od firmy THK, typové označení THK SR20W. [29]



Obrázek 26: Schéma zatížení lineárního vedení osy X

Tab 18) Vstupní parametry pro výpočet vedení v ose X

Veličina	Velikost
Vzdálenost $x_1$	100 mm
Vzdálenost $x_2$	200 mm
Vzdálenost $x_3$	230 mm
Statická únosnost $C_{v0}$	28600 N
Dynamická únosnost $C_{v\text{dyn}}$	19200 N

#### Radiální zatížení vozíku

$$R_1 = R_2 = \frac{F_g}{2} - \frac{F_g \cdot x_1 - F_{cx} \cdot x_3}{2 \cdot x_2} = \frac{100 \cdot 9,81}{2} - \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 0,1 - 94,3 \cdot 0,23}{2 \cdot 0,2} = 299,5 \text{ N}$$

$$R_3 = R_4 = \frac{F_g \cdot x_1 - F_{cx} \cdot x_3}{2 \cdot x_2} = \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 0,1 - 94,3 \cdot 0,23}{2 \cdot 0,2} = 191 \text{ N}$$

#### Tečné zatížení vozíku

$$T_3 = \frac{F_{cy}}{2} = \frac{94,3}{2} = 47,15 \text{ N}$$

kde  $F_{cy}$  [N] je řezná síla.  $F_g$  [N] je gravitační zatížení hmot v ose Y a radiální a tečné síly [N] jsou odvozeny z Obr.24.

## Statically equivalent loading

$$P_e = R_1 = 299 \text{ N}$$

where  $P_e$  [N] is the statically equivalent loading, calculated from maximum values of radial and tangential forces.

### Static safety factor

$$f = \frac{C_{vo}}{P_e} = \frac{28600}{299} = 82$$

where  $f$  [-] is the static equivalent factor, which is determined by the manufacturer and for normal loading it should reach minimum values of 3. From comparison it is found that the bearing meets the requirements.

### Bearing life in length units

$$L_v = \left( \frac{f_t \cdot f_H \cdot C_{vdyn}}{f_w \cdot P_e} \right)^2 = \left( \frac{1 \cdot 1 \cdot 19200}{1,2 \cdot 299} \right)^2 = 4,92 \cdot 10^9 \text{ m}$$

where  $L_v$  [m] is the bearing life of the most loaded bearing in length units,  $f_t$  [-] factor of temperature (value 1 for normal conditions),  $f_H$  [-] factor of hardness (normalized value 1 for normal hardness),  $f_w$  [-] factor of loading, for speeds up to  $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  the value is set at 1,2.

### Bearing life in time units

$$L_{vh} = L_v \cdot \frac{100000}{v_f \cdot 60} = 8,4 \cdot 10^8 \cdot \frac{100000}{927,87 \cdot 60} = 8,8 \cdot 10^9 \text{ h}$$

where  $L_{vh}$  [h] is the bearing life of the bearing in time units.

From the calculated values it can be seen that the linear bearing is underdimensioned. Not only the real values, but also the values of the ball bearing screw will be lower due to the cleanliness of the environment and the quality of lubrication. In this case, the linear bearing was increased due to the unused bearing and its use in the machine. From the results it is clear that linear bearings are overdimensioned in all cases. It is about the second smallest bearing from the company THK. [29]



## 6 KONSTRUKCE FRÉZKY

Kapitola konstrukce frézky rozebere realizovanou konstrukci frézky. V konstrukci frézky jsou zohledněny navrhnuté komponenty z předešlých kapitol.

Při návrhu základních součástí stroje jako je základová deska, příčník a sloupy jsou kladeny vysoké požadavky na tuhost, odolnost proti opotřebení a dynamickou stálost. Na těchto požadavcích závisí ve velké míře přesnost stroje. [1, 3]

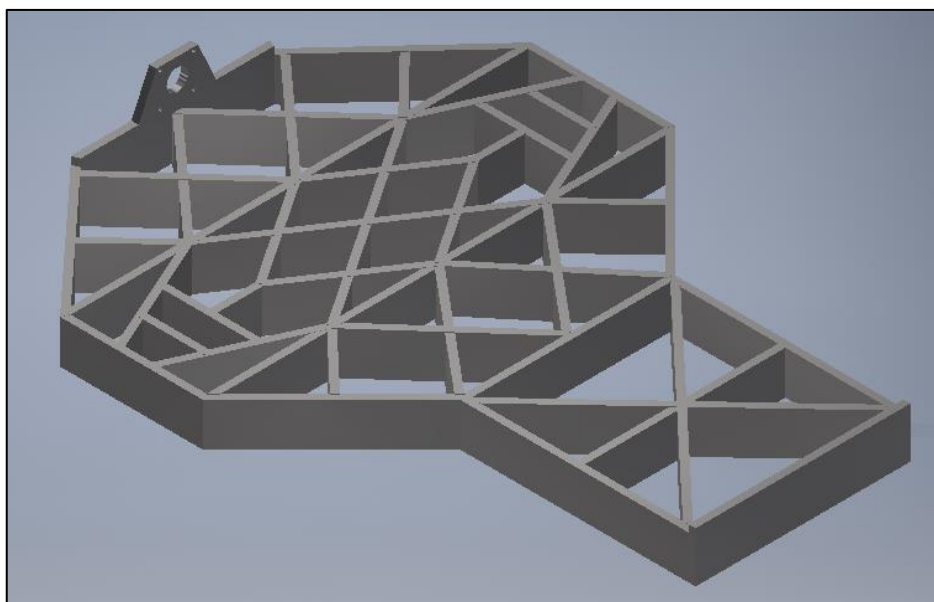
Základ portálové CNC hobby frézky tvoří základová deska, na které budou upevněny sloupy. Na sloupech upevníme příčník pro vedení vřeteníku a vřeteník s vřetenem. Na výběr máme z několika variant materiálů. V dnešní době se využívá ocel, litina případně různé polymerbetony. [1, 3]

Ke konstrukci stroje byl zvolen ocelový materiál. Konstrukce se bude skládat ze svařenců. Jednotlivé díly budou upevněny pomocí šroubových spojů. Níže budou popsány základní uzly navrhnutého stroje.

### 6.1 Základová deska

Jedná se o spodní část stroje, kde se nachází dosedací plochy pro připojení sloupů a lineárních vedení a domečků pro kuličkové šrouby.

Základová deska je tvořena žebrováním, které tvoří základ stroje. Žebra jsou vyrobená z ploché oceli 60x10 mm. Žebra (Obr.27) jsou k sobě přivařena pro zvýšení tuhosti celého stroje. Čelo základové desky je připraveno pro montáž krokového motoru pro pohon posuvového mechanismu v ose X. Polotovár slouží plochá ocel 140x10 mm s délkou 278 mm.

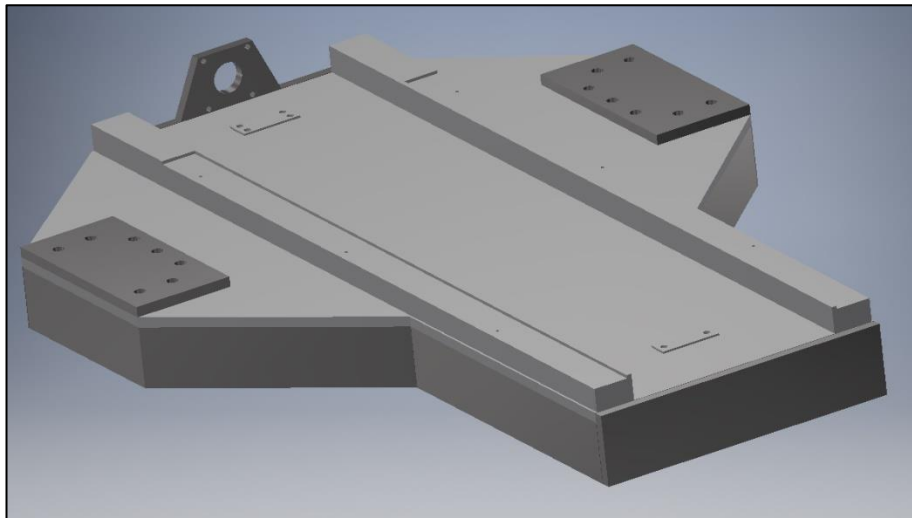


Obrázek 27: Žebrování základové desky

Na žebrování je přivařena ocelová deska o tloušťce 10 mm. Na desku jsou postupně přivařeny ocelové desky o rozměrech 100x200 mm, které slouží k montáži sloupů. Desky jsou přivařeny z důvodu následného broušení stykových hran sloupů, kde bude ubírán



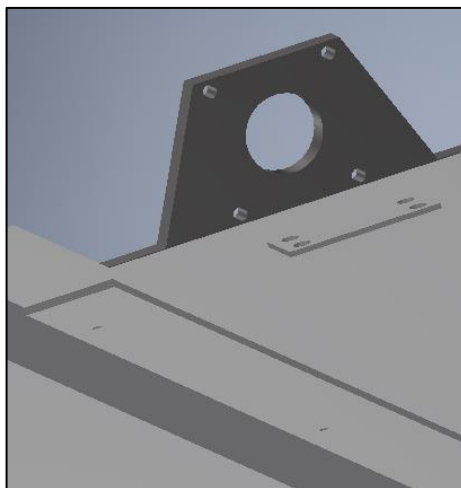
materiál. Na desce se také nachází ocel 26 x 40 mm, která poslouží k montáži kolejnic lineárního vedení. (viz. Obr.28)



Obrázek 28: Základová deska stroje

Z důvodu snadného usazení ložiskových domků, budou k desce přivařeny ocel pásky o tloušťce 2 mm. Tento materiál bude sloužit pro úběr při finálním ustavování a frézování stykových ploch. Viz. Obr. 29

Po svaření všech komponent bude součást vyžehána pro snížení pnutí ve svarech. Tento proces je potřebný vždy po operaci svařování. Při žihání se počítá s mírnou deformací součástí. Kvůli tomu bude finální obrobení funkčních ploch, drážek pro kolejnice, děr a závitů řešeno až po vyžehání součásti.

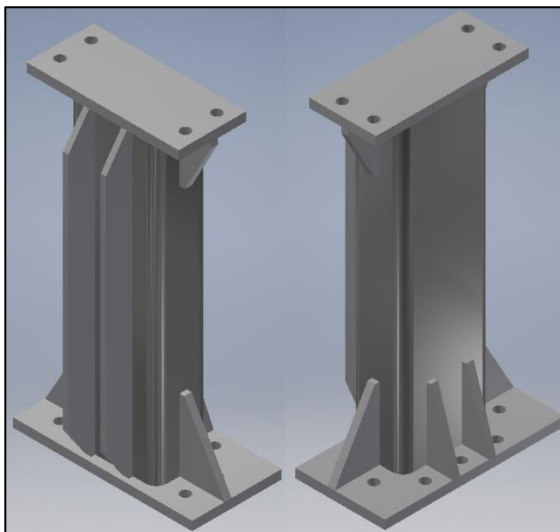


Obrázek 29: Detail plochy pro domky a drážky kolejnic

## 6.2 Sloupy

Sloupy tvoří oporu portálové frézky a přenášejí síly od frézování z příčnicku do základové desky stroje. Sloupy jsou vyrobeny ze silnostěnného jecku 100x60x6 mm. (Obr. 30) Dosedací plochy ke stolu a příčnicku tvoří ocel tloušťky 10 mm, která je přivařena ke sloupu. Pro vyztužení jsou spoje vyztuženy žebry, které zpevní svarový spoj. Pro zajištění větší stability stroje v ose Y obsahuje sloup svislé žebra, které jsou také navařeny na jecku. Po svaření

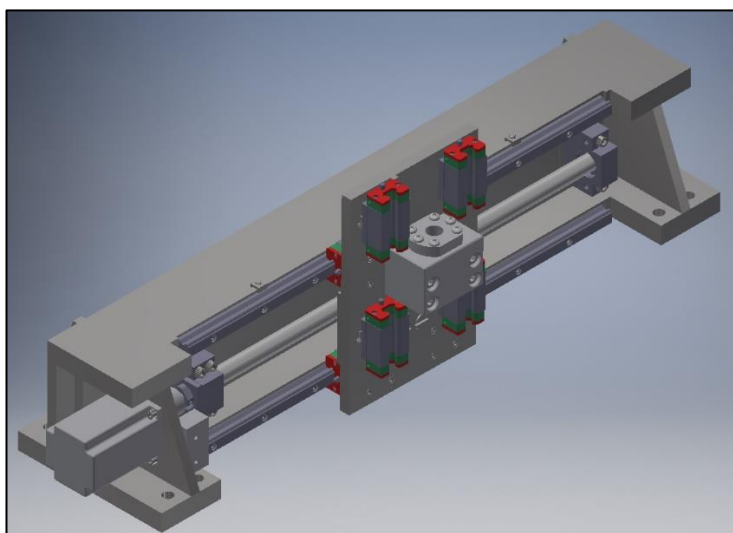
komponent musí být sloupy žíhány pro snížení pnutí. Před montáží budou obrobena dosedací plochy s dodržáním předepsaných geometrických tolerancí.



Obrázek 30: Sloupy CNC frézky

### 6.3 Příčník

Příčník je svařenec z oceli ve tvaru I, který je na jedné straně uzavřen pro zvýšení mechanických vlastností celého příčníku. Příčník tvoří dva výpalky z 20 mm oceli, které jsou spojeny dvěma žebry o tloušťce 10 mm. Příčník je navíc vyztužen v místě spojů ke sloupu. Na příčníku budou navařeny podložky pod ložiskové domky. Po svaření všech částí bude provedeno žíhání pro snížení pnutí. Na Obr. 31 je zobrazen příčník s umístěným lineárním vedením a kuličkovým šroubem.

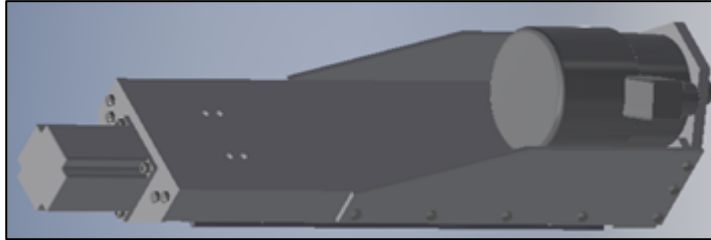


Obrázek 31: Příčník

### 6.4 Vřeteník

Vřeteník je řešen jako svařenec, který obsahuje spojené části šroubovými spoji. Základ vřeteníku tvoří plochá deska s tloušťkou 10 mm. Na kterou budou navařeny 2 kusy ocelových tyčí 25x27 mm, které zpevní konstrukci vřeteníku a 2 ks podložek pod ložiskové domky. Po vyžíhání pro snížení pnutí bude tato část obrobena na jedno pnutí, kdy se vyfrézuje drážka pro

lineární vedení a srovnají se plochy pro ložiskové domky. Vřeteno ATAS bude uloženo ve vyfrézované díře a připevněné pomocí čtyř šroubů ke konzole ve tvaru L, která bude přišroubována k základu vřeteníku. Toto řešení bylo vybráno pro usnadněnou montáž a ustavování stroje, kdy bude stačit upravovat pouze dosedací plochu vřetene a nebude potřeba speciální přípravky při obrábění. Vřeteník obsahuje vyztužovací desky, které jsou upevněny na okrajích a desku pro uchycení motoru. (viz. Obr.32)

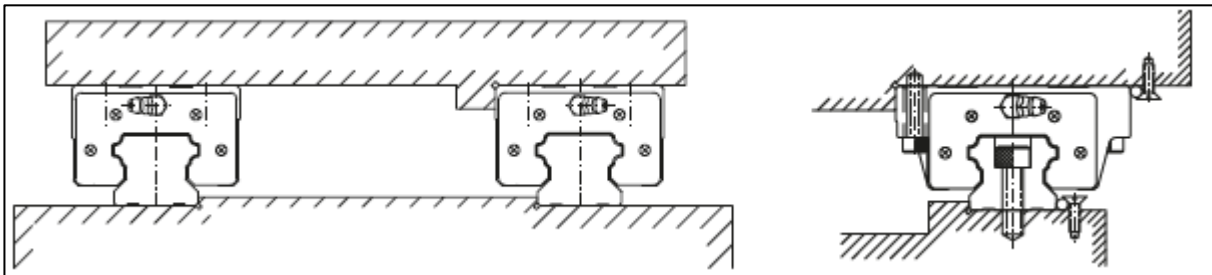


Obrázek 32. Vřeteník frézky

## 6.5 Lineární vedení

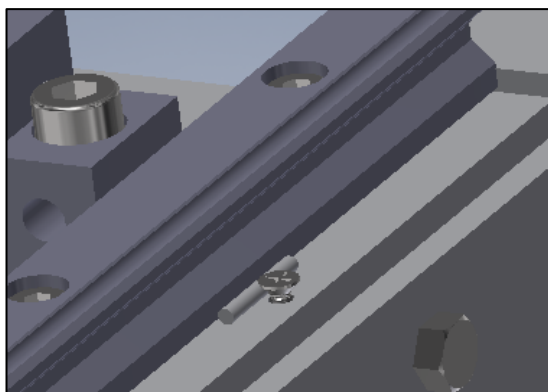
Lineární vedení je provedeno u všech os stejně, liší se pouze rozměry, kdy se u osy X nachází lineární vedení THK SR20W, pro osu Y a Z je využito vedení od společnosti HIWIN typ vozíků HGH15 a vedení HGR15. Pod lineárním vedením je plný profil z oceli, který slouží k vytvoření prostoru pro kuličkovou matici a také pro ustavení vedení.

Podle doporučení výrobce HIWIN bude pro vedení připravena vyfrézovaná referenční hrana, na kterou budou kolejnice vedení při montáži doraženy a následně přichyceny do připravených děr pomocí šroubů M4 x 16 resp. M5 u osy X, které předepisuje výrobce. Oboje kolejnice se doráží na referenční hranu viz. Schéma na Obr.33. [16]



Obrázek 33: Doporučená montáž lineárního vedení a montáž [16]

Na Obr. 33 jde také vidět montáž vozíků. Vždy pro jednu řadu vozíků bude nachystaná referenční hrana, na kterou bude vozík doražen a následně uchycen pomocí šroubů. Pro správné doražení kolejnic a vozíku byla vybrána montážní varianta od výrobce viz. Obr 34. Vedle kolejnic budou vyrobeny závity pro našroubování šroubu s kuželovou hlavou. Následným dotahováním bude šroub tlačit na ocelový váleček, který dotlačí kolejnice, vozíky do požadované polohy. [16]



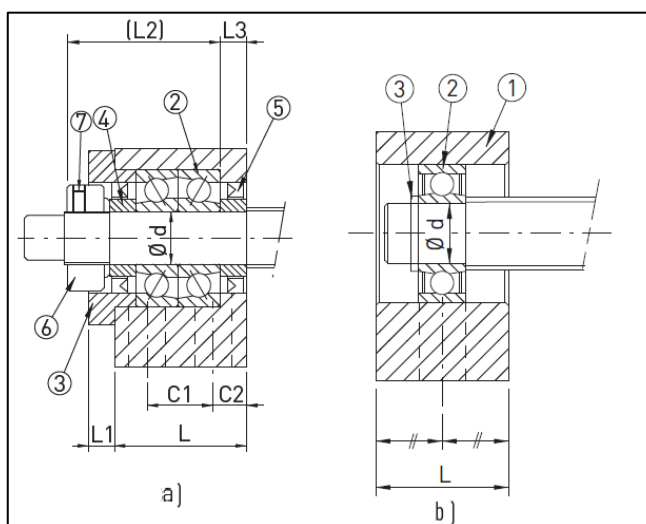
Obrázek 34: Detail realizace montáže vedení

## 6.6 Kuličkové šrouby a pohony

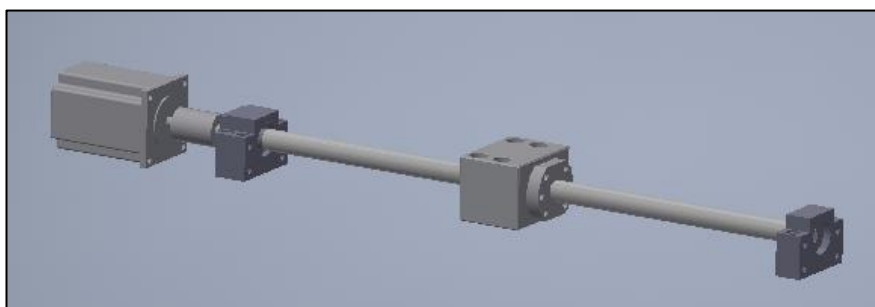
Kuličkové šrouby s maticí jsou realizovány pro celou frézku stejně. Použity jsou kuličkové šrouby od výrobce HIWIN s průměrem šroubu 16 mm. Kuličkové šrouby jsou osazeny v ložiskových domečcích od stejného výrobce. Použitý typ domečku je BK / BF. Ložiskový domeček BK obsahuje dvojici ložisek s kosoúhlým stykem pro umístění u pohonu.

Pevné uložení BK obsahuje ocelové těleso domečku, dvě ložiska (7001A) s kosoúhlým stykem, distanční kroužky a pojistňovací matici. BF ložiskový domeček obsahuje radiální ložisko (6000 ZZ) pro volné uložení, těleso domečku z oceli a pojistný kroužek. (viz. Obr. 35)

Opracování hřídele bude provedeno podle doporučení výrobce. Pro BF opracování E5B-12 a pro BK opracování E2B-12. Řez ložiskovými domečky je zobrazen v Obr.35, kde u ložiskového domečku BK je 1) Těleso domečku, 2) Ložisko, 3) Víčko, 4) Distanční kroužek, 5) Těsnění, 6) Pojistná matice, 7) Pojistný šroub. U ložiskového domečku BF je 1) Těleso domečku, 2) Radiální ložisko, 3) Pojistný kroužek.

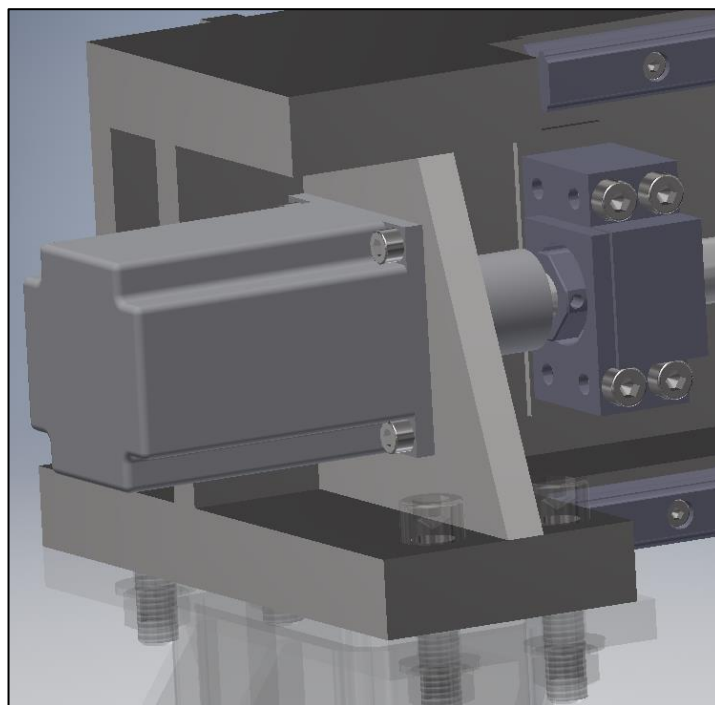


Obrázek 35: Ložiskový domeček a) BK, b) BF



*Obrázek 36: Vizualizace-Kuličkový šroub na ose Y*

Pohon os stroje je realizován pomocí krokového motoru SX23-2727. Motor je spojen s kuličkovým šroubem pomocí pružné spojky. Motory jsou na osách upevněny na konstrukci stroje. Motor obsahuje standardizovanou přírubu. Montáž se provádí pomocí čtyř šroubů. Viz. Obr.37.



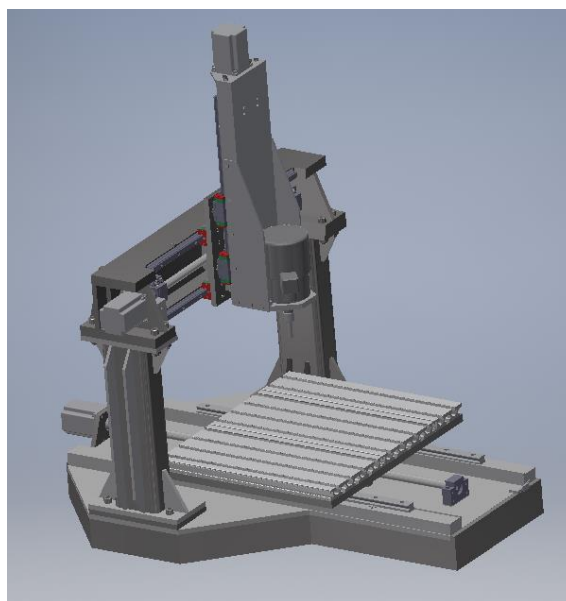
*Obrázek 37: Detail realizace motoru*

## 6.7 Výsledné parametry stroje

V tabulce níže jsou popsány dosažené parametry stroje.

Tab 19) Výsledné parametry stroje

Parametr		Hodnota
Celková velikost (při maximálním zdvihu)		660 x 885 x 960 mm
Velikost pracovního prostoru	Osa X	390 mm
	Osa Y	350 mm
	Osa Z	185 mm
Velikost pracovního stolu		390 x 455 mm
Hmotnost		182 kg
Výkon vřetene		500 W
Maximální průměr nástroje		10 mm
Kleština vřetene		ER16
Obráběný materiál		Hliník, plast, dřevo



Obrázek 38: Vizualizace CNC zfrézky



## 7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl návrh CNC hobby frézky s rešerší v oblasti komerčně dostupných CNC hobby frézek. Rozbor řešené problematiky v rešeršní části práce s následným návrhem variant řešení a výpočtovou zprávou ke zvolenému řešení. Spolu s vytvoření 3D modelu s výkresovou dokumentací k řešeným konstrukčním uzlům.

V úvodu této práce byly rozebrány základní konstrukční koncepce CNC frézovacích strojů. Následně byly na trhu vytipovány dostupně CNC hobby frézky, ke kterým byly uvedeny technické informace těchto strojů. Celkem bylo vybráno 5 frézek u kterých byly technické informace porovnány a zhodnoceny ve znázorňujících grafech. Z těchto informací se vycházelo při volbě základních parametrů stroje.

Po zvolení základních parametrů stroje byly navrženy možné konstrukční varianty řešení. Tyto varianty byly porovnány pomocí multikriteriální analýzy. Z analýzy konstrukčních řešení jsme dostali výslednou konstrukční koncepci CNC frézky. Po této volbě byly rozebrány možné řešení základních uzlů CNC stroje a doporučeny varianty pro konstrukční řešení stroje.

Konstrukční návrh je nejdůležitější částí práce, je zde vypracováno ověření zvolených konstrukčních variant. Na úvod byl proveden výpočet od frézování s následným výběrem vřetene stroje. Dále bylo posouzeno lineární vedení, pohybový mechanismus a pohon. Tento postup byl proveden pro všechny osy CNC frézky.

Po ověření zvolených součástí stroje, jako je lineární vedení, kuličkové šrouby, pohonné jednotky a vřeteno, byl vytvořen 3D model CNC portálové frézky s posuvným stolem. Model doplňuje výkresová dokumentace základních uzlů stroje a kusovník.

Celková práce byla orientována na konstrukční řešení CNC frézky, podle zadaných cílů práce. Tato práce by se dala rozšířit o podrobnější popis ovládání CNC frézky a podrobnější popis elektrických součástí stroje s plánem elektroinstalace. Následně také o řešení bezpečnosti. Případně by se dalo uvažovat o využití netradičních materiálů jako ocelová pěna nebo využití polymerbetonu.



## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BORSKÝ, Václav. Obráběcí stroje. Brno: Nakladatelství VUT, 1992, 216 s. : il., grafy, schémata. ISBN 80-214-0470-1.
- [2] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, s.r.o, 2018, 427 stran : barevné ilustrace, fotografie. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [3] Základy stavby obráběcích strojů [online]. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2020-06-20]. ISBN 978-80-261-0126-0. Dostupné z: [https://old.zcu.cz/export/sites/zcu/pracoviste/vyd/online/Zaklady\\_stavby.pdf](https://old.zcu.cz/export/sites/zcu/pracoviste/vyd/online/Zaklady_stavby.pdf)
- [4] BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991, 214 s. : tabulky, grafy. ISBN 80-214-0361-6.
- [5] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. : ISBN 978-80-260-6780-1.
- [6] CNC routery. Hobbystroje.cz [online]. Blansko [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.hobbystroje.cz/hobbystroje/eshop/1-1-DREVOOBRABECI-STROJE/265-2-CNC-ROUTERY>
- [7] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. Technologie II. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [8] CauCau s.r.o [online]. Bratislava: CauCau, 2020 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://www.cnc1.eu/sk.....2.2.1>
- [9] První hanácká BOW [online]. Olomouc, 2018 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.bow.cz/>
- [10] CNC-STEP [online]. Geldern, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.cnc-step.com/>
- [11] Stepcraft [online]. Menden, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.stepcraft-systems.com/>
- [12] IselGermanyAG [online]. Eichenzell, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.isel.com/en/series-icp-cnc-milling-machine.html>
- [13] FIALA, P., J. JABLONSKÝ a M. MAŇAS. 1994. Vícekriteriální rozhodování. 1. vyd. Praha: Vysoká škola ekonomická v Praze, 1994. ISBN 80-7079-748-7.
- [14] CNC forum [online]. Brno: Novamedia, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/>
- [15] Lineární vodící systémy [online]. Hennlich [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [https://lin-tech.hennlich.cz/fileadmin/user\\_upload/H CZ/Download/Lin-tech/pdf/05\\_GL\\_CZ\\_drylin.pdf](https://lin-tech.hennlich.cz/fileadmin/user_upload/H CZ/Download/Lin-tech/pdf/05_GL_CZ_drylin.pdf)
- [16] Lineární vedení [online]. 2016, 2016(1), 83 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [hiwin.cz](http://hiwin.cz)
- [17] Kuličkové šrouby [online]. 2018, (1), 72 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [hiwin.cz](http://hiwin.cz)
- [18] T.E.A. Technik: Ozubené hřebeny [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/sikmym-ozubenim-1/>
- [19] Regulační pohony: Lineární motory [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.regulacni-pohony.cz/rubrika/linearni-motory/>
- [20] SKALICKÝ, Jiří. Elektrické servopohony. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1978-4.

- [21] ELUC: Krokový motor [online]. Olomouc, 2016 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/809>
- [22] CNCshop [online]. Holasovice, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/>
- [23] Fréza válcovaná čelní [online]. 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [https://www.zps-fn.cz/cz/frezy-valcove-celni-sk/detail/frezy-valcove-celni-dlouhe,-2-brity-do-stredu,-45-,-typ-w,-hladka-stopka,-slinute-karbidy-\(sk\)/](https://www.zps-fn.cz/cz/frezy-valcove-celni-sk/detail/frezy-valcove-celni-dlouhe,-2-brity-do-stredu,-45-,-typ-w,-hladka-stopka,-slinute-karbidy-(sk)/)
- [24] Obráběné materiály [online]. Sandvik coromat, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [25] Výpočtové vztahy a definice pro frézování [online]. Sandvik Coromat, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [26] BRYCHTA, Josef. Výrobní stroje obráběcí. 2. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-1893-1.
- [27] Atas elektromotory [online]. Náchod: 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.atas.cz/>
- [28] Dvoufázové motory řady SX [online]. 2018: Microcon [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [http://www.microcon.cz/PDF082018/motory\\_SX\\_092018.pdf](http://www.microcon.cz/PDF082018/motory_SX_092018.pdf)
- [29] THK SR20 [online]. THK, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [https://tech.thk.com/en/products/pdfs/en\\_a01\\_212.pdf](https://tech.thk.com/en/products/pdfs/en_a01_212.pdf)



## 9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

### 9.1 Seznam zkratek

CNC – Computer numerical control

HIWIN – výrobce pohybové techniky

BK – Ložiskový domeček od výrobce HIWIN

BF – Ložiskový domeček od výrobce HIWIN

3D – 3-rozměrný prostor

HGR – typ vedení od společnosti HIWIN

ER20 – typ kleštiny

### 9.2 Seznam symbolů

$v_c$	[m·min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$D_{cv}$	[mm]	průměr nástroje
$f_z$	[mm]	posuv na zub
$z$	[-]	počet zubů
$a_p$	[mm]	hloubka řezu
$a_e$	[mm]	šířka záběru
$k_{c1}$	[N·mm <sup>2</sup> ]	materiálová měrná řezná síla
$m_c$	[-]	nárůst měrné řezné síly
$\kappa_r$	[°]	úhel nastavení ostří
$n_v$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky vřetena
$v_f$	[mm·min <sup>-1</sup> ]	rychlost posuvu při frézování
$h_m$	[mm]	průměrná tloušťka třísky
$k_{cv}$	[N·mm <sup>2</sup> ]	měrná řezná síla
$P_c$	[W]	potřebný výkon vřetene
$F_c$	[N]	řezná síla vyvozená při frézování
$d$	[mm]	průměr kuličkového šroubu
$d_k$	[mm]	malý průměr kuličkového šroubu
$P$	[mm]	stoupání šroubu
$C_{dyn}$	[N]	dynamická únosnost
$C_o$	[N]	statická únosnost
$D_{nmax}$	[-]	maximální otáčkový faktor
$k_d$	[-]	koeficient uložení
$k_k$	[-]	koeficient závislosti na uložení

$l_d$	[mm]	vzdálenost mezi ložisky
$l_k$	[mm]	nepodepřená délka hřídele
$v_r$	[m·min <sup>-1</sup> ]	rychloposuv
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	gravitační zrychlení
$t_r$	[s]	doba rozběhu
$n_r$	[min <sup>-1</sup> ]	maximální otáčky kuličkového šroubu
$n_k$	[min <sup>-1</sup> ]	kritické otáčky kuličkového šroubu
$n_{max}$	[min <sup>-1</sup> ]	maximální otáčky kuličkového šroubu
$F_{ks}$	[N]	axiální statická síla působící na kuličkový šroub
$F_{kd}$	[N]	axiální síla působící při rozběhu motoru
$F_k$	[N]	maximální teoretická dovolená axiální síla
$F_{kmax}$	[N]	maximální dovolená provozní axiální síla
$d_n$	[-]	otáčkový faktor kuličkového šroubu.
$L$	[otáčky]	životnost kuličkového šroubu v otáčkách.
$F_m$	[N]	střední zatížení kuličkového šroubu
$L_h$	[h]	životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách.
$n_m$	[min <sup>-1</sup> ]	střední otáčky různých provozních režimů
$\eta_1$	[-]	účinnost valivého vedení
$\eta_2$	[-]	účinnost uložení kuličkového šroubu
$\eta_1$	[-]	účinnost kuličkového šroubu s maticí
$f_1$	[-]	součinitel tření ve vodících plochách
$f_2$	[-]	ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu
$\alpha$	[°]	úhel sklonu
$\eta_c$	[-]	celková účinnost
$M_{ms}$	[N·m]	moment motoru ze statického hlediska
$a$	[m·s <sup>-2</sup> ]	lineární zrychlení stolu
$\varepsilon_m$	[rad·s <sup>-2</sup> ]	úhlové zrychlení motoru
$M_g$	[N·m]	ztrátový moment od přesouvaných hmot
$F_p$	[N]	síla od předeprnutí kuličkového šroubu
$M_{zks}$	[N·m]	ztrátový moment kuličkového šroubu
$M_{crm}$	[N·m]	celkový redukovaný moment na hřídeli motoru
$J_m$	[kg·m <sup>2</sup> ]	redukovaný moment setrvačnosti od posuvných hmot
$J_{rhm}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru
$J_{mot}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti motoru
$J_{kš}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti kuličkového šroubu
$J_s$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti hřídelové spojky

$M_m$	[N·m]	potřebný moment motoru.
$z_{1-4}$	[mm]	vzdálenost působící síly
$C_{v0}$	[N]	statická únosnost
$C_{v\text{dyn}}$	[N]	dynamická únosnost
$F_{cy}$	[N]	řezná síla
$F_g$	[N]	gravitační zatížení hmot
$R_{1-4}$	[N]	radiální síla
$T_{1-4}$	[N]	tečná síla
$P_e$	[N]	staticky ekvivalentní zatížení
$f$	[-]	statický ekvivalentní faktor
$L_v$	[m]	trvanlivost nejvíce zatíženého vozíku v délkové jednotce
$f_t$	[-]	faktor teploty
$f_H$	[-]	faktor tvrdosti
$f_w$	[-]	faktor zatížení
$L_{vh}$	[h]	hodnota trvanlivosti vozíku v časové jednotce.
$y_{1-4}$	[mm]	vzdálenost zatížení
$x_{1-4}$	[mm]	vzdálenost zatížení

### 9.3 Seznam tabulek

<b>TAB 1) TABULKA TECHNICKÝCH PARAMETRŮ STROJE [8].....</b>	<b>20</b>
<b>TAB 2) TABULKA TECHNICKÝCH PARAMETRŮ [9] .....</b>	<b>21</b>
<b>TAB 3) TABULKA TECHNICKÝCH SPECIFIKACÍ [10] .....</b>	<b>22</b>
<b>TAB 4) TABULKA TECHNICKÝCH PARAMETRŮ [11] .....</b>	<b>23</b>
<b>TAB 5) TABULKA TECHNICKÝCH VLASTNOSTÍ [12] .....</b>	<b>24</b>
<b>TAB 6) ZÁKLADNÍ PARAMETRY PRO NÁVRH FRÉZKY .....</b>	<b>27</b>
<b>TAB 7) VÝSLEDNÉ HODNOCENÍ NÁVRHŮ KONSTRUKCE .....</b>	<b>30</b>
<b>TAB 8) ZÁKLADNÍ HODNOTY FRÉZOVÁNÍ [23] .....</b>	<b>35</b>
<b>TAB 9) VLASTNOSTI ZVOLENÉHO VŘETENE .....</b>	<b>37</b>
<b>TAB 10) VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET ŠROUBU V OSE Z .....</b>	<b>38</b>
<b>TAB 11) VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET MOTORU Z OSY .....</b>	<b>40</b>
<b>TAB 12) VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET VEDENÍ V OSE Z.....</b>	<b>42</b>
<b>TAB 13) VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET ŠROUBU V OSE Y .....</b>	<b>44</b>
<b>TAB 14) VSTUPNÍ VELIČINY PRO VÝPOČET MOTOU OSY Y .....</b>	<b>46</b>
<b>TAB 15) VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET VEDENÍ V OSE Y .....</b>	<b>48</b>
<b>TAB 16) VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET ŠROUBU V OSE X .....</b>	<b>50</b>

<b>TAB 17) VSTUPNÍ VELIČINY PRO VÝPOČET MOTORU OSY X.....</b>	<b>52</b>
<b>TAB 18) VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET VEDENÍ V OSE X.....</b>	<b>54</b>
<b>TAB 19) VÝSLEDNÉ PARAMETRY STROJE.....</b>	<b>63</b>

## 9.4 Seznam obrázků

Obrázek 1: Konzolová frézka (1 – základny, 2-stojan, 3-konzola, 4-příčný stůl, 5-podélný stůl, 6- vřeteník, 7- základna vřeteníku) [7] .....	17
Obrázek 2: Stolová frézka (1-základní deska, 2-stojan, 3-vřeteník, 4-vřeteno, 5-pracovní stůl, 6-ovládací panel) [7] .....	18
Obrázek 3: Portálová frézka .....	19
Obrázek 4:Kompas F600 [8].....	20
Obrázek 5: Numco SHG 0404 [9] .....	21
Obrázek 6: HIGH-Z S 720/T [10].....	22
Obrázek 7: Stepcraft Q204 [11].....	23
Obrázek 8: isel ICP 4030 [12] .....	24
Obrázek 9: Porovnání pracovní plochy .....	25
Obrázek 10: Porovnání velikosti frézek.....	25
Obrázek 11: Porovnání výkonu vřeten .....	26
Obrázek 12: Porovnání max. posuvů os .....	26
Obrázek 13: Pouzdro kluzného vedení [15] .....	31
Obrázek 14: Kuličkové vedení [16].....	31
Obrázek 15: Schéma kuličkového šroubu s maticí [17] .....	32
Obrázek 16: Pastorek a hřeben [18].....	32
Obrázek 17: Schéma mechanismu šnek a hřeben [3] .....	32
Obrázek 18: Lineární motor [19].....	33
Obrázek 19: Schéma krokového motoru [21].....	34
Obrázek 20: Čelní fréza [23] .....	35
Obrázek 21: Schéma uspořádání pohonu osy Z.....	40
Obrázek 22: Schéma zatížení lineárního vedení osy Z.....	42
Obrázek 23: Schéma spojení motoru na ose Y .....	46
Obrázek 24: Schéma zatížení lineárního vedení osy Y .....	48
Obrázek 25: Schéma pohonu na ose X .....	52
Obrázek 26: Schéma zatížení lineárního vedení osy X .....	54
Obrázek 27: Žebrování základové desky .....	57
Obrázek 28: Základová deska stroje .....	58
Obrázek 29: Detail plochy pro domky a drážky kolejnič .....	58
Obrázek 30: Sloupy CNC frézky .....	59
Obrázek 31: Příčník .....	59
Obrázek 32. Vřeteník frézky.....	60
Obrázek 33: Doporučená montáž lineárního vedení a montáž [16] .....	60
Obrázek 34: Detail realizace montáže vedení.....	61
Obrázek 35: Ložiskový domeček a) BK, b) BF.....	61
Obrázek 36: Vizualizace-Kuličkový šroub na ose Y .....	62
Obrázek 37: Detail realizace motoru .....	62







## 10 SEZNAM PŘÍLOH

CD

3D model

Výkresová dokumentace



# PŘÍLOHY