



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH DÍLENSKÉ CNC FRÉZKY PRO OBRÁBĚNÍ DŘEVA

DESIGN OF CNC MILLING MACHINE FOR WOODWORKING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Drda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Slaný, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Ondřej Drda
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Martin Slaný, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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 dílenské CNC frézky pro obrábění dřeva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce si klade za cíl vypracovat inovovaný návrh CNC dílenské dřevoobráběcí frézky, využívané v hobby dílnách nebo k restaurátorským účelům. Inovace konstrukce frézky bude plynout z rešerše podobných zařízení a na základě nasbíraných dat budou jednotlivá konstrukční řešení zhodnocena a následně zapracována do inovovaného návrhu. Hlavním cílem práce tedy bude vytvoření virtuálního modelu včetně výkresové dokumentace, kompletní návrh doporučených komponent pro případnou montáž a ekonomické zhodnocení návrhu.

Cíle diplomové práce:

- Vypracování rešerše z oblasti dostupných konstrukčních řešení hobby dřevoobráběcích CNC strojů.
- Specifikace technických parametrů stroje.
- Konstrukční výpočty mechanické části stroje.
- Komplexní model stroje v 3D.
- Zpracování výkresové dokumentace.
- Technicko–ekonomické zhodnocení návrhu.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří a Petr BLECHA. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN isbn978-80-254-7980-3.

BORSKÝ, Václav. Obráběcí stroje. Brno: VUT, 1992. ISBN isbn80-214-0470-1.

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

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed.
Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady
vysokoškolských učebnic. ISBN isbn978-80-214-2629-0.

Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Přel. M.
Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN
91- 97 22 99-4-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem CNC frézky. Práce obsahuje rešerši strojů dostupných na trhu a rešerši komponent vhodných ke stavbě frézky. V další části byl proveden výpočet motorů, kuličkových šroubů a lineárních vedení. Práce obsahuje kompletní 3D model a výkresovou dokumentaci.

Klíčová slova

CNC frézka, Portálová frézka, kuličkový šroub, krokový motor

ABSTRACT

The thesis deals with the design of a CNC milling machine. The thesis includes a research of machines available on the market and a research of components suitable for the construction of the milling machine. In the next part, the calculation of motors, ball screws and linear guides was carried out. The work includes a complete 3D model and drawing documentation.

Key words

CNC milling machine, Portal milling machine, ball screw, stepper motor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRDA, Ondřej. *Návrh dilenské CNC frézky pro obrábění dřeva* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/136938>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Martin Slaný.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma Návrh dílenské CNC frézky pro obrábění dřeva vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Ondřej Drda

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Martinu Slanému Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD	9
1 frézování dřeva	10
1.1 Rozdělené frézovacích strojů	10
2 rešerše z oblasti dostupných konstrukčních řešení	12
2.1 Rešerše dostupných konstrukčních řešení	12
2.1.1 Mill right mega V XL	12
2.1.2 Shapeoko Pro XXL	13
2.1.3 Stepcraft	14
2.1.4 CNC-Step S1000 T	16
2.1.5 Mekanika Pro CNC Machine L	17
2.1.6 Caucau H1000 HF	19
2.1.7 Bxp control	20
2.1.8 Bobs CNC	21
2.1.9 Makermade Maslow	21
2.2 Rešerše komponent stroje	23
2.2.1 Vřeteno	23
2.2.2 Přenos kroutícího momentu	24
2.2.3 Pohon	26
2.2.4 Lineární vedení	28
2.2.5 CNC řídicí software	29
2.2.6 Krytování stroje a bezpečnost	33
3 návrh stroje (PRAKTICKÁ ČÁST)	36
3.1 Osa Z (držák frézky)	37
3.1.1 Výpočet základních parametrů frézování	37
3.1.2 Výběr vřetena	39
3.1.3 Návrh kuličkového šroubu	40
3.1.4 Návrh pohonu	43
3.1.5 Návrh lineárního vedení	46
3.2 Osa Y (portál)	49
3.2.1 Kuličkový šroub	49
3.2.2 Pohon	51
3.2.3 Lineární vedení	53
3.3 Osa X (stůl)	55
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	56
ZÁVĚR	57
5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
SEZNAM PŘÍLOH	64

ÚVOD

Práce si klade za cíl vypracovat návrh CNC dílenské frézky, která bude schopná obrábět materiály na bázi dřeva. Frézka bude určena pro hobby dílny. Inspirací k vytvoření této práce byla poptávka na trhu s hobby nářadím, kde se rozvíjí zájem o lepší vybavení dílny. Kupující jsou ochotni kupovat nejen ruční elektrické nářadí ale i pokročilejší stroje jako jsou 3D tiskárny, CNC lasery a právě také CNC frézky. Tyto stroje nejsou tak výkonné a tuhé jako stroje určené do průmyslových podniků, ale zvládnou usnadnit některé operace v hobby dílnách a také rozšířit okruh věcí, které si člověk může sám doma vyrobit.

Tato práce je rozdělena na jednotlivé kapitoly kde v první části bude provedena rešerše podobných zařízení a komponent potřebných k výrobě stroje. Budou zde vybrány různé koncepce strojů a popsány jejich parametry.

Druhá část bude věnovaná návrhu stroje. V této části bude stroj rozdělen na jednotlivé dílčí celky, kde se navrhne a následně výpočtem ověří vhodné komponenty. Během návrhu se vytvoří komplexní 3D model frézky, výkresová dokumentace sestav a vybraných komponent. V poslední části bude provedeno ekonomické zhodnocení návrhu.

1 FRÉZOVÁNÍ DŘEVA

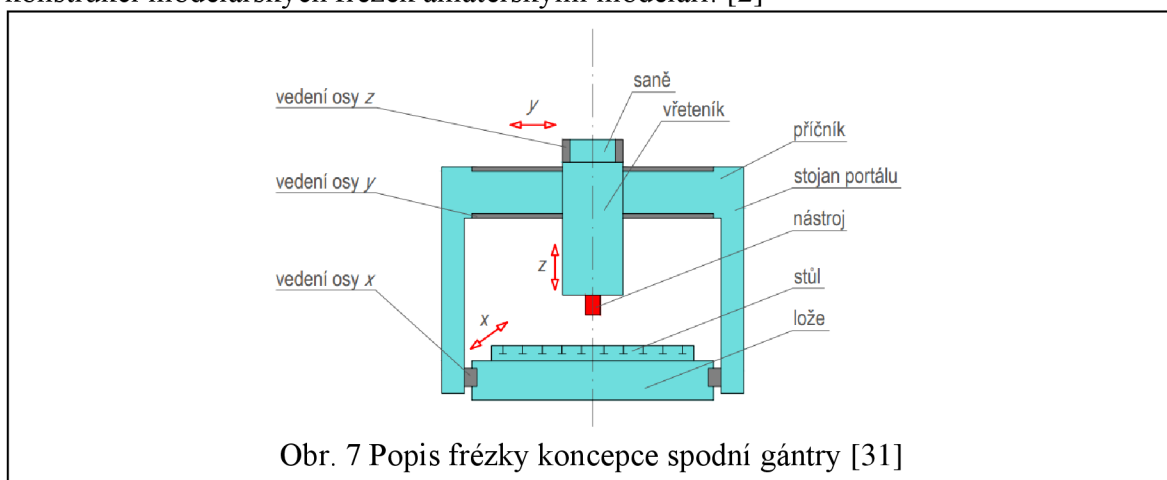
Proces obrábění dřeva je ovlivňován fyzikálními, mechanickými a technologickými vlastnostmi jak obráběného materiálu, tak i nástroje. K fyzikálním vlastnostem, které ovlivní proces řezání patří: vlhkost dřeva, hustota dřeva, pórovitost dřeva, tepelné, elektrické a zvukové vlastnosti dřeva. Vlhkost má vliv na rozměrové změny, kdy podélné změny rozměrů jsou minimální, ale dochází k výrazným změnám radiálních a tangenciálních rozměrů a je nutno s těmito změnami při zpracování dřeva počítat. Vlhkost má vliv i na mechanické vlastnosti materiálu. Přebírá-li dřevo vlhkost, zmenšují se jeho statické pevnosti i modul pružnosti. Další vlastností, která působí nepříznivě jsou akustické vlastnosti, zejména rezonanční dřeviny přenášejí a zesilují kmity vznikající při obrábění. [1]

Mechanickými vlastnostmi dřeva se vyjadřuje odolnost materiálu vůči působení vnějších mechanických sil. Proti vnějším silám působí vnitřní soudržné síly mezi molekulami, které se nazývají mechanické napětí. Velikost napětí je dána poměrem síly a plochy na kterou působí. K základním mechanickým vlastnostem patří pevnost, pružnost a tvrdost. U všech mechanických vlastností se výrazně projevuje anizotropie dřeva. Z tohoto důvodu se musí všechny mechanické vlastnosti dřeva posuzovat v závislosti na směru působení sil a směru působení vláken. Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu, jsou další základní charakteristické hodnoty, mající hlavní vliv na způsoby aplikace jednotlivých materiálů. [1]

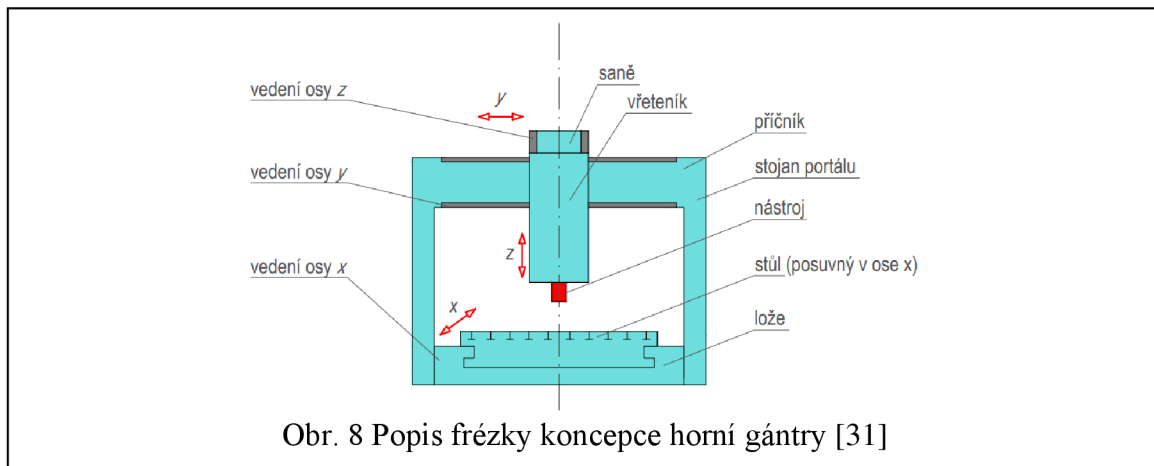
1.1 Rozdělení frézovacích strojů

CNC frézovací stroje k obrábění dřeva vycházejí z konvenčních kovoobráběcích strojů. Ty se historicky dělí podle konstrukčního provedení a druhu frézovacích operací na frézky konzolové, stolové a rovinné (portálové). V této práci bude uvažováno o použití portálové konstrukce. [2]

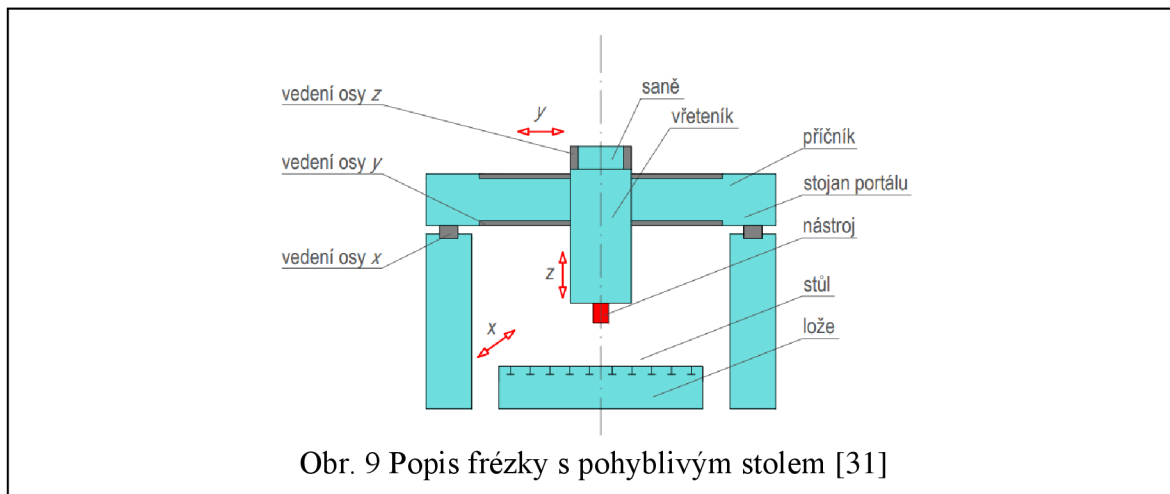
Portálové frézky se rozdělují podle polohy nosné konstrukce na spodní gántry, horní gántry a ty s pohyblivým stolem. Portálové frézky typu spodní gántry (viz obr. 7) jsou vybaveny pojízdňím portálem a pevným stolem. Využívají se především k obrábění tvarově složitých obrobků. Koncepte typu spodní gántry je jednou z nejčastěji používaných koncepcí pro konstrukci modelářských frézek amatérskými modeláři. [2]



V případě této koncepce horní gántry (viz obr. 8) nevykonává pohyb celý portál (jako u koncepce spodní gántry), ale pouze příčnick, který je uložen ve vedení na podélných stěnách. Uvedené řešení vykazuje lepší tuhost než koncepce spodní gántry a také lepší dynamiku stroje (z důvodu menší hmotnosti pohybujících se hmot). [2]



U koncepce frézky s pohyblivým stolem (viz obr. 9) je portál pevný a stůl je pohyblivý mezi stojany portálu. Uvedená varianta je vhodná na obrobky s nižší hmotností a menším rozměrem obrobku. [2]



2 REŠERŠE Z OBLASTI DOSTUPNÝCH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ

2.1 Rešerše dostupných konstrukčních řešení

Na trhu s CNC frézky určených pro obrábění dřeva a měkkých kovů se nachází řada produktů v různých cenových kategoriích. V této práci je vybrán průřez strojů nalezených jak na českém, tak i zahraničním trhu. Cílem bylo porovnat frézky různých cenových kategorií, typů konstrukce a materiálu použitého k zhotovení rámu. Na závěr jsou doplněny stroje, které neslouží ke komerčním prostředkům, ale ukazují i jiný přístup k návrhu CNC frézky.

Tab. 2.1 Omezující parametry pro vyhledávání konstrukčních řešení:

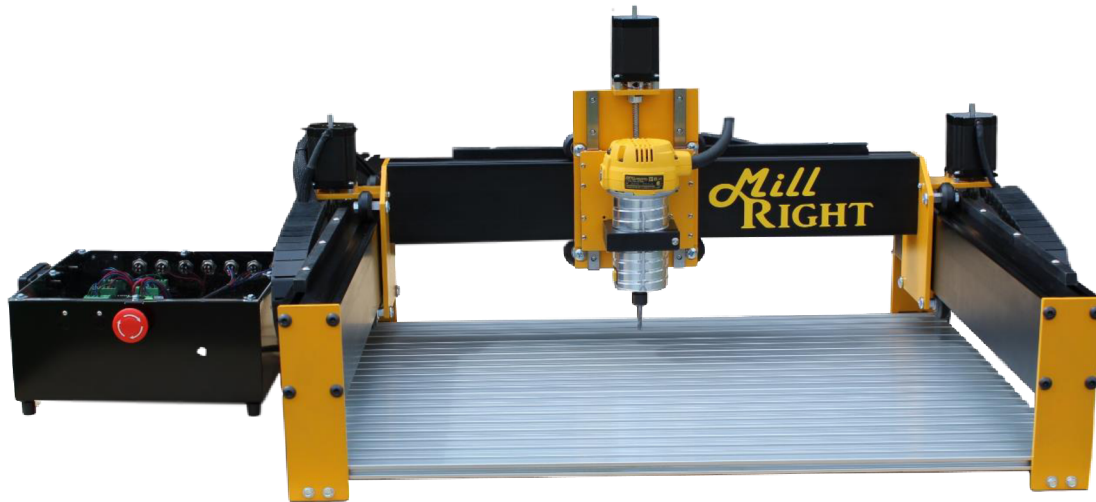
Minimální pracovní rozsah os X a Y	600 x 600 mm
Maximální pracovní rozsah os X a Y	1500 x 1500 mm
Maximální celková cena stroje	150 000 Kč

2.1.1 Mill right mega V XL

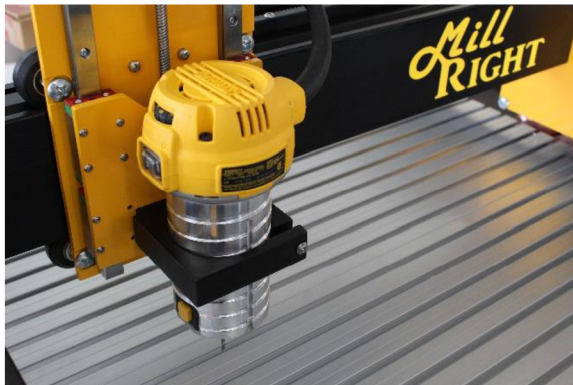
Společnost Mill Right vyrábí celkem tři varianty strojů. Požadovaným parametrům výběru vyhovuje model Mega V ve verzi XL. Pracovní rozsah os X a Y je 890 x 890 mm. V ose Z je maximální posuv 95 mm. Výhodou oproti konkurenčním strojům v podobné cenové hladině je použití ocelového hřebenu s kaleným pastorkem pro přenos pohybu v ose X. Osy pohání čtyři krokové motory Nema 23. Tímto se dosáhlo posuvové rychlosti $16\,510\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ v osách X a Y. Maximální řezná posuvová rychlost je $12\,700\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. V ose Z je pohon realizován pomocí kuličkového šroubu a maticí s ochranou proti zpětnému rázu. Na všech osách je použito valivé lineární vedení s oběžnými kuličkami. Upínací plocha je v základním provedení MDF deska, za příplatek je možno objednat profilovaný hliníkový stůl s T drážkami. Dodávka obsahuje kompletně smontovaný a seřízený stroj, počítač, software a vřetení Makita RT0701C o výkonu 1 kW nebo Dewalt o výkonu 1,7 kW. Nosné části jsou zhotoveny z ocelových výpalků a hliníkových profilů. Stroj je dodáván kompletně smontovaný a seřízený. [3] [4]

Tab. 2.2 Parametry frézky Mill right mega V XL [4].

Rozsah osy X	890 mm
Rozsah osy Y	890 mm
Rozsah osy Z	95 mm
Celkový rozměr	1 066 x 1 219 x 482 mm
Hmotnost	80 kg
Maximální posuvová rychlost v ose X a Y	$16\,510\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
Maximální posuvová rychlost v ose Z	$4\,570\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
Maximální řezná posuvová rychlost	$12\,700\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
Opakovatelná přesnost obrábění	0,025 mm
Zrychlení osy X a Y	$1,47\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
Zrychlení osy Z	$0,69\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
Opakovatelná přesnost obrábění v ose X a Y	0,013 mm
Opakovatelná přesnost obrábění v ose Z	0,005 mm
Cena	70 454 Kč



Obr.2.1 Celkový pohled Mill right mega V XL [4].



Obr.2.2 Detail osy Z [4].



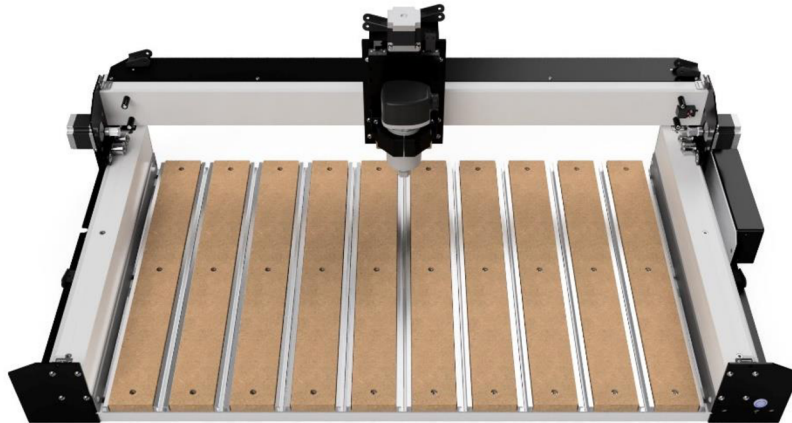
Obr.2.3 Detail osy Y a Z [4].

2.1.2 Shapeoko Pro XXL

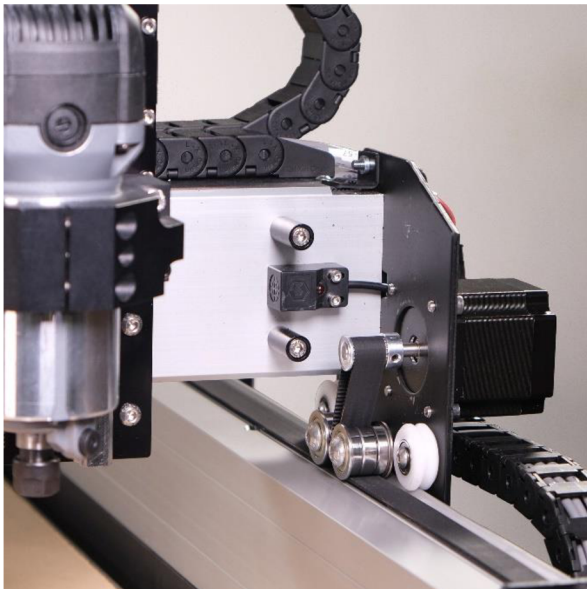
Shapeoko je v USA populární stavebnice CNC frézky, kterou nabízí společnost Carbide 3D. Je jednoduchá jak na sestavení, tak i na ovládání. Shapeoko je k dispozici ve dvou provedeních Shapeoko 4 a Shapeoko Pro. Každá varianta se nabízí ve třech velikostech. Největší rozdíl mezi verzemi je v použití lineárního vedení. U verze Shapeoko 4 je použito vozíků s rolnami, u verze Pro je lineární vedení zajištěno kolejnici a vozíkem s valivými elementy. Přenos kroučícího momentu je řešen v ose X a Y řemenem o šířce 15 mm. Osa Z je poháněná kuličkovým šroubem. Nosné části jsou vyrobeny z hliníkových profilů a ocelových výpalků. Obrobek se upíná na stůl s T drážkami. Součástí balení je optimalizovaný software Carbide motion a Carbide create. Dalším příslušenstvím je kalibrace nástroje v ose Z, která značně usnadní práci obsluhy. Balení neobsahuje samotnou frézovací jednotku, kterou je možné přibjednat nebo použít jakoukoliv ruční frézu s upínacím průměrem 68 mm. Stroj je dodáván v rozloženém stavu a stavba zabere přibližně dvě hodiny. Výrobce neudává pojezdové rychlosti ani parametry použitých krokových motorů. [5] [6]

Tab. 2.3 Parametry Shapeoko Pro XXL [5].

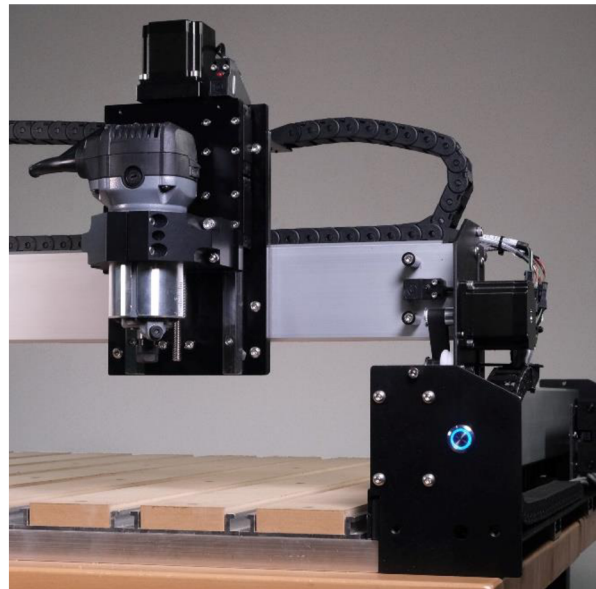
Rozsah osy x	838 mm
Rozsah osy y	838 mm
Rozsah osy z	101 mm
Celkové rozměry	1 270 x 1 066 x 482 mm
Hmotnost	79,3 kg
Cena	64 000 Kč



Obr. 2.4 Celkový pohled Shapeoko Pro XXL [5].



Obr. 2.5 Detail řemenu v ose X [5].



Obr. 2.6 Detail frézovací jednotky osa Y [5].

2.1.3 Stepcraft

Firma Stepcraft byla založena v roce 2012 a sídlí v Německém Mendenu. V české republice je zastoupená prodejcem Profitek s.r.o. Nabízejí se tři modelové řady frézek: D, M a Q. Řada D je vhodná pro soukromý sektor nebo pro vzdělávací účely. Řada M je jednou z nejuniverzálnějších frézek. Řada Q je určena pro profesionální využití ve výrobních provozech.

Do porovnání byl vybrán model z řady M s největší pracovním rozsahem os STEPCRAFT M-1000. Řada M je zajímavá systémem dvouúrovňového pracovního stolu, kde je možné odmontovat upínací stůl s T drážkami a celá frézka se postaví přímo na obráběný materiál. Tím je možné frézovat různé reliéfy například do dřevěné či betonové podlahy. Pracovní plocha modelu M-1000 je 679 x 1 044 mm v osách X a Y. Na všech osách je použito lineární vedení Bosch Rexroth, dvojité vzájemně nastavitelné pohybové matice Igus případně kuličkové šrouby HIWIN. Ty pohání krokové motory Nema 23. Stroj je sestaven ze zesílených hliníkových profilů. Držák nástrojů o průměru 43 mm umožňuje osazení běžně dostupnými pracovními jednotkami, které nejsou součástí balení. Stroj je možné osadit i tiskovou hlavou pro 3D tisk, čtvrtou rotační osou, senzorem délky upnutého nástroje, jednotkou tažného nože, gravírovacím hrotem nebo laserem. Ovládací software je vyvíjen přímo firmou Stepcraft. Frézku lze objednat ve smontovaném i rozloženém stavu. [7] [8]

Tab.2.4 Parametry Stepcraft M-1000 [9]

Rozsah osy X	679 mm
Rozsah osy Y	1 044 mm
Rozsah osy Z	194 mm
Upínací plocha	843 x 1 150 mm
Celkový rozměr	913 x 1 226 x 646 mm
Hmotnost	42 kg
Cena	86 490 Kč



Obr. 2.7 Celkový pohled STEPCRAFT M.1000 [9].



Obr. 2.8 Detail osa Z [9].



Obr. 2.9 Detail osa Y [9].

2.1.4 CNC-Step S1000 T

Frézka s označením S1000 T je produktem od společnosti CNC-Step, která sídlí v Německu. Je to rozměrově střední řada z produktů této společnosti, která je ideální pro frézování malých a středních obrobků. Rám i nosné části stroje jsou vyrobeny z hliníkových profilů. Rozsah os X a Y je 1 000 x 600 mm. Maximální posuvová rychlost je při použití softwaru Mach 3 $12\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a řezná rychlost je udávána $8\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Frézka je dodávána bez interního počítače a je tedy nutné jí propojit s počítačem s Windows nebo Linux. Výrobce dodává k frézce operační systém, kde je na výběr ze softwaru KinetiC-NC, WINPC-NC, MACH3, EMC nebo Linux CNC. O pohon se starají čtyři krokové motory Nema 23. Osa X je poháněna dvěma motory. Na všech osách jsou kuličkové šrouby o průměru 12 mm. Osy pojíždí po broušených vodících tyčích, které mají na osách X a Y průměr 22 mm a na ose Z průměr 16 mm. Upnutí obrobků je možné na stole s T drážkami, nebo lze stůl vyndat a frézku položit nad obrobek. Tím lze obrábět i vysoké obrobky a není zde omezující výška obrobku. [10]

Tab. 2.5 Parametry frézky CNC-Step S1000 T [10]

Rozsah osy x	1 000 mm
Rozsah osy y	600 mm
Rozsah osy z	110 mm
Velikost upínacího prostoru	1 330 x 690 mm
Celkové rozměry	1 330 x 870 x 575 mm
Opakovatelná přesnost obrábění	0,01 mm
Maximální rychlost posuvu	$12\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
Maximální řezná posuvová rychlost	$8\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
Hmotnost	51 kg
Cena	113 642 Kč



Obr. 2.10 Celkový pohled frézky CNC-Step S1000 T [10].



Obr. 2.11 Detail kuličkového šroubu a vodící tyče [10].



Obr. 2.12 Detail řešení umístění posuvu osy X a Y [10].

2.1.5 Mekanika Pro CNC Machine L

Stroj Mekanika Pro CNC Machine L je nejvyšším modelem od této značky. Jedná se inovovanou verzi stroje EVO CNC Machine L. Je vyrobený z komponentů, které se vyrábějí a kompletují v Belgii. Dodává se jako stavebnice, kterou si zákazník musí doma sestavit sám. Montáž trvá cca 5 hodin. K dispozici je montážní příručka i přehledný video návod. Nosné části stroje jsou zhotoveny z hliníkových profilů a bočnice portálu je vyrobena z ocelového výpalku o tloušťce 8 mm. Pohonné ústrojí se skládá ze čtyř motorů Nema 23 s přídržným momentem 165 N.cm. V ose X jsou použity dva motory. Přenos krouticího momentu je realizován kuličkovým šroubem o jmenovitém průměru 16 mm. Stoupání šroubu je v osách X a Y 10 mm, v ose Z je stoupání 5 mm. Osy se posunují po valivém lineárním vedení s vozíky a 15 mm prizmatickou kolejnicí. Vřeteno má výkon 1,4 kW a lze ho propojit s počítačem a upravovat otáčky pomocí softwaru. Zařízení se dodává s integrovaným počítačem Raspberry Pi 4, který disponuje čtyřmi USB porty, ethernetovou přípojkou, Wifi a Bluetooth. Počítač je vybaven kapacitním dotykovým displejem a klávesnicí. Není tedy nutné k frézce připojovat externí

počítač a instalovat potřebný software. Dále je stroj vybaven šesti indukčními senzory dorazu. [3]

Tab. 2.6 Parametry frézky Mekanika Pro CNC Machine L [[11]].

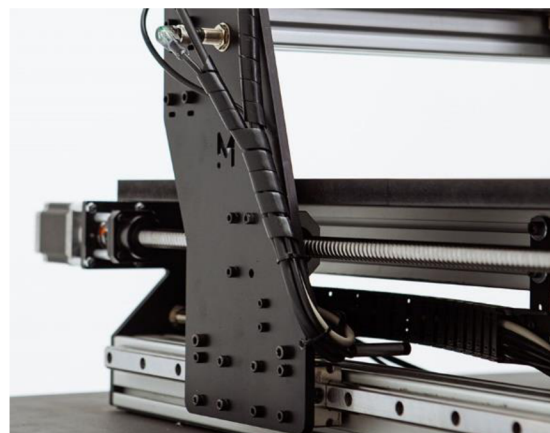
Rozsah osy x	1 030 mm
Rozsah osy y	1 030 mm
Rozsah osy z	115 mm
Celkové rozměry	1 370 x 1 370 x 300 mm
Opakovatelná přesnost obrábění	0,1 mm
Maximální rychlost posuvu	10 000 mm · min ⁻¹
Maximální řezná posuvová rychlost	8 500 mm · min ⁻¹
Hmotnost	60 kg
Cena	134 000 Kč



Obr. 2.13 Celkový pohled [11]



Obr. 2.14 Detail portálu [11]



Obr. 2.15 Detail pohonu v ose X [11]

2.1.6 Caucau H1000 HF

Základní frézka Caucau H1000 HF slovenského výrobce je vhodná pro gravírování, frézování a vyřezávání různých materiálů jako je plast, plexisklo, překližka, dřevo, MDF. Firma nabízí různé konfigurace a výbavy stroje. Obráběcí plocha je 850 x 600 mm. Rám je zhotoven z ocelového svařence. Na všech osách jsou podepřené tyče s valivými ložisky. Přenos síly zajišťuje trapézový šroub. Stroj je vybaven automatickým odměřováním délky nástroje a indukčními snímači koncové polohy. Vřetenem je vysokofrekvenční s asynchronním motorem o výkonu 1,5 kW a je součástí dodávky. [12]

Tab. 2.7 Parametry frézky Caucau H1000 HF [12]

Rozsah osy x	600 mm
Rozsah osy y	850 mm
Rozsah osy z	150 mm
Celkový rozměr	1 100 x 1 300 x 600 mm
Opakovatelná přesnost	0,05 mm
Maximální rychlost posuvu	1 200 mm·min ⁻¹
Hmotnost	90 kg
Cena	68 611 Kč



Obr. 2.16 Celkový pohled na frézku [12].



Obr. 2.17 Boční pohled [12].



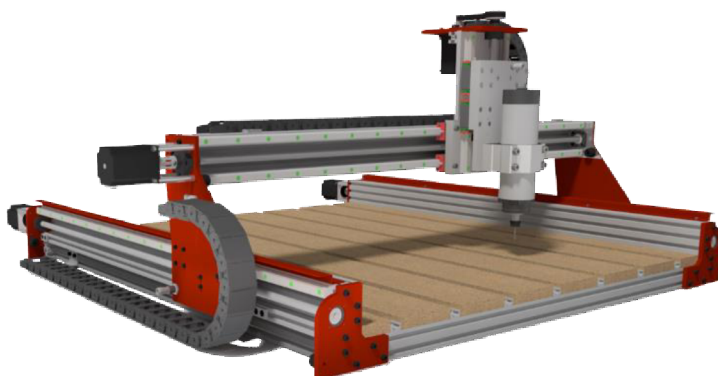
Obr. 2.18 Detail lineárního vedení a pohybového šroubu [12].

2.1.7 Bxp control

Tomáš Bařka a Jiřĩ Procházka vyvinuli stroj, který zvládne obrábět vře od duralu přes dřevo po plast. Hobby CNC frézka od BXP Control získala i veřkeré potřebné certifikace pro prodej v EU. Nosné řásti konstrukce jsou z hliníkových profilů a duralových plechů. Díky použitým kvalitním komponentům z průmyslových strojů jako jsou kuličkové řrouby, tuhé prizmatické vedení a mnohé další překvapí svojí výkonností mezi konkurenty. Stroj ALUTEX XL byl navržený pro menří výrobní firmy, které frézují primárně deskové formáty. Je nabízen ve dvou velikostech. V základní konfiguraci má pracovní plochu o velikosti 1 300×1 300 mm, ale tu je možné díky modulárnímu systému i dodatečně prodloužit na úctyhodných 2 600 mm. Stroj je osazen prizmatickým lineárním vedením a jsou použity silnostěnné hliníkové profily za účelem zvýřený tuhosti stroje. [13]

Tab. 2.8 Parametry frézky Alutex a Alutex XL [13]

	ALUTEX	ALUTEX XL
Rozsah osy x	770 mm	1 300 mm
Rozsah osy y	720 mm	1 300 mm
Rozsah osy z	100 mm	200 mm
Celkové rozměry:	1 250 x 1 160 x 530 mm	1 750 × 1 680/2 910 × 1 550 mm
Lineární vedení:	Prizmatické vedení HGR15 s vozíky HGH15CA	Prizmatické vedení HGR20 s vozíky HGH20CA
Pohybové ústrojí:	Kuličkové řrouby SFS1210	Ozubený hřeben přímý s mechanismem pro vymezení vřle (osa X,Y), kuličkový řroub SFS1605 (osa Z)
Motory:	Krokové motory NEMA 23 2,2 Nm (4ks)	Krokové motory NEMA 23 2,2 Nm (4ks)
Max. posuv:	4 800 mm·min ⁻¹	9 600 mm·min ⁻¹
Vřeteno:	Ruční ohraňovací frézka / Elektrovřeteno 1,5 kW vř. VFD	Elektrovřeteno 2,2 kW/3,3 kW vř. VFD (7 200 – 24 000 RPM)
Řídící systém	Integrované mini PC Raspberry PI 4 s nastaveným systěmem LinuxCNC	Vlastní průmyslový počítač (IPC) s nastaveným LinuxCNC
Cena	61 850 kř	149 850 kř



Obr. 2.19 Alutex [13].



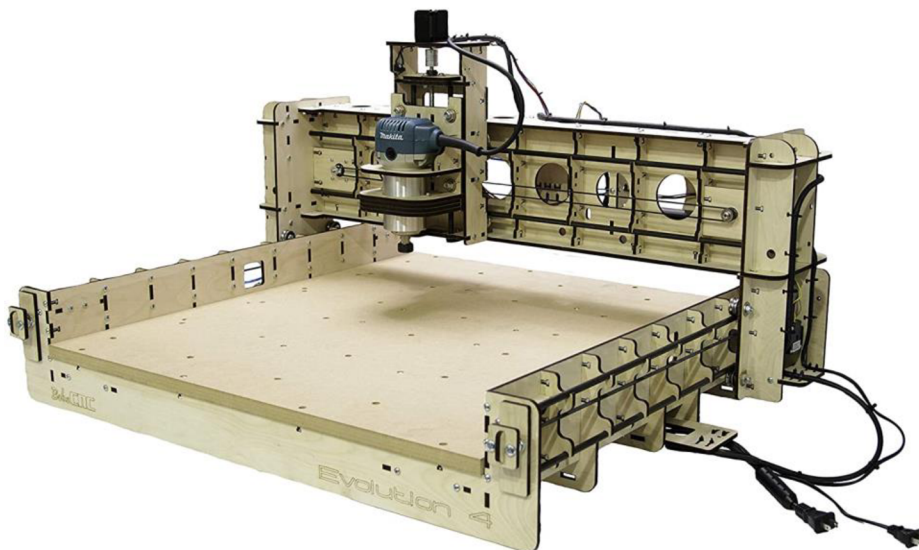
Obr. 1.20 Alutex XL [13].

2.1.8 Bobs CNC

Společnost Bobs CNC nabízí celkem čtyři varianty frézek: Evolution 3, Evolution 4, KL 733, KL 744. Liší se ve velikosti pracovní plochy a použitém softwaru. Varianty KL 733 a 744 mají lepší vedení, jiný řemen a jsou dodávány se silnějšími krokovými motory Nema 23. Pro porovnání byl zvolen stroj s označením Evolution 4. Rám stroje je laserem vyřezaný z dřevěných desek. Pro výrobu desek se používá baltická bříza, která má dobré pevnostní charakteristiky. Koncepce stroje je portálová s dolními gántry. Součástí stavebnice je ohraňovací frézka Makita RT0701V, která slouží jako vřeteno. Pohyb os zajišťují krokové motory Nema 17. Jedná se o dvoufázový krokový motor s úhlem kroku 1,8 stupně. Maximální přídržná síla je 0,48 Nm. Krouticí moment z motoru se přenáší v osách X a Y pomocí řemene. V ose Z je tyč se závitem Tr8 a dvě vůči sobě předejpaté matice. Vedení os je realizováno pomocí kolejničky, po které jezdí kladka s ložiskem. Montážní postup je podrobně popsán v příloženém manuálu a zabere zhruba 3 hodiny. Hodnoty rychlostí posuvů ani přesnost výrobce neudává. [14]

Tab. 2.9 Parametry stroje Evolution 4 [14]

Rozsah osy x	610 mm
Rozsah osy y	610 mm
Rozsah osy z	85 mm
Celkový rozměr	813 x 990 x 530 mm
Hmotnost	30 kg
Cena (CZK)	26 650 Kč

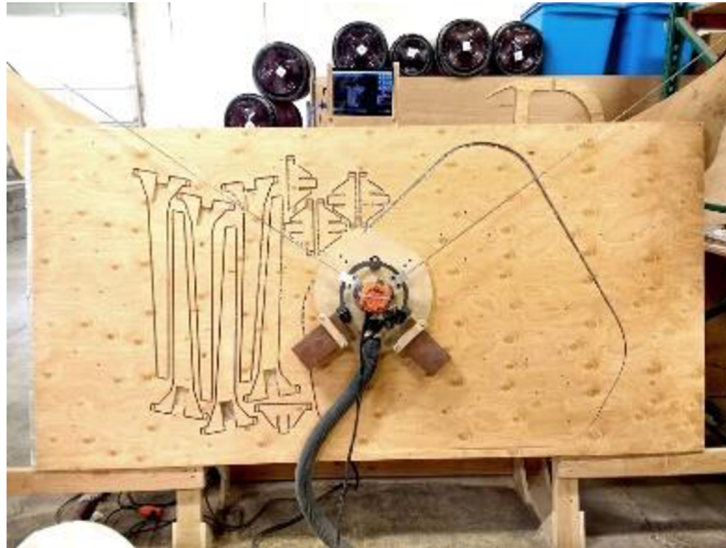


Obr. 2.21 Celkový pohled [14].

2.1.9 Makermade Maslow

Maslow je velkoformátový CNC router s netradičním konstrukčním řešením. Projekt vznikl v roce 2015, kdy ho vymyslel Bart Smith. V roce 2016 se uskutečnila kampaň na kickstarteru kde se vytvořila velká komunita fanoušků tohoto zařízení. Jedná se o open source projekt, tedy veškerá dokumentace ke stroji se dá volně stáhnout. Stroj je navržen tak, aby se jednotlivé díly daly koupit v běžně dostupných hobby marketech. Stroj je také možno objednat jako stavebnici se všemi díly. Rám stroje je velký ovšem díky vertikálnímu umístění nezabírá v dílně takovou

plochu. Výchozí rám je dřevěný. Horní příčný nosník drží motory, které pohání osu X a Y. Je vyroben z trámku 50 x 100 mm. Rám lze různě přizpůsobit podmínkám dílny a lze jej různě sklápat. Jakmile je rám postaven, namontují se motory pro osu X a Y a napínací kladky. Poté se zavěsí hnací řetězy. Vřeteno je ohraňovací fréza připojená k prstenci, který drží dva hnací řetězy. Prstenec zajišťuje, že při posouvání a otáčení saní od tahů motoru zůstává frézovací hrot vycentrovaný a vytváří tak hladkou linii řezu. Pohyb v osách X a Y je umožněn díky řetězům, které se navíjejí nebo odvíjejí na motor. Osa Z, se nastaví buďto manuálně nebo lze pořídit rozšířené příslušenství pro osu Z, kde je router spuštěn díky pohybovému šroubu a krokovému motoru. [15]



Obr. 2.22 Celkový pohled [15].



Obr. 2.23 Vedení os [15].

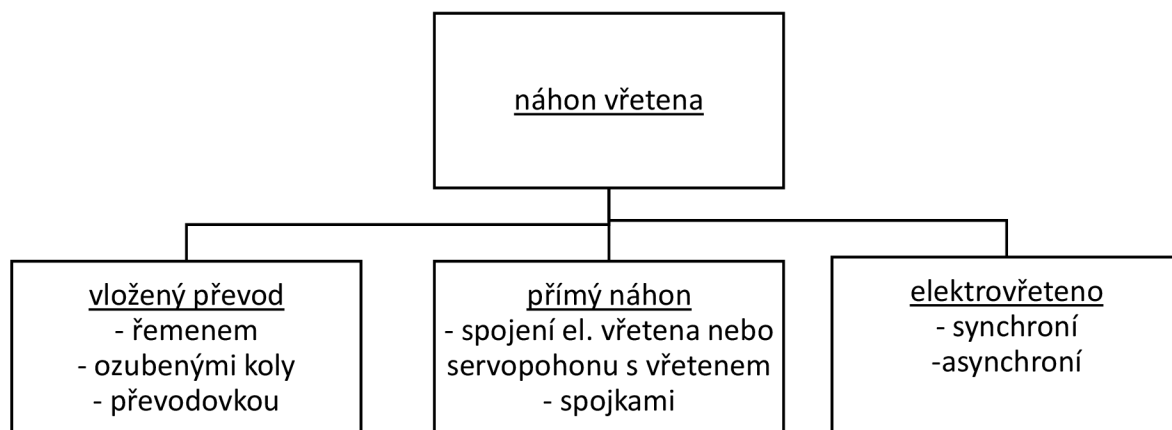


Obr. 2.24 Detail osy Z [15].

2.2 Rešerše komponent stroje

2.2.1 Vřeteno

Úkolem vřetena u frézky je zaručit nástroji přesný otáčivý pohyb, při kterém se dráhy jednotlivých bodů obrobku nebo nástroje liší od kružnice jen v přípustných mezích. Přesnost chodu je určena velikostí tzv. radiálního a axiálního házení. Vřeteno nesmí měnit polohu v prostoru, mění-li jeho zatížení směr a smysl. Ztráty v uložení vřetena musí být co nejmenší (účinnost, oteplování a tepelná dilatace, změna polohy, funkce). Vřeteno musí být tuhé. Jeho deformace spolu s přesností chodu má rozhodující vliv na přesnost práce obráběcího stroje. Přesnost chodu vřetena se kontroluje na předním konci vřetena na ploše, která má přímý vliv na přesnost otáčení nástroje (kuželová nebo válcová plocha podle ČSN). Limitujícími faktory jsou zde pracovní rozsah otáček, který určuje ve vztahu k průměru nástroje nejvyšší dosažitelnou hodnotu řezné rychlosti. Dále pak charakteristika vyjadřující rozložení dostupného kroučícího momentu, resp. výkonu v rámci rozsahu pracovních otáček. Spolu s nejvyšší dovolenou hodnotou zatížení uložení vřetene tento faktor udává maximální šířku řezu, s ní úzce souvisí produktivita stroje. K přenosu řezného výkonu na nástroj musí být vřeteno spojeno s náhonovým servomotorem. Přímý náhon se nejčastěji využívá při vysokorychlostním obrábění, kdy je potřeba dynamicky stabilní náhon. Ozubené řemeny se používají tam, kde je potřeba přenášet velké výkony a nesmí docházet k prokluzu řemenů. Elektrovřeteno je tvořeno rotorem, který se lisuje na vřeteno. Ve vnějším plášti je vnutí s chlazením. Vnitřkem vinutí prochází těleso vřetena s nalisovaným rotorem. [2] [16]

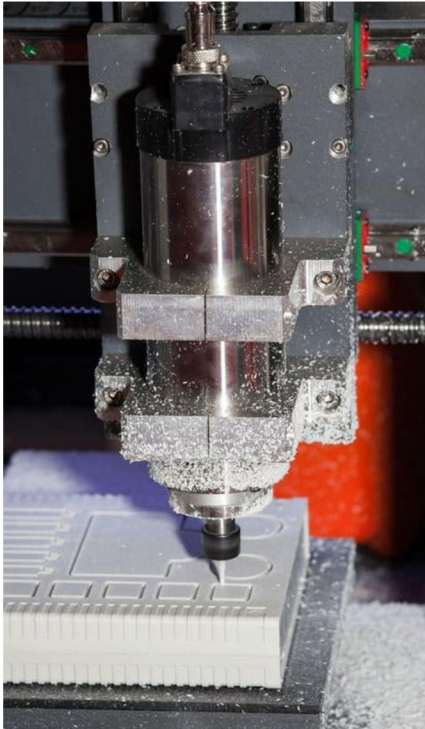


Obr. 2.25 Schéma variant náhonu vřetena [2].

Při konstrukci malé dílenské frézky na dřevo se nejvíce používají elektrovřetena, nebo ruční ohraňovací frézky. Elektrovřeteno je určeno zejména pro profesionální frézky, které musejí vydržet dlouhodobou zátěž bez přehřátí a poruchy. Je lépe výkonnostně vybaveno a musí splňovat certifikace pro průmyslovou výrobu. Má většinou bezuhlíkový motor s velkou frekvencí a tím pádem je méně hlučnější. Vřeteno je u strojů s velkým výkonem vodou chlazené. Menší motory jsou chlazeny vzduchem. Pro ovládání rychlosti otáček se používá frekvenční měnič, kterým lze docílit plynulé nastavení otáček v celém výkonnostním spektru. Vřeteno lze propojit s počítačem a pomocí programu ho ovládat. Udávaná životnost záleží na zatěžování, ale nejčastěji se uvádí okolo 12 tisíc hodin. Nevýhodou je vyšší cena oproti ruční frézce a také složitější montáž. [17] [18]

Ruční frézka je určena spíše pro začátečníky a příležitostné použití. Výhodou je snadná aplikace. Stačí jenom vyrobit upínací zařízení například pomocí 3D tisku, a poté jen připojit do

elektrické sítě. Nevýhodou je, že není tak výkonná. Udávaný výkon je pouze vrcholový. Její životnost je menší jak u elektrovřetena. Je nutné po čase vyměnit uhlíky na motoru a doporučuje se i výměna ložisek. Motor je vzduchem chlazený a po delším frézování je nutné vyfoukat prach z ventilačních otvorů stlačeným vzduchem, jinak hrozí přehřátí motoru. Otáčky lze nastavit pouze manuálně. [17] [18]



Obr. 2.26 Ukázka použití elektrovřetena [18].



Obr. 2.27 Ukázka použití ruční frézky [19].

2.2.2 Přenos kroutícího momentu

Rotační náhonové soustavy převádějí rotační pohyb od motoru na lineární pohyb. Při stavbě CNC frézky určené pro obrábění dřeva se nejčastěji používají tyto varianty: kuličkový šroub s maticí, kluzný pohybový šroub s maticí, ozubený řemen nebo ozubený hřeben. Pohybový šroub poskytuje nejzákladnější přenos síly. Jsou cenově dostupné a relativně přesné. Používají se tam kde je rychlost přímočarého pohybu poměrně malá a snesou velká zatížení. Nevýhodou je malá účinnost a velké opotřebení, které vzniká třením, mezi maticí a šroubem. Není je možné použít na velké vzdálenost. Při vyšších otáčkách dochází k rezonancím. Jsou samosvorné. [2]

Kuličkový šroub se v dnešní době využívá nejčastěji. Umožňuje velké stoupání. Matice vykazuje nižší únosnost, než pohybový šroub ale není samosvorný. Vyniká velmi nízkým třením mezi maticí a šroubem. Lze ho použít na delší vzdálenosti, jelikož hloubka závitů není tak velká. Kuličkový šroub se stává ze soustavy, hřídel, závitová tyč, ložiskový čep, matice a kuličky. [2]



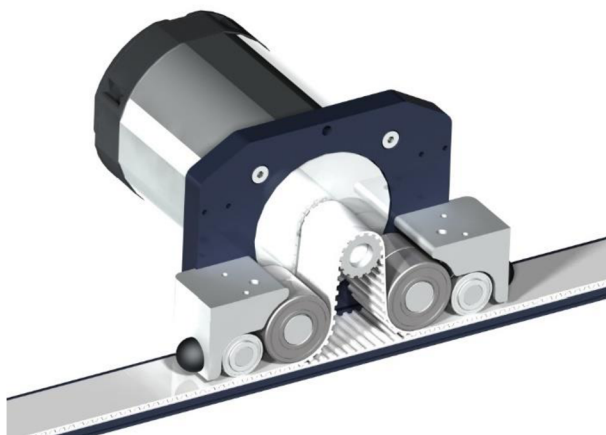
Obr. 2.28 Pohybový šroub [20].



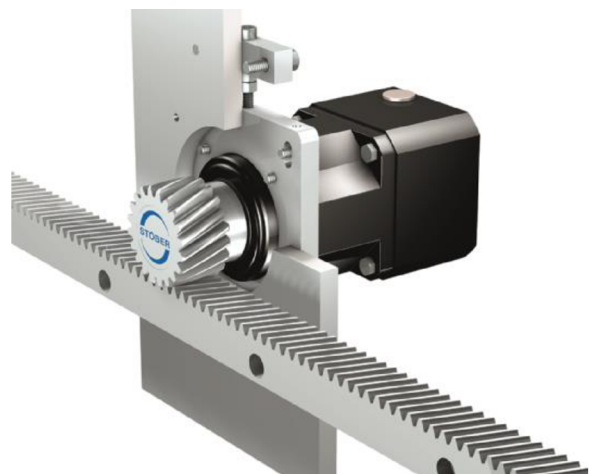
Obr. 2.29 Kuličkový šroub [21].

Ozubený řemen má mnoho verzí. Lze ho použít na větší vzdálenosti. Umožňuje přenos vyšších rychlostí. Vždy je nutné mít napínací mechanismus. Je cenově dostupný. Ozubené hřebeny patří k často používaným způsobům převodu rotačního pohybu na lineární. Ozubený hřeben tvoří lineární dráhu a jezdec je poháněn ozubeným kolem.

Využívá se pro jednoduchost a neomezenou možnost délky lineárního pojezdu. [2] Hřebeny se vyrábějí ve dvou základních provedeních: s přímým ozubením a se šikmým ozubením. Obě možnosti mají své výhody a nevýhody. Nejvíce používanou variantou je v současnosti varianta se šikmým ozubením. Díky modernímu způsobu výroby zaniká nevýhoda s vyšší cenou. Šikmé ozubení je mnohem tišší a dokáže přenášet větší tangenciální zatížení. Pohon však musí být dimenzován na axiální zatížení. Obecně platí, že pastorek by měl být vyroben z odolnějšího materiálu, než je ozubený hřeben. Je to proto, že je více zatěžován. Používá se pro náročnější aplikace. Je schopný dosahovat velkých rychlostí. [2] [22]



Obr. 2.30 Náhon ozubeným řemenem [23].



Obr. 2.31 Náhon ozubeným hřeben [24].

Poslední zmíněnou možností je pohon lineárním motorem. Lineární motor je řešení pohonu, které se liší od rotujícího motoru. Na rozdíl od rotujícího stroje negeneruje lineární motor točivý pohyb u poháněného objektu, nýbrž jím pohybuje přímočaře nebo po zakřivené dráze. Lineární motor se používá tehdy, když dynamika, kterou dosahuje rotující servomotor, nedostačuje a když je místo toho nutné realizovat přímý translační pohyb. To je například tehdy, když je nutné aplikace pohánět přímo nebo při precizních přestavovacích procesech. Toto řešení je v porovnání velmi drahé. [25]

Jednotlivé způsoby náhonu byly porovnány v tabulce. Byly porovnávány parametry cena, přesnost, tuhost, dynamika a účinnost. Každému parametru bylo přiděleno číslo od 1 do deseti, kde deset je nejlepší.

Tab. 2.10 Porovnání způsobů náhonů [2].

Parametr	Cena	Přesnost	Tuhost	Dynamika	Účinnost
Ozubený hřeben s pastorkem	7	8	10	8	6
Kuličkový šroub	8	9	8	8	8
Trapézový šroub	10	4	6	4	4
Ozubený řemen	9	5	5	5	5
Lineární motor	3	10	8	8	10

2.2.3 Pohon

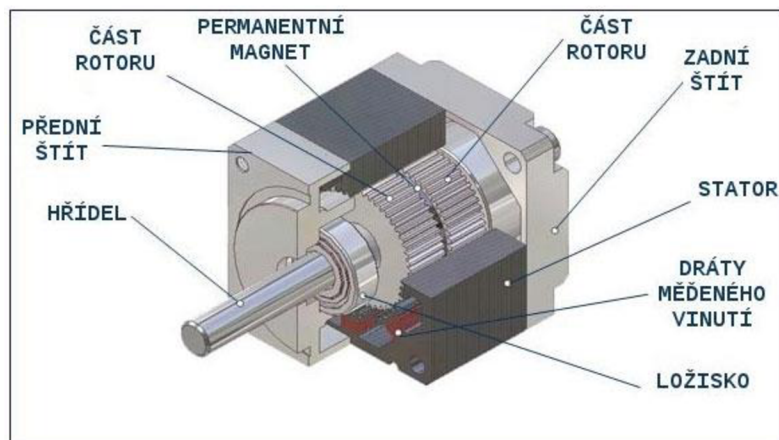
Pohony přeměňují vstupní energii na mechanický pohyb. U CNC frézek se využívají elektromotory, a to nejčastěji servomotory nebo krokové motory. Kladené nároky jsou na plynulý bez rázový rozběh a brzdění, vysokou přesnost polohování a dostatečnou polohovou tuhost. [26]

Při konstrukci strojů a přístrojů se často setkáváme s potřebou přesného polohování jejich pohyblivých částí. Použijeme-li k pohonu stejnosměrné (DC) nebo střídavé (AC) motory, je přesné polohování bez použití koncových spínačů, enkodérů a často také brzdy nebo spojky obtížné. Proto se, zvláště v menších zařízeních, velmi často používají krokové motory. Krokové motory jsou řízeny impulsem stejnosměrného proudu. Tyto impulzy jsou převáděny na jednotlivé kroky pootočení osy motoru. Velikost kroku je dána konstrukcí motoru, nejčastěji mají motory 200 kroků na otáčku tzn. jeden krok pootočí osu motoru o $1,8^\circ$. Používají se u menších CNC strojů. Výhodami krokového motoru jsou jednoduchost řízení, nepotřebují zpětnou vazbu do řídicí elektroniky, jsou cenově dostupnější než servomotory. Jejich nevýhodou je pak ztráta záběrného momentu při vysokých posuvech a při přetížení okamžitě dochází ke ztrátě kroku. [26] [27]

Nejčastěji používané krokové motory jsou ve velikostech NEMA 14, 17, 23, 24 a 34, přičemž toto označení znamená velikost příruby motoru. Velikost příruby a délka krokového motoru pak udává objem daného stroje, který zároveň předurčuje jeho maximální výstupní výkon. Ten bývá vzhledem k již zmiňovanému faktu o podobné konstrukci od všech firem prakticky stejný. Nejeftivnější oblast otáček krokových motorů se nachází v rozmezí $50-500 \text{ min}^{-1}$. Se zvyšujícími se motory velice rychle ztrácejí výkon. [28]

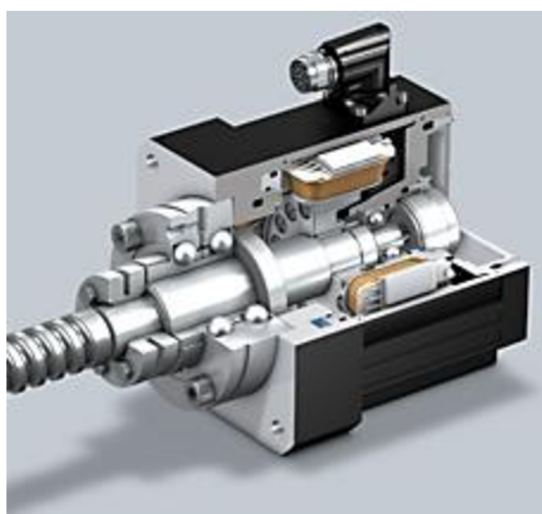
Tab. 2.11 Porovnání velikostí krokových motorů [28]

Označení	NEMA 14	NEMA 17	NEMA 23	NEMA 24	NEMA 34
Velikost hrany příruby [mm]	35.3	42.3	56.4	60.0	86.0
Statický moment: [N.m]	až 0.2	0.2-0.8	0.8-2.5	2.5-4.5	4.5-12.0



Obr. 2.32 Popis krokového motoru [28].

Servomotory jsou motory, u kterých lze nastavit přesnou polohu natočení osy. Servomotory jsou dnes nejčastěji řešeny jako synchronní motory s třífázovým vinutím ve statoru. Na výstupní hřídeli motoru je umístěn enkodér, který udává informaci o poloze natočení hřídele zpět řídicí elektronice. Servomotory jsou vhodné pro dynamicky náročné úlohy a lze je krátkodobě několikanásobně momentově přetížit. Rozdíl mezi servomotorem a krokovým motorem je ten, že servomotor spotřebovává energii, když se otáčí. Krokový motor spotřebovává energii i v klidové poloze, aby byla udržena tato poloha. Pokud tuto polohu není potřeba zachovat, tak krokový motor také není potřeba napájet. Další podstatnou věcí je, že servomotor o své poloze ví i po znovu zapnutí napájení. Je to díky sensorům, které obsahuje. U krokového motoru polohu neznáme. Proto pokud potřebujeme dostat zařízení do požadované polohy, je potřeba tuto polohu znovu zjistit. Toho dosáhneme tím, že se dostaneme na známou polohu. Například na koncovou, kde je koncový spínač. [26] [29]



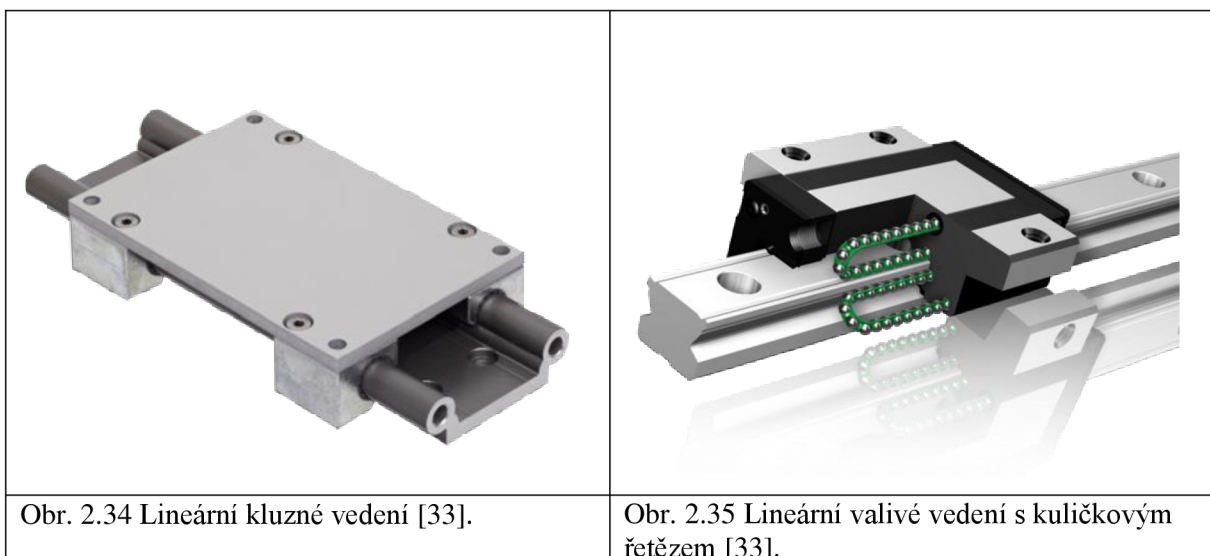
Obr. 2.33 Řez vřetenovým servomotorem EZS [30].

2.2.4 Lineární vedení

Lineární (přimočaré) vedení je definováno jako soustava ploch, na kterých se stýká pohyblivá část s nepohyblivou, která má zajišťovat pohyb po geometricky přesné dráze. Jednotlivé plochy se nazývají vodící. Při konstrukci obráběcích strojů se kladou na vodící plochy následující všeobecné požadavky. Vysoká statická a dynamická tuhost vedení. Vedení je vyrobeno s takovou přesností, aby odchylka dráhy pohybu od ideálního tvaru dráhy byly v určitých mezích daných přesností stroje. Odolnost vedení vůči opotřebení. Zvolený vhodný materiál ploch, popřípadě jeho tepelné zpracování. Možnost vymezení vůle vzniklé opotřebením ploch vedení při provozu. Výborná jakost povrchu, která sníží součinitel tření na minimum. Dokonalá ochrana proti vnikání prachu, třísek a jiných nečistot. Dokonalé mazání, aby byly ztráty pohybu co nejmenší. Jednoduchý tvar se zřetelem na snadnou výrobu. Podle druhu tření mezi styčnými plochami lze rozlišit vedení kluzná a valivá. [31]

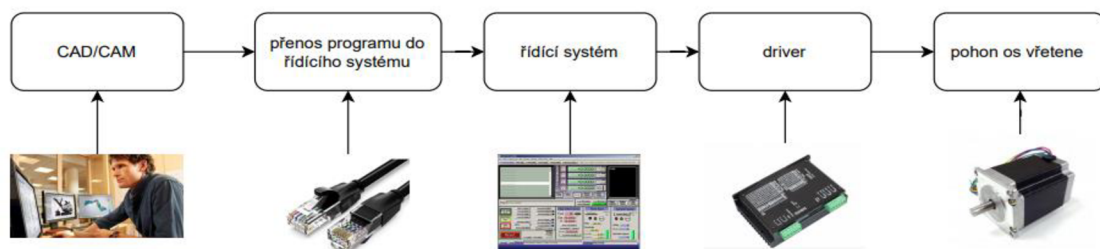
Kluzná vedení se používají ve dvou provedeních, podle třecích poměrů, které v nich dominují: hydrostatická a hydrodynamická. Nevýhodou hydrodynamického typu je nerovnoměrný trhavý pohyb zejména při malých rychlostech. Přesnost vedení se dosáhne vhodnou technologií obrábění a volbou vhodného materiálu. Jako materiál se nejčastěji používá šedá litina, kalená šedá litina, kalená ocel a umělé hmoty. Výhodami hydrostatického vedení jsou: velmi malý součinitel tření, prakticky žádné opotřebení, vysoká tlumící schopnost ve směru kolmém na vodící plochy, vysoká tuhost vedení. Nepříznivě se projevují tyto vlastnosti: nutnost velmi tuhých částí vedení, nutnost čerpadla, komplikovaná konstrukce, rozvod oleje, filtrování oleje. Méně typická jsou celoplastová lineární kluzná vedení. Plast vyztužený skleněnými vlákny zaujme ve srovnání s kovovými alternativami především svou nízkou hmotností. Je vysoce odolný vůči chemikáliím, je nemagnetický a kromě toho také cenově výhodný. [31] [32]

Valivé vedení vyniká menším součinitelem tření. Neprojevuje se u nich trhavý pohyb při malých rychlostech, mají delší životnost, lze u nich vymežit vůli a předepnutí, mají vysokou přesnost pohybu i při menších rychlostech. Jako nevýhody valivého vedení lze uvést: náročnost na přesnost výroby, větší rozměry, menší schopnost útlumu chvění. Vedení se skládá z kolejničky a vozíku, který obsahuje valivé elementy. Jako valivý element se používá kulička, váleček nebo jehla. Kolejnička je dostupná v několika variantách průřezu (kruhová, profilová) a je upevněná pomocí šroubů na přesně upravenou plochu. [31]



2.2.5 CNC řídicí software

Hlavním úkolem řídicího softwaru je řízení relativního pohybu mezi nástrojem a obrobkem, přičemž instrukce o dráze a rychlosti jsou stanovené v programu. Dalšími funkcemi může být spuštění vřetena a ovládání jeho otáček, vypínání a zapínání toku chladicí kapaliny, kontrola programu nebo obsluhy, tak aby nedošlo k vyjetí nástroje mimo pracovní oblast stroje a nedošlo tak k poškození stroje nebo obrobku. Řízení stroje má hardwarové nebo softwarové ovládací prvky jako jsou tlačítka, klávesnice, ruční kolečko (MPG – manual pulse generator), knoflíky potenciometrů, joystick sloužící k ručnímu ovládání stroje operátorem. Součástí systému je i displej, který zobrazuje důležité informace o aktuálním stavu stroje. Pro snadnější pochopení funkce řídicího systému je potřeba znázornit obráběcí proces na CNC. Typický CNC obráběcí proces funguje takto. Konstruktor vytvoří 3D model v CAD systému, model nahraje do CAM, který vytvoří takzvaný part program nejčastěji v g-kódu. Tento program je přenesen do řídicího systému stroje. Přenos dat se provádí pomocí datového nosiče nebo po datové síti. Řídicí systém interpretuje g-kód, ve kterém je definováno řízení nástroje, který opracuje obrobek a vyšle signály do pohonných jednotek tzv. driverů. Tyto drivery signál zpracují a zesílí, tak aby byly dostatečně velké a vhodně načasované pro motory. Motory rozpohybují pracovní osy požadovanou rychlostí a zvoleným směrem. [34] [17]

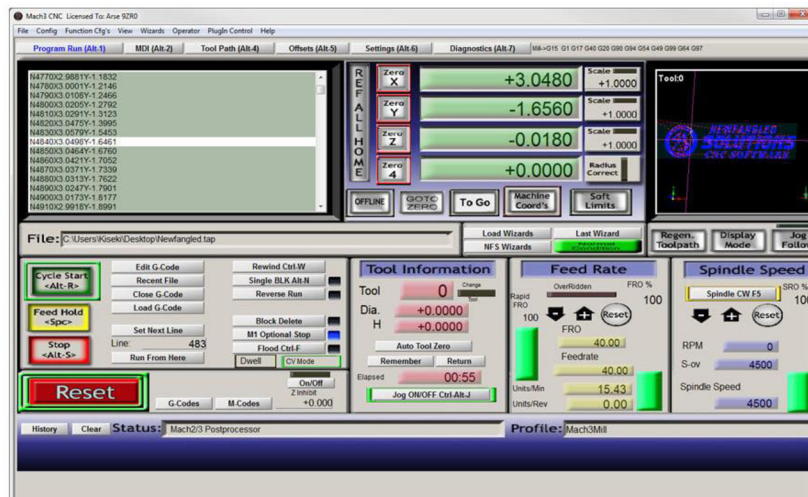


Obr. 2.36 CNC obráběcí proces.

Na trhu lze najít celou řadu řídicích softwarů. Do této práce byly vybrány softwary tak, aby splnily následující kritéria. Program je aktualizován a vývojář nabízí plnou zákaznickou podporu. Software lze upravit podle požadavků zákazníka. Program je cenově i technicky dostupný pro neprofesionální použití. Musí umět ovládat minimálně tři osy. Rozdíly mezi těmito programy jsou značné. Některé umí vygenerovat kód na základě obrázku a příslušný kód je možno v softwaru editovat. Některé jenom přeloží kód a odešle pokyny do driverů. [34] [17]

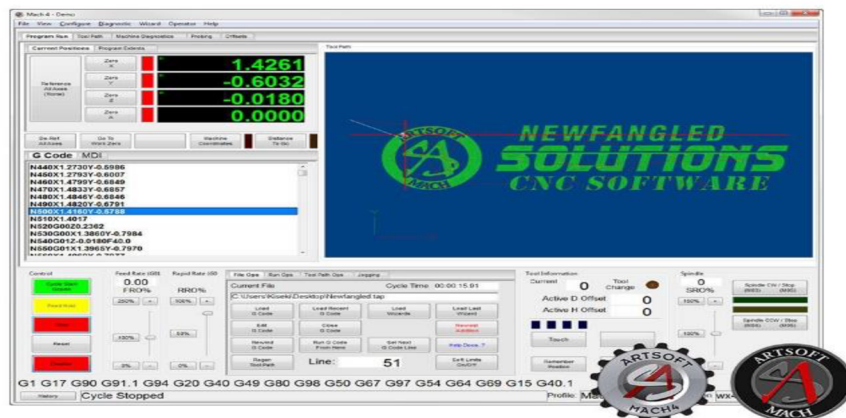
Mach 3 a Mach 4

Mach 3 je populární a dlouho vyvíjený software, který splňuje potřeby hobby uživatelů. Lze ho upravit podle požadavků zákazníka. Je kompatibilní s externími drivery jako je například Smooth Stepper. Umožňuje řízení až šestiosého stroje. Pracuje se standartním ISO kódem. Lze sním ovládat vřetena, chlazení a odsávání. Nabízí velkou univerzálnost za přijatelné peníze. Cena se pohybuje okolo 175 USD. K dispozici je i demo verze, která je omezena na 1 000 řádků kódu. Lze stáhnout i českou lokalizaci. [34] [17]



Obr. 2.37 Uživatelské prostředí Mach 3. [35]

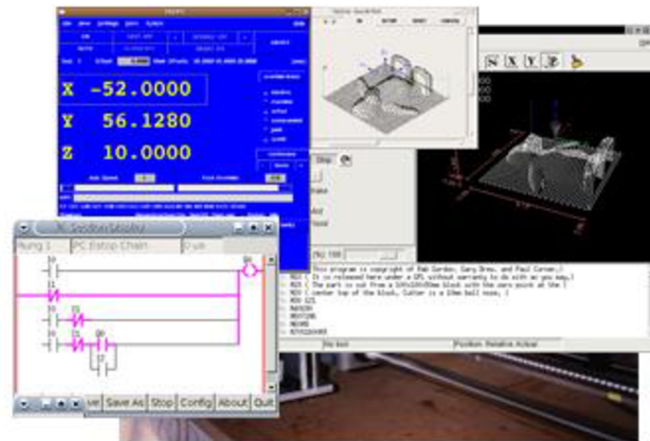
Mach 4 je novější verze CNC řídicího softwaru. Byl kompletně přepsán a upraven tak, aby mohl pracovat i s velkými soubory náročnějšími na výpočetní výkon. Používá se na průmyslových zařízeních. Mach 4 je na rozdíl od Mach 3 nabízen v mnoha variantách a obsahuje programy pro spuštění fréz, soustruhů, vrtaček, plazmových řezaček a 3D tiskáren. Cena licence je 200 USD. Oba softwary běží na systému Windows. [34] [17]



Obr. 2.38 Uživatelské prostředí Mach 4. [35]

Linux CNC

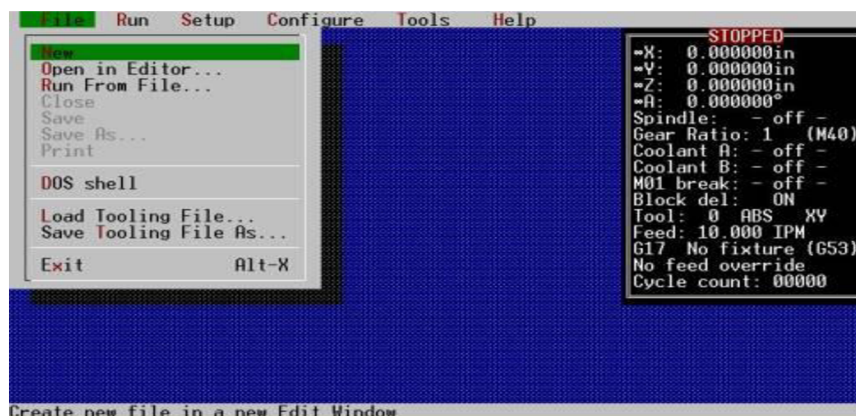
Linux CNC je další populární program. Je oblíben, protože je to opensource program (počítačový software s otevřeným zdrojovým kódem) a je nabízen zdarma. Má širokou základnu aktivních uživatelů. Běží na systému Linux. Je jednoduchý na instalaci a podporuje řadu CNC strojů. [34] [17]



Obr. 2.39 Uživatelské prostředí Linux CNC [36].

Turbo CNC

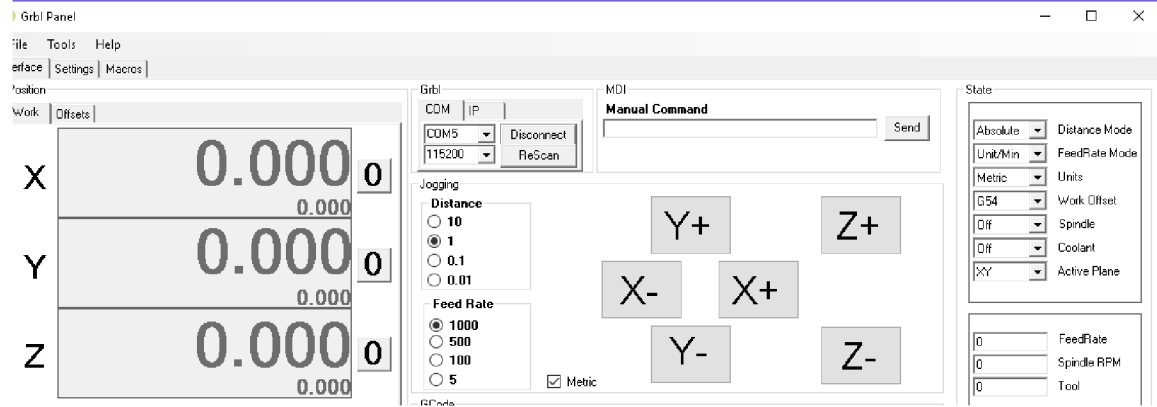
Turbo CNC je interpretér g-kódu. Po načtení g-kódu a jejich spuštění dojde k fyzickému pohybu stroje. Funguje v prostředí MS DOS (Microsoft Disk Operating System – je operační systém firmy Microsoft). Má vložený editor g-kódu a podporuje až osm os. Lze plně nastavit krok a směr. Podporuje parametrické programování. Poplatek za stažení je 60 USD. [34] [17]



Obr. 2.40 Uživatelské prostředí Turbo CNC. [37]

GRBL

Firmware (označení pro software, který slouží pro řízení nějakého vestavěného systému) GRBL se používá pro řízení CNC strojů ve spojení s řídicí elektronikou. Nejčastěji se používají desky Arduino UNO a další založené na tomto procesoru. Firmware je dostupný jak ve zdrojovém kódu nebo jako předkompilovaná verze. Firmware lze zdarma stáhnout na internetových stránkách GitHub. Zde lze vybrat požadovanou verzi. Konfigurace a ovládání je intuitivní. GRBL umožňuje jenom pohyb ve třech osách souřadnicového systému X, Y, Z a neumožňuje práci s rotačními osami. Množina zpracovávaných g-kódů je záměrně omezena jen na základní příkazy. Rozšířené příkazy, u kterých se nedá předpokládat, že je lze použít pro jednoduché řízení CNC jsou vypuštěny. S programem je možno komunikovat USB portem a nevyžaduje od nadřazeného počítače žádné zvláštní vlastnosti ani výkon. Arduino nemusí ovládat jen PC ale lze použít i mikrokontrolery. Většinu parametrů programu je možno nastavovat i za běhu stroje, konfigurační soubor je uložen v paměti a je přenositelný mezi různými verzemi. [34] [17]



Obr. 2.41 Uživatelské prostředí Turbo GRBL. [38]

2.2.6 Krytování stroje a bezpečnost

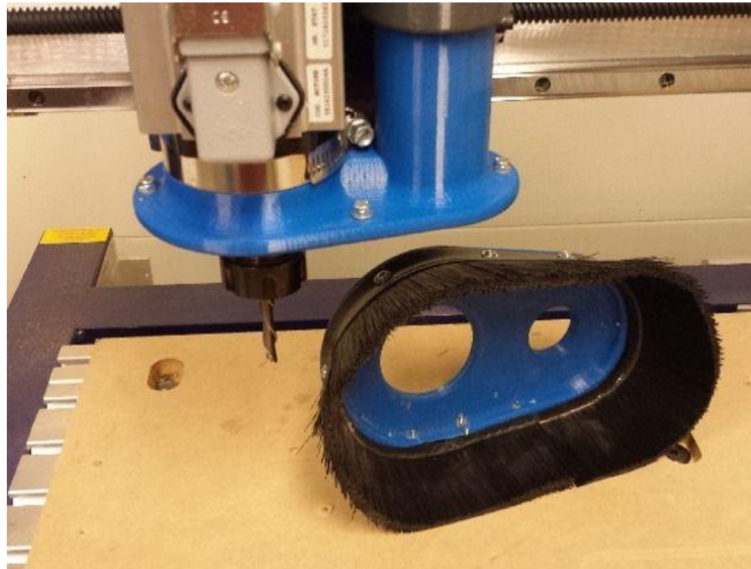
Při frézování dřeva na frézce se vytváří třísky, vířící prach a hluk před kterým je potřeba chránit obsluhu, okolí stroje a stroj samotný. Pokud by stroj nebyl chráněn před působením třísek a prachu mohlo by to na stroj působit destruktivně a výrazně by se tím snížila jeho životnost. Prach, který vzniká při obrábění dřeva, se může například usadit na vodičích plochách lineárních posuvových soustav a následně tím snížit jejich hladký posuv. Může se také dostat do kuličkových vodičích ložisek, kde může dojít k jejich zadrhávání. Prach je nepříjemný i pro obsluhu a není žádoucí v dílně. Obsluhu stroje je také nutno ochránit před střetem s pohyblivými se částmi stroje. Případný střet by mohl způsobit zranění obsluhované osoby. Stroje proto musí být konstrukčně řešeny tak, aby splnily náročné provozní požadavky, normy a nařízení. [2]

Ochranné kryty lze rozlišit na vnitřní a vnější. Vnitřní oddělují pohybové mechanismy od pracovního prostoru. Vnější tvoří rozhraní mezi vnějším okolím a pracovním prostorem, to znamená že chrání obsluhu a životní prostředí. Vnitřní ochranné kryty se skládají z ochranných panelů, teleskopických krytů a stěn, skluzů a dalších. Použití těchto krytů závisí především na tom, jakou část konstrukce je třeba chránit. U malé CNC frézky určené k obrábění dřeva je vhodná ochrana lineárního vedení. Pokud je lineární vedení vystavené silnému znečištění a těsnění vozíku nemusí stačit, doporučuje se ochránit lineární vedení harmonikovým krytem. Někdy se tento kryt označuje jako měchový nebo vlnovec. Na obrázku č.1 je zobrazen krycí měch pro vedení HIWIN. Krycí měchy jsou i v kruhovém provedení. Slouží pro ochranu kuličkových šroubů, trapézových šroubů nebo vodičích tyčí. Kruhové měchy jsou vyrobeny z tkaniny potažené vrstvou ochranného materiálu. V případě nutnosti jsou vybaveny omezovači rozsahu, vyztužením nebo vodičimi kluzáky. Mezi vnější ochranné kryty stroje lze zařadit opláštění. Jedná se o nepohyblivou část, jejímž účelem je ochrana obsluhy proti hluku, prachu, odlétajícím součástkám. Opláštění má také estetický vliv. Opláštění může být buď částečně otevřené (open top) nebo uzavřené. Částečné je oproti uzavřenému levnější. Uzavřené však nabízí kvalitnější odhlučnění a zamezí jakýkoliv nežádoucí styk obsluhy s nástrojem. [2]



Obr. 2.43 Příklad opláštění.

Dalším vnitřním prvkem, který zlepší bezpečnost a ochranu před prachem je odsavač pilin a prachu. Hromadění prachu v dílně může zvýšit riziko požáru, nebo uklouznutí nemluvě o zdravotních rizicích spojených s častým vdechováním prachu. Tento odsavač vysává nečistoty přímo od nástroje a zvyšuje tím komfort obsluhy i zanesení stroje. Příklad provedení odsavače pilin je na obrázku 2.44



Obr. 2.44 Odsavač pilin.

Každé strojní zařízení by mělo být vybavené tlačítkem nouzového zastavení. S jeho pomocí je v jakémkoliv případě možné zastavit provoz zařízení, které obsahuje pohyblivé části. Nouzové zastavení znamená, že v případě nouze je nutno nejen zastavit všechny nebezpečné pohyby, ale i bezpečně vyřadit všechny zdroje energie, které mohou být zdrojem nebezpečí. Základní norma pro bezpečnost strojních zařízení říká, že každý stroj musí být vybaven nejméně jedním tlačítkem nouzového zastavení se stop funkcí (funkce zastavení) kategorie 0 (tj. okamžité vypnutí odpojením napájení do pohonů stroje). Stop funkce kategorie 1 (řízené vypnutí, kdy k vypnutí energie dojde teprve po dosažení klidového stavu stroje) nebo kategorie 2 (řízené vypnutí, kdy dodávka napájení do pohonů stroje je zachována) musí být zajištěny pouze v případě potřeby, vyžadují-li to technickobezpečnostní anebo funkční požadavky stroje. Nouzové zastavení pak podléhá následujícím pravidlům: tlačítko musí být snadno přístupné, stisknutím tlačítka musí ukončit nebezpečný stav co nejrychleji, aniž by vznikla dodatečná rizika. Povel nouzové zastavení musí mít přednost před všemi ostatními funkcemi a povely ve všech provozních režimech. Reset nouzového zastavení nesmí mít za následek opětovné spuštění stroje, musí být použit princip přímého stisknutí s mechanickou blokovací funkcí. Provedení tlačítka je přesně specifikované normou. Ta specifikuje konstrukční zásady a funkční požadavky pro funkci nouzové zastavení u strojních zařízení. Norma platí pro všechna zařízení, kromě strojů, u kterých by opatření nouzového zastavení nesnižovalo riziko a také u ručních strojů a ručně vedených strojů. Nabídka kompletních certifikovaných bezpečnostních e-stop tlačítek je velmi rozsáhlá a ceny, jak pro vestavbu do panelu, tak i v provedení s krabičkou jsou velmi příznivé. Pohybují se v řádech stokorun. Tlačítko nouzového zastavení představuje absolutní základ alespoň pro základní bezpečnost strojů. Sice samo o sobě nijak uživatele a obsluhu zařízení nechrání, ale umožňuje včasnou aktivaci významně snížit následky nebezpečné situace. V jeho případě je tak hlavním parametrem jednotný a všeobecně známý

vzhled a spolehlivost funkce. Výrobci nouzových tlačítek je poměrně velké množství. I když na první pohled vypadají velmi podobně, je při osobním kontaktu s nimi dost často významný rozdíl v kvalitě provedení. [39]



Obr. 2.45 Tlačítko nouzového zastavení. [39]

3 NÁVRH STROJE (PRAKTICKÁ ČÁST)

Specifikace technických parametrů:

Stroje bude určený k obrábění těchto materiálů:

- MDF (dřevovláknitá deska)
- OSB (dřevo-štěpkové desky)
- DTD (dřevotřísková deska bez povrchové úpravy)
- LTD (laminované dřevotřískové desky)
- PDP (kompozitní desky vyrobené ze tří nebo více vrstev loupaných nebo krájených dýh)
- měkké dřevo
- tvrdé dřevo

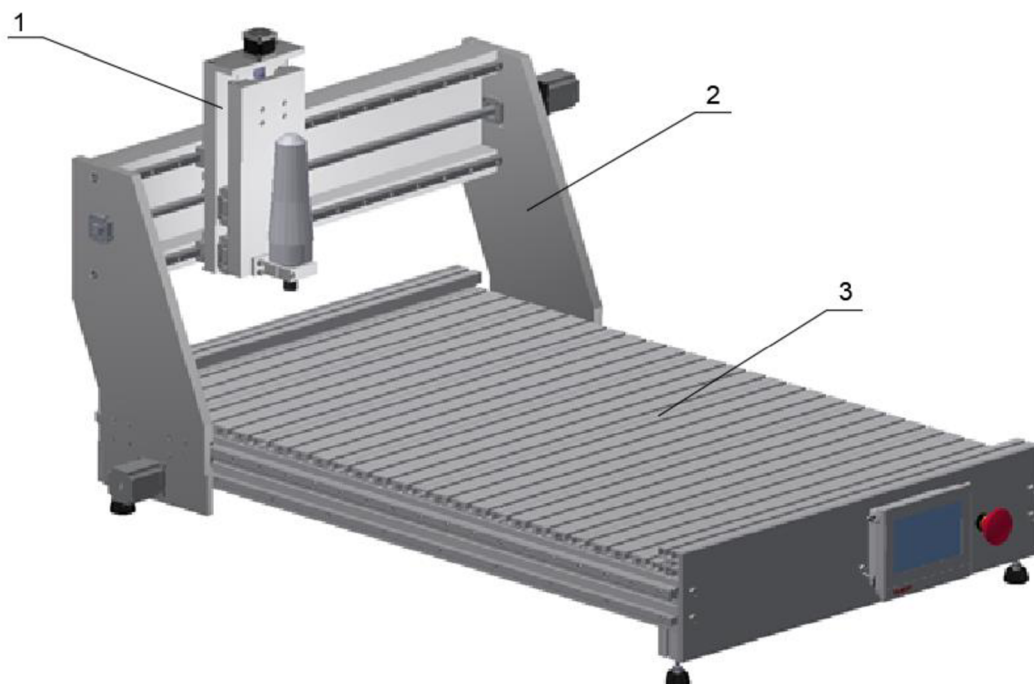
Základní operace prováděné tímto strojem:

- frézování 2D a 3D kontur
- drážkování
- srovnávání
- gravírování

Velikost pracovního prostoru je určena tak, aby bylo možné upnout na pracovní desku normalizovaný polotovar o rozměrech 600 x 1200 mm. Zdvih osy je předběžně stanoven tak, aby byl minimálně 150 mm.

Maximální rychlost posuvu je určena na cca 30 až 50 mm.s⁻¹. Řezná rychlost by měla dosahovat 300 až 500 m.min⁻¹ v závislosti na otáčkách vřetene a materiálu obráběného polotovaru. Vřeteno by mělo mít rozsah otáček od 600 do 20 000 ot.min⁻¹.

Při konstrukci celého stroje bylo přistupováno tak, že bylo zařízení rozděleno na jednotlivé dílčí celky, kterými jsou: Držák vřetene (osa Z), portál (osa Y), upínací deska (osa X)

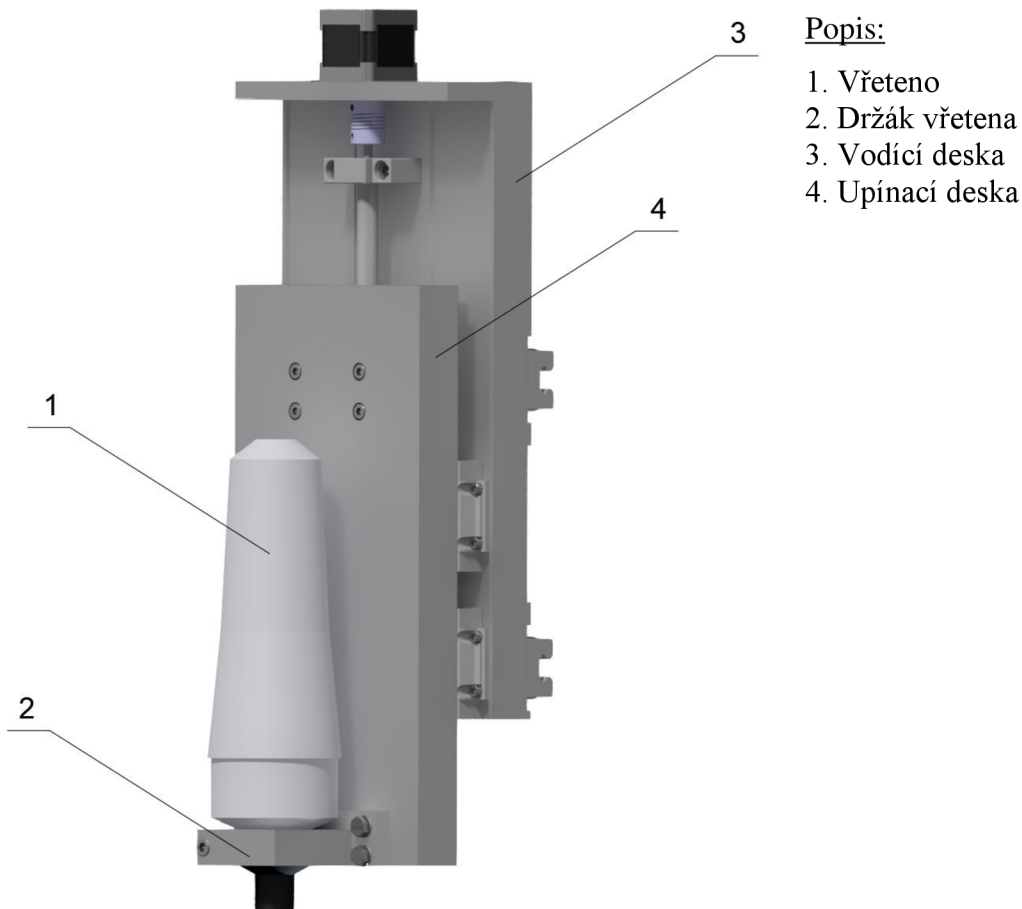


Popis:

1. Držák vřetena (osa Z)
2. Portál (osa Y)
3. Upínací deska (osa X)

Obr. 3.1 Konstrukce stroje s popiskem jednotlivých dílčích celků.

3.1 Osa Z (držák frézky)



Obr. 2.2 Pohled na 3D model konstrukčního celku osy Z.

3.1.1 Výpočet základních parametrů frézování

Nejprve byl zvolen maximální nástroj, který lze do stroje upnout. Tímto nástrojem je drážkovací fréza o průměru 8 mm. Výrobce udává, že maximální hloubka záběru pro frézování drážek do měkkých kovů je 0,25násobek průměru nástroje a pro dřevo a plast je to 1,5násobek. Pro výpočet je tedy uvažovaná hloubka záběru 16 mm. Výpočtem byla zjištěna řezná síla, minimální výkon a krouticí moment. Při výpočtu bylo čerpáno z poznatků z literatury [40] [7] [41].

Tab. 3.1 Vstupní parametry pro výpočet základních parametrů frézování

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Řezný průměr frézky	D	8	mm
Otáčky vřetena	n	18 000	min ⁻¹
Počet zubů nástroje	z	2	
Posuv na zub	f _Z	0,1	mm
Šířka záběru frézy	B	8	mm
Hloubka řezu	E	16	mm

Jednotkový měrný řezný odpor	K_{BOR}	10,5	[-]
Opravný součinitel vlivu dřeviny	K_D	1,55	[-]
Opravný součinitel vlivu řezné rychlosti	K_V	1	[-]
Opravný součinitel vlivu tloušťky třísky	K_h	3,25	[-]
Opravný součinitel vlivu vlhkosti	K_w	1,05	[-]
Opravný součinitel vlivu otupení	K_p	1,2	[-]

Řezná rychlost se vypočítá podle vzorce:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3.1.1)$$

Pro výpočet měrného řezného odporu materiálu byla využita technologicko-statistická metoda popsána v [41]. Při výpočtu je uvažovaná vlhkost dřeva 20 %. Čas řezání je stanoven na 1 h. Jako materiál je uvažováno smrkové dřevo.

Měrný řezný odpor obráběného materiálu se vypočítá podle vzorce:

$$K_c = K_{BOR} \cdot K_D \cdot K_V \cdot K_h \cdot K_w \cdot K_p \quad (3.1.2)$$

Rychlost posuvu se vypočítá podle vzorce:

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z \cdot 10^{-3} \quad (3.1.3)$$

Řezný odpor se vypočítá podle vzorce:

$$F_c = \frac{K_c \cdot B \cdot E \cdot v_f}{60 \cdot v_c} \quad (3.1.4)$$

Výkon vřetena při frézování se vypočítá podle vzorce:

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (3.1.5)$$

Kroutící moment se vypočítá podle vzorce:

$$M_c = F_c \cdot \frac{D}{2 \cdot 10^3} \quad (3.1.6)$$

Tab. 3.2 Výstupní parametry pro výpočet základních parametrů frézování

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	7,536	[m·s ⁻¹]
Měrný řezný odpor obráběného materiálu	K_c	67	[Mpa]
Rychlost posuvu	v_f	3,6	[m·min ⁻¹]
Řezný odpor	F_c	67,9	[N]
Výkon vřetena při frézování	P_c	511,8	[W]
Kroutící moment	M_c	0,27	[N·m]

Výpočtem byla zjištěna řezná síla při frézování 67,9 N. Výkon vřetena při frézování odpovídá hodnotě 511,8 W. Tím bylo ověřeno, že použité vřeteno Stepcraft MM-1000 o výkonu 1000 W je dostačující.

3.1.2 Výběr vřetena

Výkonnostně byly uvažovány vřetena od 700 w do 1 500 W. Ideální vřeteno by mělo mít co nejvyšší výkon, malou hmotnost a přijatelnou cenu. Pro určení nejvhodnější varianty vřetena byly vybrány pro konstrukci nedůležitější parametry. Podle vzorce (3.1.7) byly stanoveny poměry parametrů a produkty byly seřazeny do tabulky (3.3) od nejlepšího po nejhorší.

$$poměr = \frac{cena \cdot hmotnost}{výkon} \quad (3.1.7)$$

Tab. 3.3 Porovnání vřeten

Název	Výkon (W)	Hmotnost (kg)	Cena Kč	Poměr
Stepcraft MM-1000	1 000	1,6	6 480	10,4
Makita RT 0700C	710	1,8	4 190	10,8
Pajtech 46510	1 500	2,6	7 150	12,4
Kress AMB FME 1051-1	1 050	1,7	8 145	13,2
Teknomotor SB	730	3,6	8 250	40,7

Nejlepší poměr parametrů vykazuje frézka Stepcraft MM-1000 (obr.3.3). Tato frézovací jednotka umožňuje upnutí nástroje systémem převlečné matice a kleštiny. Aretace vřetene během výměny je prováděna mechanicky stisknutím tlačítka na těle jednotky. Na těle jednotky je též umístěn otočný ovladač pro plynulou regulaci otáček, doplněný kabelem umožňujícím jejich softwarové řízení. Kompletní technická specifikace je popsána v tabulce (3.4). [9]



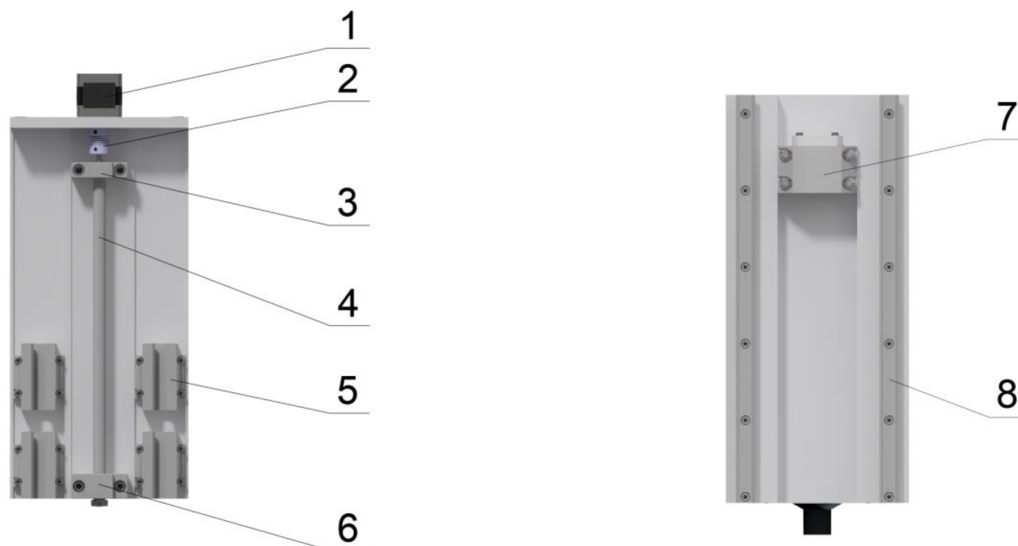
Obr. 3.3 Frézovací jednotka Stepcraft MM-1000 [9]

Tab. 3.4 Parametry frézovací jednotky Stepcraft MM-1000. [9]

Vstupní napětí	230 V
Výkon	1 000 W
Plynule regulovatelné otáčky	4.000 - 25.000 min ⁻¹
Koncentricita-házivost (kužel)	<0,01 mm
Koncentricita-házivost 25 mm od kužele (koncová fréza)	<0,05 mm
Upínací kleština	OZ 1,0 - 8,0 mm
Maximální velikost řezné kružnice frézy	36 mm
Vnější upínací průměr	43 mm
Hlučnost	71 dB
Rozměry	74 x 275 x 79 mm
Hmotnost	1,65 kg

3.1.3 Návrh kuličkového šroubu

V ose Z byl použitý válcovaný kuličkový šroub o velikosti závitu 12 mm a stoupání 5 mm spolu s jednoduchou přírubovou maticí R12-05K4-FSCDIN. Válcované kuličkové šrouby mají tu výhodu, že s nimi realizované pohybové systémy mají oproti běžným pohybovým šroubům nízké tření a klidný chod. Při návrhu kuličkového šroubu je třeba vzít do úvahy následující parametry. Požadavky na přesnost polohování, ze kterých se odvíjí, zda se použije šroub se závitem válcovaným, okružovaným nebo broušeným. Vůle nebo předepnutí matice, přičemž jednoduché matice jsou dodávány s vůlí max. 0,05 mm, nebo s vymezenou vůlí. Dvojitě matice jsou dodávány předepnuté, což umožňuje provoz bez vůle i při zatížení soustavy. Je třeba zkontrolovat, zda jmenovitý průměr šroubu vynásobený požadovanými maximálními otáčkami (tzv. Dn faktor) nepřesahuje danou maximální hodnotu. Dále je nutno zkontrolovat pracovní zatížení, které má vliv na životnost kuličkového šroubu a kritické otáčky šroubu, které závisí na délce hřídele a jeho uložení. [42]



Popis:

- 1 Krokový motor Nema 17
- 2 Hřídelová spojka
- 3 Ložiskový domeček EK – 08
- 4 Kuličkový šroub

- 5 Vozík lineárního vedení
- 6 Ložiskový domeček EF – 08
- 7 Jednoduchá přírubová matice
- 8 Kolejnice lineárního vedení

Obr. 3.4 Popis osy Z.

Tab. 3.5 Tabulka vstupních parametrů pro výpočet kuličkového šroubu [42]

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Koeficient uložení	k_d	1,88	[-]
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	d_k	9,9	[mm]
Vzdálenost mezi ložisky	l_d	275	[mm]
Maximální rychlost při polohování	v_{max}	5	[m · min ⁻¹]
Stoupání závitu kuličkového šroubu	P	5	[mm]
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	d_ξ	12	[mm]
Koeficient závislosti na uložení	k_k	2,05	[-]
Nepodepřená délka šroubu	l_k	188	[mm]
Dynamická únosnost	C_{dyn}	5 500	[N]
Řezná síla při frézování	F_m	67,9	[N]
Střední otáčky kuličkového šroubu	n_ξ	500	[min ⁻¹]

Kuličkové šrouby nesmějí pracovat v oblastech kritických otáček. Kritické otáčky závisí na délce a průměru hřídele a uložení konců. Maximální pracovní otáčky n_{max} by neměly přesáhnout 80 % kritických otáček n_k .

Kritické otáčky byly vypočteny podle vztahu [katalog hiwin kuličkové šrouby]:

$$n_k = k_d \cdot \frac{d_k}{l_{dz}^2} \cdot 10^8 \quad (3.1.8)$$

Maximální přípustné otáčky byly vypočteny podle vztahu []:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k \quad (3.1.9)$$

Pro výpočet otáčkového faktoru je potřeba určit velikost maximálních otáček kuličkového šroubu, kterých šroub dosáhne při rychloposuvu.

Výpočet maximálních otáček při rychloposuvu se vypočítá podle vztahu:

$$n_f = \frac{v_{max}}{P \cdot 10^{-3}} \quad (3.1.10)$$

Otáčkový faktor (tzv. D_n faktor) je násobek jmenovitého průměru kuličkového šroubu a požadovaných maximálních otáček, jehož výsledek nesmí přesáhnout hodnotu, která je pro válcovaný šroub rovna hodnotě 70 000. Kontrola otáčkového faktoru byla provedena podle vztahu:

$$D_n = d_\xi \cdot n_f \quad (3.1.11)$$

Kuličkový šroub může být zatěžován axiální silou pouze do té míry, aby nedošlo k jeho deformaci. Přípustné axiální zatížení závisí na délce, průměru a uložení kuličkového šroubu. Maximální axiální zatížení šroubu F_{kmax} v pracovních podmínkách může být nejvýše 50 % přípustného teoretického zatížení F_k .

Výpočet maximální teoretické dovolené axiální síly byl vypočten podle vztahu:

$$F_k = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_k^2} \cdot 10^5 \quad (3.1.12)$$

Výpočet maximální dovolené axiální síly byl vypočten podle vztahu:

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k \quad (3.1.13)$$

Dynamická únosnost C_{dyn} udává takové axiální zatížení matice, při jehož neměnném působení dosáhne převod 1x10⁶ otáček bez známek opotřebení jak kuličkových drah, tak kuliček.

Výpočet životnosti kuličkového šroubu v otáčkách byl vypočten podle vztahu:

$$L_{ot} = \left(\frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot 10^6 \quad (3.1.14)$$

Výpočet životnosti kuličkového šroubu v hodinách byl vypočten podle vztahu:

$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{\xi} \cdot 60} \quad (3.1.15)$$

Tab. 3.6 Výstupní parametry

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Kritické otáčky	n_k	24 610	[min ⁻¹].
Maximální přípustné otáčky	n_{max}	19 688	[min ⁻¹].
Maximální otáčky při rychloposuvu	n_f	1 000	[min ⁻¹].
Otáčkový faktor	D_n	12 000	[mm]
Maximální teoretická dovolená axiální síla	F_k	55 715	[N]
Maximální dovolená axiální síla	F_{kmax}	27 857	[N]
Životnosti kuličkového šroubu v otáčkách	L_{ot}	5,3 x 10 ¹¹	[otáček]
Životnost kuličkového šroubu v hodinách	L_h	1,7 x 10 ⁷	[h]

Na základě literatury [42] je maximální dovolený otáčkový faktor u válcovaného kuličkového šroubu s vymezenou vůlí stanoven na $D_{nmax} = 70\,000$. Při porovnání maximálního dovoleného otáčkového faktoru s otáčkovým faktorem daného kuličkového šroubu lze zjistit, že zvolený kuličkový šroub vyhovuje. Při konstrukci byly voleny nejmenší možné komponenty, a i tak jsou díly předimenzované. Výpočtem bylo tedy ověřeno že díly snesou i větší zatížení, než se kterým budou běžně pracovat.



Obr. 3.5 Kuličkový šroub s přírbovou maticí.

3.1.4 Návrh pohonu

Krokový motor je jednoduchý dvoufázový bezkartáčový synchronní motor skládající se ze segmentovaného zmagnetovaného rotoru a statoru s předepsaným počtem elektromagnetických cívek. Když jsou cívky pod napětím, vytvářejí severní a jižní póly, které tlačí nebo táhnou segmentovaný zmagnetovaný rotor tak, aby se roztočil. Krokové motory se vybírají podle jejich přídržného krouticího momentu a odpovídajícího jmenovitého proudu. Přídržný moment určuje maximální externí krouticí moment aplikovaný na motor (napájený jmenovitým proudem) ve statické poloze bez otáčení. V okamžiku, kdy se motor začne otáčet, se dostupný točivý moment často označuje jako moment zvratu (Pull-out torque), který udává mezní hodnotu momentu při stabilním a konstantním chodu motoru bez ztráty kroku. [43]

Tab. 3.7 Vstupní hodnoty pro výpočet pohonu

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Účinnost valivého vedení	η_v	0,98	[-]
Účinnost kuličkového šroubu a matice	η_s	0,92	[-]
Účinnost oboustranného uložení kuličkového ložiska	η_L	0,97	[-]
Řezná síla při frézování	F_{ef}	67,9	[N]
Stoupání kuličkového šroubu	P	0,005	[m]
Hmotnost osy Z	m_z	5,5	[kg]
Úhel sklonu vedení	α_z	90	[°]
Maximální rychlost posuvu	v_{maxz}	5	[m.min]
Čas rozběhu	t	0,2	[s]
Moment setrvačnosti motoru	J_{mot}	$4,5 \cdot 10^{-5}$	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy Z	J_{KSZ}	1,5	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti hřídelové spojky	J_s	$8 \cdot 10^{-6}$	[kg.m ²]

Vzhledem malému prostoru v ose Z byl zvolen krokový motor s přírubou Nema 17 konkrétně model 42CM04 od společnosti Leadshine Technology Co., Ltd. Parametry motoru jsou uvedeny v tabulce. Prodejce uvádí i momentovou charakteristiku, která je zobrazena na obr. 3.6

Tab. Parametry motoru 42CM04 [44].

Proud	1,5 A
Krok motoru	1,8°
Moment	0,4
Hmotnost	0,3 kg

Ověření daného pohonu je proveden ze statického, kinematického a dynamického hlediska. V rámci statického hlediska se zjišťuje moment motoru, který je potřebný pro překonání gravitační složky, pasivních odporů a axiální síly. Při výpočtu kinematického hlediska se zjišťuje lineárního zrychlení osy Z a úhlového zrychlení motoru. Na základě dynamického hlediska se vypočítá potřebný moment motoru. Do výpočtu je zahrnut moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru vynásobený uhlovým zrychlením a přičtená hodnota momentu zátěže redukovaná na hřídel motoru.

Statické hledisko

Celková účinnost byla vypočtena podle vztahu:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L \quad (3.1.16)$$

Výpočet momentu daného motoru ze statického hlediska, který je potřebný pro překonání gravitační složky, pasivních odporů a axiální síly byl vypočítán podle vztahu:

$$M_{mot} = \frac{F_{ef} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} + \frac{m_z \cdot g \cdot \sin(\alpha_z) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \quad (3.1.17)$$

Kinematické hledisko

Lineární zrychlení bylo vypočítáno podle vztahu:

$$a_z = \frac{\frac{v_{maxz}}{60}}{t} \quad (3.1.18)$$

Úhlové zrychlení motoru bylo vypočítáno podle vztahu:

$$\varepsilon_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_z}{P} \quad (3.1.19)$$

Dynamické hledisko

Kuličkový šroub pracuje s určitým předpětím, které bylo zjištěno podle vztahu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_z \cdot g \quad (3.1.20)$$

Ztrátový moment třecích sil přesouvaných ploch byl vypočítán podle vztahu:

$$M_G = \frac{m_z \cdot g \cdot \sin(\alpha_z) \cdot P}{2 \cdot \pi} \quad (3.1.21)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu byl vypočítán podle vztahu:

$$M_{KSM} = \frac{F_p \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \cdot (1 - \eta_s^2) \quad (3.1.22)$$

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru byl vypočítán podle vztahu:

$$M_{red} = M_G + M_{KSM} \quad (3.1.23)$$

Moment setrvačnosti posuvových hmot redukováný na oso šroubu byl vypočítán podle vztahu:

$$J_m = m_z \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot \pi}\right)^2 \quad (3.1.24)$$

Výpočet celkového momentu setrvačnosti redukováného na hřídel motoru:

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_{KSZ} + J_m + J_s \quad (3.1.25)$$

Výpočet potřebné velikosti momentu motoru:

$$M_{mz} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_s + M_{red} \quad (3.1.26)$$

Kvalita dynamického poměru byla vypočítána podle vztahu:

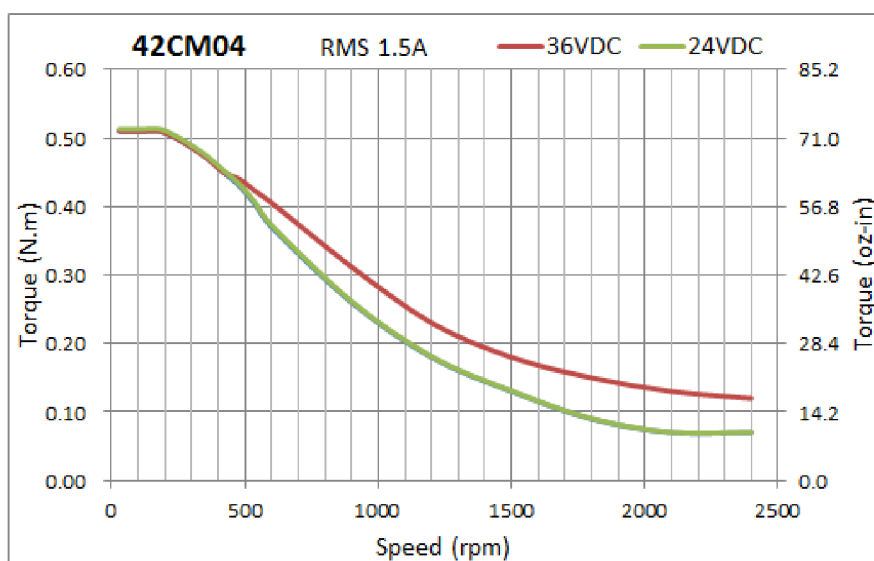
$$P_{d0} = \frac{J_{rhm}}{J_{mot}} \quad (3.1.27)$$

Dynamický poměr by měl nabývat hodnot od 1,5 do 3. Čím je hodnota poměru blíže k 1,5 tím je lepší dynamický poměr.

Tab. 3.8 Výstupní parametry výpočtu pohonu v ose Z

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Celková účinnost	η_c	0,87	[-]
Statický moment	M_{mot}	0,112	[N.m]
Lineární zrychlení	a_z	0,41	[m.s ⁻²]
Úhlové zrychlení motoru	ε_s	514	[rad.s ⁻²]
Předpětí kuličkového šroubu	F_p	18,84	[N]
Ztrátový moment třecích sil přesouvaných ploch	M_G	0,043	[N.m]
Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu	M_{KSM}	0,003	[N.m]
Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru	M_{red}	0,046	[N.m]
Moment setrvačnosti posuvových hmot redukováný na oso šroubu	J_m	$3,49 \cdot 10^{-6}$	[kg.m ²]
celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru	J_{rhm}	$7,1 \cdot 10^{-5}$	[kg.m ²]
Minimální moment motoru	M_{mz}	0,082	[N.m]
Kvalita dynamického poměru	P_{d0}	1,57	[-]

Kvalita dynamického poměru vyšla 1,57 což odpovídá požadovanému intervalu. Velikosti zatěžujících momentů jsou menší než moment zvoleného motoru. Tím lze konstatovat, že navrhovaný motor vyhovuje. Momentová charakteristika je zobrazena na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Momentová charakteristika motoru 42CM04

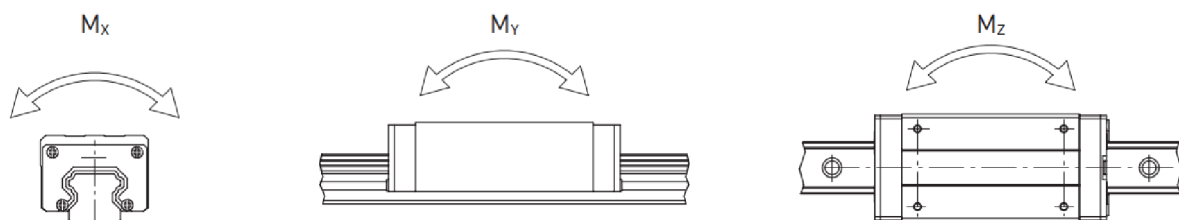
3.1.5 Návrh lineárního vedení

Lineární vedení se skládá z profilové kolejnice a vozíku, který je opatřen zpravidla čtyřmi řadami kuliček, případně válečků, které zajišťují dokonale hladký a přesný přímočarý pohyb. Účinnost kuličkového či válečkového vedení se pohybuje okolo 90 %, což oproti 40 až 50 % účinnosti u kluzných systémů lineárního vedení je znatelný rozdíl. Lineární vedení se používá tam, kde je potřeba vymezený přesný pohyb v jedné přímočaré ose. Kuličkové lineární vedení typu HG se čtyřmi oběžnými řadami kuliček je určeno pro aplikace s vysokými požadavky na tuhost a únosnost. To je umožněno optimalizací oběžných kuličkových drah a vratného systému. Dalšími znaky lineárního vedení typu HG jsou nízké posuvové síly a vysoká účinnost. Pro osu Z byl použitý vozík typu HGW 15C pro montáž shora i zespodu a kolejnice typu HGR15R.

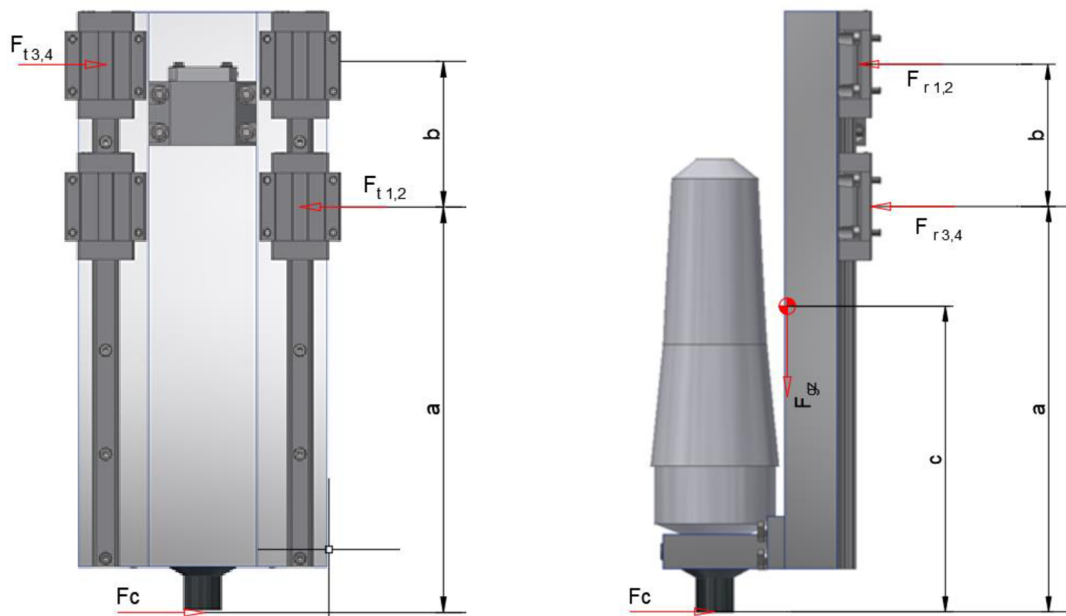
Tab. 3.9 Vstupní hodnoty a parametry pro výpočet lineárního vedení

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Dynamická únosnost	C_{dyn}	11 380	[N]
Statická únosnost	C_o	16 970	[N]
Dynamický moment	v ose X	M_x	76 [Nm]
	v ose Y	M_y	67 [Nm]
	v ose Z	M_z	67 [Nm]
Statický moment	v ose X	M_{ox}	120 [Nm]
	v ose Y	M_{oy}	100 [Nm]
	v ose Z	M_{oz}	100 [Nm]
Řezná síla	F_c	67,9	[N]
Faktor tvrdosti	f_h	1	[-]
Teplotní faktor	f_t	1	[-]
Zátěžový faktor	f_w	1,2	[-]
Maximální rychlost v ose Z	v_{maxz}	5	[m · min ⁻¹]
	a	232	[mm]
	b	81	[mm]
	c	169	[mm]
	d	38	[mm]
Hmotnostní zatížení osy Z	F_{gz}	38,4	[N]

Přípustný statický moment je moment odpovídající největšímu možnému zatížení pohyblivých součástí silou odpovídající statické únosnosti ve stanoveném směru. Přípustný statický moment je definován ve třech směrech (M_x , M_y a M_z) pro systémy lineárního posuvu. [42]



Obr. 3.8 Schéma zatěžujících sil lineárního vedení v ose Z.



Obr. 3.7 Schéma zatěžujících sil lineárního vedení v ose Z.

Pokud bude lineární vedení předmětem nepřiměřeného zatěžování nebo nárazů během pohybu nebo stání, bude docházet k místní trvalé deformaci mezi vozíkem a kuličkami. Jakmile tato trvalá deformace překročí určitou míru, bude se vedení hůře pohybovat. V zásadě hodnota statické únosnosti odpovídá statickému zatížení způsobujícímu trvalou deformaci o hodnotě 0,0001 x průměr kuličky v místě kontaktu, který je nejvíce zatěžován. Hodnoty jsou pro každý typ a velikost lineárního vedení uvedeny v tabulkách. Tyto tabulky lze použít pro výběr vhodného lineárního vedení. Maximální statické zatížení, kterému bude lineární vedení vystaveno, nesmí překročit hodnotu statické únosnosti. [42]

Na základě silové a momentové podmínky byly vyšetřeny radiální a tečné reakce v jednotlivých vozících. Při výpočtu zatížení působícího na lineární vedení je nutno vzít v úvahu různé faktory, jako je těžiště zatížení, bod působení pohybové síly a setrvačnost hmoty na začátku a na konci pohybu.

$$F_{t1} = F_{t2} = \frac{F_c}{2} + \frac{F_c \cdot a}{2 \cdot b} \quad (3.1.28)$$

$$F_{t3} = F_{t4} = \frac{F_c \cdot a}{2 \cdot b} \quad (3.1.29)$$

$$F_{r1} = F_{r2} = \frac{-F_g \cdot d - F_c \cdot a}{2 \cdot b} \quad (3.1.30)$$

$$F_{r3} = F_{r4} = \frac{F_c}{2} + \frac{F_g \cdot d + F_c \cdot a}{2 \cdot b} \quad (3.1.31)$$

Ekvivalentní statické zatížení bylo vypočítáno podle vztahu:

$$P_e = F_{T1} + F_{R2} \quad (3.1.32)$$

Pro vodící systémy v klidu nebo při pomalém pohybu je nutno brát v úvahu statickou konstrukční bezpečnost, která závisí na prostředí a provozních podmínkách. Dle výrobce je minimální hodnota statické konstrukční bezpečnosti 1,25 pro normální zatížení a 3 pro zatížení s rázy a vibracemi. Statická konstrukční bezpečnost byla vypočítána podle vzorce:

$$f_{SL} = \frac{C_0}{P_e} \quad (3.1.33)$$

Životnost lineárního vedení se může značně lišit, i když bude lineární vedení vyrobeno stejným způsobem a používáno za stejných podmínek. Jmenovitá životnost je proto uvažována za hrubý odhad skutečné životnosti lineárního vedení. Jmenovitá životnost odpovídá celkové vzdálenosti, kterou ujedou vozíky 90 % totožných lineárních vedení za stejných podmínek bez porušení. Jmenovitou životnost lineárního vedení ovlivňuje jeho skutečné zatížení a externí vlivy na životnost kolejnice, které nejsou přímo zahrnuty ve výpočtu (jako jsou vibrace, rázy a vysoké rychlosti).

Výpočet jmenovité životnosti bylo proveden podle vzorce:

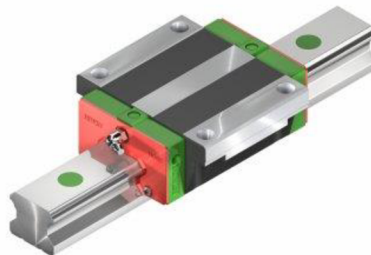
$$L = \left(\frac{f_h \cdot f_t \cdot C_{dyn}}{f_w \cdot P_e} \right)^3 \cdot 5 \cdot 10^4 \quad (3.1.34)$$

Výpočet životnosti v hodinách byl proveden podle vzorce:

$$L_h = \frac{L}{v_{maxz} \cdot 60} \quad (3.1.35)$$

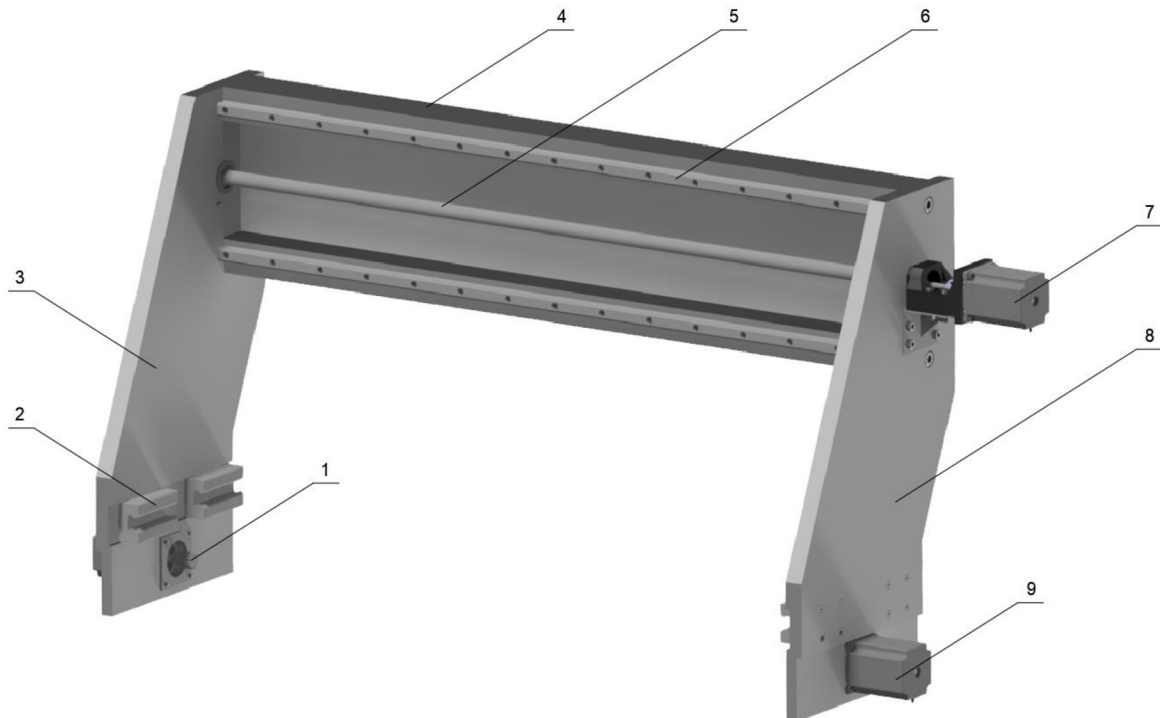
Tab. 3.10 Výstupní hodnoty návrhu lineárního vedení.

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Tečné zatížení	$F_{t1} = F_{t2}$	131	[N]
	$F_{t3} = F_{t4}$	97	[N]
Radiální zatížení	$F_{r1} = F_{r2}$	106	[N]
	$F_{r3} = F_{r4}$	140	[N]
Ekvivalentní statické zatížení	P_e	271	[N]
Statická konstrukční bezpečnost	f_{SL}	62,8	[-]
Jmenovitá životnost	L	$2,1 \times 10^9$	[ot]
Životnost v hodinách	L_h	$7,1 \times 10^6$	[h]



Obr. 3.9 Lineární vedení v ose Z.

3.2 Osa Y (portál)



Popis:

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 1. Pastorek ozubeného hřebenu | 6. Kolejnice lineárního vedení |
| 2. Vozík lineárního vedení | 7. Motor pro posuv v ose Y |
| 3. Bočnice | 8. Bočnice |
| 4. Příčník | 9. Motor pro posuv v ose X |
| 5. Kuličkový šroub | |

Obr. 3.10 Popis osy Y.

3.2.1 Kuličkový šroub

Tab. 3.11 Vstupní parametry pro výpočet kuličkového šroubu

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Koeficient uložení	k_d	1,88	[-]
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	d_k	15,5	[mm]
Vzdálenost mezi ložisky	l_d	865	[mm]
Maximální rychlost při polohování	v_{max}	5	[m · min ⁻¹]
Stoupání závitu kuličkového šroubu	P	5	[mm]
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	d_s	16	[mm]
Koeficient závislosti na uložení	k_k	2,05	[-]
Nepodepřená délka šroubu	l_k	885	[mm]
Dynamická únosnost	C_{dyn}	7 320	[N]

Řezná síla při frézování	F_m	67,9	[N]
Střední otáčky kuličkového šroubu	n_{ξ}	500	[min ⁻¹]

Vzorce

Kritické otáčky byly vypočteny podle vztahu [katalog hiwin kuličkové šrouby]:

$$n_k = k_d \cdot \frac{d_k}{l_{dz}^2} \cdot 10^8 \quad (3.2.1)$$

Maximální přípustné otáčky byly vypočteny podle vztahu []:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k \quad (3.2.2)$$

Velikost maximálních otáček při rychloposuvu se vypočítá podle vztahu:

$$n_f = \frac{v_{max}}{p \cdot 10^{-3}} \quad (3.2.3)$$

Otáčkový faktor byl vypočítán podle vztahu:

$$D_n = d_{\xi} \cdot n_f \quad (3.2.4)$$

Výpočet maximální teoretické dovolené axiální síly byl vypočten podle vztahu:

$$F_k = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_k^2} \cdot 10^5 \quad (3.2.5)$$

Výpočet maximální dovolené axiální síly byl vypočten podle vztahu:

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k \quad (3.2.6)$$

Výpočet dynamické axiální síly na šroub v ose Y

$$F_{Dy} = m_z \cdot a_y \quad (3.2.7)$$

Výpočet životnosti kuličkového šroubu v otáčkách byl vypočten podle vztahu:

$$L_{ot} = \left(\frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot 10^6 \quad (3.2.8)$$

Výpočet životnosti kuličkového šroubu v hodinách byl vypočten podle vztahu:

$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{\xi} \cdot 60} \quad (3.2.9)$$

Tab. 3.12 Výstupní hodnoty

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Kritické otáčky	n_k	3 894	[min ⁻¹].
Maximální přípustné otáčky	n_{max}	3 116	[min ⁻¹].
Maximální otáčky při rychloposuvu	n_f	1 000	[min ⁻¹].
Otáčkový faktor	D_n	16 000	[mm]
Maximální teoretická dovolená axiální síla	F_k	15 107	[N]
Maximální dovolená axiální síla	F_{kmax}	7 553	[N]
Životnosti kuličkového šroubu v otáčkách	L_{ot}	1,2x10 ¹²	[otáček]
Životnost kuličkového šroubu v hodinách	L_h	4,2x10 ⁷	[h]

3.2.2 Pohon

Ověření daného pohonu je proveden ze statického, kinematického a dynamického hlediska.

Tab. 3.13 Vstupní hodnoty pro výpočet pohonu

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Účinnost valivého vedení	η_v	0,98	[-]
Účinnost kuličkového šroubu a matice	η_s	0,92	[-]
Účinnost oboustranného uložení kuličkového ložiska	η_L	0,97	[-]
Řezná síla při frézování	F_{ef}	67,9	[N]
Stoupání kuličkového šroubu	P	0,005	[m]
Hmotnost osy Y	m_y	10,5	[kg]
Úhel sklonu vedení	α_y	0	[°]
Maximální rychlost posuvu	v_{maxy}	5	[m.min]
Čas rozběhu	t	0,2	[s]
Moment setrvačnosti motoru	J_{mot}	$4,7 \cdot 10^{-5}$	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy Y	J_{KSZ}	$2,7 \cdot 10^{-5}$	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti hřídelové spojky	J_s	$8 \cdot 10^{-6}$	[kg.m ²]
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	f_1	0,005	[-]
Součinitel tření v KŠM redukovaný na poloměr šroubu	f_2	0,003	[-]

Statické hledisko

Celková účinnost byla vypočtena podle vztahu:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L \quad (3.2.10)$$

Výpočet momentu daného motoru ze statického hlediska byl vypočítán podle vztahu:

$$M_{mot} = \frac{F_{ef} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} + \frac{m_y \cdot g \cdot \sin(\alpha_z) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \quad (3.2.11)$$

Kinematické hledisko

Lineární zrychlení bylo vypočítáno podle vztahu:

$$a_y = \frac{v_{maxy}}{t} \quad (3.2.12)$$

Úhlové zrychlení motoru bylo vypočítáno podle vztahu:

$$\varepsilon_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_y}{P} \quad (3.2.13)$$

Dynamické hledisko

Kuličkový šroub pracuje s určitým předpětím, které bylo zjištěno podle vztahu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_y \cdot g \quad (3.2.14)$$

Ztrátový moment třecích sil přesouvaných ploch byl vypočítán podle vztahu:

$$M_G = \frac{m_y \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_y) \cdot P}{2 \cdot \pi} \quad (3.2.15)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu byl vypočítán podle vztahu:

$$M_{KSM} = \frac{F_p \cdot P}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - \eta_c^2) + \frac{1}{2} \cdot m_y \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_y) \cdot d_s \cdot f_2 \quad (3.2.16)$$

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru byl vypočítán podle vztahu:

$$M_{red} = M_G + M_{KSM} \quad (3.2.17)$$

Moment setrvačnosti posuvových hmot redukováný na oso šroubu byl vypočítán podle vztahu:

$$J_m = m_y \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot \pi} \right)^2 \quad (3.2.18)$$

Výpočet celkového momentu setrvačnosti redukováného na hřídel motoru:

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_{KSZ} + J_m + J_s \quad (3.2.19)$$

Minimální moment motoru z dynamického hlediska byl vypočítán podle vztahu:

$$M_{mz} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_s + M_{red} \quad (3.2.20)$$

Kvalita dynamického poměru byla vypočítána podle vztahu:

$$P_{d0} = \frac{J_{rhm}}{J_{mot}} \quad (3.2.21)$$

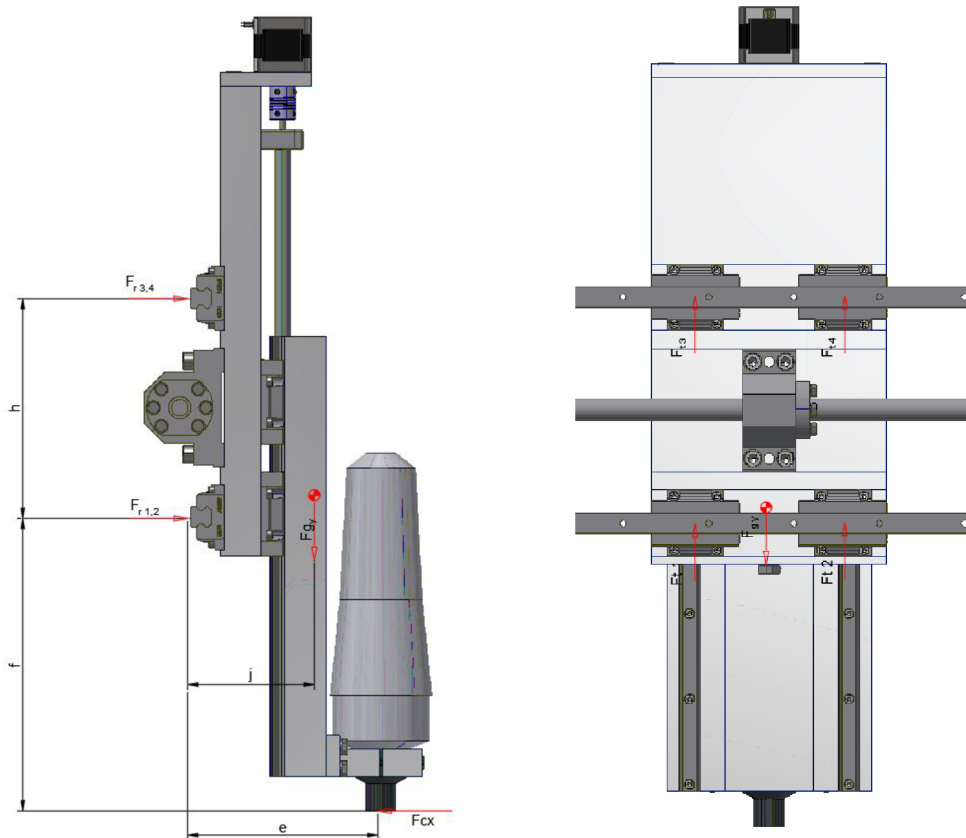
Tab. 3.14 Výstupní hodnoty výpočtu pohonu

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Celková účinnost	η_c	0,87	[-]
Statický moment	M_{mot}	0,062	[N.m]
Lineární zrychlení	a_y	0,41	[m.s ⁻²]
Úhlové zrychlení motoru	ε_s	514	[rad·s ⁻²]
Předpětí kuličkového šroubu	F_p	36,05	[N]
Ztrátový moment třecích sil přesouvaných ploch	M_G	0,0004	[N.m]
Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu	M_{KSM}	0,0069	[N.m]
Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru	M_{red}	0,0073	[N.m]
Moment setrvačnosti posuvových hmot redukováný na oso šroubu	J_m	6,67·10 ⁻⁶	[kg.m ²]
celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru	J_{rhm}	8·10 ⁻⁵	[kg.m ²]
Minimální moment motoru	M_{mz}	0,052	[N.m]
Kvalita dynamického poměru	P_{d0}	1,7	[-]

3.2.3 Lineární vedení

Pro osu Y byl použitý vozík typu HGW 15C pro montáž shora i zesponu a kolejnice typu HGR15R. Stejný typ vozíku byl použitý v ose Z. Parametry těchto komponent jsou uvedeny v předchozí tabulce. Tab. ().

Schéma



Obr. 3.11 Schéma zatěžujících sil lineárního vedení v ose Z.

Tab. 3.15 Vstupní hodnoty pro výpočet lineárního vedení

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Dynamická únosnost	C_{dyn}	11 380	[N]
Statická únosnost	C_o	16 970	[N]
Řezná síla	F_c	67,9	[N]
Faktor tvrdosti	f_h	1	[-]
Teplotní faktor	f_t	1	[-]
Zátěžový faktor	f_w	1,2	[-]
Maximální rychlost v ose Z	v_{maxz}	5	[m · min ⁻¹]
	e	138	[mm]
	f	206	[mm]
	h	159	[mm]
	j	101	[mm]
Hmotnostní zatížení osy Y	F_{g_y}	103	[N]

Na základě silové a momentové podmínky byly vyšetřeny radiální a tečné zatížení jednotlivých vozíků.:

$$F_{t1} = F_{t2} = F_{t3} = F_{t4} = \frac{F_{gy}}{4} \quad (3.2.22)$$

$$F_{r3} = F_{r4} = \frac{-F_c \cdot f - F_{gy} \cdot j}{2 \cdot h} \quad (3.2.23)$$

$$F_{r1} = F_{r2} = F_c - 2 \cdot F_{r3} \quad (3.2.24)$$

Ekvivalentní statické zatížení bylo vypočítáno podle vztahu:

$$P_e = F_{T1} + F_{R2} \quad (3.2.25)$$

Statická konstrukční bezpečnost byla vypočítána podle vzorce:

$$f_{SL} = \frac{C_0}{P_e} \quad (3.2.26)$$

Výpočet jmenovité životnosti bylo proveden podle vzorce:

$$L = \left(\frac{f_h \cdot f_t \cdot C_{dyn}}{f_w \cdot P_e} \right)^3 \cdot 5 \cdot 10^4 \quad (3.2.27)$$

Výpočet životnosti v hodinách byl proveden podle vzorce:

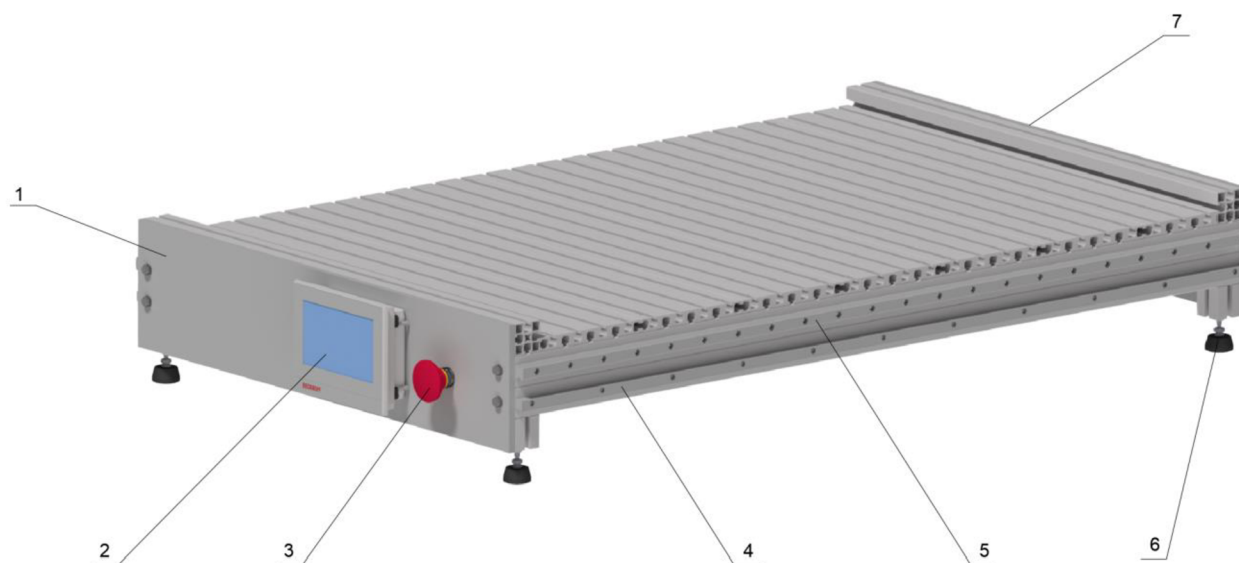
$$L_h = \frac{L}{v_{maxz} \cdot 60} \quad (3.2.28)$$

Tab. 3.16 Výstupní hodnoty výpočtu lineárního vedení

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Tečné zatížení	$F_{t1} = F_{t2} = F_{t3} = F_{t4}$	26	[N]
Radiální zatížení	$F_{r1} = F_{r2}$	221	[N]
	$F_{r3} = F_{r4}$	-76,7	[N]
Ekvivalentní statické zatížení	P_e	247	[N]
Statická konstrukční bezpečnost	f_{SL}	68,7	[-]
Jmenovitá životnost	L	$2,8 \times 10^9$	[otáček]
Životnost v hodinách	L_h	$9,4 \times 10^6$	[h]

Výpočtem bylo ověřeno že navrhované lineární vedení přenesé uvažované zatížení.

3.3 Osa X (stůl)



Popis:

- 1. Přední deska
- 2. Ovládací panel
- 3. Tlačítko nouzového zastavení
- 4. Ozubený Hřeben

- 5. Kolejnice lineárního vedení
- 6. Vyrovnávací noha
- 7. Zadní deska

Obr. 3.12 Popis Osy X.

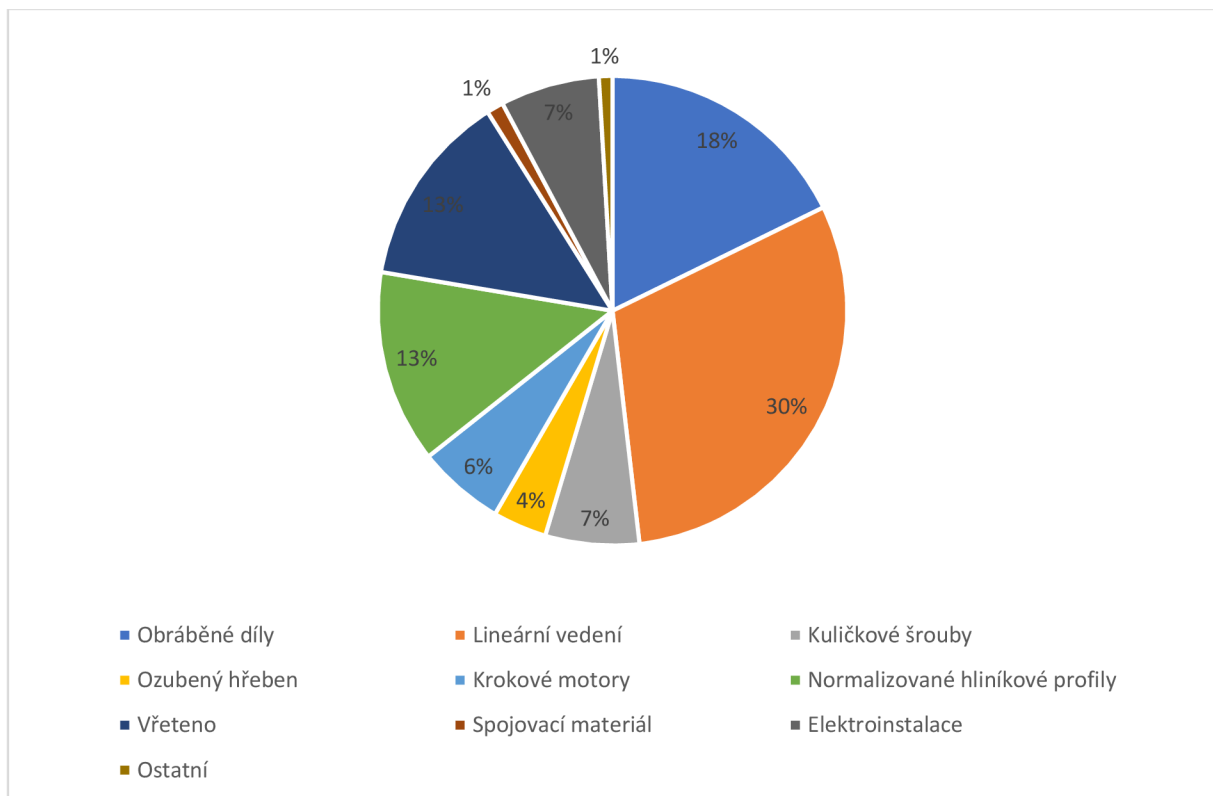


Obr. 3.13 Uspořádání rámu stolu.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Při navrhování stroje bylo přistupováno tak, že bylo použito co nejvíce normalizovaných dílů. Cena obrábění je pouze odhadnutá a vychází ze zkušenosti autora. Přesná cena obrobených dílů by byla dále specifikována při zadání zakázky konkrétní firmě. Ceny komponent jsou čerpány z e-shopu cncshop.cz.

Název	Cena (Kč)
Obráběné díly	8 564
Lineární vedení	14 680
Kuličkové šrouby	3 122
Ozubený hřeben	1 791
Krokové motory	2 895
Normalizované hliníkové profily	6 420
Vřeteno	6 480
Spojovací materiál	560
Elektroinstalace	3 300
Ostatní	450
Celkem	48 262



Jak je patrné z obrázku největší podíl na ceně má lineární vedení a obráběné díly. Následuje vřeteno a elektroinstalace. Snížení ceny pomohlo použití ozubeného hřebenu namísto kuličkového šroubu v ose x. Varianta s kuličkovým šroubem by byla dražší o 15 %. Do ceny nejsou zahrnuty náklady na vývoj a montáž.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo vypracovat návrh CNC dílenské dřevoobráběcí frézky, využívané v hobby dílnách. V První části byla vypracována rešerše z oblasti dostupných konstrukčních řešení. Z této rešerše vyplynulo, že pro zvolené rozměry a výkony bude nejvhodnější portálová konstrukce. Následně byla provedena analýza typů komponent, které lze pro stavbu frézky použít. Nosné části konstrukce budou zhotoveny z obrobených desek ze slitiny hliníku a z normalizovaných hliníkových profilů. Ve všech osách stroje je použito lineární kolejnicové vedení s vozíkem, který má čtyři řady oběžných kuliček. Přenos momentu v ose Y a Z je pomocí kuličkového šroubu. V ose X je použitý hřeben s pastorkem. Kuličkový šroub a pastorek hřebenu pohání krokový motor. Celková cena materiálu byla vyčíslena na 48 262 Kč.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JOSTEN, Elmar, Thomas REICHE a Bernd WITTCHEN. *Dřevo a jeho obrábění*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010. Průvodce truhláře. ISBN isbn978-80-247-2961-9.
- [2] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 3. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [3] *Mekanika* [online]. In: . [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.mekanika.io/the-best-cnc-milling-machines>
- [4] *Millrightcnc* [online]. In: . [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://millrightcnc.com/>
- [5] Carbide3d. In: <https://carbide3d.com/shapeoko/> [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://carbide3d.com/shapeoko/>
- [6] Mellowpine. In: *Mellowpine* [online]. 2020 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://mellowpine.com/cnc/shapeoko-4-cnc-review/#linear>
- [7] *Profítek* [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://eshop.profitek.cz/>
- [8] *Stepcraft-systems* [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.stepcraft-systems.com/>
- [9] Stepcraft-m-1000. In: *Profítek.cz* [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://eshop.profitek.cz/stepcraft-cnc-systemy/stepcraft-m-1000-kit-2/>
- [10] *Cncstepusa* [online]. 2017 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.cncstepusa.com/>
- [11] Pro-cnc. In: *Mekanika* [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.mekanika.io/products/pro-cnc/technical-specifications>
- [12] Kompas h1000hf. In: *Caucau* [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.caucau.cz/cnc-frezky-kompas-h1000/>
- [13] *Bxpcontrol* [online]. 2021 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://bxpcontrol.cz/>
- [14] *Bobscnc* [online]. 2022 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.bobscnc.com/>
- [15] *Makermade* [online]. 2021 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://makermade.com/>
- [16] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991.
- [17] *Cnccookbook* [online]. In: . [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://www..com/cnc-spindle-mill/>
- [18] *Circlemwoodworking* [online]. In: . [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://.com/cnc-router-motor-vs-spindle-which-is-better/>
- [19] *Helmm.co* [online]. In: . [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://helmm.co/spin-spin-spindle-which-router-for-cnc/>
- [20] *Jprint3d* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <http://www.jprint3d.cz/e-shop/dily-reprap-prusa-i3/trapezovy-sroub-matice-pruzna-spojka-pro-3d-tiskarny-prusa-i3-reprap-set?zobrazit-zbozi=240>
- [21] *Mmspektrum.com* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/volba-kulickovych-sroubu>
- [22] *Ozubene-hrebeny.cz* [online]. 2022 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <http://www.ozubene-hrebeny.cz/>
- [23] *Forum.strojirenstvi.cz* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/viewtopic.php?t=4378>
-

-
- [24] *Rem-technik.cz* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.rem-technik.cz/pohyb-pohony-prevody/prevodovky/pohony-s-ozubenymi-hrebeny/system-pridavneho-pastorku-zv-a-hrebenu-844.html>
- [25] *Sew-eurodrive.c* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.sew-eurodrive.cz/vyrobky/motory/linearni_pohyb/linearmotoren.html
- [26] *Lifewire* [online]. In: . [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://www.lifewire.com/stepper-motor-vs-servo-motors-selecting-a-motor-818841>
- [27] *Profirobot.cz* [online]. In: . [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <http://profirobot.cz/krokove-motory/>
- [28] *Shop.eufactory.com* [online]. In: . [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://shop.eufactory.com/blog/13_krokovy-motor-vyber
- [29] *Navody.dratek.cz* [online]. In: . [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/arduino-projekty/servo-motor.html>
- [30] *Rem-technik.cz* [online]. In: . [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.rem-technik.cz/pohyb-pohony-prevody/motory-a-servomotory/servomotory/vretenovy-servomotor-ezs-s-dutou-hrideli-525.html>
- [31] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [32] *Celoplastová lineární kluzná vedení: lehká a cenově dostupná* [online]. 1 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/celoplastova-linearni-kluzna-vedeni-lehka-a-cenove-dostupna_42594.html
- [33] *Hennlich.cz* [online]. 2020 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www./produkty>
- [34] *Theedgecutter* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://theedgecutter.com/best-softwares-for-cnc-machine/>
- [35] *Machsupport* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.machsupport.com/shop/mach3/>
- [36] *Linuxcnc* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://linuxcnc.org/>
- [37] *Researchgate.net* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Turbo-CNC-CAD-CAM-Software_fig2_268119154
- [38] *Sakul* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.sakul.cz/konfigurace-firmware-grbl/n>
- [39] *Automatizace* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/bezpecnost-stroju-komponenty/nouzove-zastaveni-stroje-volba-a-pouziti-e-stop-tlacitek.html>
- [40] VARKOČEK, Jan, Jindřich HOLOPÍREK a Miroslav ROUSEK. *Dělení, obrábění a tváření materiálů*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1996. ISBN 80-715-7230-6.
- [41] HOLOPÍREK, Jindřich. *Teorie řezných odporů při obrábění dřeva*. 1. vyd. Brno: VA, 2000.
- [42] *Hiwin* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby/valcovane-srouby/53_jednoduchamatice-prirubova-fsc-fsi-dle-din-69051
- [43] *Raveo* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: [<https://www.raveo.cz/jak-funguje-krokovy-motor>]
-

[44] *Cncshop.cz* [online]. In: . [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/es-m32320-easy-servo-motor-2nm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Řezný průměr frézky	D	mm
Jednotkový měrný řezný odpor	K_{BOR}	[-]
Opravný součinitel vlivu dřeviny	K_D	[-]
Opravný součinitel vlivu otupení	K_p	[-]
Opravný součinitel vlivu řezné rychlosti	K_V	[-]
Opravný součinitel vlivu tloušťky třísky	K_h	[-]
Opravný součinitel vlivu vlhkosti	K_w	[-]
Účinnost valivého vedení	η_v	[-]
Účinnost kuličkového šroubu a matice	η_{ξ}	[-]
Účinnost oboustranného uložení kuličkového ložiska	η_L	[-]
Celková účinnost	η_c	[-]
Kvalita dynamického poměru	P_{d0}	[-]
Statická konstrukční bezpečnost	f_{SL}	[-]
Koeficient uložení	k_d	[-]
Koeficient závislosti na uložení	k_k	[-]
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	f_1	[-]
Součinitel tření v KŠM redukováný na poloměr šroubu	f_2	[-]
Faktor tvrdosti	f_h	[-]
Teplotní faktor	f_t	[-]
Zátěžový faktor	f_w	[-]
Úhel sklonu vedení	α_z	[°]
Životnost v hodinách	L_h	[h]
Moment setrvačnosti motoru	J_{mot}	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy Z	J_{KSZ}	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti hřídelové spojky	J_s	[kg.m ²]
Moment setrvačnosti posuvových hmot redukováný na oso šroubu	J_m	[kg.m ²]
celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru	J_{rhm}	[kg.m ²]
Hmotnost osy Z	m_z	[kg]
Hmotnost osy Y	m_y	[kg]
Hmotnost osy Z	m_z	[kg]
Maximální rychlost posuvu	v_{maxz}	[m.min]
Maximální rychlost posuvu	v_{maxy}	[m.min]
Lineární zrychlení	a_z	[m.s ⁻²]
Lineární zrychlení	a_y	[m.s ⁻²]
Lineární zrychlení	a_z	[m.s ⁻²]
Rychlost posuvu	v_f	[m.min ⁻¹]
Maximální rychlost při polohování	v_{max}	[m.min ⁻¹]
Řezná rychlost	v_c	[m.s ⁻¹]
Střední otáčky kuličkového šroubu	n_{ξ}	[min ⁻¹]

Kritické otáčky	n_k	$[\text{min}^{-1}]$.
Maximální přípustné otáčky	n_{max}	$[\text{min}^{-1}]$.
Maximální otáčky při rychloposuvu	n_f	$[\text{min}^{-1}]$.
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	d_k	$[\text{mm}]$
Vzdálenost mezi ložisky	l_d	$[\text{mm}]$
Stoupání závitu kuličkového šroubu	P	$[\text{mm}]$
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	d_{ξ}	$[\text{mm}]$
Nepodepřená délka šroubu	l_k	$[\text{mm}]$
Otáčkový faktor	D_n	$[\text{mm}]$
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	d_k	$[\text{mm}]$
Vzdálenost mezi ložisky	l_d	$[\text{mm}]$
Stoupání závitu kuličkového šroubu	P	$[\text{mm}]$
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	d_{ξ}	$[\text{mm}]$
Nepodepřená délka šroubu	l_k	$[\text{mm}]$
Otáčkový faktor	D_n	$[\text{mm}]$
Měrný řezný odpor obráběného materiálu	K_c	$[\text{Mpa}]$
Statický moment	M_{mot}	$[\text{N}\cdot\text{m}]$
Ztrátový moment třecích sil přesouvaných ploch	M_G	$[\text{N}\cdot\text{m}]$
Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v kuličkovém šroubu	M_{KSM}	$[\text{N}\cdot\text{m}]$
Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru	M_{red}	$[\text{N}\cdot\text{m}]$
Minimální moment motoru	M_{mz}	$[\text{N}\cdot\text{m}]$
Řezný odpor	F_c	$[\text{N}]$
Maximální dovolená axiální síla	F_{kmax}	$[\text{N}]$
Řezná síla při frézování	F_{ef}	$[\text{N}]$
Předpětí kuličkového šroubu	F_p	$[\text{N}]$
Ekvivalentní statické zatížení	P_e	$[\text{N}]$
Dynamická únosnost	C_{dym}	$[\text{N}]$
Řezná síla při frézování	F_m	$[\text{N}]$
Maximální teoretická dovolená axiální síla	F_k	$[\text{N}]$
Statická únosnost	C_o	$[\text{N}]$
Hmotnostní zatížení osy Y	F_{gy}	$[\text{N}]$
Tečné zatížení	F_t	$[\text{N}]$
Radiální zatížení	F_r	$[\text{N}]$
Ekvivalentní statické zatížení	P_e	$[\text{N}]$
Kroutící moment	M_c	$[\text{N}\cdot\text{m}]$
Jmenovitá životnost	L	$[\text{ot}]$
Životnosti kuličkového šroubu v otáčkách	L_{ot}	$[\text{otáček}]$
Úhlové zrychlení motoru	ε_s	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}]$
Čas rozběhu	t	$[\text{s}]$
Výkon vřetena při frézování	P_c	$[\text{W}]$
Počet zubů nástroje	z	ks

Otáčky vřetena	n	min ⁻¹
Hloubka řezu	E	mm
Posuv na zub	f _Z	mm
Šířka záběru frézy	B	mm

SEZNAM PŘÍLOH

Seznam výkresů

2022-DP-S1

2022-DP-S2

2022-DP-S3

2022-DP-S4

2022-DP-V1-1

2022-DP-V1-2

2022-DP-V2-1

2022-DP-V2-2

2022-DP-V3-1

2022-DP-V3-2

2022-DP-V3-3

2022-DP-V3-4

2022-DP-V3-5

2022-DP-V4-1

2022-DP-V4-2

