



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 MALÉ MODELÁŘSKÉ CNC FRÉZKY S PEVNÝM
STOLEM**

DESIGN OF SMALL HOBBY CNC MILLING MACHINE WITH FIXED TABLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Hanzal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2020

diplomové práce Zadání

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Jiří Hanzal
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing. Jan Pavlík, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 malé modelářské CNC frézky s pevným stolem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a konstrukčně zpracujte řešení malé modelářské CNC frézky s pevným stolem pro obrábění dřeva, plastu popřípadě lehkých slitin (Al, Zn, atd.). Rozměrové a výkonnostní charakteristiky budou součástí rešerše a návrhu stroje.

Cíle diplomové práce:

Důkladná analýza problematiky.

Systémový rozbor řešené problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.

Návrh variant řešení a zdůvodnění výběru konkrétního řešení.

Konstrukční návrh zvolené varianty – 3D model.

Výpočtová zpráva.

Výkresová dokumentace vybraných uzlů.

Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tématem této práce je návrh malé modelářské CNC frézky s pevným stolem pro obrábění dřeva, plastu, popřípadě lehkých slitin (Al, Zn atd.). Součástí je i výpočtová zpráva a výkresová dokumentace vybraných uzlů. Začátek této práce je tvořen úvodem do problematiky frézek, jejich rozdělení a následná analýza trhu. Následně jsou navrženy na základě analýzy trhu vstupní parametry a v poslední části se nachází výpočtová zpráva, samotný návrh konstrukce frézky a krátké ekonomické zhodnocení.

ABSTRACT

The topic of this work is the design of a small model CNC milling machine with a fixed table for machining wood, plastic, or light alloys (Al, Zn, etc.). It also includes a calculation report and drawing documentation of selected nodes. The beginning of this work consists of an introduction to the issue of milling machines, their distribution and subsequent market analysis. Subsequently, the input parameters are designed on the basis of market analysis and in the last part there is a calculation report, the design of the milling machine itself and a short economic evaluation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Modelářská frézka, CNC frézka, konstrukce frézky, portálová frézka, spodní gántry, , frézování, kuličkový šroub, lineární vedení.

KEYWORDS

Model milling machine, CNC milling machine, milling machine construction, portal milling machine, bottom gantry,, milling, ball screw, linear guide.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANZAL, Jiří. *Návrh malé modelářské CNC frézky s pevným stolem* [online]. Brno, 2021 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129502>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Pavlík.

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval mému vedoucímu práce, panu Ing. Janu Pavlíkovi, Ph.D. za rady při zpracovávání diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

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

V Brně dne 6.9.2020

.....

Hanzal Jiří

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	ROZDĚLENÍ CNC FRÉZOVACÍCH STROJŮ.....	17
2.1	Konzolové frézky	17
2.2	Stolové frézky	18
2.3	Portálové frézky	18
2.3.1	Spodní gántry.....	18
2.3.2	Horní gántry.....	18
2.3.3	Frézka s pohyblivým stolem.....	19
3	MODELÁŘSKÁ FRÉZKA	20
4	ANALÝZA TRHU.....	21
4.1	Firma Merkur.....	21
4.2	Firma CauCau	22
4.3	Společnost StepCraft.....	23
4.4	Eurazio center	25
4.5	Solidvision	28
4.6	PILART	30
5	VOLBA VSTUPNÍCH PARAMETRŮ	33
6	VOLBA KONCEPCE FRÉZKY	34
6.1	Výběr nejvhodnější koncepce stroje pomocí metody PATTERN	35
6.2	Volba parametrů určených ke srovnání a určení tendence změny.....	35
6.3	Párové porovnání jednotlivých parametrů	35
6.4	Určení váhy významnosti srovnávaných parametrů	36
6.5	Určení pořadí srovnávaných koncepcí strojů.....	37
6.6	Konečné vyhodnocení navržených koncepcí.....	38
7	NÁVRH MODELÁŘSKÉ FRÉZKY.....	39
7.1	Výpočet základních parametrů vřetene – frézování	39
7.2	Výpočet základních parametrů vřetene – vrtání	41
7.3	Volba vřetene	42
7.4	Návrh lineární posuvové soustavy	45
7.4.1	Kuličkové šrouby.....	45
7.4.2	Lineární systémy.....	46
7.4.3	Výpočet osy Z.....	48
7.4.4	Výpočet osy Y	55
7.4.5	Výpočet osy X	62
7.5	Konstrukční návrh modelářské frézky	69
7.5.1	Svařenec stolu.....	69
7.5.2	Konstrukce stolu	70
7.5.3	Spodní portál.....	72
7.5.4	Příčník.....	73
7.5.5	Sáně a vřeteník.....	74
7.5.6	Upevnění motorů, vřetena a desky stolu	76
7.5.7	Krytování	76
7.5.8	Elektronika, kabeláž, řídicí systém.....	76
7.5.9	3D Model.....	77

8	EKONOMICKÉ SHODNOCENÍ	79
9	ZÁVĚR.....	85
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	87
11	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	91
11.1	Seznam zkratk.....	91
11.2	Seznam symbolů.....	91
11.3	Seznam tabulek.....	93
11.4	Seznam obrázků.....	94
12	SEZNAM PŘÍLOH.....	97

1 ÚVOD

V poslední době lze zaregistrovat narůstající poptávku po malých modelářských frézkách nebo jinak nazývané jako hobby frézky. Dnes je možné se setkat s velkým množstvím výrobců zabývajících se touto problematikou, ať už jde o stabilní zavedené firmy, začínající firmy či jednotlivce. U jednotlivců se spíše jedná o začínající projekty než o zavedenou produkci. A z tohoto důvodu, jsem se rozhodl také přispět svým dílem a navrhnout vlastní modelářskou CNC frézku.

Modelářská CNC frézka slouží především pro obrábění měkkých materiálů, jako je například dřevo, plast nebo různé lehké slitiny. Všeobecně mezi hlavní požadavky zákazníka na strojní zařízení, v tomto případě „modeláře“ na modelářskou CNC frézku patří jednoduchost konstrukce, malé nároky na údržbu, v mnohých případech kompaktnost, a především v rámci možností nízká cena.

V této práci je nejprve uvedeno všeobecné rozdělení frézek s následným vysvětlením pojmu modelářská CNC frézka. Poté je provedena analýza trhu, kde jsou vybrány a popsány různé typy modelářských CNC frézek s pevným stolem. Na základě analýzy trhu došlo k výběru vstupních parametrů a volbě výsledné koncepce modelářské frézky. Volba koncepce modelářské frézky byla provedena pomocí metody PATTERN.

Další část práce se zabývá vlastním návrhem modelářské frézky. Kde nejprve je proveden kompletní výpočet hlavních uzlových částí stroje, jako jsou kuličkové šrouby a jejich pohony, lineární vedení, vřeteno a podobně.

A v poslední části práce je uveden konstrukční návrh s důrazem na určitou jednoduchost, ale bytelnost. Při volbě jednotlivých komponent byl kladen důraz na minimální cenu při dobrém poměru kvality.

2 ROZDĚLENÍ CNC FRÉZOVACÍCH STROJŮ

Frézovací stroje neboli frézky jsou určeny především k obrábění rovinných ploch, závitů, drážek, jak rovných, tak i zakřivených apod. Frézky můžeme obecně rozdělit na: [1]

- Konzolové
 - Vodorovná (horizontální) osa vřetena
 - Svislá (vertikální) osa vřetena
 - Univerzální
- Stolové a Ložové
 - Vodorovná (horizontální) osa vřetena
 - Svislá (vertikální) osa vřetena
 - Univerzální
- Portálové
 - Spodní gántry
 - Horní gántry
 - S pohyblivým stolem

2.1 Konzolové frézky

Konzolové frézky (Obrázek 1) jsou určeny zejména k obrábění ploch rovinných či tvarově složitějších a jsou využívány v kusové či malosériové výrobě. Obrobek je upnut na stole frézky, který je schopen pohybu ve směru osy X, Y a Z. Konzolové frézky se vyznačují především připevněnou konzolou na vedení stojanu a přestavitelným šroubem a maticí ve svislém směru. [2]



Obrázek 1 Konzolová frézka s označením CNCH-40305A-1500 [3]

2.2 Stolové frézky

Stolových frézek (Obrázek 2) je využíváno především k obrábění větších obrobků a dle své konstrukce mohou být svislé či vodorovné. Mezi hlavní výhody patří jejich tuhost a možnost větších výkonů. [1]



Obrázek 2 Stolová frézka FCV 63 CNC [4]

2.3 Portálové frézky

Portálové neboli rovinné frézky jsou určeny především k frézování velkých ploch anebo skříňových obrobků. A je možné je rozdělit dle konstrukce na Spodní gántry, Horní gántry a frézky s pohyblivým stolem. [2]

2.3.1 Spodní gántry

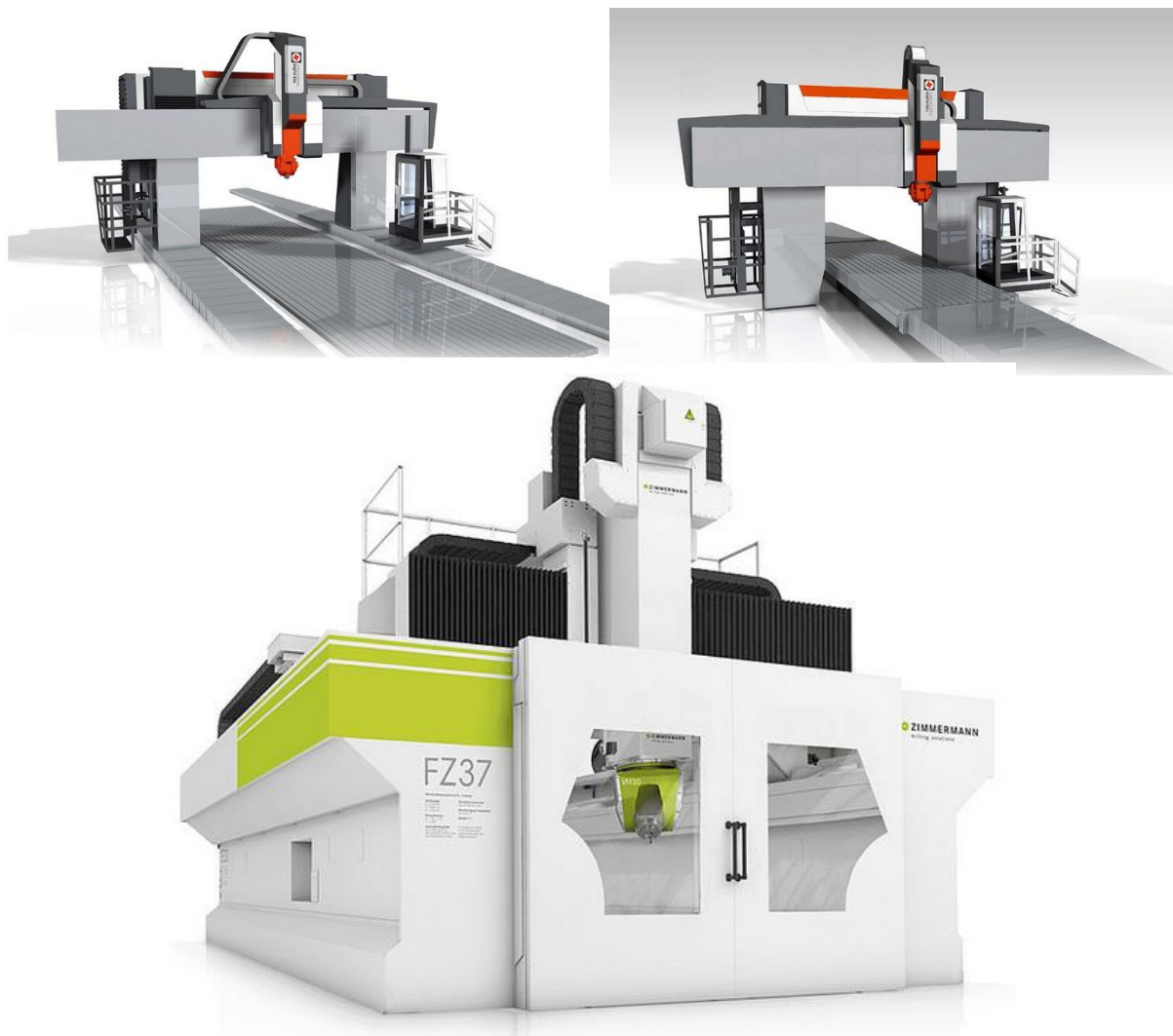
Portálová frézka typu spodní gántry se skládá z pevného stolu, po kterém se na každé straně současně pohybují dva pojezdové stojany, přičemž jsou vzájemně spojeny pevným příčnickem tvořící portál viz Obrázek 3a. Na pevném příčniku je usazen kuličkový šroub, který slouží k příčnému pohybu saní po příčniku. Také je zde připevněno lineární vedení pro zachytávání sil. V přední části saní je umístěn další kuličkový šroub a vedení pro posuv vřeteníku. [2]

2.3.2 Horní gántry

Portálová frézka typu horní gántry je velmi podobná konstrukci portálové frézky typu spodní gántry ovšem s pár rozdíly. Konkrétně konstrukce je upravena tak, že příčnick se pohybuje samostatně ve směru osy X. Stůl i stojany jsou pevné. Na příčniku jsou příčně pohybující sáně (směr osy Y), na kterých je připevněno vřeteno, jež se pohybuje ve směru osy Z, viz obrázek 3b. [5]

2.3.3 Frézka s pohyblivým stolem

Portálová frézka s pohyblivým stolem se vyznačuje především pevným portálem. Stůl je zpravidla schopen pohybu ve směru osy X a pohyb ve směru osy Y a Z obstarávají části na portálu. Konkrétně pohyb v osách Y a Z obstarávají sáně a vřeteno upevněné na saních viz obrázek 3c. [5]



Obrázek 3 a) Spodní gántry (vlevo) [38]; b) Horní gántry (dole) [39]; c) posuvný stůl (vpravo) [40].

3 MODELÁŘSKÁ FRÉZKA

Modelářské frézky slouží k obrábění zejména měkkých materiálů, kterými mohou být například slitiny hliníku či neželezných kovů, dřeva, různých kompozitních materiálů a polymerů a podobně. Výrobci modelářských frézek rozdělují frézky dle využití v praxi do dvou hlavních skupin, kterými jsou na jedné straně Hobby frézky a na straně druhé profesionální frézky. Dále modelářské CNC frézky můžeme dělit dle konstrukce, jak tomu je i u normálních frézek. Konkrétně na frézky konzolové, frézky s posuvným portálem (spodní gántry), frézky s posuvným příčnickem (horní gántry), frézky s posuvným stolem a dále na CNC routery. [6] Na obrázku 4 lze vidět modelářskou frézku používanou modelářskou firmou Krill AirCraft.



Obrázek 4 Modelářská CNC frézka

4 ANALÝZA TRHU

V této kapitole jsou rozebrány a následně porovnány modelářské CNC frézky. Modelářské CNC frézky jsou vybrány s ohledem na téma diplomové práce, avšak zde jsou představeny navíc i zástupci středních i větších modelářských CNC frézek. Při průzkumu trhu bylo osloveno ústní nebo e-mailovou formou celkově 14 výrobců, z nichž se ozvalo 6 výrobců.

4.1 Firma Merkur

Merkurtoys s.r.o. je českou firmou jejíž začátky se datují k roku 1920. Dnes je tato firma známá po celém světě díky kovovým stavebnicím, jež produkuje. Doménou posledních pár let jsou stavebnice zaměřující se na robotiku či mechatroniku. Dále mimo jiné nabízí školám po celém světě velké množství učebních pomůcek, které jednak děti naučí především manuální zručnosti a také technickému myšlení. Nejzajímavějším trhákem především pro střední odborné školy, popřípadě pro malé modelářské podniky je malý CNC frézovací stroj s obecným typovým označením MC30. CNC frézka je dodávána celkově v 6 různých konfiguracích a obecně jako 3osý, popř. 4osý obráběcí stroj. Frézka je určena především pro obrábění měkkých materiálů, jako jsou například plasty, dřevo či hliník a podobně. V tabulce 1 jsou zaznamenány 4 základní konfigurace a na obrázku 5, je možné vidět nejprodávanější konfiguraci. [7]



Obrázek 5 CNC frézovací stroj MC30FT [7]

Tabulka 1 Technické parametry frézovacích strojů firmy Merkur [7]

TYP STROJE	MC30F	MC30F2	MC30FT	MC30F2T
	S vřetenem	S vřetenem	S vřetenem + T stůl	S vřetenem + T stůl
Rozměry (š, h, v)	400x470x500	400x470x500	400x470x500	400x470x500
Hmotnost	20 Kg	22 Kg	21 Kg	23 Kg
Pracovní prostor	330x300x110	330x300x110	330x300x110	330x300x110
Rozsah posuvu – osa X	180 mm	180 mm	180 mm	180 mm
Rozsah posuvu – osa Y	210 mm	210 mm	210 mm	210 mm
Rozsah posuvu – osa Z	90 mm	90 mm	90 mm	90 mm
Přesnost najetí	0,05 mm	0,05 mm	0,05 mm	0,05 mm
Rozlišení	0,001 m	0,001 m	0,001 m	0,001 m
Pohon stroje	Krokové motory			
Max. rychlost posuvu	5 mm/s	5 mm/s	5 mm/s	5 mm/s
Výkon vřetene	100 W	250 W	100 W	250 W
Otáčky vřetene – ot/min	5000-20000	900-6000	5000-20000	900-6000
Uložení vřetene	2bodové	3bodové	2bodové	3bodové
Ovládací software stroje	Demo MACH 3			
Napájení	24 V / 5 A DC			
Cena	33 400 Kč	-	36 500 Kč	-

4.2 Firma CauCau

Společnost CauCau vznikla asi před 25 lety se sídlem v hlavním městě Slovenska, Bratislavě. Zabývá se především výrobou jak modelářských CNC frézek, tak i CNC soustruhů nebo CNC plazmových řezacích strojů. Podle jejich slov jsou schopni vyrobit ročně přes 300 strojů. Firma CauCau nabízí pro modelářské účely především frézky s označením Kompas F600 a Kompas H400, které je možné vidět na obrázku 6. [8], [9]



Obrázek 6 a) Kompas F600 (vlevo) [9], b) Kompas H400 (vpravo) [8]

V následující tabulce 2 jsou zaznamenány základní technické parametry obou modelářských frézek z předcházející stránky.

Tabulka 2 Technické parametry CNC frézek firmy CauCau [8], [9]

Typ stroje	Kompas F600	Kompas H400
Rozměry (š, h, v)	800x900x800	750x650x600
Hmotnost	70 Kg	60 Kg
Pracovní prostor	200x300x150	300x400x150
Přesnost	0,03 mm	0,03
Výkon vřetena	2200 W (vysokofrek. asyn.)	710 W (uhlíkové)
Otáčky vřetena	24000 ot. /min	32000 ot. /min
Rychloposuv	2400 mm/min	800 mm/min
Řídicí software	Mach3	Mach3
Elektronika	Profi4	H5
Vedení X/Y/Z	Prizmatické HGR20	Podepřené tyče SBR20
Přenos síly X/Y/Z	Kuličkové šrouby	Trapézové šrouby
Pohon	Krokové motory (5,4Nm)	Krokové motory (1,8Nm)
Konstrukce	Duralová	Svařovaná
Cena	93 340 Kč	43 940 Kč

4.3 Společnost StepCraft

Společnost StepCraft (dále jen StepCraft) byla založena roku 2012 se sídlem v německém Mendenu. StepCraft, jak o sobě tvrdí patří mezi přední světové výrobce v oblasti multifunkčních CNC systémy. Kromě multifunkčních CNC systémů se věnují vývoji, výrobě a distribuci vysokofrekvenčních vřeten, laserů, 3D tiskových hlav a malých modelářských frézek (Obrázek 7). V oblasti obráběcích strojů firma poskytuje 2 základní řady – řada D a řada Q. [10], [11]

Řada Q se zaměřuje na výkonnost daného obráběcího stroje s ohledem na přesnost, účinnost a celkovou kvalitu. Proto tyto stroje naleznou své využití v sériové výrobě anebo u náročnějších průmyslových aplikací. [11]

Řada D byla speciálně vyvinuta pro použití v modelářském průmyslu, na středních školách, jakož to edukační pomůcka či pro využití v malých podnicích. Tyto stroje jsou schopny obrábět nejrůznější materiály, jako je například dřevo, plasty, hliník, uhlík, mosaz a podobně. Frézovací stroje z této řady se liší zejména velikostí pracovního prostoru a potažmo velikostí a hmotností celého stroje. Základní technické parametry jsou uvedeny v tabulce 3. [10]

Tabulka 3 Technické parametry strojů firmy StepCraft [10]

Typ stroje	D.210	D.300	D.420	D.600
Rozměry	340x345x350	350x430x410	450x550x510	570x730x510
Pracovní prostor	210x210x80	210x300x100	300x420x140	420x600x140
Hmotnost	13,7 Kg	15,4 Kg	17,3 kg	21,7 Kg
Pohon	Krokové motory			
Výkon vřetena	500 W	500 W	1000 W	1000 W
Otáčky vřetena	20000 ot. / min	20000 ot. / min	25000 ot. / min	25000 ot. / min
Rychloposuv	1800 mm/min	3000 mm/min	3000 mm/min	3000 mm/min
Rozlišení	0,005 mm	0,005 mm	0,005 mm	0,005 mm
Opakovatelnost	+/- 0,04 mm	+/- 0,04 mm	+/- 0,04 mm	+/- 0,05 mm
Konstrukce	Hliník, vysokotlaký laminát			



Obrázek 7 a) StepCraft D.600 (nahore), b) Frézovací motor MM-1000 (dole). [10]

4.4 Eurazio center

Společnost Eurazio center vznikla roku 2009 se sídlem firmy ve městě Modletice. Dnes společnost vlastní největší prodejní a předváděcí showroom v Evropě a zabývá se především zprostředkováním prodejem vláknových řezacích laserových strojů, značkových laserů, CO₂ laserů, ohraňovacích lisů, malých a středních modelářských CNC frézek a routerů, popřípadě jejich příslušenství, dále laserovým svařováním, broušením a leštěním. [12]

Mezi nabízené produkty v oblasti malých modelářských CNC frézek patří například CNC frézka pro gravírování a rytí s označením CNCX-4030V2, mini stolní CNC frézka s označením CNCB-2030 nebo CNC frézka s označením CNCH-6040-Z100 viz. Obrázek 8 nebo portálová frézka s označením RCT-AW6090-3000W viz. Obrázek 9 určená pro obrábění především plastů, dřeva a neželezných kovů. [13], [14], [15]



Obrázek 8 a) CNCX-4030V2 (vlevo) [14], b) CNCB-2030 (vpravo) [15], c) CNCH-6040-Z100 (dole) [13]

Technické parametry malých modelářských CNC frézek jsou porovnány v Tabulce 4 a 5.

Tabulka 4 Eurazio center – technické parametry malých modelářských CNC frézek [13], [14], [15]

Typ stroje	CNCX-4030V2	CNCB-2030	CNCH-6040-Z100
Rozměry	610x480x400	-	590x890x620
Pracovní prostor	300x400x55	300x200x65	600x400x100
Hmotnost	28 Kg	-	55 Kg
Pohon	Krokové motory		
Výkon vřetena	300 W	300 W	2200 W
Max otáčky vřetena	11000 ot. / min.	8000 ot. / min.	24000 ot. / min.
Řídící software	Mach3	LPT	Mach3
Převod hnací síly	Kuličkové šrouby	Trapézové šrouby	Kuličkové šrouby
Lineární vedení	Broušené tyče		
Rychloposuv	2000 mm/min.	900 mm/min.	4000 mm/min.
Kleštiny	ER-11	ER-11	ER-20
Přesnost polohování	-	-	0,05



Obrázek 9 - RCT-AW6090-3000W [16]

Tabulka 5 Technické parametry portálové CNC frézky RCT-AW6090 [16]

Typ stroje	RCT-AW6090-3000W
Rozměry	-
Pracovní plocha	900x600x120
Hmotnost	800 Kg
Pohon	Servo pohony
Výkon vřetena	3000 W
Max. otáčky vřetena	24000 ot. / min
Řídící software	Mach 3
Převod hnací síly	Kuličkové šrouby
Lineární vedení	PMI
Rychloposuv	-
Pracovní přesnost	0,15 mm
Kleštiny	ER-25
Konstrukce	Svařovaná

4.5 Solidvision

Firma SolidVision je v oblasti střední Evropy velmi dobře známa, avšak už málo kdo ví, že se mimo jiné zabývá vývojem a výrobou malých modelářských CNC frézek pro účely výuky, malé dílny a samozřejmě v oblasti modelářství. Dnes firma SolidVision potažmo SolidCon, vyrábí dvě univerzální CNC frézky, konkrétně SLV EDU a SLV EDU 5X. Mezi hlavní výhody patřící k těmto strojům je vysoká dynamika, rychlost, pracovní přesnost a kompaktní rozměry. [17]

Univerzální frézka s označením SLV EDU viz. Obrázek 10 je vhodné použít pro obrábění materiálů, jako je například dřevo, plasty, kompozity, slitiny hliníku a podobně. Své uplatnění nachází nejčastěji jako edukační pomůcka, u výrobců elektroniky při obrábění tištěných spojů, obrábění různých forem a modelů v modelářském průmyslu. [17]

Stroj SLD EDU 5X je 5osá portálová frézka určena pro obrábění především slitin hliníku, barevných kovů, všelijakého dřeva, plastů a různých kompozitních materiálů viz. Obrázek 11. Díky 5osé koncepci stroje lze frézku použít pro výrobu tvarově složitých dílců. Jako tomu bylo u univerzální frézky SLV EDU, tak i tato frézka nachází své uplatnění jako edukační pomůcka, u výrobců elektroniky při obrábění tištěných spojů, obrábění různých forem a modelů v modelářském průmyslu. [17]

Frézky mohou být vybaveny různými vysokootáчковými vřeteny typu HSD s manuální výměnou nástroje pro kleštiny ER-25 nebo typu IMT s pneumatickým uvolněním nástroje s kuželovou dutinou ISO20/ER-16. Zároveň je vybavena automatickým zásobníkem nástrojů s názvem ATCH-9. A o řízení se stará software Arem Pro. Technické parametry stroje SLD EDU jsou zobrazeny v tabulce 6. [17]

Tabulka 6 Technické parametry strojů firmy SolidVision [17]

Typ stroje	SLV EDU		SLV EDU 5X	
Rozměry stroje	2000x1510x1000		1405x1270x2350	
Hmotnost stroje	300 Kg		350 Kg	
Pracovní prostor	365x400x185		225x400x170	
Rozměry stolu	476x400		ø200	
Typ vřetena	HSD	IMT	HSD	IMT
Upínací rozhraní	Kleštiny ER-25	ISO20/BT20	Kleštiny ER-25	ISO20/BT20
Výkon vřetena (S1/S6)	2100 W (S1)	1,9/2,5 kW	2100 W (S1)	1,9/2,5 kW
Rozsah otáček	100-24000 ot. / min			
Krouticí moment	1,1 Nm	0,8 Nm	1,1 Nm	0,8 Nm
Rychloposuv	20000 mm/min.			
Opakovatelná přesnost	0,005 mm		0,02	
Geometrická přesnost	0,05 mm		0,15	
Řídicí systém	Arem Pro		CNC 886 5X	
Pohony	TG Drives			



Obrázek 10 - SLV EDU [17]



Obrázek 11 - SLV EDU 5X [17]

4.6 PILART

Společnost PILART s.r.o. byla založena roku 2009 a působí zejména na Českém a Slovenském trhu. V dnešní době se společnost zabývá zejména prodejem a servisem Hobby frézek, profesionálních dřevoobráběcích a kovoobráběcích strojů různých světových značek. Mimo jiné jejich nabídka zahrnuje také formátovací, pásové, kotoučové a zkracovací pily, hoblovky, olepovačky hran, odsavače, kompletní odsávací techniku, brusky, velká obráběcí centra, kolíkovačky, širokou nabídku nástrojů a příslušenství. Firma také nabízí CNC routery, jež se hojně využívá v modelářství, konkrétně jsou to následující CNC routery s označením Numco CNC router SHG 0404 (Obrázek 12a), Numco CNC router SHG 0609 (Obrázek 12b) a Numco CNC router SHM 0609 (Obrázek 13). Porovnání technických parametrů lze nalézt v tabulce 7. [18], [19], [20]

Tabulka 7 Technické parametry strojů značky NUMCO [18], [19], [20]

Typ stroje	Numco SHG 0404	Numco SHG 0609	Numco SHM 0609
Rozměry stroje	910x800x880	1710x1250x1800	1710 × 1250 × 1585
Hmotnost stroje	80 Kg	165 Kg	195 Kg
Pracovní prostor	520x660x125	780x1300x125	780x1300x150
Typ vřetena	HSD		
Výkon vřetena	2000 W		1500 W
Kleštiny	ER-16		
Otáček	24 000 ot. / min		
Rychloposuv	9 000 mm/min	6 000 mm/min	6 000 mm/min
Opak. přesnost	± 0,02 mm		
Řídicí systém	Armote		
Posuvy osy X	400 mm	600 mm	600 mm
Posuvy osy Y	400 mm	900 mm	900 mm
Posuvy osy Z	100 mm	100 mm	120 mm
cena	266 186 Kč	292 806 Kč	332 736 Kč



Obrázek 12 a) CNC router – NUMCO SHG 0404 (vlevo) [18];
b) NUMCO SHG 0609 (vpravo) [19]



Obrázek 13 CNC router NUMCO SHM 0609 [20]

5 VOLBA VSTUPNÍCH PARAMETRŮ

V tabulce 8 jsou uvedeny vstupní parametry, které jsou výchozím bodem pro konstrukci frézovacího stroje. Tyto vstupní parametry stroj může splňovat ba i předčít. Důležité jsou především parametry výkonu a nosnosti a ostatní parametry, jako jsou rozsahy posuvů, rozměry stolu či regulace otáček jsou zvoleny jen přibližně a není nutno je přesně dodržet. Všechny vstupní parametry vycházejí z požadavků na frézovací stroj a z velikostí a výkonů ostatních strojů na základě počáteční analýzy trhu a osobních konzultací s výrobcem Merkur.

Tabulka 8 Vstupní parametry malé modelářské frézky

Parametr	Hodnota	Jednotka
Pracovní rozsah osy X	400	mm
Pracovní rozsah osy Y	380	mm
Pracovní rozsah osy Z	150	mm
Rozměry stolu	500x400	mm
Zatížitelnost stolu	80	Kg
Přesnost polohování	0,05	mm
Výkon vřetene	1,2-3,2	kW
Rozsah regulace otáček	0-24000	min ⁻¹
Rychloposuv	6000	mm/min

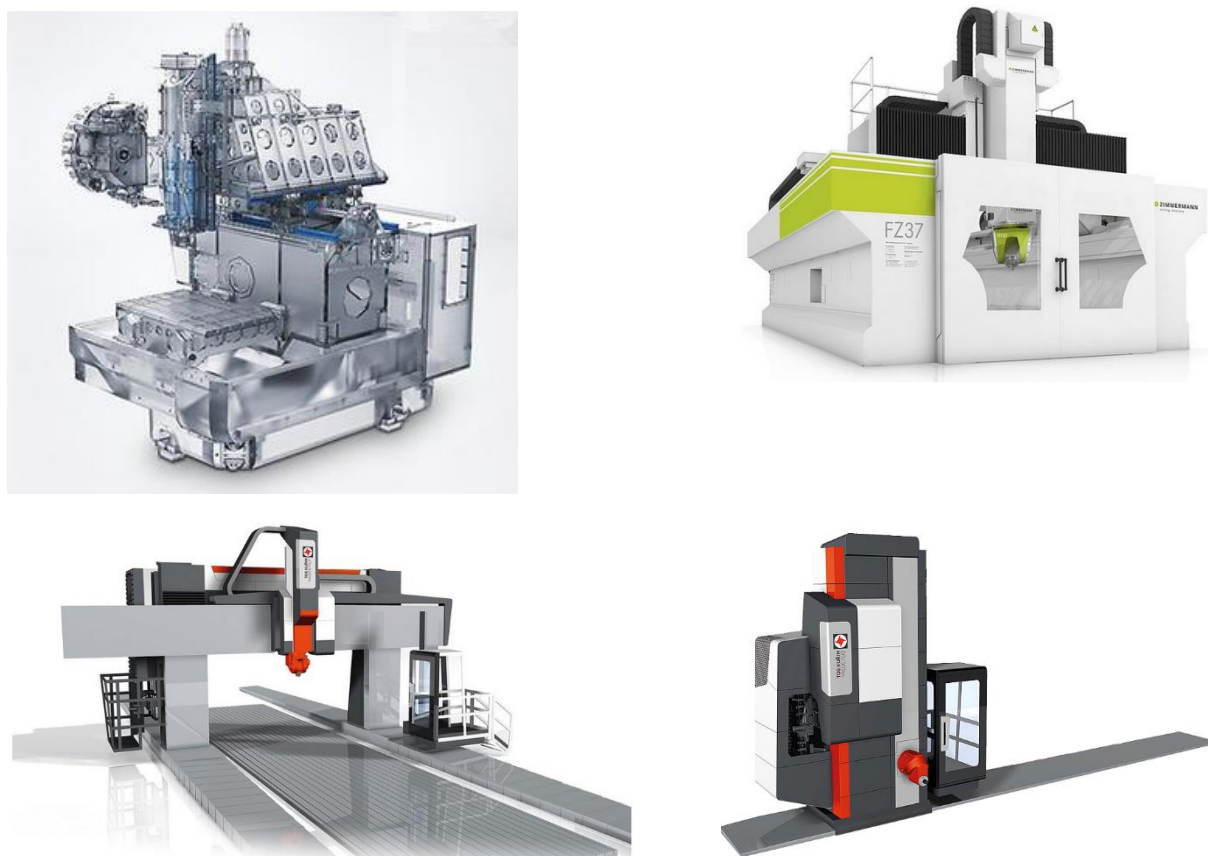
6 VOLBA KONCEPCE FRÉZKY

Při volbě vhodné koncepce stroje určeného pro frézování měkkých materiálů, jako je například dřevo, plasty či lehké slitiny (Al, Zn a jiné) je potřebné se na daný problém zaměřit z více úhlů pohledu. A to jak z úhlu pohledu budoucího zákazníka, tak i z úhlu pohledu výrobce.

Vzhledem ke skutečnosti, že cílem práce je navržení malé frézky s pevným stolem pro modelářské účely. Tak je možné vybírat koncepci z více různých variant, avšak mezi nejznámější koncepce strojů patří varianty typu (obrázek 14):

- Vertikální frézka
- Horní gántry
- Dolní gántry
- Jedno-stojanová frézka

Dále je možné se setkat, zejména na strojírenských veletrzích, s několika dalšími koncepcemi. Tyto koncepce mohou být zajímavé, avšak z hlediska funkčních vlastností stroje a požadavků na ně z pohledu zákazníka, zcela nedostačující.



Obrázek 14 Koncepce strojů: a) Vertikální frézka (vlevo nahoře) [41], b) Horní gántry (vpravo nahoře) [39], c) dolní gántry (vlevo dole) [42], d) Jedno-stojanová frézka (vpravo dole) [42]

6.1 Výběr nejvhodnější koncepce stroje pomocí metody PATTERN

Metoda PATTERN je zkratka pro multikriteriální metodu Planning Assistance Through Technical Evaluation of Relevance Numbers. Tato metoda spolu s metodou Simple additive weighting (SAW) je vhodná pro výběr různých technologií a strojů. Metoda je založena na porovnání různých parametrů či vlastností každého stroje. Celkový postup metody PATTERN je založen na následujících krocích: [5]

- Výběr parametrů k porovnání
- Definování požadované tendence změny u srovnávaných kritérií
- U vybraných kritérií stanovení váhy významnosti
- Výpočet indexů změn vybraných kritérií pro každou variantu
- Stanovení pořadí variant

6.2 Volba parametrů určených ke srovnání a určení tendence změny

Při volbě parametrů či kritérií určených ke srovnání je nutné brát ohled na optimální počet těchto parametrů, jelikož malý počet parametrů neumožní celkové srovnání a velký počet parametrů snižuje efektivnost této metody a potažmo tzv. rozlišovací schopnost. Z daného důvodu volím celkový počet parametrů v rozmezí 6–8.

V tabulce 9 lze vidět celkový výčet parametrů určených ke srovnání a jejich tendence změny. Tendence změny je určena pomocí slovního vyjádření – rostoucí/klesající. Tzn například u parametru hmotnost je tendence změny klesající, protože je zde lehčí stroj považován za lepší.

Tabulka 9 Parametry určené ke srovnání a jejich tendence změny

Označení parametru	Název parametru	Tendence změny
P.1	Přesnost	Rostoucí
P.2	Tuhost	Rostoucí
P.3	Dynamika	Rostoucí
P.4	Technologičnost konstrukce	Rostoucí
P.5	Zástavbový prostor	Klesající
P.6	Hmotnost	Klesající
P.7	Čas montáže	Klesající

6.3 Párové porovnání jednotlivých parametrů

Zde dochází k porovnání jednotlivých parametrů v řádku ke sloupci. Tudíž je nutné posoudit významnost každého parametru a to tak, že vybraný parametr ze sloupce porovnávám s každým parametrem na řádku. Na základě sečtení jednotlivých parametrů v tabulce je vyhodnocené pořadí parametrů a potažmo jejich významnost.

Tabulka 10 Párové porovnání parametrů

Parametr	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	Suma	Pořadí
P.1	P.1	P.2	P.1	P.4	P.1	P.1	P.7	4	4
P.2		P.2	P.2	P.2	P.2	P.2	P.2	7	1
P.3			P.3	P.4	P.3	P.3	P.7	3	5
P.4				P.4	P.4	P.6	P.4	5	3
P.5					P.5	P.6	P.6	1	7
P.6						P.6	P.6	6	2
P.7							P.7	2	6

6.4 Určení váhy významnosti srovnávaných parametrů

V následující tabulce jsou zaznamenány všechny parametry vzestupně dle pořadí v tabulce 10. A následně parametry hodnotíme dle následující stupnice s přihlédnutím k blízkosti obou vybraných parametrů.

1 – Blízko

2 – Středně

3 – Daleko

Následně dojde k výpočtu významnosti dle následujícího vztahu:

$$q_j = \frac{BHV_j}{\sum_{j=1}^k BHV_j} \quad (1)$$

, kde BHV_j je hodnota významnosti pro každý parametr

k je celkový počet parametrů

Tabulka 11 Kvalifikovaná porovnávací matice

Parametr	P.2	P.6	P.4	P.1	P.3	P.7	P.5	Suma (BHV_j)	Váha (q_j)
P.2	1	2	1	1	1	3	2	11	0,22
P.6		1	1	3	2	3	1	11	0,22
P.4			1	2	3	1	2	9	0,18
P.1				1	1	3	3	8	0,16
P.3					1	3	3	7	0,14
P.7						1	2	3	0,06
P.5							1	1	0,02
							Součet	50	1

6.5 Určení pořadí srovnávaných koncepcí strojů

Za účelem zjištění konečného pořadí srovnávaných strojů je nutné ke každému parametru přiřadit index změny. Index změny je stanovován zvlášť pro parametry s rostoucí tendencí a zvlášť pro parametry s klesající tendencí viz tabulka 9.

Výpočet indexů změny pro parametry s rostoucí tendencí se děje na základě:

$$I_{jx} = \frac{H_{jx}}{H_{jMIN}} \quad (2)$$

Výpočet indexů změny pro parametry s klesající tendencí se děje na základě:

$$I_{jx} = \frac{H_{jMAX}}{H_{jX}} \quad (3)$$

Výpočet vážených indexů:

$$I_{jx} \cdot v = I_{jx} \cdot q_j \quad (4)$$

Stanovení pořadí:

$$S_x = \sum_{j=1}^k I_{jx} \cdot v \quad (5)$$

, kde H_{jx} – Hodnota j-tého parametru x-tého prvku
 H_{jMIN} – Nejmenší hodnota j-tého parametru
 H_{jMAX} – Největší hodnota j-tého parametru
 q_j – Váha významnosti j-tého parametru

V tabulce 12 lze spatřit konečné porovnání všech vyhodnocených parametrů na základě předchozích výpočtů a tabulek. Hodnota H_{jx} je číselné hodnocení, které volí hodnotitel, jenž je založeno na přiřazení důležitosti daného parametru k určité koncepci stroje. Hodnota H_{jx} je v tabulce modře vyznačena. Dále parametry, které se vyznačují rostoucí tendencí změny jsou vyznačeny šedě a parametry klesající tendencí změny jsou ponechány bez zvýraznění. Výsledky výpočtů vážených indexů jsou vyznačeny zelenou barvou. A v neposlední řadě v kolonkách oranžově vyznačených lze vidět dílčí výpočty indexů změn jak pro parametry s rostoucí či klesající tendencí I_{jx} . V tabulce 13 lze nalézt seznam koncepcí strojů, který je v tabulce 12 ohodnocen.

Stupnice pro hodnocení parametrů – hodnota H_{jx}

- 5 – Velmi vysoké
- 4 – Vysoké
- 3 – Střední
- 2 – Nízké
- 1 – Velmi nízké

Tabulka 12 Konečné srovnání navrhovaných koncepcí

Parametr	Jednotka	Váha	Typ stroje							
			Stroj 1		Stroj 2		Stroj 3		Stroj 4	
P.1: Přesnost	[μm]	0,16	4	0,21	5	0,27	5	0,27	3	0,16
			1,33		1,67		1,67		1	
P.2: Tuhost	[μm/kN]	0,22	4	0,29	5	0,37	4	0,29	3	0,22
			1,33		1,67		1,33		1	
P.3: Dynamika	[m/s2]	0,14	3	0,14	5	0,23	5	0,23	5	0,23
			1		1,67		1,67		1,67	
P.4: Technolog. konstrukce	-	0,18	3	0,18	3	0,18	5	0,3	5	0,3
			1		1		1,67		1,67	
P.5: Zástavbový prostor	[mm2]	0,02	4	0,03	5	0,02	3	0,03	2	0,05
			1,25		1		1,67		2,5	
P.6: Hmotnost	[kg]	0,22	4	0,28	5	0,22	2	0,55	2	0,55
			1,25		1		2,5		2,5	
P.7: Čas montáže	[min]	0,06	4	0,06	2	0,12	3	0,08	2	0,12
			1		2		1,33		2	
Celkem S _x		1	1,19		1,41		1,76		1,63	
Pořadí			4.		3.		1.		2.	

Tabulka 13 Seznam koncepcí strojů

Označení dle tabulky 12	Koncepce stroje
Stroj 1	Vertikální frézka
Stroj 2	Horní gántry
Stroj 3	Spodní gántry
Stroj 4	Jedno-stojanová frézka

6.6 Konečné vyhodnocení navržených koncepcí

Na základě postupu metody PATTERN a z výsledků (tabulka 12) vyplívá, že nejvýhodnější cesta k nejlepšímu výsledku je zvolení koncepce stroje ve stylu spodní gántry. Zajímavým řešením by mohlo být na základě dané metody zkonstruování jedno-stojanové frézky, ale vzhledem k horším parametrům, jako je přesnost či tuhost, jsem zvolil v souladu s výsledkem metody variantu spodní gántry.

7 NÁVRH MODELÁŘSKÉ FRÉZKY

V následující kapitole budeme seznámeni s návrhem vřetene, jednotlivých pohonů os a lineárního vedení, jež jsou založeny na výpočtech potřebných pro správné zvolení daných návrhů. Dále zde budou popsány klíčové uzly navrhované modelářské frézky ve vztahu k předešlým návrhům.

Ke všem výpočtům a návrhům jednotlivých konstrukčních uzlů je přístupováno s ohledem na základní vlastnosti každého modelářského stroje, což je jednoduchost, kompaktnost, ale dostatečná životnost a cenová dostupnost.

Návrh modelářské frézky je určen především k obrábění dřeva, plastu či lehkých slitin založených na Al-Si, Zn a podobně. U slitin Al-Si je obsah křemíku menší než 12 %. Pro úspěšný návrh vřetene a pro zjednodušení celkového výpočtu, byli uvažovány tyto pracovní operace – frézování a vrtání.

7.1 Výpočet základních parametrů vřetene – frézování

Nejprve musí být zvolen vhodný nástroj. Na jehož základě jsou provedeny veškeré výpočty nutné pro zjištění výkonu, momentu či řezné síly atd. Pro pracovní operaci frézování byla zvolena čelní válcová fréza s označením 270618.080. Veškeré parametry, jež uvádí výrobce (ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE) jsou uvedeny v tabulce 14 níže. Zvolená fréza může nalézt své uplatnění zejména u frézování lehkých slitin Al-Si, kde Si je méně než 12 %, anebo při frézování automatové a konstrukční oceli. S ohledem, že zvolený nástroj bude pracovat na modelářské frézce, tak z toho vyplívají určité skutečnosti. Například výrobce udává, že maximální hloubka záběru třísky $A_p = 4$ mm, což je téměř nemyslitelné. Z toho důvodu doporučuji při frézování zmenšit hodnotu A_p na 2 mm. Nicméně zde hodnotu A_p ponecháme na 4 mm, z důvodu dimenzování vřetene. Dále v tabulce 15 jsou uvedeny materiálové konstanty potřebné k výpočtům. [21]

Tabulka 14 Parametry frézy 270618.080

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Průměr nástroje	D	8	[mm]
Počet zubů	Z	2	[-]
Hloubka záběru třísky	A_p	4	[mm]
Pracovní záběr	A_e	8	[mm]
Řezná rychlost	v_c	200	[m/min]
Posuv na zub	f_z	0,0377	[mm/z]
Úhel šroubovice	λ	40	[°]
Úhel čela	γ	20	[°]
Nástrojový úhel nastavení ostří	κ_r	90	[°]

Tabulka 15 Materiálové konstanty obráběného materiálu

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Měrná řezná síla	k_{c1}	700	[MPa]
Nárůst měrné řezné síly	m_c	0,25	[-]

Výpočet je proveden na základě literatury [2], [22].

Otáčky vřetene:

$$n_f = \frac{v_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} = \frac{200 \cdot 1000}{\pi \cdot 8} = 7958 \frac{1}{\min} \quad (6)$$

Rychlost posuvu:

$$v_f = n_f \cdot Z \cdot f_z = 7958 \cdot 2 \cdot 0,0377 = 600 \frac{mm}{\min} \quad (7)$$

Průměrná tloušťka třísky:

$$h_m = f_z \cdot \sqrt{\frac{A_e}{D}} = 0,0377 \cdot \sqrt{\frac{8}{8}} = 0,0377 \text{ mm} \quad (8)$$

Měrná řezná síla při frézování:

$$k_{cf} = k_{c1} \cdot h_m^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) = 700 \cdot 0,0377^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 1271 \text{ MPa} \quad (9)$$

Výkon vřetene při frézování:

$$P_{cf} = \frac{A_p \cdot A_e \cdot v_f \cdot k_{cf}}{60 \cdot 10^3} = \frac{4 \cdot 8 \cdot 600 \cdot 1271}{60 \cdot 10^3} = 407 \text{ W} \quad (10)$$

Řezná síla při frézování:

$$F_{cf} = k_{cf} \cdot A_p \cdot f_z = 1271 \cdot 4 \cdot 0,0377 = 192 \text{ N} \quad (11)$$

Kroutící moment:

$$M_{kf} = F_{cf} \cdot \frac{D}{2 \cdot 10^3} = 192 \cdot \frac{8}{2 \cdot 10^3} = 0,77 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (12)$$

7.2 Výpočet základních parametrů vřetene – vrtání

Zde byl zvolen monolitní karbidový vrták pro vrtání děr s označením CoroDrill 856 od společnosti Sandvik Coromant. Tento vrták je poslední novinkou společnosti a slouží především pro vrtání lehkých slitin založených na hliníku či různých kompozitních materiálech. Veškeré parametry, které uvádí výrobce a jsou potřebné pro následující výpočty jsou uvedeny v tabulce 16. [23]

Tabulka 16 Parametry vrtáku CoroDrill 856

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost	v_{cv}	135	[m/min]
Posuv na otáčku	f_0	0,12	[mm/ot.]
Průměr nástroje	D_v	8	[mm]
Počet zubů	Z_v	2	[-]
Úhel čela nástroje	γ	30	[°]
Nástrojový úhel nastavení ostří	κ_r	70	[°]

Výpočet je proveden na základě literatury [2], [22]

Otáčky vřetene:

$$n_v = \frac{v_{cv} \cdot 1000}{D_v \cdot \pi} = \frac{135 \cdot 1000}{8 \cdot \pi} = 5372 \frac{1}{\text{min}} \quad (13)$$

Posuv na zub:

$$f_{zv} = \frac{f_0}{Z_v} = \frac{0,12}{2} = 0,06 \text{ mm} \quad (14)$$

Měrná řezná síla při vrtání:

$$k_{cv} = k_{c1} \cdot (f_{zv} \cdot \sin \kappa_r)^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) = 700 \cdot (0,06 \cdot \sin 70)^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{30}{100}\right) = 1006 \text{ MPa} \quad (15)$$

Výkon vřetena při vrtání:

$$P_v = \frac{f_{zv} \cdot v_{ev} \cdot D_v \cdot k_{cv}}{240} = \frac{0,06 \cdot 135 \cdot 8 \cdot 1006}{240} = 272 \text{ W} \quad (16)$$

Krouticí moment při vrtání:

$$M_{kv} = \frac{P_v \cdot 30}{\pi \cdot n_v} = \frac{272 \cdot 30}{\pi \cdot 5372} = 0,482 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (17)$$

Rychlost posuvu:

$$v_{fv} = f_0 \cdot n_v = 0,12 \cdot 5372 = 644,64 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad (18)$$

Síla posuvu:

$$F_t = 0,5 \cdot k_{cv} \cdot \frac{D_v}{2} \cdot f_0 \cdot \sin \kappa_r = 0,5 \cdot 1006 \cdot \frac{8}{2} \cdot 0,12 \cdot \sin 70 = 227 \text{ N} \quad (19)$$

Tloušťka třísky:

$$h_D = f_{zv} \cdot \sin \kappa_r = 0,06 \cdot \sin 70 = 0,056 \text{ mm} \quad (20)$$

Šířka třísky:

$$b_D = \frac{D_v}{2 \cdot \sin \kappa_r} = \frac{8}{2 \cdot \sin 70} = 4,26 \text{ mm} \quad (21)$$

Průřez třísky:

$$A_D = h_D \cdot b_D = 0,056 \cdot 4,26 = 0,24 \text{ mm}^2 \quad (22)$$

Řezná síla při vrtání:

$$F_{cv} = k_{cv} \cdot A_D = 1006 \cdot 0,24 = 239,8 \text{ N} \quad (23)$$

Veškeré výpočty v kapitole vrtání byly ověřeny kalkulačkou řezných podmínek společnosti Sandvik Coromant.

7.3 Volba vřetene

Nyní na základě výše vypočtených hodnot jednotlivých parametrů u dílčích operací je nutné zvolit pro modelářskou frézku vhodné vřeteno. Volbu vhodného vřetena lze provést zejména s přihlédnutím k řezným podmínkám při frézování, jelikož zde jednotlivé parametry kladou větší nároky na vřeteno nežli u operace vrtání. Při dimenzování vhodného vřetena je důležité brát v úvahu především krouticí moment při daných otáčkách, výkon, napájecí napětí a proudové zatížení.

V dnešní době lze nalézt široký výběr nejrozličnějších vřeten, a to od malých, levných hobby vřeten až po profesionální výkonné a drahá vřetena, jež se používají ve velkých obráběcích centrech. My se zde budeme zabývat frézovacími vřeteny s malými výkony do 2,5 kW. Mezi nejznámější výrobce či prodejce cenově dostupných frézovacích vřeten patří například společnost IMT, Isel germany AG, HSD, Mechatron, Teknomotor či KRESS-elektrik.

Pro výběr nejvhodnějšího vřetene pro malou modelářskou frézku bude použito výběrové metody založené na bodovém ohodnocení klíčových parametrů vřetene viz tabulka 17. Stupnice bodového hodnocení je následující:

- 1 – Nedostačující
- 2 – Dostačující
- 3 – Dobré
- 4 – Velmi dobré
- 5 – Výborné

Tabulka 17 Bodové ohodnocení parametrů vřetene

Parametr	Váha param.	Název		
		HFSAC-8022-24-ER20	MT1073 – Y6162Y0011	iSA 1500
Výkon	10	4	5	5
Proud	5	4	3	3
Frekvence	5	4	3	3
Hmotnost	10	5	3	3
Krouticí moment	15	5	4	4
Rozsah otáček	2	5	3	4
Celkem		215	176	178

Na základě bodového hodnocení bylo vybráno vřeteno firmy Mechatron s označením HFSAC-8022-24 - ER20. Klíčové parametry jsou uvedeny v tabulce 18 a zvolené vřeteno je na obrázku 15a.

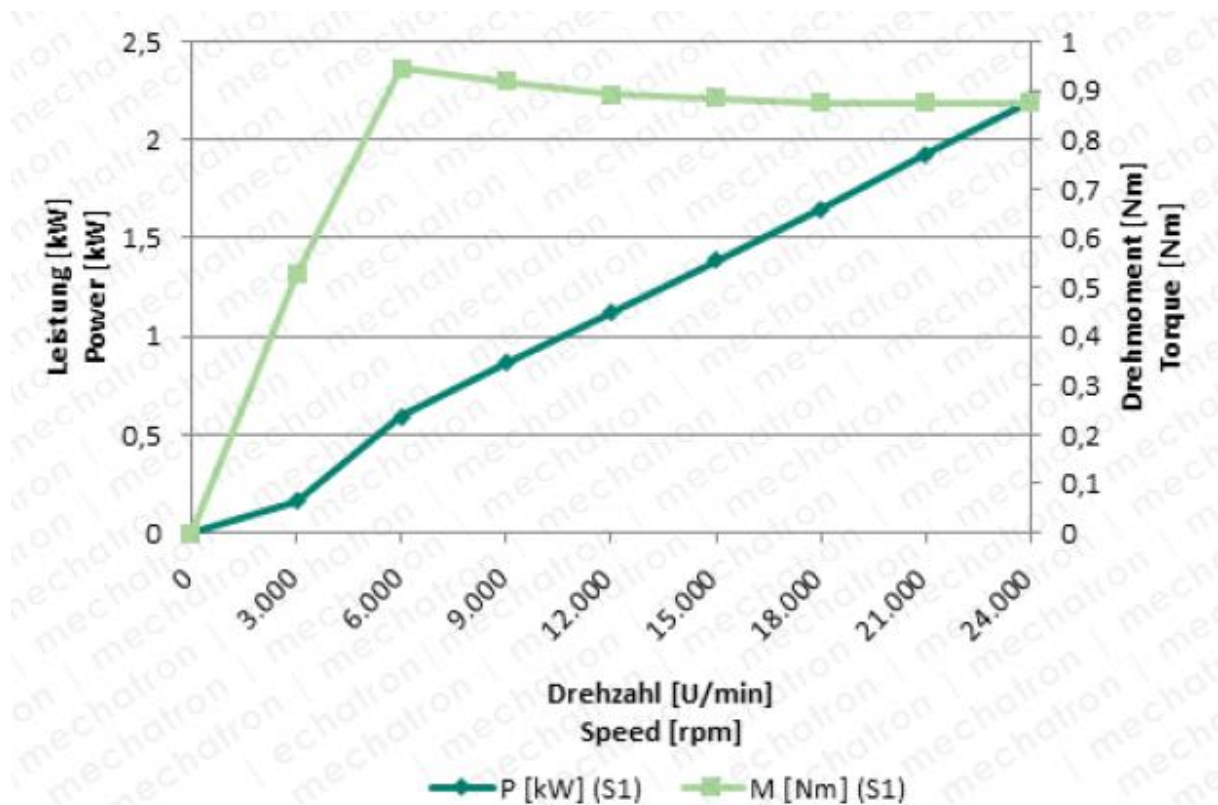
Tabulka 18 Parametry vybraného vřetena [24]

Parametr	Hodnota	Jednotky
Výkon S1/S6	2200/2500	[W]
Napětí	230	[V]
Proud S1/S6	4/5	[A]
Rozsah otáček	0–24000	[min ⁻¹]
Maximální průměr nástroje	1–13	[mm]
Hmotnost	4,4	[kg]



Obrázek 15 a) Vřeteno (HFSAC-8022-24 - ER20) firmy Mechatron [24]; b) frekvenční měnič (MX2-series) firmy Omron [24]

Výrobce udává i výkonově-momentovou charakteristiku, kterou lze vidět na obrázku 16. Na ní lze lehce ověřit, zda bude docházet k přetěžování vřetene. Na obrázku 15b lze vidět frekvenční měnič firmy Omron s označením MX2-series. Na základě e-mailové komunikace s výrobcem zvoleného vřetene (Mechatron) mi bylo doporučeno použití této kombinace i v naší modelářské frézce.



Obrázek 16 Výkonově-momentová charakteristika vřetena firmy Mechatron [24]

7.4 Návrh lineární posuvové soustavy

V následující kapitole se budeme zabývat především popisem a výběrem způsobu náhonu a lineárního vedení pro jednotlivé pohybové osy. A následnou výpočtovou zprávou pro správné dimenzování pohonů.

Všeobecně ke způsobu náhonu jednotlivých os je nejčastěji používáno buď lineárního motoru anebo rotačního servopohonu. Pod lineárním motorem si lze představit synchronní či asynchronní motor a u rotačního servopohonu – kuličkový šroub a matice, pastorek a hřeben nebo šnek a hřeben. [25]

U malých modelářských frézek se nejčastěji využívá rotačního servopohonu, a to konkrétně kuličkového šroubu či trapézového šroubu a matice. Nicméně pro výběr nejvhodnější varianty způsobu náhonu bude použito bodové metody, která bude porovnávat způsob náhonu, a to především kuličkový a trapézový šroub a matice, pastorek a hřeben a lineární motor viz. tabulka 19.

Tabulka 19 Srovnání způsobu náhonu

Parametr	Váha	Pastorek a hřeben	Kuličkový šroub	Trapézový šroub	Lineární motor
Cena	15	5	8	10	3
Přesnost	10	8	9	4	10
Tuhost	10	10	8	6	8
Dynamika	10	8	8	4	8
Konstrukce	5	4	6	8	4
Účinnost	5	6	8	4	10
Celkem		385	440	350	360

Na základě bodové metody byl vybrán pro modelářskou CNC frézku způsob náhonu založen na kuličkovém šroubu a předepnuté matici. Při posuzování byl brán zřetel zejména na cenu, popřípadě dostupnost, přesnost, tuhost a dynamika. Jak lze vyčíst z tabulky 19, tak kuličkový šroub a matice je v podstatě nejlepší cestou.

7.4.1 Kuličkové šrouby

Kuličkové šrouby patří k základním stavebním prvkům, které využívají především obráběcí stroje. A slouží k převodu rotačního pohybu na lineární. Vyznačuje se vysokou přesností a účinností díky použití valivých elementů, konkrétně kuliček. Všeobecně můžeme kuličkové šrouby rozdělit: [2]

- Válcované šrouby
- Okružované šrouby
- Broušené šrouby

Válcované šrouby se vyznačují menší přesností a příznivou cenou. Tyto šrouby naleznou nejčastěji své využití v transportní oblasti a většinou je na větších obráběcích strojích nenalezneme, nicméně své využití nalézají i u malých modelářských frézek, kde jsou použity válcované kuličkové šrouby s předepnutou maticí. Okružované šrouby se již vyznačují vyšší přesností, ale i vyšší cenou. Využití nalézají zejména v automatizaci, manipulaci a u obráběcích strojů. A broušené šrouby se vyznačují použitím u vysoce přesných obráběcích strojů. Avšak

jsou vyráběny pouze na míru zákazníka z toho vyplývá vysoká cena a delší dodací lhůta. [2], [26] Na obrázku 17 lze vidět již od pohledu rozdíl mezi válcovaným a broušeným kuličkovým šroubem.



Obrázek 17 a) Válcovaný šroub (vlevo) [26]; b) Broušený šroub (vpravo) [26]

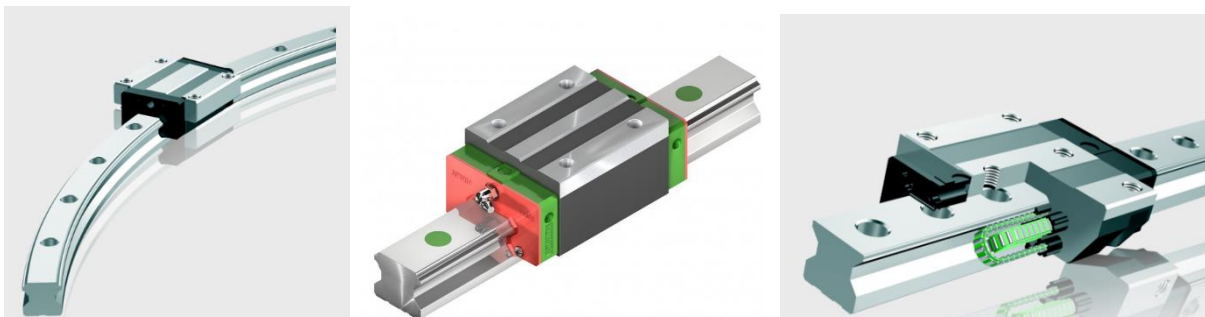
V návrhu malé modelářské frézky je uvažováno použití kuličkových šroubů s maticí od firmy TBI Motion. A to z důvodu cenové dostupnosti a možnosti použít u válcovaných kuličkových šroubů předepnutou matici. Vzhledem k tématu práce tedy volím válcovaný kuličkový šroub SCR01204 se standartní přírubovou maticí s označením SFU1204T4D o průměru 12 mm a stoupáním 4 mm, a to pro osu Y a Z. Matice je vyrobena vymezenou vůlí v různých variantách provedení a v třídách přesnosti C5 či C7. Pro osu X Volím kuličkový šroub SCR01605FC7 a opět standartní přírubovou matici s označením SFNU1605-4. Výběr kuličkového šroubu je ověřen pomocí výpočtů v následujících kapitolách. [27]

7.4.2 Lineární systémy

Lineární systémy si lze představit jako ucelený funkční celek umožňující regulovaný pohyb v dané ose. A jsou složeny z lineárního vedení, vozíku a pohonu. Vodící systémy především fixují pohyb po dané ose, popřípadě po oblouku viz Obrázek 18. [28]

Všeobecně vodící systémy lze rozdělit: [29],

- Lineární vedení s profilovou kolejnicí
 - Kuličkové vedení
 - Válečkové vedení
 - Rolničkové vedení
 - Miniaturní vedení
- Vedení s integrovaným odměřováním
- Vodící tyče



Obrázek 18 a) Hennlich – kruhové vedení (vlevo) [29]; b) Hiwin – kuličkové vedení (uprostřed) [30]; c) Hennlich – vedení s válečkovým řetězem (vpravo) [29]

Lineární vedení s profilovou kolejničí se dělí především dle typu valivých elementů, anebo dle velikosti vedení. Vzhledem k použití valivých elementů lze dosáhnout velmi přesného pohybu. A díky profilové kolejnici je schopen vozík na lineárním vedení zachytávat síly jak v horizontálním, tak i vertikálním směru. Lineární vedení má nepřeborné množství využití vzhledem k velkému počtu variací v konstrukci vedení. [30]

Další a nejjednodušší možností lineárního vedení je pomocí vodících tyčí, po kterých se pohybují nejčastěji kuličková pouzdra viz Obrázek 19. Toto řešení je oproti lineárnímu vedení s profilovou kolejnici, levnější a méně přesné. Mohou se vyrábět v průměrech od 4 mm až do 120 mm a jsou buď chromované či nerezové. Mimo jiné zákazník může volit mezi vodícími tyčemi dutými nebo plnými. Vodící tyče nalézají využití především v následujících oblastech: strojírenství, obráběcí technika, balící stroje, tiskařské stroje, textilní stroje, dopravníky, přístroje pro zdravotnictví a podobně. [31], [28]



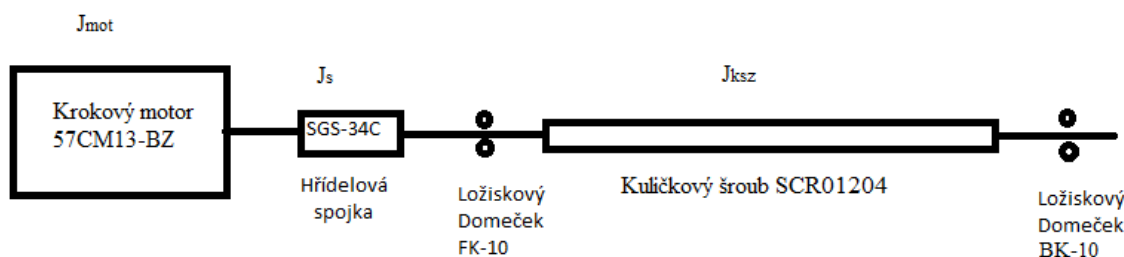
Obrázek 19 a) Kuličkové pouzdro – Hiwin [43]; b) vodící tyč – Hiwin [43]

V návrhu modelářské frézky pro osy Y a Z je uvažováno s lineárním vedením s profilovou kolejnici od firmy HIWIN. Konkrétní označení vozíku je HGH15CA a kolejnice s průchozími připevňovacími otvory je HGR15RH. Všeobecně profilové lineární vedení řady HGH se vyznačuje vysokou účinností a nízkými posuvovými silami díky použití valivých elementů – kuliček ve čtyřech oběžných dráhách. Výběr profilového lineárního vedení bude ověřen pomocí výpočtů v následujících kapitolách.

7.4.3 Výpočet osy Z

V této kapitole bude proveden kontrolní výpočet již dříve zmiňovaných komponent, konkrétně kuličkového šroubu a matice, výběru pohonu a lineárního vedení. Pro pohon osy Z byl zvolen válcovaný kuličkový šroub SCR01204 se standardní přírubovou maticí s označením SFU1204T4D o průměru 12 mm a stoupáním 4 mm. Matice je předepnuta, pro zajištění vyšší tuhosti a přesnosti pohybu. Šroub bude uložen na straně motoru pevně v držáku motoru MBA10-DP pomocí ložiskového domečku FK-10 a na druhé straně volně v ložiskovém domečku BF-10. Držák motoru, ložiskové domečky i domeček matice dodává společnost SYK Sonyung Industry. Domeček matice nese označení MGD12. Konce kuličkových šroubů jsou opracovány na základě doporučení výrobce ložiskových domečků. [27], [32]

Hmotnosti jednotlivých částí a potažmo celé osy Z byly zjištěny na základě 3D modelu vytvořeného v programu Autodesk Inventor professional. Veškeré parametry potřebné ke kompletnímu výpočtu osy Z jsou uvedeny v Tabulce 20, přičemž pro lepší znázornění důležitých parametrů bylo vytvořeno zjednodušené schéma osy Z, viz. Obrázek 20.



Obrázek 20 Zjednodušené schéma osy Z

Tabulka 20 Parametry potřebné pro kontrolní výpočty osy Z

Parametr	Značení	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	d_{0s}	12	[mm]
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	d_k	9.9	[mm]
Stoupání kuličkového šroubu	P	0.004	[m]
Dynamická tuhost kuličkového šroubu a matice	C_{dyn}	8845	[N]
Statická tuhost kuličkového šroubu a matice	C_0	18475	[N]
Koeficient uložení konců kuličkového šroubu	k_d	1,88	[-]
Koeficient závislosti na uložení	k_k	2,05	[-]
Úhel sklonu vedení	α_z	90	[°]
Účinnost valivého vedení	η_v	0,98	[-]
Účinnost kuličkového šroubu a matice	η_s	0,92	[-]
Účinnost oboustranného uložení kuličkového ložiska	η_L	0,92	[-]
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	f_1	0,005	[-]
Ekvivalentní součinitel tření v KŠM redukovaný na poloměr šroubu	f_2	0,003	[-]
Hmotnost osy Z	m_z	10	[kg]
Maximální rychlost posuvu	v_{maxz}	6	[m/min]

Řezná síla při frézování	F_{ef}	192	[N]
Vzdálenost mezi ložisky	I_{dz}	202	[mm]
Nepodepřená délka hřídele	I_k	172	[mm]
Čas rozběhu	t	0,2	[s]
Tíhové zrychlení	g	9,81	[m/s ²]

Následující výpočty byly provedeny za pomoci literatury [2], [33].

KULIČKOVÝ ŠROUB A MATICE:

Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu:

$$n_s = \frac{v_{maxz}}{p} = \frac{6}{0,004} = 1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (24)$$

Kritické otáčky:

$$n_k = k_d \cdot \left(\frac{d_k}{I_{dz}^2} \right) \cdot 10^8 = 1,88 \cdot \left(\frac{9,9}{202^2} \right) \cdot 10^8 = 45613,2 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (25)$$

Maximální přípustné otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 36490,5 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (26)$$

Na základě literatury [33] je maximální dovolený otáčkový faktor u válcovaného kuličkového šroubu s vymezenou vůlí stanoven na $D_{nmax} = 90000$.

Kontrola otáčkového faktoru:

$$D_n = d_{0s} \cdot n_s = 12 \cdot 1500 = 18000 \quad (27)$$

Při porovnání maximálního dovoleného otáčkového faktoru s otáčkovým faktorem daného kuličkového šroubu lze zjistit, že zvolený kuličkový šroub **vyhovuje**.

$$D_n < D_{nmax} \rightarrow 18000 < 90000 \quad (28)$$

Maximální teoretická dovolená axiální síla:

$$F_k = k_k \cdot \left(\frac{d_k^4}{I_k^2} \right) \cdot 10^5 = 2,05 \cdot \left(\frac{9,9^4}{172^2} \right) \cdot 10^5 = 66563,7 \text{ N} \quad (29)$$

Maximální dovolená provozní axiální síla:

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k = 0,5 \cdot 66563,7 = 33281,9 \text{ N} \quad (30)$$

Vymezení životnosti kuličkového šroubu a matice v otáčkách:

$$L_1 = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{ef}} \right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{8845}{192} \right)^3 \cdot 10^6 = 9,776 \cdot 10^{10} \text{ ot.} \quad (31)$$

Vymezení životnosti kuličkového šroubu s matice v hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{ef}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{(n_s \cdot 60)} = \left(\frac{8845}{192} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{(1500 \cdot 60)} = 1,086 \cdot 10^6 h \quad (32)$$

Na základě vypočtených hodnot lze vidět, že kuličkový šroub je předimenzován. Hodnoty životnosti jak v otáčkách, tak i v hodinách jsou velmi vysoké, tudíž kuličkový šroub s teoretického hlediska lze nahradit kuličkovým šroubem o menším průměru a menší tuhosti. Nicméně z důvodu zjednodušení návrhu a výběru dalších navazujících komponent, vybraný kuličkový šroub ponechám. Navíc je nutné mít na paměti, že výpočet životností v daném případě je čistě teoretický. V reálném pojetí bude životnost snížena díky působení okolního prostředí.

DIMENZOVÁNÍ POHONU:

Výpočet je proveden na základě literatury [2].

Statické hledisko

V rámci statického hlediska je třeba zjistit především moment daného motoru, který je potřebný pro překonání gravitační složky, pasivních odporů a axiální síly. [2]

Výpočet celkové účinnosti:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,829 \quad (33)$$

Výpočet potřebného momentu motoru:

$$\begin{aligned} M_{mot} &= \left(\frac{F_{ef} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \right) + \left(\frac{m_z \cdot g \cdot \sin(\alpha_z) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \right) \\ &= \left(\frac{192 \cdot 0,004}{2 \cdot \pi \cdot 0,829} \right) + \left(\frac{10 \cdot g \cdot \sin(90) \cdot 0,004}{2 \cdot \pi \cdot 0,829} \right) = 0,223 N.m \end{aligned} \quad (34)$$

Kinematické hledisko

Úlohou kinematického hlediska je zjištění především lineárního zrychlení osy Z a úhlového zrychlení motoru.

Lineární zrychlení osy Z:

$$a_z = \frac{v_{maxz}}{t} = \frac{6}{0,2} = 0,5 m \cdot s^{-2} \quad (35)$$

Úhlové zrychlení motoru:

$$\varepsilon_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_z}{P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,5}{0,004} = 785,4 rad \cdot s^{-2} \quad (36)$$

Dynamické hledisko

Zde je nutné nejprve určit momenty setrvačnosti posuvových hmot redukovaných na osu šroubu, moment setrvačnosti motoru a brzdy, kuličkového šroubu osy Z a hřídelové spojky. Na základě momentů setrvačnosti dostaneme celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru. Dále určíme celkový moment zátěže redukovaný na hřídel motoru, jež je složen ze ztrátového momentu třecích sil přesouvaných ploch, ze ztrátového momentu pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu a matici a posledním, ale zde nulovým ztrátovým momentem je moment pasivních odporů způsobený gravitací přesouvaných hmot. [2]

Momenty setrvačnosti motoru, brzdy a hřídelové spojky udává výrobce. Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy Z byl určen na základě 3D modelu v programu Autodesk Inventor. A moment setrvačnosti posuvových hmot redukovaný na osu šroubu osy Z je vypočten na základě parametrů z Tabulky 20. Jednotlivé momenty setrvačnosti lze nalézt v Tabulce 21.

Předepnutí kuličkového šroubu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_z \cdot g = 0,35 \cdot 10 \cdot 9,81 = 34,34 \text{ N} \quad (37)$$

Ztrátový moment třecích sil přesouvaných ploch:

$$M_G = \frac{m_z \cdot g \cdot \sin(\alpha_z) \cdot P}{2 \cdot \pi} = \frac{10 \cdot 9,81 \cdot \sin 90^\circ \cdot 0,004}{2 \cdot \pi} = 0,063 \text{ N.m} \quad (38)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu a matici:

$$M_{KSM} = \left(\frac{F_p \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \right) \cdot (1 - \eta_s^2) = \left(\frac{34,34 \cdot 0,004}{2 \cdot \pi \cdot 0,829} \right) \cdot (1 - 0,92^2) = 0,004 \text{ N.m} \quad (39)$$

Celkový moment zátěže redukovaný na hřídel motoru:

$$M_{zdrhmz} = M_G + M_{KSM} = 0,063 + 0,004 = 0,067 \text{ N.m} \quad (40)$$

Moment setrvačnosti posuvových hmot redukovaný na osu šroubu:

$$J_m = m_z \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 10 \cdot \left(\frac{0,004}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 4,053 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2 \quad (41)$$

Tabulka 21 Momenty setrvačnosti

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Moment setrvačnosti motoru a brzdy	J_{mot}	$4,6 \cdot 10^{-5}$	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy Z	J_{KSZ}	$1,762 \cdot 10^{-5}$	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti hřídelové spojky	J_s	$8 \cdot 10^{-6}$	[kg.m ²]

Pro pohon osy Z jsem navrhl použití motoru indické společnosti Leadshine Technology CO., Ltd. A to především pro nízkou cenu motoru. Konkrétně se jedná o motor s označením 57CM13-BZ. Motor je opatřen elektromagnetickou brzdou.

Výpočet celkového momentu setrvačnosti redukováného na hřídel motoru:

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_{KSZ} + J_m + J_s = 4,6 \cdot 10^{-5} + 1,762 \cdot 10^{-5} + 4,053 \cdot 10^{-6} + 8 \cdot 10^{-6} = 7,567 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2 \quad (42)$$

Výpočet potřebné velikosti momentu motoru:

$$M_{mz} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_s + M_{zdrhmz} = 7,567 \cdot 10^{-5} \cdot 785,4 + 0,067 = 0,126 \text{ N.m} \quad (43)$$

Kvalita dynamického poměru:

$$P_{d0} = \frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{7,567 \cdot 10^{-5}}{4,6 \cdot 10^{-5}} = 1,645 \quad (44)$$

Aby byl dynamický poměr kvalitní, měl by nabývat hodnot v intervalu $<1,5;3>$, přičemž čím blíže hodnotě 1,5, tím lepší dynamický poměr. [2]

Zvolený krokový motor s označením 57CM13-BZ (Obrázek 21) indické společnosti Leadshine Technology CO., Ltd tedy vyhovuje. V Tabulce 22 můžeme nalézt základní údaje o navrhovaném motoru.

Tabulka 22 Základní parametry motoru [34]

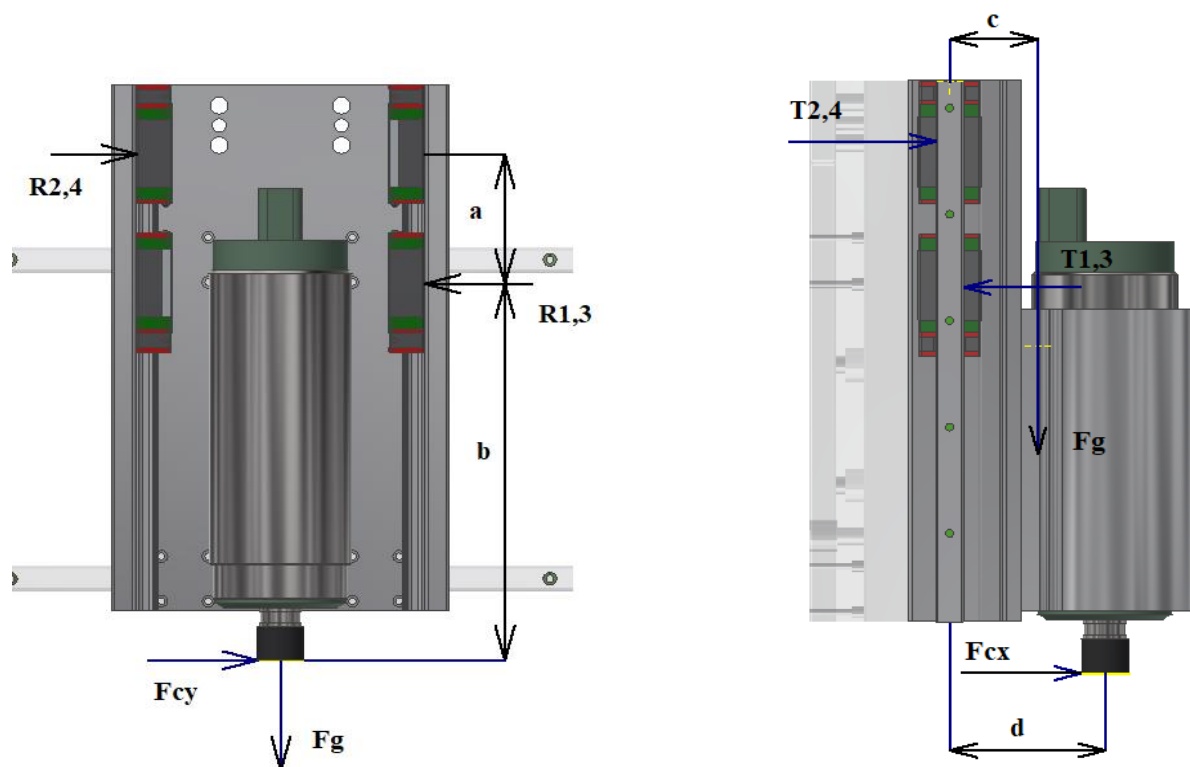
Veličina	Hodnota	Jednotka
Krok	1,8	[°]
Proud	4	[A]
Moment motoru	1,3	[N.m]
Moment brzdy	0,75	[N.m]
Hmotnost	1	[kg]
Délka	91	[mm]
Příruba	NEMA23	[-]



Obrázek 21 Zvolený krokový motor 57CM13-BZ [34]

LINEÁRNÍ VEDENÍ:

Pro lepší pochopení působícího zatížení zachytávající lineární vedení je vytvořen Obrázek 22.



Obrázek 22 Schématické znázornění silového zatížení osy Z

Pro osu Z bylo navrženo použití lineárního vedení firmy Hiwin s označením vozíku HGH15CA a kolejnice HGR15RH. Veškeré informace potřebné pro výpočty jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 23 Parametry lineárního vedení osy Z

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Dynamická tuhost vozíku lineárního vedení	C_{dyn}	11380	[N]
Statická tuhost vozíku lineárního vedení	C_0	25310	[N]
Délka profilové kolejnice	L	305	[mm]
Počet vozíku na kolejnici	-	2	[-]
Počet kolejnic	-	2	[-]
Vzdálenost 1 (viz Obrázek 22)	a	81,4	[mm]
Vzdálenost 2 (viz Obrázek 22)	b	221,9	[mm]
Vzdálenost 3 (viz Obrázek 22)	c	47,5	[mm]
Vzdálenost 4 (viz Obrázek 22)	d	84,2	[mm]
Řezná síla při frézování	$F_{cx} = F_{cy}$	192	[N]
Hmotnost	m_z	10	[kg]
Faktor zatížení	f_w	1,2	[-]
Faktor tvrdosti	f_H	1	[-]
Faktor teploty	f_T	1	[-]

Kontrola únosnosti lineárního vedení

Výpočet radiálního zatížení vozíku:

$$R_2 = R_4 = \frac{F_{cy} \cdot b}{2 \cdot a} = \frac{192 \cdot 221,9}{2 \cdot 81,4} = 261,7 \text{ N} \quad (45)$$

$$R_1 = R_3 = \frac{F_{cy}}{2} + R_2 = \frac{192}{2} + 261,7 = 357,7 \text{ N} \quad (46)$$

Výpočet tečného zatížení vozíku:

$$T_2 = T_4 = \frac{F_{cx} \cdot b}{2 \cdot a} - \frac{m_z \cdot g \cdot c}{2 \cdot a} = \frac{192 \cdot 221,9}{2 \cdot 81,4} - \frac{10 \cdot 9,81 \cdot 47,5}{2 \cdot 81,4} = 233,1 \text{ N} \quad (47)$$

$$T_1 = T_3 = \frac{F_{cx}}{2} + T_2 = \frac{192}{2} + 233,1 = 329,1 \text{ N} \quad (48)$$

Výpočet ekvivalentní statického zatížení:

$$P_e = R_1 + T_1 = 357,7 + 329,1 = 686,8 \text{ N} \quad (49)$$

Výpočet statické bezpečnosti:

$$f = \frac{C_0}{P_e} = \frac{25310}{686,8} = 36,85 \quad (50)$$

Vzhledem k tomu, že statická bezpečnost pro normální zatížení se pohybuje výrazně nad hodnotou 3, tak lineární vedení VYHOVUJE. [2]

Kontrola životnosti lineárního vedení

Výpočet jmenovité životnosti:

$$L_j = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot C_{dyn}}{f_W \cdot P_e} \right)^3 \cdot 50000 = \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 11380}{1,2 \cdot 686,8} \right)^3 \cdot 50000 = \quad (51)$$
$$= 131,63 \cdot 10^6 \text{ m}$$

Výpočet životnosti:

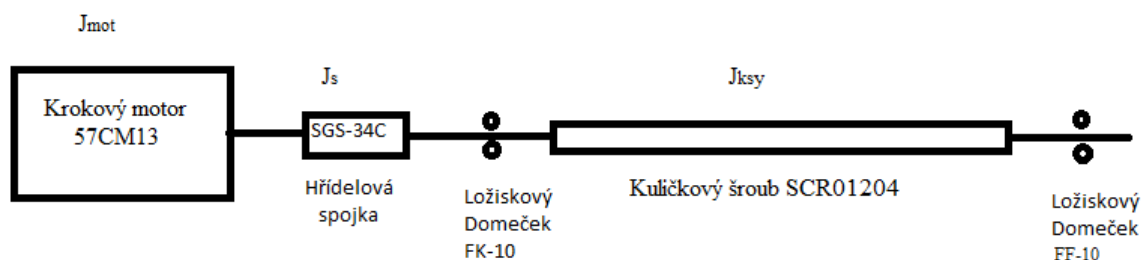
$$L_h = L_j \cdot \frac{1000}{v_{maxz} \cdot 60} = 131,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{1000}{6 \cdot 60} = 3,656 \cdot 10^8 \text{ h} \quad (52)$$

Na základě vypočtených životností je patrné, že lineární vedení je značně předimenzované. Nicméně v případě nutnosti, lze dané lineární vedení nahradit miniaturním vedením, avšak zde je nutné počítat s výrazně vyšší cenou kolejnice.

7.4.4 Výpočet osy Y

Pro pohon osy Y byl opět zvolen válcovaný kuličkový šroub SCR01204 se standartní přírubovou maticí s označením SFU1204T4D o průměru 12 mm a stoupáním 4 mm. Jako tomu bylo u osy Z. Matice je opět předepnuta. Šroub bude uložen na straně motoru pevně v držáku motoru MBA10-DP pomocí ložiskového domečku FK-10, stejně jako u osy Z. A na druhé straně volně v ložiskovém domečku FF-10. Domeček matice bude opět totožný s osou Z. [27], [32]

Hmotnosti jednotlivých částí potřebné k výpočtu osy Y byly zjištěny na základě 3D modelu vytvořeného v programu Autodesk Inventor professional. Veškeré parametry potřebné ke kompletnímu výpočtu osy Y jsou uvedeny v Tabulce 24, přičemž pro lepší znázornění důležitých parametrů bylo vytvořeno zjednodušené schéma osy Y, viz Obrázek 23.



Obrázek 23 Zjednodušené schéma osy Y

Tabulka 24 Parametry potřebné pro kontrolní výpočty osy Y

Parametr	Značení	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	d_{0s}	12	[mm]
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	d_k	9.9	[mm]
Stoupání kuličkového šroubu	P	0.004	[m]
Dynamická tuhost kuličkového šroubu a matice	C_{dyn}	8845	[N]
Statická tuhost kuličkového šroubu a matice	C_0	18475	[N]
Koeficient uložení konců kuličkového šroubu	k_d	1,88	[-]
Koeficient závislosti na uložení	k_k	2,05	[-]
Úhel sklonu vedení	α_y	0	[°]
Účinnost valivého vedení	η_v	0,98	[-]
Účinnost kuličkového šroubu a matice	η_s	0,92	[-]
Účinnost oboustranného uložení kuličkového ložiska	η_L	0,92	[-]
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	f_1	0,005	[-]
Ekvivalentní součinitel tření v KŠM redukovaný na poloměr šroubu	f_2	0,003	[-]
Hmotnost osy Y	m_y	20	[kg]
Maximální rychlost posuvu	v_{maxy}	6	[m/min]
Řezná síla při frézování	F_{ef}	192	[N]
Vzdálenost mezi ložisky	l_{dy}	580	[mm]

Nepodepřená délka hřídele	I_k	550	[mm]
Čas rozběhu	t	0,2	[s]
Tíhové zrychlení	g	9,81	[m/s ²]

Veškeré výpočty byly provedeny na základě následující literatury: [2], [33].

KULIČKOVÝ ŠROUB A MATICE:

Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu:

$$n_s = \frac{v_{maxy}}{P} = \frac{6}{0,004} = 1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (53)$$

Kritické otáčky:

$$n_k = k_d \cdot \left(\frac{d_k}{I_{dy}^2} \right) \cdot 10^8 = 1,88 \cdot \left(\frac{9,9}{580^2} \right) \cdot 10^8 = 5532,7 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (54)$$

Maximální přípustné otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 4426,2 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (55)$$

Na základě literatury [33] je maximální dovolený otáčkový faktor u válcovaného kuličkového šroubu s vymezenou vůlí stanoven na $D_{nmax} = 90000$.

Kontrola otáčkového faktoru:

$$D_n = d_{0s} \cdot n_s = 12 \cdot 1500 = 18000 \quad (56)$$

Při porovnání maximálního dovoleného otáčkového faktoru s otáčkovým faktorem daného kuličkového šroubu lze zjistit, že zvolený kuličkový šroub **vyhovuje**.

$$D_n < D_{nmax} \rightarrow 18000 < 90000 \quad (57)$$

Maximální teoretická dovolená axiální síla:

$$F_k = k_k \cdot \left(\frac{d_k^4}{I_k^2} \right) \cdot 10^5 = 2,05 \cdot \left(\frac{9,9^4}{550^2} \right) \cdot 10^5 = 6509,8 \text{ N} \quad (58)$$

Maximální dovolená provozní axiální síla:

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k = 0,5 \cdot 6509,8 = 3254,9 \text{ N} \quad (59)$$

Vymezení životnosti kuličkového šroubu a matice v otáčkách:

$$L_1 = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{ef}} \right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{8845}{192} \right)^3 \cdot 10^6 = 9,776 \cdot 10^{10} \text{ ot.} \quad (60)$$

Vymezení životnosti kuličkového šroubu s matice v hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{ef}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{(n_s \cdot 60)} = \left(\frac{8845}{192} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{(1500 \cdot 60)} = 1,086 \cdot 10^6 \text{ h} \quad (61)$$

Na základě vypočtených hodnot lze opět vidět, že kuličkový šroub je značně předimenzován. Nicméně tyto komponenty, zvláště u tak malých modelářských frézek, budou vždy předimenzované. Proto s daným kuličkovým šroubem a maticí uvažuji i nadále.

DIMENZOVÁNÍ POHONU:

Statické hledisko

Výpočet celkové účinnosti:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,829 \quad (62)$$

Výpočet potřebného momentu motoru:

$$\begin{aligned} M_{mot} &= \left(\frac{F_{ef} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \right) + \left(\frac{m_y \cdot g \cdot \sin(\alpha_y) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \right) \\ &= \left(\frac{192 \cdot 0,004}{2 \cdot \pi \cdot 0,829} \right) + \left(\frac{20 \cdot g \cdot \sin(0) \cdot 0,004}{2 \cdot \pi \cdot 0,829} \right) = 0,147 \text{ N.m} \end{aligned} \quad (63)$$

Kinematické hledisko

Lineární zrychlení osy Y:

$$a_y = \frac{v_{maxy}}{t} = \frac{60}{0,2} = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (64)$$

Úhlové zrychlení motoru:

$$\varepsilon_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_y}{P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,5}{0,004} = 785,4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (65)$$

Dynamické hledisko

Stejně jako tomu bylo u osy Z je zde nutné určit jednotlivé momenty setrvačnosti. Na základě momentů setrvačnosti dostaneme celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru. Dále určíme celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru, jež je složen ze ztrátového momentu třecích sil přesouvaných ploch, který je zde nulový, dále ze ztrátového momentu pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu a matici a posledním je ztrátový moment pasivních odporů způsobený gravitací přesouvaných hmot. [2]

Momenty setrvačnosti motoru, brzdy a hřídelové spojky udává výrobce. Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy Y byl určen na základě 3D modelu v programu Autodesk Inventor. Jednotlivé momenty setrvačnosti lze nalézt v Tabulce 25.

Předepnutí kuličkového šroubu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_y \cdot g = 0,35 \cdot 20 \cdot 9,81 = 68,67 \text{ N} \quad (66)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený gravitací přesouvaných hmot:

$$\begin{aligned} M_{GT} &= \frac{m_y \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_y) \cdot P}{2 \cdot \pi} = \frac{20 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,004}{2 \cdot \pi} \\ &= 6,245 \cdot 10^{-4} \text{ N.m} \end{aligned} \quad (67)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu a matici:

$$M_{KSM} = \left(\frac{F_p \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \right) \cdot (1 - \eta_s^2) = \left(\frac{68,67 \cdot 0,004}{2 \cdot \pi \cdot 0,829} \right) \cdot (1 - 0,92^2) = \quad (68)$$

$$= 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}$$

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru:

$$M_{zdrhmy} = M_{GT} + M_{KSM} = 6,245 \cdot 10^{-4} + 8,1 \cdot 10^{-3} = 8,72 \cdot 10^{-3} \text{ N.m} \quad (69)$$

Moment setrvačnosti posuvových hmot redukováný na osu šroubu:

$$J_m = m_y \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 20 \cdot \left(\frac{0,004}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 8,106 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2 \quad (70)$$

Tabulka 25 Momenty setrvačnosti

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Moment setrvačnosti motoru	J_{mot}	$3 \cdot 10^{-5}$	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy Y	J_{KSY}	$9,385 \cdot 10^{-6}$	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti hřídelové spojky	J_s	$8 \cdot 10^{-6}$	[kg.m ²]

Pro pohon osy Y jsem navrhl použití motoru indické společnosti Leadshine Technology CO., Ltd. Konkrétně se jedná o motor s označením 57CM13.

Výpočet celkového momentu setrvačnosti redukováného na hřídel motoru:

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_{KSY} + J_m + J_s = 3 \cdot 10^{-5} + 9,385 \cdot 10^{-6} + \quad (71)$$

$$8,106 \cdot 10^{-6} + 8 \cdot 10^{-6} = 5,549 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2$$

Výpočet potřebné velikosti momentu motoru:

$$M_{mz} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_s + M_{zdrhmy} = 5,549 \cdot 10^{-5} \cdot 785,4 + 8,72 \cdot 10^{-3} = \quad (72)$$

$$= 0,052 \text{ N.m}$$

Kvalita dynamického poměru:

$$P_{d0} = \frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{5,549 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-5}} = 1,85 \quad (73)$$

Zvolený krokový motor s označením 57CM13 (Obrázek 24) indické společnosti Leadshine Technology CO., Ltd vyhovuje. V Tabulce 26 můžeme nalézt základní údaje o navrhovaném motoru.

Tabulka 26 Základní parametry motoru [35]

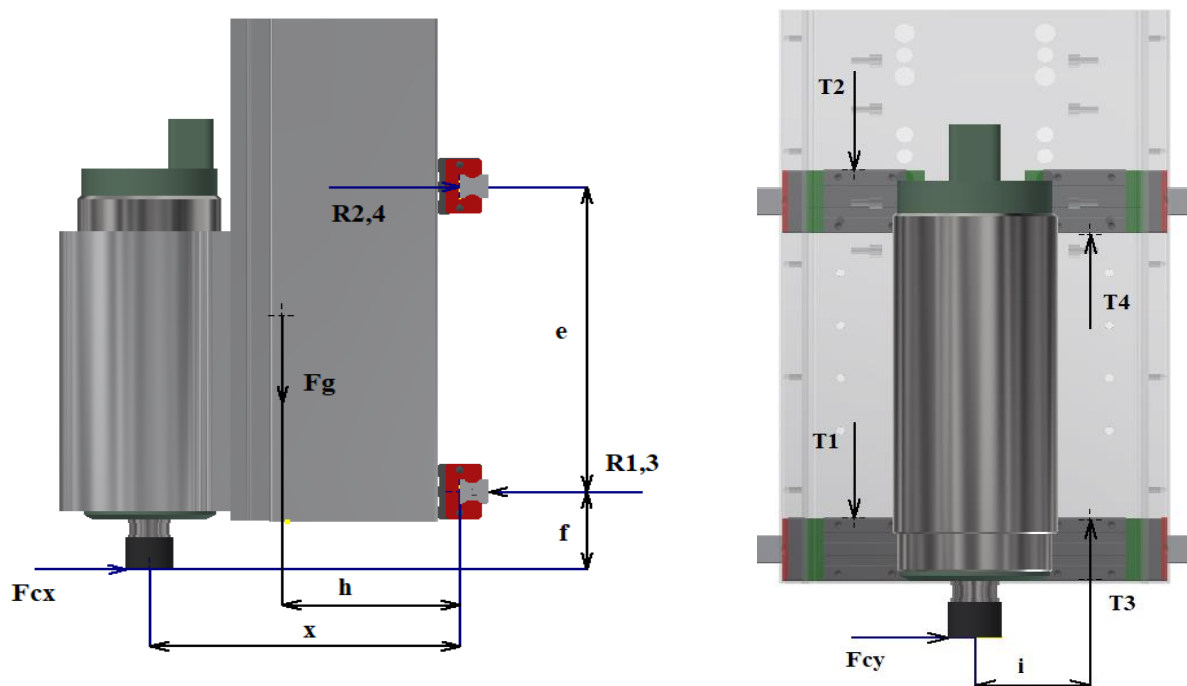
Veličina	Hodnota	Jednotka
Krok	1,8	[°]
Proud	4	[A]
Moment motoru	1,3	[N.m]
Hmotnost	0,7	[kg]
Délka	55	[mm]
Příruba	NEMA23	[-]



Obrázek 24 Krokový motor 57CM13 [35]

LINEÁRNÍ VEDENÍ:

Pro lepší pochopení působícího zatížení zachytávající lineární vedení je vytvořen Obrázek 25.



Obrázek 25 Schématické znázornění silového zatížení osy Y

Pro osu Y bylo navrženo použití lineárního vedení firmy Hiwin s označením vozíku HGH15CA a kolejnice HGR15RH. Veškeré informace potřebné pro výpočty jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 27 Parametry lineárního vedení osy Y

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Dynamická tuhost vozíku lineárního vedení	C_{dyn}	11380	[N]
Statická tuhost vozíku lineárního vedení	C_0	25310	[N]
Délka profilové kolejnice	L	580	[mm]
Počet vozíku na kolejnici	-	2	[-]
Počet kolejníc	-	2	[-]
Vzdálenost 1 (viz Obrázek 25)	e	185	[mm]
Vzdálenost 2 (viz Obrázek 25)	f	47,1	[mm]
Vzdálenost 3 (viz Obrázek 25)	h	98,1	[mm]
Vzdálenost 4 (viz Obrázek 25)	i	58,5	[mm]
Vzdálenost 5 (viz Obrázek 25)	x	171,2	[mm]
Řezná síla při frézování	$F_{cx} = F_{cy}$	192	[N]
Hmotnost	m_y	20	[kg]
Faktor zatížení	f_w	1,2	[-]
Faktor tvrdosti	f_H	1	[-]
Faktor teploty	f_T	1	[-]

Kontrola únosnosti lineárního vedení

Výpočet radiálního zatížení vozíku:

$$R_3 = R_4 = \frac{F_{cx} \cdot f}{2 \cdot e} + \frac{F_g \cdot h}{2 \cdot e} = \frac{192 \cdot 47,1}{2 \cdot 185} + \frac{20 \cdot 9,81 \cdot 98,1}{2 \cdot 185} = 76,5 \text{ N} \quad (74)$$

$$R_1 = R_2 = \frac{F_{cx}}{2} + R_3 = \frac{192}{2} + 76,5 = 172,5 \text{ N} \quad (75)$$

Výpočet tečného zatížení vozíku:

$$T_3 = T_4 = \frac{-F_{cx} \cdot f + F_g \cdot h}{2 \cdot (i + i)} = \frac{-192 \cdot 47,1 + 20 \cdot 9,81 \cdot 98,1}{2 \cdot (58,5 + 58,5)} = 43,6 \text{ N} \quad (76)$$

$$T_1 = T_2 = \frac{F_g}{2} + T_3 = \frac{20 \cdot 9,81}{2} + 43,6 = 141,7 \text{ N} \quad (77)$$

Výpočet ekvivalentní statického zatížení:

$$P_e = R_1 + T_1 = 141,7 + 172,5 = 314,2 \text{ N} \quad (78)$$

Výpočet statické bezpečnosti:

$$f = \frac{C_0}{P_e} = \frac{25310}{314,2} = 80,55 \quad (79)$$

Vzhledem k tomu, že statická bezpečnost pro normální zatížení se pohybuje výrazně nad hodnotou 3, tak lineární vedení **vyhovuje**. [2]

Kontrola životnosti lineárního vedení

Výpočet jmenovité životnosti:

$$L_j = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot C_{dyn}}{f_W \cdot P_e} \right)^3 \cdot 50000 = \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 11380}{1,2 \cdot 314,2} \right)^3 \cdot 50000 = \quad (80)$$

$$= 1,375 \cdot 10^9 \text{ m}$$

Výpočet životnosti:

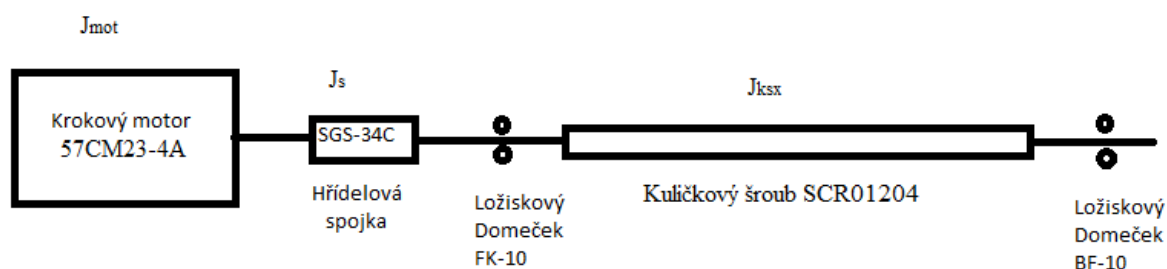
$$L_h = L_j \cdot \frac{1000}{v_{maxz} \cdot 60} = 1,375 \cdot 10^9 \cdot \frac{1000}{6 \cdot 60} = 3,819 \cdot 10^9 \text{ h} \quad (81)$$

Na základě vypočtených životností je opět patrné, že lineární vedení je značně předimenzované. Nicméně v případě nutnosti, lze dané lineární vedení nahradit miniaturním vedením, avšak zde je nutné počítat s výrazně vyšší cenou kolejnice a menšími zástavbovými rozměry.

7.4.5 Výpočet osy X

Pro pohon osy X byl opět zvolen, jako v předchozích případech válcovaný kuličkový šroub SCR01204 se standartní přírubovou maticí s označením SFU1204T4D o průměru 12 mm a stoupáním 4 mm. Matice je opět předepnuta. Kuličkový šroub bude uložen stejným způsobem, jako tomu je u osy Z, tzn. na straně motoru bude pevně uložen v držáku motoru MBA10-DP pomocí ložiskového domečku FK-10. A na druhé straně volně v ložiskovém domečku BF-10. Domeček matice bude opět totožný s osou Z. [27], [32]

Hmotnosti potřebné k výpočtu osy X byly opět zjištěny na základě 3D modelu. Veškeré parametry potřebné ke kompletnímu výpočtu osy X jsou uvedeny v Tabulce 27, přičemž pro lepší znázornění důležitých parametrů bylo vytvořeno zjednodušené schéma osy X, viz Obrázek 26.



Obrázek 26 Zjednodušené schéma osy X

Tabulka 28 Parametry potřebné pro kontrolní výpočty osy X

Parametr	Značení	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	d_{0s}	12	[mm]
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	d_k	9.9	[mm]
Stoupání kuličkového šroubu	P	0.004	[m]
Dynamická tuhost kuličkového šroubu a matice	C_{dyn}	8845	[N]
Statická tuhost kuličkového šroubu a matice	C_0	18475	[N]
Koeficient uložení konců kuličkového šroubu	k_d	1,88	[-]
Koeficient závislosti na uložení	k_k	2,05	[-]
Úhel sklonu vedení	α_y	0	[°]
Účinnost valivého vedení	η_v	0,98	[-]
Účinnost kuličkového šroubu a matice	η_s	0,92	[-]
Účinnost oboustranného uložení kuličkového ložiska	η_L	0,92	[-]
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	f_1	0,005	[-]
Ekvivalentní součinitel tření v KŠM redukovaný na poloměr šroubu	f_2	0,003	[-]
Hmotnost osy X	m_x	56	[kg]
Maximální rychlost posuvu	v_{maxx}	6	[m/min]
Řezná síla při frézování	F_{ef}	192	[N]
Vzdálenost mezi ložisky	I_{dx}	544	[mm]

Nepodepřená délka hřídele	I_k	514	[mm]
Čas rozběhu	t	0,2	[s]
Tíhové zrychlení	g	9,81	[m/s ²]

Veškeré výpočty byly provedeny na základě následující literatury: [2], [33].

KULIČKOVÝ ŠROUB A MATICE:

Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu:

$$n_{\xi} = \frac{v_{maxx}}{P} = \frac{6}{0,004} = 1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (82)$$

Kritické otáčky:

$$n_k = k_d \cdot \left(\frac{d_k}{I_{dx}^2} \right) \cdot 10^8 = 1,88 \cdot \left(\frac{9,9}{544^2} \right) \cdot 10^8 = 6289,2 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (83)$$

Maximální přípustné otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 5031,4 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (84)$$

Na základě literatury [33] je maximální dovolený otáčkový faktor u válcovaného kuličkového šroubu s vymezenou vůlí stanoven na $D_{nmax} = 90000$.

Kontrola otáčkového faktoru:

$$D_n = d_{0s} \cdot n_{\xi} = 12 \cdot 1500 = 18000 \quad (85)$$

Při porovnání maximálního dovoleného otáčkového faktoru s otáčkovým faktorem daného kuličkového šroubu lze zjistit, že zvolený kuličkový šroub **vyhovuje**.

$$D_n < D_{nmax} \rightarrow 18000 < 90000 \quad (86)$$

Maximální teoretická dovolená axiální síla:

$$F_k = k_k \cdot \left(\frac{d_k^4}{I_k^2} \right) \cdot 10^5 = 2,05 \cdot \left(\frac{9,9^4}{514^2} \right) \cdot 10^5 = 7453,6 \text{ N} \quad (87)$$

Maximální dovolená provozní axiální síla:

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k = 0,5 \cdot 7453,6 = 3726,8 \text{ N} \quad (88)$$

Vymezení životnosti kuličkového šroubu a matice v otáčkách:

$$L_1 = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{ef}} \right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{8845}{192} \right)^3 \cdot 10^6 = 9,776 \cdot 10^{10} \text{ ot.} \quad (89)$$

Vymezení životnosti kuličkového šroubu s matice v hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{ef}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{(n_{\xi} \cdot 60)} = \left(\frac{8845}{192} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{(1500 \cdot 60)} = 1,086 \cdot 10^6 \text{ h} \quad (90)$$

DIMENZOVÁNÍ POHONU:

Statické hledisko

Výpočet celkové účinnosti:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,829 \quad (91)$$

Výpočet potřebného momentu motoru:

$$\begin{aligned} M_{mot} &= \left(\frac{F_{ef} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \right) + \left(\frac{m_x \cdot g \cdot \sin(\alpha_x) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \right) \\ &= \left(\frac{192 \cdot 0,004}{2 \cdot \pi \cdot 0,829} \right) + \left(\frac{56 \cdot 9,81 \cdot \sin(0) \cdot 0,004}{2 \cdot \pi \cdot 0,829} \right) = 0,147 \text{ N.m} \end{aligned} \quad (92)$$

Kinematické hledisko

Lineární zrychlení osy X:

$$a_y = \frac{v_{maxx}}{t} = \frac{6}{0,2} = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (93)$$

Úhlové zrychlení motoru:

$$\varepsilon_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_x}{P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,5}{0,004} = 785,4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (94)$$

Dynamické hledisko

Jednotlivé momenty setrvačnosti lze nalézt v Tabulce 28.

Předepnutí kuličkového šroubu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_z \cdot g = 0,35 \cdot 56 \cdot 9,81 = 192,3 \text{ N} \quad (95)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený gravitací přesouvaných hmot:

$$\begin{aligned} M_{GT} &= \frac{m_z \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_z) \cdot P}{2 \cdot \pi} = \frac{56 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,004}{2 \cdot \pi} \\ &= 1,749 \cdot 10^{-3} \text{ N.m} \end{aligned} \quad (96)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu a matici:

$$\begin{aligned} M_{KSM} &= \left(\frac{F_p \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \right) \cdot (1 - \eta_s^2) = \left(\frac{192,3 \cdot 0,004}{2 \cdot \pi \cdot 0,829} \right) \cdot (1 - 0,92^2) = \\ &= 0,023 \text{ N.m} \end{aligned} \quad (97)$$

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru:

$$M_{zdrhmx} = M_{GT} + M_{KSM} = 1,749 \cdot 10^{-3} + 0,023 = 0,024 \text{ N.m} \quad (98)$$

Moment setrvačnosti posuvových hmot redukovaný na osu šroubu:

$$J_m = m_x \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 56 \cdot \left(\frac{0,004}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 2,27 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2 \quad (99)$$

Tabulka 29 Momenty setrvačnosti

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Moment setrvačnosti motoru	J_{mot}	$4,8 \cdot 10^{-5}$	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy Y	J_{KSX}	$8,963 \cdot 10^{-6}$	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti hřídelové spojky	J_s	$8 \cdot 10^{-6}$	[kg.m ²]

Pro pohon osy X jsem navrhl použití stejného motoru jako tomu bylo v předešlých případech, konkrétně motor s označením 57CM23-4A.

Výpočet celkového momentu setrvačnosti redukovaného na hřídel motoru:

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_{KSX} + J_m + J_s = 4,8 \cdot 10^{-5} + 8,963 \cdot 10^{-6} + 2,27 \cdot 10^{-5} + 8 \cdot 10^{-6} = 8,7663 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2 \quad (100)$$

Výpočet potřebné velikosti momentu motoru:

$$M_{mz} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_s + M_{zdrhmx} = 8,77 \cdot 10^{-5} \cdot 785,4 + 0,024 = 0,093 \text{ N.m} \quad (101)$$

Kvalita dynamického poměru:

$$P_{d0} = \frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{8,77 \cdot 10^{-5}}{4,8 \cdot 10^{-5}} = 1,83 \quad (102)$$

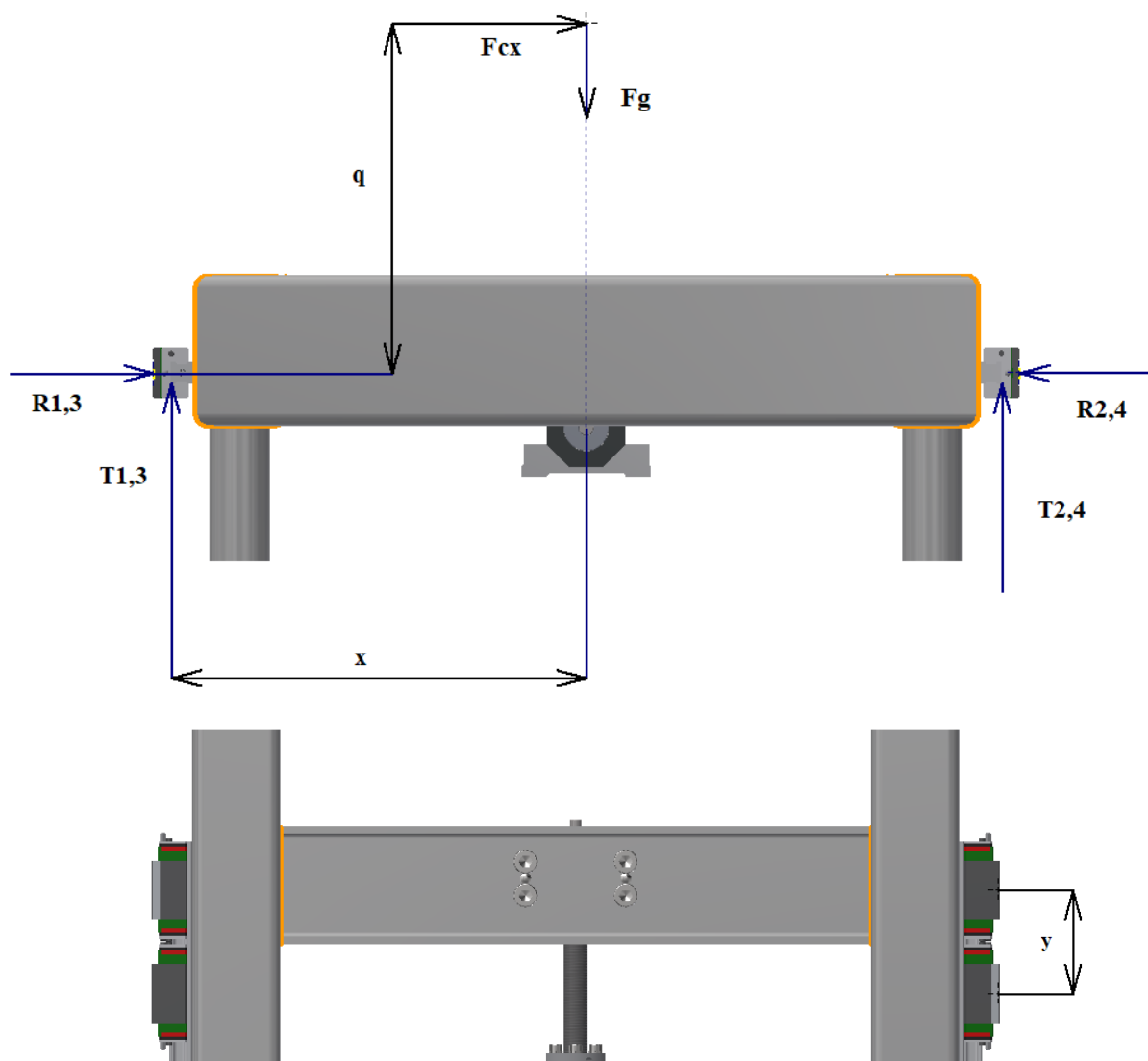
Zvolený krokový motor s označením 57CM23-4A vyhovuje. V Tabulce 29 můžeme nalézt základní údaje o navrhovaném motoru.

Tabulka 30 Základní parametry motoru [36]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Krok	1,8	[°]
Proud	4	[A]
Moment motoru	2,3	[N.m]
Hmotnost	1,1	[kg]
Délka	76	[mm]
Příruba	NEMA23	[-]

LINEÁRNÍ VEDENÍ:

Pro lepší pochopení působícího zatížení zachytávající lineární vedení je vytvořen Obrázek 27.



Obrázek 27 Schématické znázornění silového zatížení osy X

Pro osu Z bylo navrženo použití lineárního vedení firmy Hiwin s označením vozíku HGH15CA a kolejnice HGR15RH. Veškeré informace potřebné pro výpočty jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 31 Parametry lineárního vedení osy X

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Dynamická tuhost vozíku lineárního vedení	C_{dyn}	11380	[N]
Statická tuhost vozíku lineárního vedení	C_0	25310	[N]
Délka profilové kolejnice	L	630	[mm]
Počet vozíku na kolejnici	-	2	[-]
Počet kolejnic	-	2	[-]
Vzdálenost 1 (viz Obrázek 26)	x	275,7	[mm]
Vzdálenost 2 (viz Obrázek 26)	q	241,6	[mm]
Vzdálenost 3 (viz Obrázek 26)	y	75	[mm]
Řezná síla při frézování	$F_{cx} = F_{cy}$	192	[N]
Hmotnost	m_y	56	[kg]
Faktor zatížení	f_w	1,3	[-]
Faktor tvrdosti	f_H	1	[-]
Faktor teploty	f_T	1	[-]

Kontrola únosnosti lineárního vedení

Výpočet radiálního zatížení vozíku:

$$R_1 = R_3 = \frac{F_g \cdot x - F_{cx} \cdot q}{2 \cdot y} = \frac{56 \cdot 9,81 \cdot 275,7 - 192 \cdot 241,6}{2 \cdot 75} = 700,5 \text{ N} \quad (103)$$

$$R_4 = R_2 = \frac{F_{cx}}{2} + R_1 = \frac{192}{2} + 700,5 = 796,5 \text{ N} \quad (104)$$

Výpočet tečného zatížení vozíku:

$$T_3 = T_1 = \frac{F_g \cdot x - F_{cx} \cdot q}{2 \cdot (x + x)} = \frac{56 \cdot 9,81 \cdot 275,7 - 192 \cdot 241,6}{2 \cdot (275,7 + 275,7)} = 95,2 \text{ N} \quad (105)$$

$$T_4 = T_2 = \frac{F_g}{2} - T_1 = \frac{56 \cdot 9,81}{2} + 95,2 = 179,5 \text{ N} \quad (106)$$

Výpočet ekvivalentní statického zatížení:

$$P_e = R_2 + T_2 = 796,5 + 179,5 = 976 \text{ N} \quad (107)$$

Výpočet statické bezpečnosti:

$$f = \frac{C_0}{P_e} = \frac{25310}{976} = 25,9 \quad (108)$$

Vzhledem k tomu, že statická bezpečnost pro normální zatížení se pohybuje výrazně nad hodnotou 3, tak lineární vedení VYHOVUJE. [2]

Kontrola životnosti lineárního vedení

Výpočet jmenovité životnosti:

$$L_j = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot C_{dyn}}{f_W \cdot P_e} \right)^3 \cdot 50000 = \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 11380}{1,3 \cdot 976} \right)^3 \cdot 50000 = \quad (109)$$
$$= 3,6076 \cdot 10^7 \text{ m}$$

Výpočet životnosti:

$$L_h = L_j \cdot \frac{1000}{v_{maxz} \cdot 60} = 3,6076 \cdot 10^7 \cdot \frac{1000}{6 \cdot 60} = 1,002 \cdot 10^8 \text{ h} \quad (110)$$

I zde je patrné, že lineární vedení je předimenzované, nicméně lineární vedení s menší únosností a srovnatelnou cenou, ba i menší je téměř k nalezení. Zde je hlavním porovnávacím parametrem celková cena vedení. Tudíž i zde budu uvažovat s navrženým vedením v konstrukci modelářské frézky.

7.5 Konstrukční návrh modelářské frézky

V následující kapitole budou specifikovány a popsány jednotlivé uzlové části modelářské frézky. Uzlovými částmi jsou myšleny tyto díly či sestavy: základna stroje neboli svařenec kostry stolu, samotná konstrukce stolu s již usazeným lineárním vedením na každé straně svařence společně s usazeným kuličkovým šroubem. Mezi další uzly patří tzv. spodní portál, příčník, sáně, upevnění motorů, vřetena a desky stolu a v poslední části kryt základny.

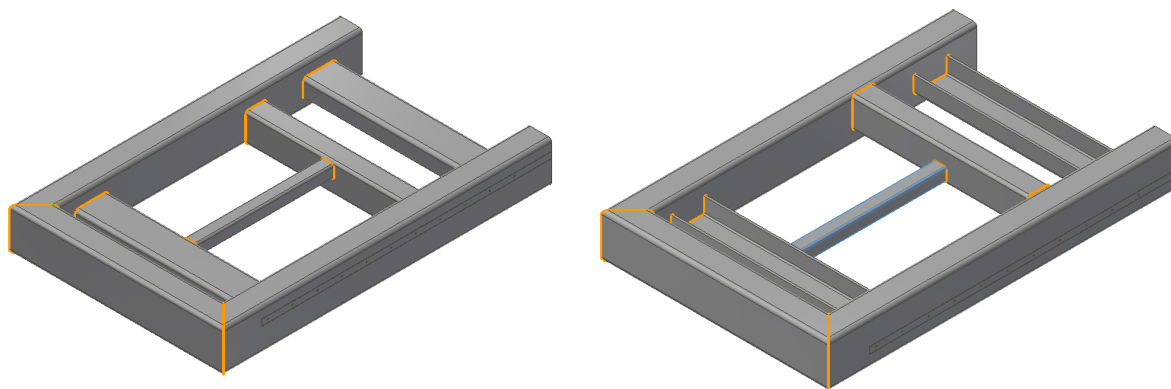
Veškeré obráběcí operace jednotlivých dílů budou prováděny na vertikálním obráběcím centru MCV1016 BaseLine firmy Kovosvit Mas. Na základě specifikace stroje je upínací plocha stolu 1300x600 mm, což je dle mého názoru dostatečné. Tuto cestu volím z důvodu možnosti obrobění součástí v podstatě jen za symbolickou cenu. I když některé součásti nebudou schopny být obroběny na jedno upnutí.

7.5.1 Svařenec stolu

Konstrukce svařence stolu je složena zejména z obdélníkových uzavřených silnostěnných jeleků a obdélníkových profilů ve tvaru U.

První koncepce svařence stolu byla složena pouze z obdélníkových uzavřených jeleků různých rozměrů, viz obrázek 28a. Zde hlavní rám je složen ze tří uzavřených jeleků o rozměru 100x60x5, dvou příček o rozměrech 80x40x5 a dvou příček o rozměrech 40x40x3 a 70x50x3. Nicméně jsem zde shledal vznik větší koncentrace napětí při upevnění ložiskových domečků kuličkového šroubu skrz obě stěny uzavřeného profilu. Z daného důvodu jsem první koncepci změnil a nahradil jsem problémové části obdélníkovým profilem ve tvaru U o rozměru 80x40x40x5 a prostřední příčku jsem zmenšil z rozměru 40x40x3 na rozměr 30x30x2.

Druhá koncepce svařence stolu je zobrazena na obrázku 28b. Veškeré sváry jsou provedeny v ochranné atmosféře metodou MAG. Pro konstrukci jsem použil ekvivalent materiálu 11375 neboli S235JR. Tento materiál je zaručeně svařitelný. Celkové rozměry konstrukce jsou 800x520x100. Váha svařence stolu činí 28,9 kg.

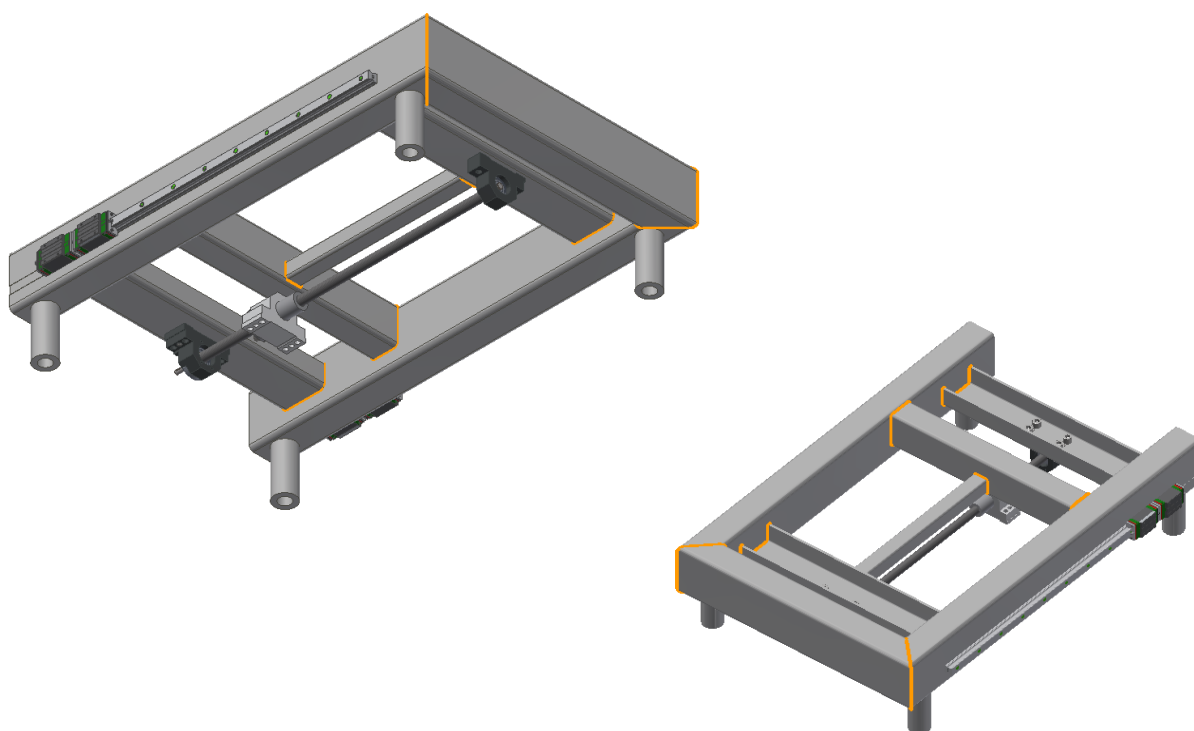


Obrázek 28 a) První koncepce svařence stolu; b) Konečná koncepce svařence stolu

7.5.2 Konstrukce stolu

Dalším uzlem v konstrukci modelářské frézky je samotná konstrukce stolu, kde je řešeno ustavení ložiskových domečků, kuličkového šroubu společně domečkem na matici, dále ustavení lineárního vedení po stranách kostry stolu a v poslední řadě přišroubování noh stolu.

Opět zde byla navržena koncepce, která byla v průběhu navrhování dalších uzlů změněna. Na obrázku 29 lze vidět pohled na konstrukci první koncepce s obou stran.



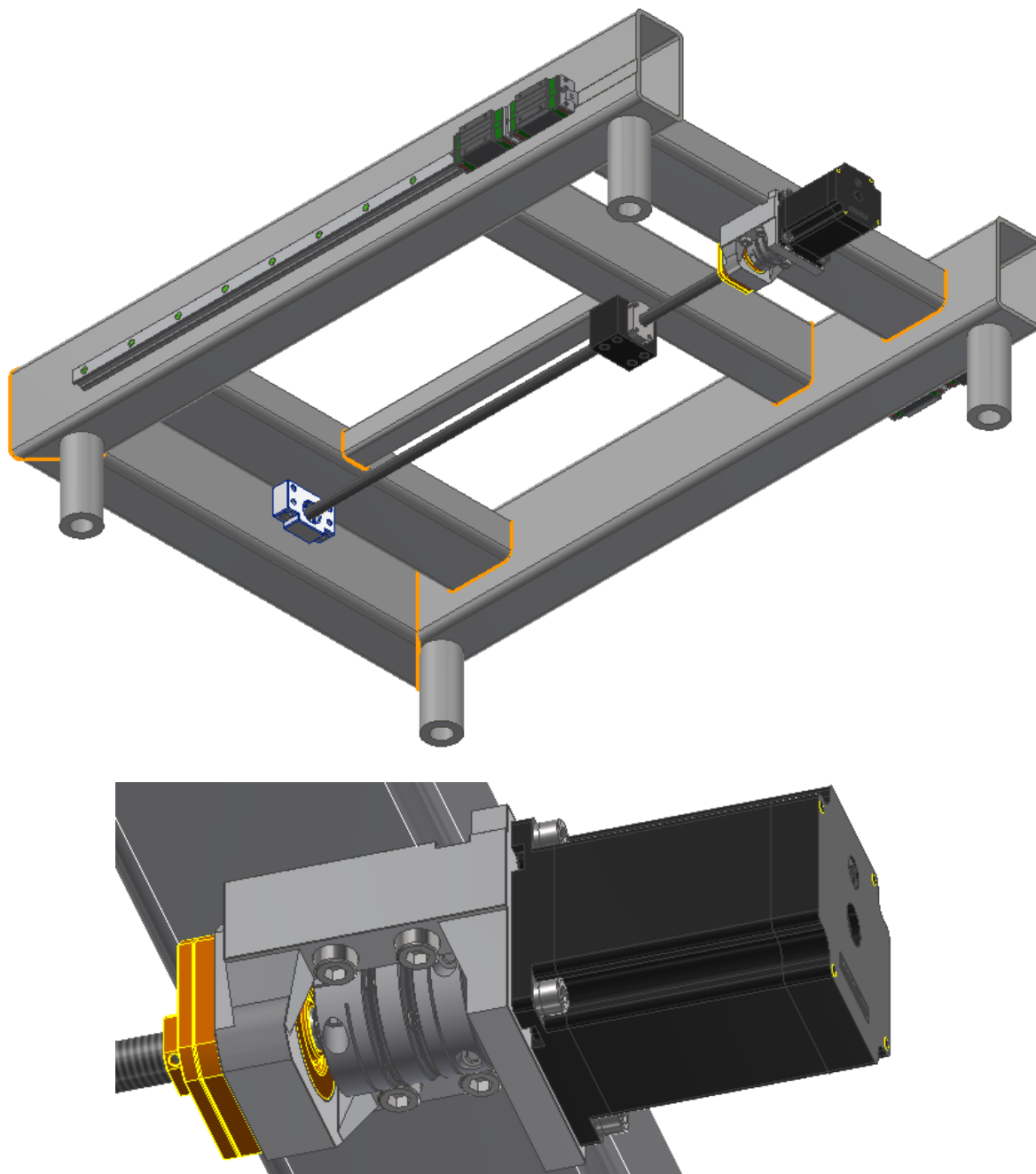
Obrázek 29 První koncepce konstrukce stolu

Pro lepší usazení kolejnice lineárního vedení a hlavně zajištění rovnoběžnosti, bylo navrženo mírné vyfrézování drážky na boku obou bočnic viz obrázek 30. Tato drážka a potažmo spodní hrana drážky má splňovat úlohu referenční hrany. Avšak vzhledem ke skutečnosti, že tato drážka bude vyfrézována na jeklu, jenž má tloušťku stěny 5 mm, nesmí být nikterak hluboká. Proto hloubka drážky je 1 mm. Jelikož kolejnice budou upevňovány shora, tak v drážkách v požadovaných roztečích budou vyvrtány závitové díry.



Obrázek 30 Referenční drážky pro ustavení kolejnice

Další důležitou částí tohoto uzlu je ustavení kuličkového šroubu a potažmo ložiskových domečků. Původně zde byl navržen okružovaný kuličkový šroub o průměru 16 mm a stoupáním 5 mm od společnosti Hiwin. A k tomu příslušné ložiskové domečky typu SLA-10 a SFA-10. Nicméně od této varianty bylo upuštěno z důvodu vysoké ceny kuličkového šroubu a ložiskových domečků. Tato důležitá část stroje byla nahrazena válcovaným kuličkovým šroubem o průměru 12 mm a stoupáním 4 mm společně s předepnutou maticí a ložiskovými domečky FK-10 a BF-10. Tato vyrianta je výrazně levnější za současné velmi podobné statické tuhosti. Navíc se zde nabízí možnost použití držáku motoru s označením MBA10-DP a hřídelové spojky SGL-34C viz obrázek 31b. Celkový pohled je zobrazen na obrázku 31a.

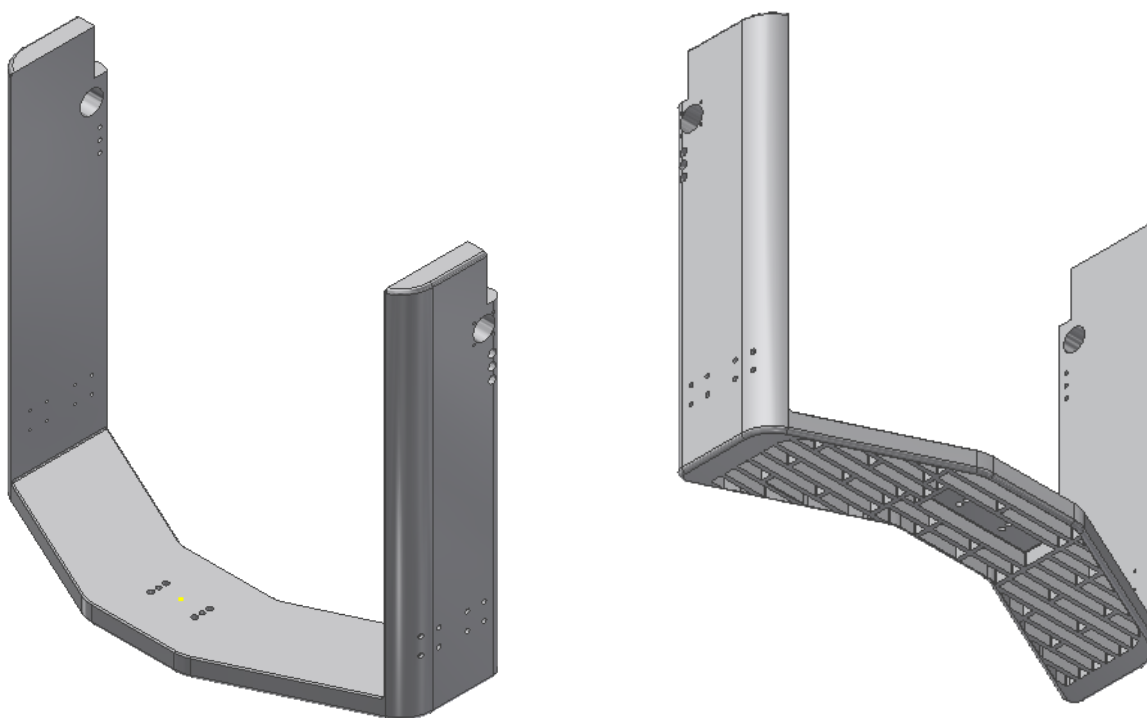


Obrázek 31 a) Celková konstrukce stolu (nahore); b) Upevnění motoru (dole)

7.5.3 Spodní portál

Zde se jedná o odlitek, jenž původně měl být z materiálu EN-GJL-250. Nicméně od této úvahy bylo upuštěno z důvodu špatného následného obrábění a vysoké hmotnosti dílu. Dalším uvažovaným materiálem byla tvárná litina s označením EN-GJS-400-15. A to zejména díky své výrazně lepší obrobiteľnosti, v podstatě stejné ceny za kg materiálu, avšak podobnou hmotností. Nicméně i od tohoto materiálu bylo upuštěno a konečným materiálem pro tento odlitek se stal dural z důvodu vysoké pevnosti, velmi dobré obrobiteľnosti a nízké hmotnosti. Dural v porovnání s tvárnou litinou je sice asi 2x dražší, ale také téměř 3x lehčí.

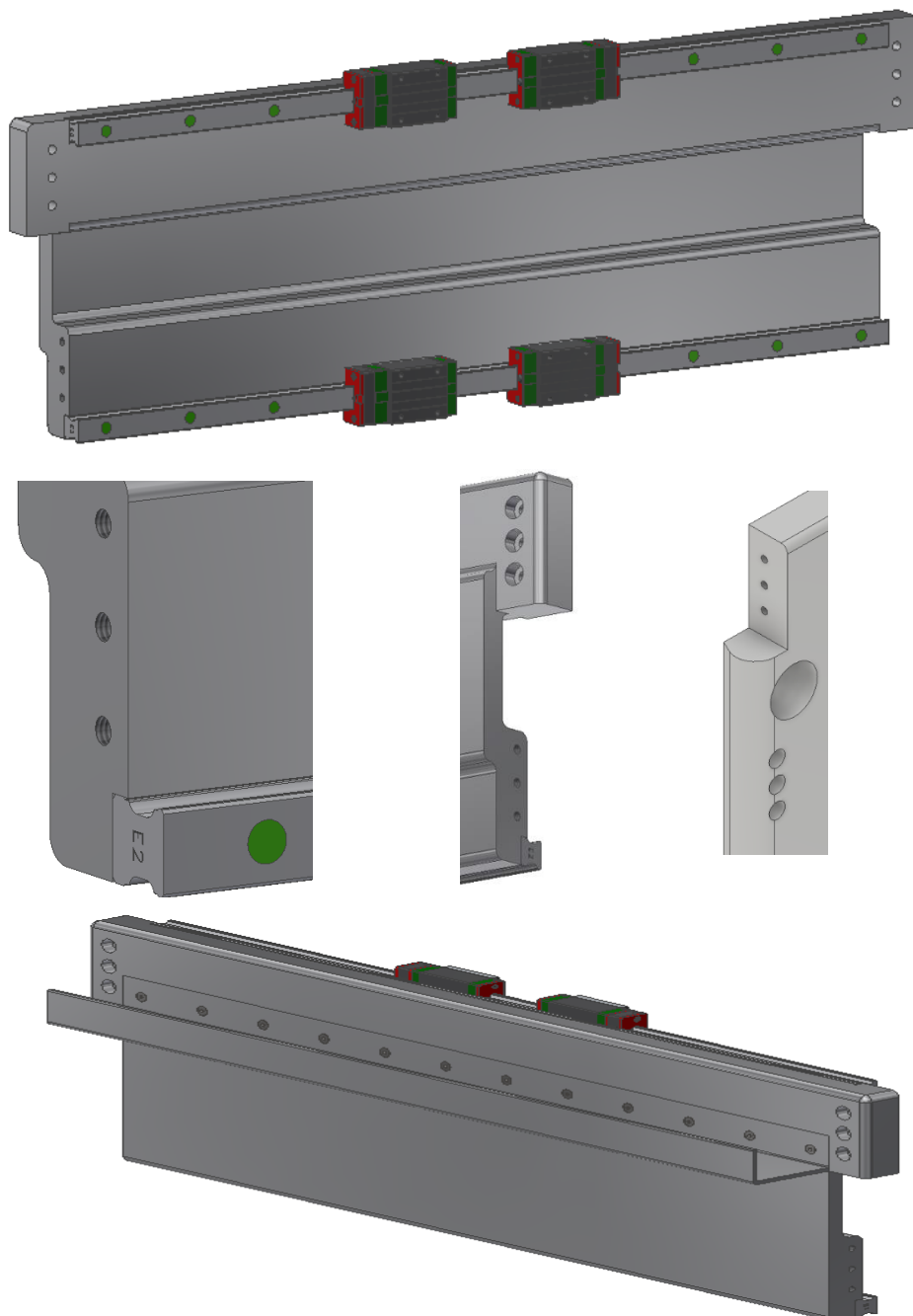
Spodní portál je odléván do pískových forem, jelikož tzv. lití do písku se vyznačuje vysokou flexibilitou a v porovnání s dalšími způsoby lití je nejlevnější. Díl je následně po odlití povrchově upraven způsobem SurTec a obroben viz obrázek 32.



Obrázek 32 Spodní portál po obrobení

7.5.4 Příčník

Tento díl je do své konečné podoby obroben z polotovaru – desky o rozměru 640x200x25. Jehož materiálem je opět dural. Jak lze vidět na obrázku 33, horní i spodní část příčníku je opatřena referenční hranou pro snazší ustavení lineárního vedení.

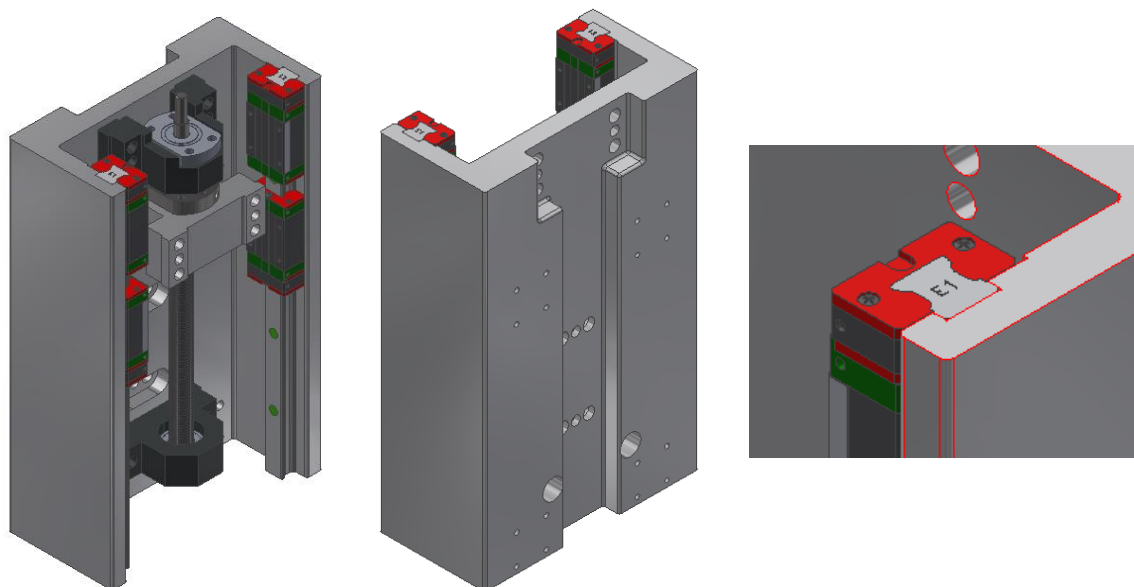


Obrázek 33 a) Konstrukce příčníku – nahoře; b) Referenční hrana – vlevo; c) Obrobené plochy pro lepší usazení příčníku – uprostřed; d) Protikus (spodní portál) k příčníku – vpravo. e) zadní pohled (dole)

Dále jsou zde na obou stranách příčníku a protikusu (spodního portálu) obrobeny plochy z důvodu následné lepší montáže příčníku na spodní portál viz obrázek 33c, d. Dále na zadní straně příčníku vyfrézovaná drážka pro usazení U profilu o rozměrech 60x30x30x3, který slouží jako opora energetického řetězu.

7.5.5 Sáně a vřeteník

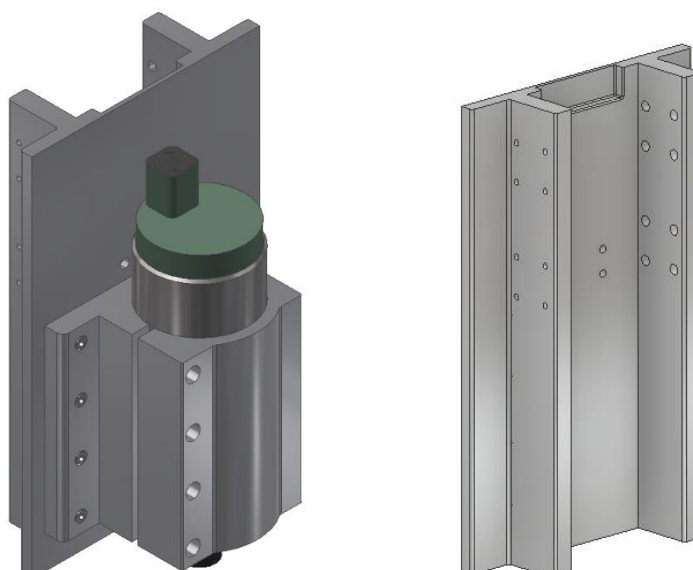
Sáně jsou vyrobeny z polotovaru o rozměrech 305x190x80, jehož materiálem je opět hliníková slitina – dural. Na obrázku 34a, b lze vidět původní koncepci s okružovaným kuličkovým šroubem. Dále na obrázku 34c lze vidět tzv. referenční drážku pro ustavení kolejnice lineárního vedení.



Obrázek 34 a) Pohled zepředu – vlevo; b) Pohled zezadu – uprostřed; c) Referenční drážka – vpravo.

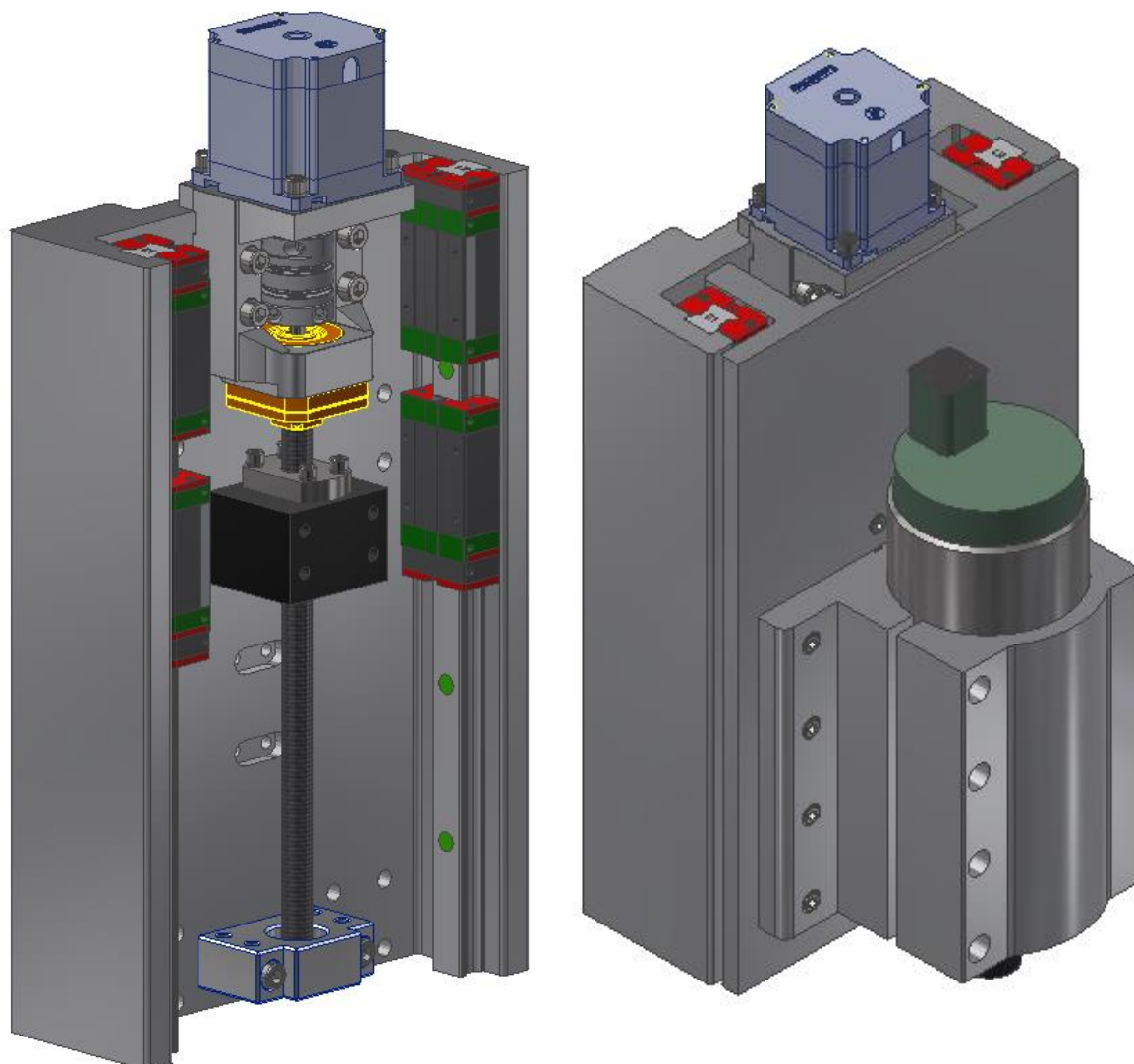
Jak bylo zmíněno na předešlých stránkách okružovaný kuličkový šroub od společnosti Hiwin byl zde nahrazen válcovaným kuličkovým šroubem s předepnutou maticí od společnosti TBI Motion. Nová koncepce je zobrazena na obrázku 36.

Další klíčovým uzlem je součást, na které je přichyceno vřeteno. Tato součást je nazvána vřeteníkem a to i přes to že vřeteník bývá zpravidla skříňovitého charakteru. Celá sestava



Obrázek 35 a) Sestava vřeteníku; b) Vřeteník

vřeteníku je zobrazena na obrázku 35a a samotný vřeteník na obrázku 35b. Vřeteník vznikl obrobením duralové desky o rozměrech 305x190x60.



Obrázek 36 Nová koncepce s držákem na motor

7.5.6 Upevnění motorů, vřetena a desky stolu

K upevnění motorů jednotlivých os je použito držáků motoru s označením MBA10-DP je patrné na obrázek 36 vlevo. Vřeteno je upevněno na vřeteníku pomocí držáku vřetene viz Obrázek 36 vpravo. Deska stolu je přichycena ke kostře stolu 12 šrouby velikosti M6, které procházejí skrz laminátový kryt.

7.5.7 Krytování

Na obrázku 37 lze vidět kryt celé konstrukce stolu. Jedná se o laminát o tloušťce 4 mm a s dekorem polykarbonátu.



Obrázek 37 Laminátový kryt

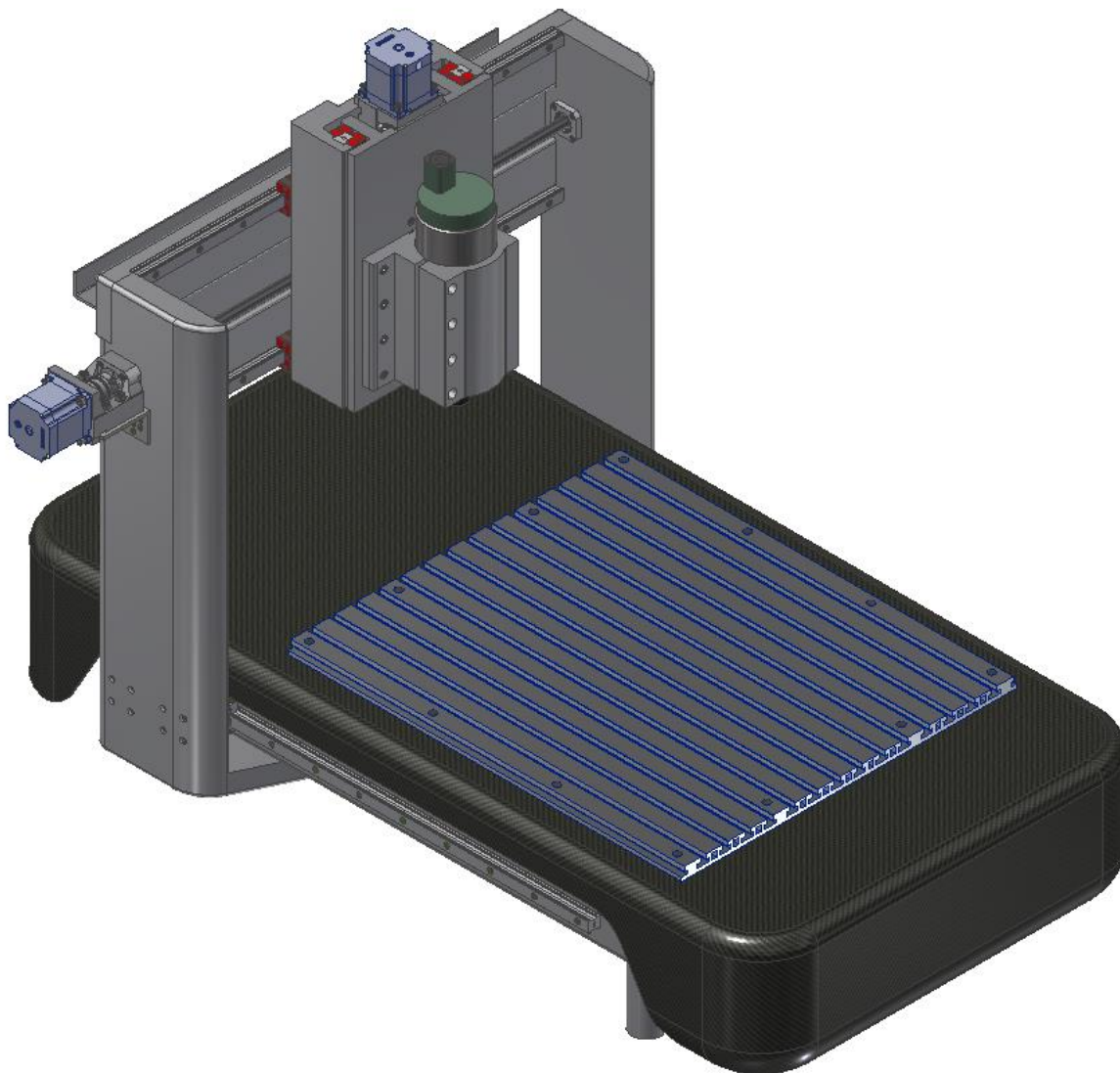
7.5.8 Elektronika, kabeláž, řídicí systém

Vzhledem k tomu, že součástí zadání diplomové práce není zpracování elektrické části stroje. Takže návrh elektrických komponent a kabeláže nebyl zpracován.

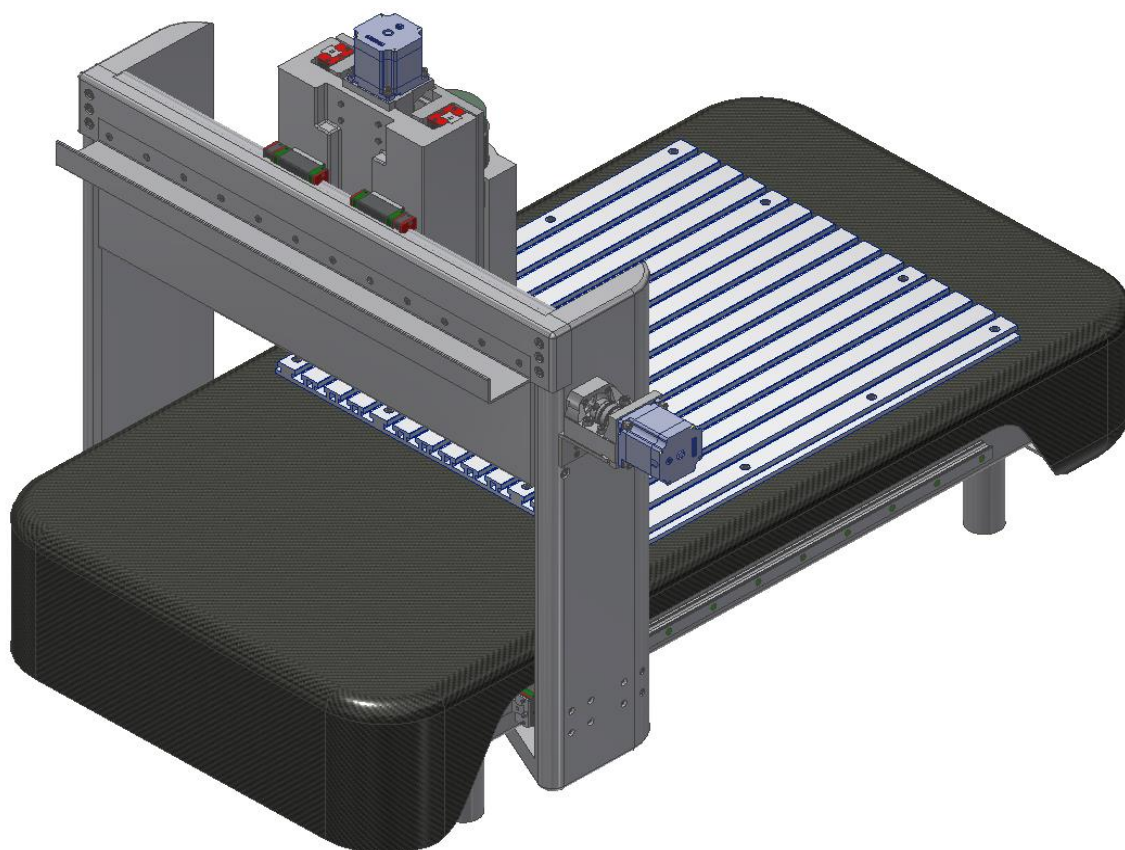
Nicméně pro modelářskou frézku je asi nejlepší použití řídicího systému MACH 3 od společnosti ArtSoft USA. Zejména pro dobrou spolupráci se systémem Windows. Modelářskou frézku lze díky tomu řídit z normálního stolního počítače za současného zakoupení základní desky pro řízení 4osého CNC frézky. Přičemž zde musí mít na paměti, že řídicí deska musí být kompatibilní s řídicím systémem MACH 3. [37] Avšak tato část již není součástí zadání diplomové práce.

7.5.9 3D Model

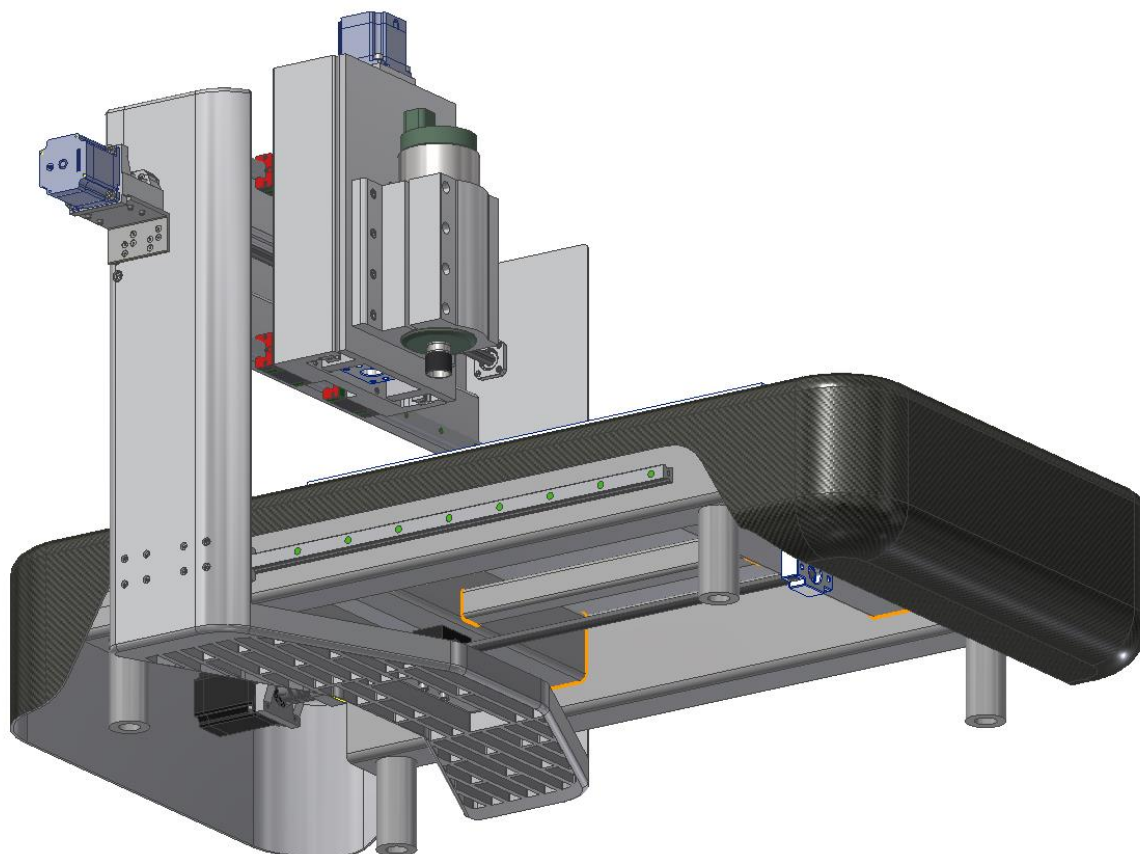
Součásti a sestavy jsou vytvořeny pomocí programu Autodesk Inventor Professional 2019. V mnohých případech výrobci uzlových bodů nabízejí 3D modely ve formátu STEP. Zde jsem využil tyto možnosti zejména u kuličkových šroubů a matic, lineárního vedení, držáků motorů, krokových motorů, spojek a ložiskových domečků. Normalizované díly byly čerpány zejména z obsahového centra v rámci programu Autodesk Inventor anebo z internetového portálu Traceparts.com. Na obrázku 38, 39 a 40 lze vidět návrh konstrukce modelářské frézky.



Obrázek 38 Modelářská frézka – pohled zepředu



Obrázek 39 Modelářská frézka – pohled zezadu



Obrázek 40 Modelářská frézka – pohled zespodu

8 EKONOMICKÉ SHODNOCENÍ

V následující kapitole bude zpracována orientační cenová kalkulace za materiál, kupované komponenty, obrábění, režijní náklady a podobně. Dále zde jsou zaznamenáni jednotliví dodavatelé dílčích komponent, eventuálně případní náhradní dodavatelé. V cenové kalkulaci bude počítáno i obrábění, avšak naskytla se možnost domluvit obrábění dílů na frézovacím centru MCV 1016 Baseline od firmy Kovosvit Mas jen za symbolickou cenu. Časy na obrábění a montáž jsou odhadnuty. Nyní přejdeme k orientační cenové náročnosti za jednotlivé konstrukční celky, viz tabulka 32-37.

Tabulka 32 Nacenění svařované konstrukce

Svařovaná konstrukce						
Dodavatel	Název dílu	Rozměr [mm]	Délka [mm]	Dělení [Kč]	Kusy	Celková cena [Kč]
MZ hutní materiál	Jekl	100x60x5	800	90	2	520,-
			520	45	1	185,-
		70x50x3	400	19	1	62,-
		30x30x2	335	9	1	20,-
	U profil	80x40x40x5	400	70	2	153,-
					Mezisoučet:	940,-

Operace		Čas [hod.]	Cena za hodinu [Kč]			
Obrábění		0,25	2000,-			
Svařování		2	520,-			
					Mezisoučet:	1540,-
					Celkem bez obrábění	1980,-
					Celkem	2480,-

Tabulka 33 Nacení konstrukce stolu

Konstrukce stolu					
Dodavatel	Typ komponenty	Označení / Rozměr [mm]	Délka [mm]	Kusy	Celková cena [Kč]
MZ hutní materiál	Tyč kruhová	Průměr 40	90	4	191,-
CNC shop	Lineární vedení	Vozík HGH15CA	-	4	3756,-
		Kolejnice HGR15R	630	2	2772,-
	Krokový motor	57CM23-4A	-	1	1050,-
	Ložiskový domeček	BF-10	-	1	650,-
		FK-10	-	1	990,-
	Držák na motor	MBA-10DP	-	1	1211,-
TBI Motion	Kuličkový šroub	SCR1204	540 (závit)/ 615	1	2029,-
	Matice	SFU1204T4D	-	1	1417,-
	Spojka	SGS-34C	-	1	927,-
	Domeček na matici	MGD-12	-	1	982,-
				Mezisoučet:	15975,-

Operace	Čas [hod.]	Cena za hodinu [Kč]			
Obrábění	0,25	2000,-			500,-
				Mezisoučet:	500,-
				Celkem bez obrábění	15975,-
				Celkem	16475,-

Tabulka 34 Nacení sestavy příčnicku

Sestava příčnicku					
Dodavatel	Typ komponenty	Označení / Rozměr [mm]	Délka [mm]	Kusy	Celková cena [Kč]
Ehlinik	Duralová deska	640x200x25	-	1	848,-
	U profil	60x30x30x3	580	1	75,-
CNC shop	Lineární vedení	Vozík HGH15CA	-	4	3756,-
		Kolejnice HGR15R	580	2	2552,-
	Krokový motor	57CM13-4A	-	1	810,-
	Ložiskový domeček	FF-10	-	1	440,-
		FK-10	-	1	990,-
	Držák na motor	MBA-10DP	-	1	1211,-
TBI Motion	Kuličkový šroub	SCR1204	560 (závit)/ 640	1	2085,-
	Matice	SFU1204T4D	-	1	1417,-
	Spojka	SGS-27C	-	1	696,-
	Domeček na matici	MGD-12	-	1	982,-
				Mezisoučet:	15862,-
Operace	Čas [hod.]	Cena za hodinu [Kč]			
Obrábění	1,5	2000,-			3000,-
				Mezisoučet:	3000,-
				Celkem bez obrábění	15862,-
				Celkem	18862,-

Sáně a vřeteník					
Dodavatel	Typ komponenty	Označení / Rozměr [mm]	Délka [mm]	Kusy	Celková cena [Kč]
ALCOM ALVAL	Duralová deska	305x190x75	-	1	1396,-
		305x190x55	-	1	1016,-
CNC shop	Lineární vedení	Vozík HGH15CA	-	4	3756,-
		Kolejnice HGR15R	305	2	1342,-
	Krokový motor	57CM13-BZ	-	1	1072,-
	Ložiskový domeček	BF-10	-	1	650,-
		FK-10	-	1	990,-
	Držák na motor	MBA-10DP	-	1	1211,-
	Driver	M542	-	1	1314,-
TBI Motion	Kuličkový šroub	SCR1204	200 (závit)/ 260	1	1571,-
	Matice	SFU1204T4D	-	1	1417,-
	Spojka	SGS-27C	-	1	696,-
	Domeček na matici	MGD-12	-	1	982,-
Chinaexpress.shop	Držák vřetena	Průměr 80		1	760,-
SOROTEC	Vřeteno	HFSAC-8022-24-ER20	-	1	22756,-
				Mezisoučet:	40929,-

Operace	Čas [hod.]	Cena za hodinu [Kč]			
Obrábění	3,5	2000,-			7000,-
				Mezisoučet:	7000,-
				Celkem bez obrábění	40929,-
				Celkem	47929,-

Tabulka 35 Nacenění saní a vřeteníku

Tabulka 36 Nacenění ostatních dílů

Ostatní					
Dodavatel	Typ komponenty	Označení / Rozměr [mm]	Délka [mm]	Kusy	Celková cena [Kč]
UNEKO	Odlitek spodního portálu	-	-	1	6200,-
Krill AirCraft	Laminátový kryt	-	-	1	1000,-
Soldering	Upínací stůl s T drážkami	540x460		1	6303,-
Ehliník	Podpěra L	60x40	70	1	12,-
Obchod pro dílnu	Spojovací materiál (šroub, podložka)	Různé	Různé	530	522,-
				Mezisoučet:	14037,-

Operace	Čas [hod.]	Cena za hodinu [Kč]			
Obrábění	1	2000,-			2000,-

Režijní náklady					2800,-
				Mezisoučet:	4800,-
				Celkem bez obrábění	16837,-
				Celkem	18837,-

Tabulka 37 Souhrn všech naceněných položek

Jednotlivé celky	Cena bez obrábění [Kč]	Cena včetně obrábění [Kč]		
Svařovaná konstrukce	1980,-	2480,-		
Konstrukce stolu	15975,-	16475,-		
Sestava příčnicku	15862,-	18862,-		
Sáně a vřeteník	40929,-	47929,-		
Ostatní	16837,-	18837,-		

Cena celkem	91583,-	104583,-		

Veškeré ceny jsou udávány včetně DPH. Ceny a rozměry jednotlivých dílů byli diskutovány s daným dodavatelem. Celková cena modelářské frézky činí bez obrábění 91583 Kč. A v případě nevyužití nabídky obrábění na frézovacím centru MCV 1016 BaseLine je cena stanovena na 104583 Kč. V případě zájmu, lze cenu rapidně snížit využitím výrobků koupených například přes Aliexpress, Amazon či vřetení přes Rattmmotor. V tabulce 38 lze vidět možné úspory použitím alternativních dodavatelů s Číny či Ruska. Nicméně tuto variantu v návrhu modelářské frézky jsem nezvolil z důvodu mnohdy neúplných informací o daném produktu.

Tabulka 38 Možné ekvivalenty vybraných komponent

Dodavatel	Typ komponenty	Označení	Kusy	Celková cena [Kč]	Původní cena [Kč]	Úspora [Kč]
Aliexpress	Lineární vedení	Vozík HGH15CA	12	2275,-	11268,-	8993,-
Rattmmotor	Vřetení	Rattmmotor 2.2Kw ER 20	1	3773,-	22756,-	18983,-

Zde je vidět, že úspora peněz za dané komponenty je dosti velká. Avšak kvalita daných produktů je diskutabilní. Z daného důvodu jsem se touto cestou nevydal.

9 ZÁVĚR

Jeden z hlavních cílů této diplomové práce byl návrh malé modelářské CNC frézky s pevným stolem. Dalším cílem byla důkladná analýza dané problematiky a na jejíž základě volba koncepce frézky a její zdůvodnění. Posléze volba vstupních parametrů modelářské frézky na jejíž základě bude provedena výpočtová zpráva a konstrukční návrh zvolené koncepce. A v neposlední řadě výkresová dokumentace vybraných uzlových bodů.

V druhé kapitole bylo provedeno stručné seznámení s danou problematikou z obecného hlediska, konkrétně se jednalo o seznámení a rozdělení CNC frézovacích strojů. Následně byl definován pojem modelářská frézka. Ve čtvrté kapitole byla provedena analýza trhu, především českého trhu. V rámci analýzy trhu jsem oslovil tři výrobce na strojírenském veletrhu v Brně a osm výrobců elektronickou formou – e-mailem. V této práci jsou vyjmenováni výrobci či zprostředkovatelé, kteří na mé dotazy kladně odpověděli. Celkově je zde vyjmenováno 19 modelářských frézek od 6 výrobců.

V páté kapitole byla provedena volba vstupních parametrů modelářské frézky, a to na základě předešlé analýzy trhu. Vstupní parametry představují jakýsi vstupní bod do návrhu modelářské frézky. Avšak navržená frézka by měla těchto parametrů dosáhnout ba i předčít.

Volbou nejvhodnější koncepce frézky se zabývá šestá kapitola, kde jsou porovnávány tři základní koncepce frézek a jedna koncepce – můj návrh, pomocí metody PATTERN. Na jejíž základě byla vybrána koncepce stylu spodní gántry. Spodní gántry je nejtypičtější konstrukcí modelářských frézek na českém trhu.

Sedmá kapitola se zabývá především vlastním návrhem modelářské frézky. V první části této kapitoly byly provedeny výpočty za účelem zjištění základních parametrů vřetene během frézování a vrtání. Výsledky byly ověřeny pomocí kalkulačky, která je k dispozici na internetových stránkách společnosti Sandvik Coromant. Na základě daných výsledků byl proveden průzkum výrobců a typů vřeten. Následně byla vybrána tři vřetena a na základě bodového ohodnocení v klíčových složkách bylo vybráno vřeteno firmy Mechatron. Druhá část této kapitoly je věnována základnímu průzkumu v oblasti kuličkových šroubů a lineárního vedení a výpočtů jednotlivých os. V poslední části této kapitoly je provedeno stručné shrnutí a popis hlavních konstrukčních uzlů modelářské frézky.

Vytvořený 3D model byl zpracován v programu Autodesk Inventor Professional 2019. V mnohých případech výrobci uzlových bodů (Kuličkový šroub a matice, lineární vedení, pohony, a podobně) nabízejí 3D modely ve formátu STEP. V návrhu modelářské frézky je této možnosti využito především na komponenty jednotlivých os.

Na základě provedených výpočtů je navržená modelářská frézka typu spodní gántry zcela schopna ustát veškeré požadavky modelářů. Rám frézky je zde tvořen ocelovými profily a jekly, ostatní konstrukční díly jsou vyrobeny z hliníkové slitiny – duralu pro jeho vysokou pevnost, dobrou obrobitelnost a dobrým poměrem ceny. Pohyb v jednotlivých osách je řešen pomocí válcovaného kuličkového šroubu s předepnutou maticí a lineárním vedením s profilovou kolejnicí, kde valivými elementy jsou kuličky. Jednotlivé osy jsou poháněny krokovými motory jejichž základní parametry byly srovnány s výsledky uskutečněné v programu Sizer od společnosti Siemens. Výsledné parametry navržené modelářské frézky jsou zobrazeny v tabulce 33.

Tabulka 39 Dosažené parametry modelářské frézky

Parametr		Hodnota	Jednotka
Rozměry	Délka	1050	[mm]
	Šířka	550	[mm]
	Výška	765	[mm]
Hmotnost		88	[Kg]
Rozměry pracovní desky stolu		540x460	[mm]
Pracovní rozsah	Osy X	406	[mm]
	Osy Y	384	[mm]
	Osy Z	150	[mm]
Rychloposuv		6000	[mm/min]
Výkon vřetene		2200	[W]
Rozsah otáček vřetene		0-24000	[ot/min]

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Stroje pro frézování* [online]. (Olomoucký kraj): ELUC, 2014 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1227>
- [2] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. : il. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [3] *Frézky/router: CNCH-40305A-1500* [online]. Eurazio Center, 2011 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.eurazio.eu/cs/produkt/cnch-40305a-1500>
- [4] *Stolové frézky: FCV 63 CNC* [online]. Kuřim: ELSTAV, c2002-2015 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <http://www.elstavkurim.cz/stroje/fcv-63-cnc/>
- [5] ČECHMAN, D. *Návrh CNC modelářské frézky pro opracování hliníkových slitin*. Brno, 2019.. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA.
- [6] BORSKÝ, Václav. *Obráběcí stroje*. Vyd. 1. Brno: Nakladatelství VUT, 1992, 216 s. : il., grafy, schémata. ISBN 80-214-0470-1.
- [7] *CNC výukové stroje: MERKUR 3D CNC Frézovací stroj MC30FT* [online]. Police nad Metují: Merkurtoys [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://eshop.merkurtoys.cz/cnc-vyukove-stroje-c41/>
- [8] *CNC Frézky: CauCau CNC Frézky řady KOMPAS H400* [online]. CAUCAU, 2020 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.caucau.cz/caucau-cnc-frezky-ryady-h400/>
- [9] *CNC Stroje: CauCau CNC frézka KOMPAS F600 2,2kW* [online]. CAUCAU, 2020 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: https://www.caucau.cz/cnc_stroje/caucau-cnc-frezka-kompas-f600--400x600x150mm/
- [10] *D-Series* [online]. Stepcraft, 2020 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.stepcraft-systems.com/en/cnc-machines/d-series>
- [11] *Q series* [online]. Stepcraft, 2020 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.stepcraft-systems.com/en/cnc-machines/q-series>
- [12] *Historie firmy* [online]. Modletice: Eurazio Center, 2009 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.eurazio.eu/cs/historie>
- [13] *4-osá CNC frézka: CNCH-6040-Z100* [online]. Eurazio Center [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.eurazio.eu/cs/produkt/cnch-6040-z100>
- [14] *Modelářská CNC frézka pro gravírování a rytí: CNCX-4030V2* [online]. Eurazio Center [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.eurazio.eu/cs/produkt/cncx-4030v2>

- [15] *Stolní modelářská frézka: CNCB-2030* [online]. Eurazio Center [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.eurazio.eu/cs/produkt/cncb-2030>
- [16] *Portálová frézka pro obrábění neželezných materiálů: RCT-AW6090-3000W* [online]. Eurazio Center [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.eurazio.eu/cs/produkt/rct-aw6090-3000w>
- [17] *Stroje: SLV EDU* [online]. Brno: SolidVision [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.cncstroj.cz/cz/stroje/>
- [18] *CNC router Numco SHG 0404* [online]. Blansko: Pilart, 2013 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.pilart.cz/produkt/CNC-router-Numco-SHG-0404-1032/>
- [19] *CNC router Numco SHG 0609* [online]. Blansko: Pilart, 2013 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.pilart.cz/produkt/CNC-router-Numco-SHG-0609-1033/>
- [20] *CNC router Numco SHM 0609* [online]. Blansko: Pilart, 2013 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.pilart.cz/produkt/CNC-router-Numco-SHM-0609-1034/>
- [21] *Frézy válcové čelní HSS: Frézy pro drážky per* [online]. ZPS-FN, 2020 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/cz/frezy-valcove-celni-hss/>
- [22] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
- [23] *CoroDrill 854/856* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/corodrill_854_856/pages/default.aspx
- [24] *HFSAC-8022-24-ER20* [online]. Mechatron, c2014-2019 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: https://www.mechatron-gmbh.de/fileadmin/user_upload/Datenblaetter_2019/HFSAC-8022-24-ER20.pdf
- [25] *Regulační pohony* [online]. Liberec: Fakulta strojní, technická univerzita v Liberci [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:3675>
- [26] *Kuličkové šrouby* [online]. Brno: Hiwin [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby>
- [27] *TBI Motion Precision Ballscrews and Nuts: Ball Screw Shafts and Standard Ball Nuts SFNU/SFU* [online]. LJUBLJANA: Tuli shop, 2019 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.tuli-shop.com/linear-motion-products/ball-screws-and-nuts/precision-ball-nuts>
- [28] *Lineární vedení Matis* [online]. Brno: Matis [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.matis.cz/cs/kategorie/linearni-vedeni>
- [29] *Lineární vedení valivé* [online]. Litoměřice: HENNLICH, 2020 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/linearni-vedeni-valiva-motory-a-pohony-linearni-vedeni-valive-26.html>
- [30] *Lineární vedení Hiwin* [online]. Brno: Hiwin [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni>

- [31] *Vodící tyče* [online]. HYDRAULICS, 2017 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.hydraulics.cz/24929-vodici-tyce>
- [32] *Ball Screw Bracket Nut Holder MGD Series* [online]. Aresmotion, 2018 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <http://www.aresmotion.com/product/ball-screw-bracket-nut-holder-mgd-series/>
- [33] *Kuličkové šrouby* [online]. Brno: Hiwin, 2018 [cit. 2020-09-02]. Dostupné z: <file:///C:/Users/user/AppData/Local/Temp/CZ-kuli%C4%8Dkov%C3%A9%20%C5%A1rouby%202018-2.pdf>
- [34] *Leadshine Stepper Motor With Brakes 57CM13-BZ NEMA 23* [online]. Navi Mumbai: Leadshine Technology, 2020 [cit. 2020-09-03]. Dostupné z: <https://leadshineindia.com/collections/stepper-motors-with-brakes/products/leadshine-stepper-motors-with-brakes-57cm13-bz-nema-23>
- [35] *Leadshine Hybrid Stepper Motor CM Series: 57CM13 NEMA 23* [online]. Navi Mumbai: Leadshine Technology, 2020 [cit. 2020-09-03]. Dostupné z: <https://leadshineindia.com/collections/leadshine-hybrid-stepper-motors/products/leadshine-hybrid-stepper-motor-57cm13>
- [36] *Leadshine Hybrid Stepper Motor CM Series: 57CM23-4A NEMA 23* [online]. Navi Mumbai: Leadshine Technology, 2020 [cit. 2020-09-03]. Dostupné z: <https://leadshineindia.com/collections/leadshine-hybrid-stepper-motors/products/leadshine-hybrid-stepper-motor-57cm23-4a>
- [37] VEČEŘ, Petr. *Konstrukční návrh malé modelářské CNC frézky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [38] TOS FRU. In: *Portálová obráběcí centra* [online]. KUŘIM: TOS KUŘIM, c1942-2019 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <http://www.tos-kurim.cz/cz/produktove-portfolio/portalova-obrabeci-centra>
- [39] FZ42. In: *Milling machines: FZ42* [online]. Zimmermann, 2019 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.f-zimmermann.com/us/gantry-machines/fz42/>
- [40] TOS FRP. In: *Portálová obráběcí centra* [online]. KUŘIM: TOS KUŘIM, 2019 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <http://www.tos-kurim.cz/cz/produktove-portfolio/portalova-obrabeci-centra>
- [41] *DMC 650 V* [online]. DMG MORI, 2020 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/vertikalni-frezovani/dmc-v/dmc-650-v>
- [42] *Ložové a portálové* [online]. Hulín: Tos Hulín group, 2017 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <http://www.strojimport.cz/category/produkty/frezky/lozove-a-portalove/>
- [43] *Kul. pouzdra a vodící tyče* [online]. Brno: Hiwin [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kul-pouzdra-a-vodici-tyce>

11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam zkratk

CNC	– Computer Numerical Control
CAD	– Computer aided design
PATTERN	– Planning Assistance Through Technical Evaluation of Relevance Numbers
SAW	– Simple additive weighting
MAG	– Metal Active Gas

11.2 Seznam symbolů

H_{jx}	[-]	– Hodnota j-tého parametru x-tého prvku
H_{jMIN}	[-]	– Nejmenší hodnota j-tého parametru
H_{jMAX}	[-]	– Největší hodnota j-tého parametru
q_j	[-]	– Váha významnosti j-tého parametru
BHV_j	[-]	– Hodnota významnosti pro každý parametr
k	[-]	– Celkový počet parametrů
v	[-]	– Váha parametrů
S_x	[-]	– Pořadí
D	[mm]	– Průměr nástroje
Z	[-]	– Počet zubů
A_p	[mm]	– Hloubka záběru třísky
A_e	[mm]	– Pracovní záběr
v_c	[m/min]	– Řezná rychlost
f_z	[mm/z]	– Posuv na zub
λ	[°]	– Úhel šroubovice
γ	[°]	– Úhel čela
κ_r	[°]	– Nástrojový úhel nastavení ostří
k_{c1}	[N]	– Měrná řezná síla
m_c	[-]	– Nárůst měrné řezné síly
n_f	[ot/min]	– Otáčky vřetene
v_f	[mm/min]	– Rychlost posuvu
h_m	[mm]	– Průměrná tloušťka třísky
k_{cf}	[N]	– Měrná řezná síla při frézování
P_{cf}	[W]	– Výkon vřetene při frézování
F_{cf}	[N]	– Řezná síla při frézování
M_{kf}	[N.m]	– Krouticí moment
v_{cv}	[m/min]	– Řezná rychlost
f_0	[mm/ot]	– Posuv na otáčku
D_v	[mm]	– Průměr nástroje
Z_v	[-]	– Počet zubů
n_v	[ot/min]	– Otáčky vřetene
f_{zv}	[mm/z]	– Posuv na zub
k_{cv}	[N]	– Měrná řezná síla při vrtání

P_v	[W]	– Výkon vřetena při vrtání
M_{kv}	[N.m]	– Krouticí moment při vrtání
v_{fv}	[mm/min]	– Rychlost posuvu
F_t	[N]	– Síla posuvu
h_D	[mm]	– Tloušťka třísky
b_D	[mm]	– Šířka třísky
A_D	[mm]	– Průřez třísky
F_{cv}	[N]	– Řezná síla při vrtání
d_{0s}	[mm]	– Jmenovitý průměr kuličkového šroubu
d_k	[mm]	– Malý průměr závitů kuličkového šroubu
P	[m]	– Stoupání kuličkového šroubu
C_{dyn}	[N]	– Dynamická tuhost kuličkového šroubu a matice
C_0	[N]	– Statická tuhost kuličkového šroubu a matice
k_d	[-]	– Koeficient uložení konců kuličkového šroubu
k_k	[-]	– Koeficient závislosti na uložení
α_z	[°]	– Úhel sklonu vedení
η_v	[-]	– Účinnost valivého vedení
η_s	[-]	– Účinnost kuličkového šroubu a matice
η_L	[-]	– Účinnost oboustranného uložení kuličkového ložiska
f_1	[-]	– Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení
f_2	[-]	– Součinitel tření v KŠM redukovaný na poloměr šroubu
m_z	[kg]	– Hmotnost osy Z
v_{maxz}	[m/min]	– Maximální rychlost posuvu
F_{ef}	[N]	– Řezná síla při frézování
l_{dz}	[mm]	– Vzdálenost mezi ložisky
l_k	[mm]	– Nepodepřená délka hřídele
t	[s]	– Čas rozběhu
g	[m.s ⁻²]	– Tíhové zrychlení
n_s	[ot/min]	– Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu
n_k	[ot/min]	– Kritické otáčky
n_{max}	[ot/min]	– Maximální přípustné otáčky
F_k	[N]	– Maximální teoretická dovolená axiální síla
F_{kmax}	[N]	– Maximální dovolená provozní axiální síla
L_1	[ot]	– Vymezení životnosti kuličkového šroubu a matice v otáčkách
L_h	[h]	– Vymezení životnosti kuličkového šroubu s matice v hodinách
η_c	[-]	– Celkové účinnosti
M_{mot}	[N.m]	– Moment motoru
a_z	[m/s ²]	– Lineární zrychlení osy Z
ε_s	[rad/s ²]	– Úhlové zrychlení motoru
F_p	[N]	– Předepnutí kuličkového šroubu
M_G	[N.m]	– Ztrátový moment třecích sil přesouvaných ploch
M_{KSM}	[N.m]	– Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v KŠM
M_{GT}	[N.m]	– Ztrátový moment pasivních odporů způsobený gravitací přesouv. hmot
M_{zdrhmz}	[N.m]	– Celkový moment zátěže redukovaný na hřídel motoru
J_m	[kg.m ²]	– Moment setrvačnosti posuvových hmot redukovaný na osu šroubu
J_{rhm}	[kg.m ²]	– Celkový moment setrvačnosti redukovaného na hřídel motoru
J_s	[kg.m ²]	– Moment setrvačnosti hřídelové spojky

J_{KSZ}	[kg.m ²]	– Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy Z
J_{mot}	[kg.m ²]	– Moment setrvačnosti motoru
M_{mz}	[N.m]	– Potřebná velikost moment motoru
P_{d0}	[-]	– Kvalita dynamického poměru
L	[mm]	– Délka profilové kolejnice
F_{cx}	[N]	– Řezná síla při frézování
F_{cy}	[N]	– Řezná síla při frézování
f_w	[-]	– Faktor zatížení
f_H	[-]	– Faktor tvrdosti
f_T	[-]	– Faktor teploty
$R_{1,2,3,4}$	[N]	– Radiální zatížení vozíku
$T_{1,2,3,4}$	[N]	– Tečné zatížení vozíku
P_e	[N]	– Ekvivalentní statické zatížení
f	[-]	– Statická bezpečnost
L_j	[m]	– Jmenovitá životnost

11.3 Seznam tabulek

Tabulka 1 Technické parametry frézovacích strojů firmy Merkur [7]	22
Tabulka 2 Technické parametry CNC frézek firmy CauCau [8], [9]	23
Tabulka 3 Technické parametry strojů firmy StepCraft [10]	24
Tabulka 4 Eurazio center – technické parametry malých modelářských CNC frézek [13], [14], [15]	27
Tabulka 5 Technické parametry portálové CNC frézky RCT-AW6090 [16]	28
Tabulka 6 Technické parametry strojů firmy SolidVision [17]	29
Tabulka 7 Technické parametry strojů značky NUMCO [18], [19], [20]	31
Tabulka 8 Vstupní parametry malé modelářské frézky	33
Tabulka 9 Parametry určené ke srovnání a jejich tendence změny	35
Tabulka 10 Párové porovnání parametrů	36
Tabulka 11 Kvalifikovaná porovnávací matice	36
Tabulka 12 Konečné srovnání navrhovaných koncepcí	38
Tabulka 13 Seznam koncepcí strojů	38
Tabulka 14 Parametry frézy 270618.080	39
Tabulka 15 Materiálové konstanty obráběného materiálu	40
Tabulka 16 Parametry vrtáku CoroDrill 856	41
Tabulka 17 Bodové ohodnocení parametrů vřetene	43
Tabulka 18 Parametry vybraného vřetena [24]	43
Tabulka 19 Srovnání způsobu náhonu	45
Tabulka 20 Parametry potřebné pro kontrolní výpočty osy Z	48
Tabulka 21 Momenty setrvačnosti	51
Tabulka 22 Základní parametry motoru [34]	52
Tabulka 23 Parametry lineárního vedení osy Z	53
Tabulka 24 Parametry potřebné pro kontrolní výpočty osy Y	55
Tabulka 25 Momenty setrvačnosti	58
Tabulka 26 Základní parametry motoru [35]	59
Tabulka 27 Parametry lineárního vedení osy Y	60

Tabulka 28 Parametry potřebné pro kontrolní výpočty osy X	62
Tabulka 29 Momenty setrvačnosti	65
Tabulka 30 Základní parametry motoru [36]	65
Tabulka 31 Parametry lineárního vedení osy X	67
Tabulka 32 Nacnění svařované konstrukce	79
Tabulka 33 Nacnění konstrukce stolu.....	80
Tabulka 34 Nacnění sestavy příčnicku.....	81
Tabulka 35 Nacnění saní a vřeteníku.....	82
Tabulka 36 Nacnění ostatních dílů	83
Tabulka 37 Souhrn všech naceněných položek	84
Tabulka 38 Možné ekvivalenty vybraných komponent	84
Tabulka 39 Dosažené parametry modelářské frézky.....	86

11.4 Seznam obrázků

Obrázek 1 Konzolová frézka s označením CNCH-40305A-1500 [3].....	17
Obrázek 2 Stolová frézka FCV 63 CNC [4].....	18
Obrázek 3 a) Spodní gántry (vlevo) [37]; b) Horní gántry (dole) [38]; c) posuvný stůl (vpravo) [39].....	19
Obrázek 4 Modelářská CNC frézka.....	20
Obrázek 5 CNC frézovací stroj MC30FT [7]	21
Obrázek 6 a) Kompas F600 (vlevo) [9], b) Kompas H400 (vpravo) [8].....	23
Obrázek 7 a) StepCraft D.600 (nahore), b) Frézovací motor MM-1000 (dole). [10]	25
Obrázek 8 a) CNCX-4030V2 (vlevo) [14], b) CNCB-2030 (vpravo) [15], c) CNCH-6040-Z100 (dole) [13].....	26
Obrázek 9 - RCT-AW6090-3000W [16].....	27
Obrázek 10 - SLV EDU [17].....	29
Obrázek 11 - SLV EDU 5X [17]	30
Obrázek 12 a) CNC router – NUMCO SHG 0404 (vlevo) [18]; b) NUMCO SHG 0609 (vpravo) [19].....	31
Obrázek 13 CNC router NUMCO SHM 0609 [20].....	32
Obrázek 14 Koncepce strojů: a) Vertikální frézka (vlevo nahore) [40], b) Horní gántry (vpravo nahore) [38], c) dolní gántry (vlevo dole) [41], d) Jedno-stojanová frézka (vpravo dole) [41].....	34
Obrázek 15 a) Vřeteno (HFSAC-8022-24 - ER20) firmy Mechatron [24]; b) frekvenční měnič (MX2-series) firmy Omron [24].....	43
Obrázek 16 Výkonově-momentová charakteristika vřetena firmy Mechatron [24].....	44
Obrázek 17 a) Válcovaný šroub (vlevo) [26]; b) Broušený šroub (vpravo) [26]	46
Obrázek 18 a) Hennlich – kruhové vedení (vlevo) [29]; b) Hiwin – kuličkové vedení (uprostřed) [30]; c) Hennlich – vedení s válečkovým řetězem (vpravo) [29]	46
Obrázek 19 a) Kuličkové pouzdro – Hiwin [42]; b) vodící tyč – Hiwin [42]	47
Obrázek 20 Zjednodušené schéma osy Z	48
Obrázek 21 Zvolený krokový motor 57CM13-BZ [34]	52
Obrázek 22 Schématické znázornění silového zatížení osy Z.....	53
Obrázek 23 Zjednodušené schéma osy Y	55
Obrázek 24 Krokový motor 57CM13 [35]	59
Obrázek 25 Schématické znázornění silového zatížení osy Y	60

Obrázek 26 Zjednodušené schéma osy X	62
Obrázek 27 Schématické znázornění silového zatížení osy X.....	66
Obrázek 28 a) První koncepce svařence stolu; b) Konečná koncepce svařence stolu.....	69
Obrázek 29 První koncepce konstrukce stolu	70
Obrázek 30 Referenční drážky pro ustavení kolejnice	70
Obrázek 31 a) Celková konstrukce stolu (nahore); b) Upevnění motoru (dole).....	71
Obrázek 32 Spodní portál po obrobení	72
Obrázek 33 a) Konstrukce příčnicku – nahore; b) Referenční hrana – vlevo; c) Obrobené plochy pro lepší usazení příčnicku – uprostřed; d) Protikus (spodní portál) k příčnicku – vpravo.	73
Obrázek 34 a) Pohled zepředu – vlevo; b) Pohled zezadu – uprostřed; c) Referenční drážka – vpravo.	74
Obrázek 35 Původní koncepce saní a vřeteníku.	Chyba! Záložka není definována.
Obrázek 36 Laminátový kryt	76

12 SEZNAM PŘÍLOH

Flash disk – 3D model navržené modelářské frézky a výkresová dokumentace