



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH KONSTRUKCE HOBBY FRÉZKY

HOBBY MILLING MACHINE DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Valášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Ondřej Valášek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jaromír Dvořák, 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 bakalářské práce:

Návrh konstrukce hobby frézky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh vlastní konstrukce hobby frézky.

Cíle bakalářské práce:

Provést analýzu dostupných řešení v hobby oblasti a navrhnout vlastní konstrukční řešení.

Popsat jednotlivé části zařízení.

Popsat základní charakteristiky řídicího systému.

Provést cenovou kalkulaci výroby.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, J. a kol. Konstrukce CNC obráběcích strojů. 2. vydání. Praha : MM publishing, s. r. o., 2010. ISBN 978-80-254-7980-3.

HUMÁR, A. TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 1. část [online]. Fakulta strojírenského inženýrství, 2016 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G., VLK, M. (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Překlad Martin Hartl. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské 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

Tato práce se v úvodní části zabývá popisem jednotlivých prvků konstrukce a řízení CNC strojů. U jednotlivých částí je stručně popsán princip jejich funkce, vlastnosti a možná aplikace na hobby stroji. Dále je provedena stručná analýza komerčně vyráběných CNC frézek, které se dají pořídit na tuzemském či zahraničním trhu za účelem frézování dřeva, případně hliníku. Stěžejním cílem práce je návrh vlastního řešení CNC frézky pro nekomerční užití. Nejdříve jsou vytvořena tři různá koncepční řešení. Poté je jedno z nich hlouběji rozpracováno a přetvořeno na kompletní návrh. Tento návrh je poté podroben numerické simulaci pro předběžné určení tuhosti stroje a schopnosti obrábět hliník. Výsledek této simulace potvrzuje možné užití stroje pro frézování hliníkových slitin. Deformace při možném obrábění hliníku za předem stanovených podmínek je dle simulace maximálně 0,18 mm. V poslední části práce byla provedena cenová kalkulace určující orientační náklady na výrobu stroje na 75 000 Kč. Součástí práce je kompletní výkresová dokumentace mechanických částí stroje.

Klíčová slova

Hobby frézka, Mach3, lineární vedení, krokové motory, frézování

ABSTRACT

At the introductory part, this thesis deals with description of individual parts of construction and control of CNC machine. Individual parts are described by viewpoint of principle of function, attributes and possibility of implementation on hobby machine. Furthermore is performed brief analysis of commercially manufactured CNC milling machines, which can be purchased on domestic and foreign markets for a purpose of milling wood and eventually aluminum alloys. Main purpose of thesis is custom design of CNC milling machine for non-commercial use. Three draft proposals are created first. Then one of them is developed into complete proposal. This design is then subjected to numerical simulation to pre-determine the machine's stiffness and ability to mill aluminium. The result of this simulation confirms the possible use of the machine for milling aluminium alloys. According to the simulation, the maximum deformation for possible machining of aluminium under predetermined conditions is 0.18 mm. In the last part of the work a price calculation was made, determining the approximate cost of the machine production at 75 000 CZK. The work includes a complete drawing documentation of the mechanical parts of the machine.

Key words

Hobby milling machine, Mach3, linear guide, step motor, milling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALÁŠEK, Ondřej. *Návrh konstrukce hobby frézky* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139827>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Dvořák

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Návrh konstrukce hobby frézky vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Ondřej Valášek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. za odborné vedení, velmi cenné připomínky, rady a čas trávený na konzultacích k vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za podporu při studiu.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 Analýza problému a dostupných řešení.....	11
2.1 Teorie obrábění.....	11
2.2 Řídicí systémy a software CNC	14
2.2.1 Struktura řídicího systému.....	15
2.2.2 Programování CNC strojů	16
2.2.3 Charakteristika systému Mach3.....	17
2.3 Části CNC frézky	18
2.3.1 Lineární Vedení a jeho pohon u CNC strojů	19
2.3.2 Vřetena frézovacích strojů.....	22
2.4 Dostupná řešení na trhu	23
3 NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ	26
3.1 Koncepty	26
3.2 Návrh jednotlivých komponent	28
3.3 Řídicí software a elektronické části stroje.....	36
3.4 Výpočet charakteristik stroje.....	37
3.5 Numerická simulace výchylky vřetena při obrábění	41
4 KALKULACE CELKOVÝCH NÁKLADŮ NA VÝROBU.....	43
ZÁVĚR.....	45
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	48
SEZNAM PŘÍLOH.....	50

ÚVOD

Frézovací stroje začaly vznikat již v osmnáctém století a svou současnou podobu dostávaly na konci devatenáctého století. Od ručních posuvů se s rozvojem automatizace přecházelo na automatické posuvy, až k plně automatickému řízení. Téměř všechny nově vyrobené třískové obráběcí stroje jsou v dnešní době řízeny počítačově. Jejich ceny jsou však i s parametry pro domácí dílenské účely v částkách přesahujících desetitisíce korun. Za účelem snížení nákladů, začali nadšenci tyto stroje konstruovat v domácích podmínkách metodou „pokus omyl“. Zároveň s tím začala vznikat internetová diskusní fóra, na nichž se nadšenci chlubili svými výtvary, a zároveň hledali odpovědi na problémy, které se objevovaly při konstrukci, zprovoznění či následným provozem stroje.

Toto téma jsem zvolil se záměrem vytvoření vlastního návrhu a možné budoucí realizace hobby stroje pro příležitostné frézování dřeva a slitin lehkých kovů. Návrh je sestaven na základě odborných doporučení pro stavbu obráběcích strojů. Zároveň bude brán ohled na nedostatky již realizovaných strojů podobné konstrukce. Většina navržených komponent je podložena výpočty vhodnými pro řešení dané problematiky. Navržený stroj by měl být dle zadání schopen opracovávat dřevo a s malou výkonností i lehké hliníkové slitiny různých polotovarů. V návrhu konstrukce budou též zohledněny omezené možnosti autora, co se týče technologického vybavení na zpracování materiálů.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

V práci budou nejdříve analyzovány jednotlivé strojní části a jejich varianty na CNC frézkách. Různé varianty každé části budou stručně popsány včetně jejich výhod a nevýhod zejména v aplikovatelnosti pro hobby stroj. Součástí vypracování bude dále popis a charakteristika řídicího systému Mach3. Dále bude provedena analýza a srovnání komerčně vyráběných strojů na trhu. Hlavním cílem, jak již úvodu vyplývá, bude komplexní návrh vlastního řešení hobby CNC frézky s ohledem na vstupní parametry. Jednotlivé komponenty budou voleny na základě doporučených výpočetních vztahů z doporučené literatury či katalogů výrobců. Jakýmsi ukončením praktické části práce bude numerická simulace metodou konečných prvků zobrazující odchylku obráběcí hlavy při frézování. V poslední části dojde k cenové kalkulaci výroby, zahrnující náklady na materiál a technologické operace, které nebude možné provést v domácích podmínkách. Poslední část bude tedy odpovědí na otázku, zda lze hobby stroj postavit za výrazně přívětivější cenu, než je tomu u strojů komerčních.

▪ Parametry návrhu

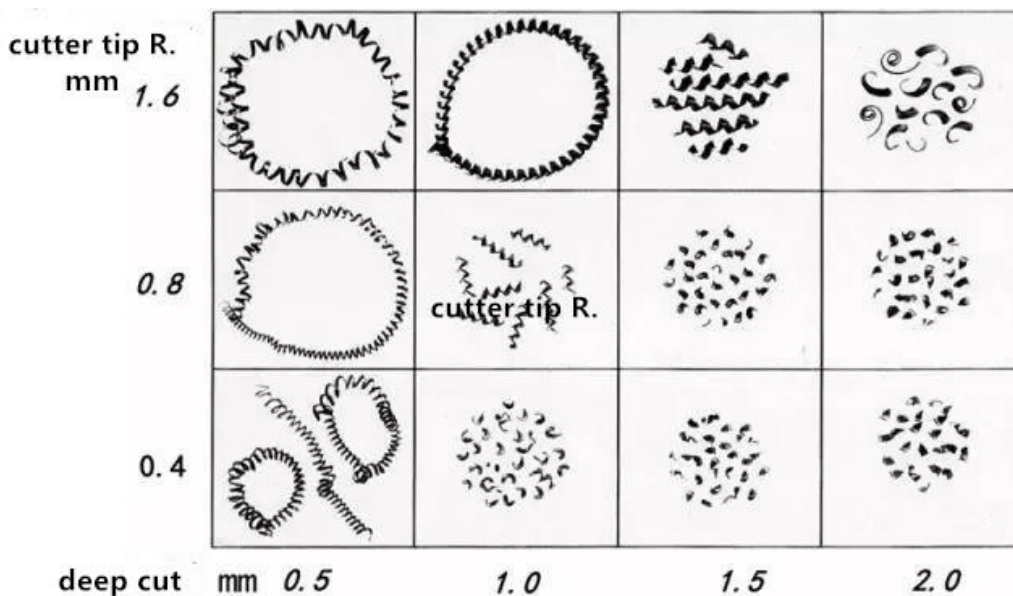
Jelikož se jedná o návrh hobby stroje, je nutné brát zřetel zejména na minimalizaci nákladů při kompletní výrobě na co nejnižší úrovni. Vstupními parametry jsou požadavky na rozjezdy jednotlivých os X/Y/Z v hodnotách blízkých se 800/400/150 mm. Primárním účelem stroje je obrábění deskových materiálů ze dřeva, ale je žádoucí, aby stroj zvládal opracovávat i lehké, zejména hliníkové slitiny při malých hloubkách záběru a vysokých rezných a posuvových rychlostech. Taktéž je nutné navrhnout upínací mechanismus pro vřeteno tak, aby bylo možné ho jednoduše vyměnit za jiné. Hobby stroje jsou ve většině případů konstruovány v domácích podmínkách a není tedy brán velký ohled na designovou stránku, nýbrž hlavně na funkčnost, jednoduchost výroby, zpracování a cenu.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A DOSTUPNÝCH ŘEŠENÍ

Následující část bude shrnovat teoretické podklady na jejichž základech bude navrhována vlastní konstrukce. Informace jsou čerpány zejména z odborné literatury zabývající se konstrukcí obráběcích strojů, dále také z doporučení konkrétních výrobců daných prvků a odborných článků.

2.1 Teorie obrábění

Obrábění je technologický proces, při kterém dochází k odebrání materiálu z povrchu pomocí mechanických, chemických nebo elektrických účinků, případně jejich kombinací. Cílem je vytvářet plochy požadovaných rozměrů a jakostí [1]. Třískové obrábění je léta nepostradatelnou stále progresivní technologií, která umožňuje efektivně vyrábět dílce daných přesných rozměrů a vysokých jakostí. Kombinací základních druhů obrábění je možné vytvořit téměř jakýkoliv výrobek, kde jedinými limity jsou rozměry strojů. Odpadem vznikajícím při třískovém obrábění jsou kovové třísky různých rozměrů a geometrií viz obr.1.



Obr. 1 druhy třísek vznikajíc při obrábění [1].

▪ Frézování

Frézování je obráběcí metoda užitečná pro obrábění rovinných, šikmých a tvarových ploch. Zmíněná metoda je též užitečná pro výrobu boků zubů ozubených kol s přímým, šikmým či šípovým ozubením [4]. Hlavním pohybem je rotační pohyb nástroje a vedlejším pohybem je přímočarý vrátný vykonávaný obrobkem [1].

Dle směru pohybu zubů nástroje a směru pohybu obrobku lze frézování rozdělit na sousledné a nesousledné. Stav, kdy směr není stejný, nazýváme frézování nesousledné, které je vhodné zejména pro konvenční stroje, jelikož zde není potřeba vymezení vůle v posuvovém mechanismu. Také zde dochází ke vzniku tření na hřbetě zubu předtím, než začne břit vnikat do obráběného materiálu a tím pádem je nástroj rychleji opotřebováván. Zároveň vzniká horší povrch v porovnání s frézováním sousledným. Pokud jsou směry stejné, nazýváme tento stav frézováním sousledným. Pokud to soustava stroj-nástroj-obrobek dovoluje, upřednostňujeme frézování sousledné před nesousledným [3].

Frézovací obráběcí stroje jsou frézky a rozlišují se dle konstrukce na konzolové, stolové, rovinné, speciální a počítačově řízené. Konvenční stroje pracují ve třech osách a je možné za použití dělicího aparátu přidat jednu rotační osu. Počítačově řízené frézky mohou být osazeny naklápěcím pracovním stolem nebo otočnou frézovací hlavou, která umožní stroji pracovat v celkem pěti osách současně. Polotovary jsou na frézky upínány do svěráků, nebo pomocí upínacích kamenů ke stolu frézky. Ve speciálních případech, kdy polotovar nelze bezpečně a dostatečně upevnit do svěráku či na stůl přes upínky, je třeba vyrobit upínací přípravek, který zaručí bezpečné a dostatečně tuhé upnutí polotovaru. Na frézkách je ve většině případech možné provádět i jiné než frézovací operace, jako je vrtání, vyvrtávání či závitování. [4]

Obráběcími nástroji jsou zejména frézy. Jedná se o převážně vícebřité nástroje s kruhových průřezem konající rotační pohyb kolem své osy. Směrodatnými parametry frézy jsou průměr a počet zubů, poté také délka řezné části a celková délka. Frézy dělíme dle umístění zubů na válcové, čelní, čelní válcové, kotoučové, kuželové, tvarové, úhlové a speciální. Dále mohou být děleny dle nástrojových materiálů, provedení zubů, směru zubů, počtu zubů, geometrie a podobně. Pro konvenční stroje jsou používány zvláště frézy z rychlořezné oceli. U CNC frézek jsou již používány raději frézy ze slinutých karbidů či frézovací hlavy s výměnnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů a cermetů, které umožní použití vyšších řezných rychlostí, a tím více využít obráběcí potenciál CNC stroje. Nejhojněji užívané frézy pro kovoobráběcí průmysl lze vidět na obrázku číslo 9. [4]



Obr. 2 frézy ze slinutých karbidů podle [9].

▪ Řezné podmínky

Pojem řezné podmínky je souhrnné označení pro činitele ovlivňující proces obrábění, zejména se jedná o řeznou rychlost, posuvovou rychlost a hloubku záběru. Volbu řezných podmínek ovlivňuje několik faktorů, mezi hlavní spadá materiál obrobku, materiál obráběcího nástroje, geometrie nástroje, druh obrábění a požadavky na jakost povrchu. [1]

2.2 Řídicí systémy a software CNC

Řídicí systémy jako takové jsou mozkiem CNC strojů. Společně s kinematikou a mechanikou CNC stroje tvoří systém, na jehož kvalitě závisí výsledná přesnost a spolehlivost daného stroje. Mezi nejpoužívanější profesionální řídicí systémy se řadí Siemens Sinumerik, Haidenhain, Fanuc a Mitsubishi. Tyto systémy jsou však pro hobby použití nepřiměřeně drahé vzhledem ke skutečnosti, co se od hobby strojů očekává. Proto se používají převážně systémy navržené přímo pro hobby užití. Od toho se odráží jejich cena a lze tyto programy zakoupit v řádu tisíců korun. Mnoho z těchto programů lze stáhnout a užívat jako freeware, avšak s určitými funkčními omezeními. Mezi nejpoužívanější programy pro hobby stroje patří Mach3, TG Motion či LinuxCNC.

▪ Vznik počítačového řízení

S postupným technologickým vývojem a pokrokem v průmyslu začaly vznikat vyšší nároky na přesnosti a jakosti vyráběných dílců. Důsledkem toho bylo nutné zpřesnit a zefektivnit obráběcí stroje. Do klasických konvenčních obráběcích strojů se začaly přidávat odměřovací systémy a pohony os zajišťující jejich chod. Z počátku byla data zaznamenávána a předávána mechanicky přes děrné štítky, později byla zaznamenávána na magnetické pásky. Posledním a stále používaným způsobem je uchování dat v paměti CNC stroje.

Vývoj číslicového řízení lze obecně rozdělit do čtyř generací. [8]

- První generací jsou konvenční stroje osazené o číslicový řídicí systém, v němž je možné sestavovat souřadnice a pohybovat se samostatně v pravoúhlých osách.
- Druhou vývojovou generací jsou stroje osazené prvky, které umožňují zvýšit efektivitu stroje. Jsou tedy vybaveny servomotory, revolverovými hlavami či zásobníky nástrojů, které umožňují rychlejší výměnu nástrojů a tím vyšší produktivitu. Tyto stroje jsou schopné pracovat souvisle ve dvou osách a vytvářet tedy například rádiusy či kruhové kapsy.
- Třetí generací jsou stroje, jež jsou schopny obrábět souvisle ve třech osách a zároveň dávat zpětnou vazbu uživateli o silových poměrech působících na jednotlivé osy, vřetena či nástroje za pomoci senzorů. Také výrazně vzrostla přesnost výroby.
- Čtvrtou a současnou generací číslicově řízených strojů jsou centra schopná pracovat souvisle ve více jak třech osách viz obr. 4. Dle zatížení pohonu či nástroje jsou schopny samy poznat a nahradit opotřebený nástroj. Disponují též přesnějším seřízením nástrojů či samostatnou rozměrovou kontrolou obrobku.



Obr. 4 obráběcí centrum čtvrté generace řízení značky Mazak [10].

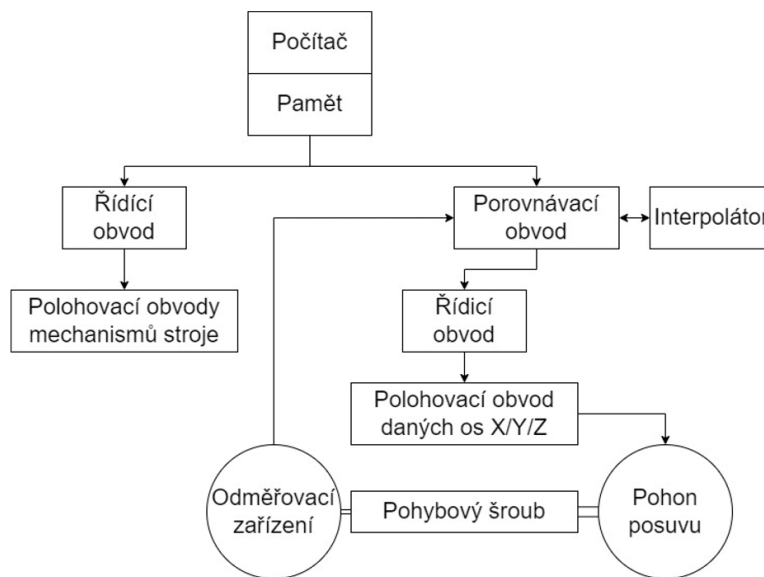
2.2.1 Struktura řídicího systému

Strukturou řídicího systému se rozumí logické zapojení hardwarových prvků v CNC stroji. Na rozdíl od NC strojů, u CNC strojů již není čtena jen jedna věta programu, nýbrž do paměti stroje je načten celý program, který může obsahovat i odkazy na podprogramy uložené v paměti stroje. [5, 7]

Řídicí systém po zapnutí stroje aktivuje souřadnicový systém, jenž má svůj počátek stanoven již z výroby. Jedná se o nulový bod stroje značený M, který je jedním ze vztažných bodů stroje. Vztažné body poskytují stroji informaci o tom, v jakém bodě se nachází jeho pohyblivá část. Dalším vztažným bodem je bod referenční, značený R, jenž slouží k synchronizaci měřicího systému. Po každém zapnutí musí stroj provést referenci ve všech osách pro zajištění správného polohování při následujících akcích. Nulový bod a referenční bod jsou pevně zadány výrobcem. Nulový bod obrobku, značený W, či nástroje, značený N, určuje programátor a je dále používán jako počáteční bod pro CNC program. [5, 7]

Souřadnicový systém, který používá valná většina strojů je systém kartézský. Základní osy označujeme písmeny X, Y, Z. Osy rotační okolo základních označujeme A, B, C. Dále existují doplňkové osy primární, sekundární a terciální, které užíváme pro určení parametrů pohybu, popis přidavných pohybů či pro programování manipulátorů u strojů. Definicí je dáno, že osa Z je vždy totožná s hlavní osou rotace. [5, 7]

Blokové schéma CNC stroje vypadá následovně [4, 5]:



Obr. 5 Zjednodušené blokové schéma CNC stroje.

kde:

- Počítač s nahaným řídicím systémem je součástí stroje. Počítač je řízen obsluhou přes ovládací panel a tím je zároveň ovládán celý stroj.

- Řídicí obvody převádí logické signály na silnoproudé elektrické signály, které přímo ovládají jednotlivé části stroje jako jsou pohony, vřetena, ventily a čerpadla.
- Interpolátor propočítává dráhu nástroje a rozděluje ji na infinitezimálně krátké úsečky rovnoběžné s osami, také zaručuje geometrickou přesnost výrobku.
- Porovnávací obvod, též zvaný diferenční člen, získává zpětnou vazbu z pohonů os přes odměřování a srovnává rozdíl mezi souřadnicí aktuální a souřadnicí na kterou se stroj má dle programu dostavit. Pokud je zjištěn rozdíl, pohony dostanou povel k dosažení daných hodnot.

▪ Druhy řízení

Cílem řízení technologického procesu obrábění je dosažení požadovaného geometrického tvaru obrobku v požadované rozměrové přesnosti a drsnosti obrobených ploch při optimálních řezných podmínkách.

Řídicí systémy lze obecně rozdělit na systémy s přetržitým řízením a systémy se souvislým řízením. Dále také podle typu programování na přírůstkové a absolutní. [4,7]

- Systém stavění souřadnic – jedná se o nejstarší typ řízení spadající pod přetržité řízení. Systémy nebyly osazeny mikroprocesorem pro lineární a kruhové interpolace. Jednalo se pouze o pohyb rychloposuvem na požadovaný bod. Tento systém je používán pouze u vrtaček a vyvrtávaček.
- Pravoúhlá řízení – Jsou dalším typem přetržitého řízení. Jedná se o nadstavbu systému stavění souřadnic. Umožňuje realizovat strojní obrábění v jedné ose.
- Souvislá řízení – Tyto typy řízení jsou již schopny pracovat s korekcí a geometrií nástroje. Umožňují souvislé obrábění ve více osách. Dělíme na 1D, 2D až do 5D kdy je stroj schopen souvisle obrábět v pěti osách současně.

2.2.2 Programování CNC strojů

V dnešní době a s nástupem průmyslu 4.0 již většina programování probíhá na oddělených pracovištích, kdy na PC s daným CAD/CAM softwarem je možné utvářet strategii obrábění, kterou lze poté automaticky převést do ISO kódu a ten poté přes externí disk či síť nahrát do CNC stroje. V některých případech, kdy se jedná o obrábění jednoduchých tvarů a zejména v jedné rovině, lze vytvářet program pro budoucí obrábění již během procesu, kdy obsluha koná pasivní dozor u stroje, který obrábí a zároveň píše program pro budoucí obrábění přímo na ovládacím panelu stroje. Není zde tedy prodleva, kdy stroj nepracuje, a proto je to ekonomicky výhodné. S tímto způsobem programování však vznikají vyšší nároky na kvalifikaci obsluhy. Programování také můžeme dělit na programování absolutní, přírůstkové, pomocí polárních souřadnic a parametrické programování. Nejčastěji užívané je programování absolutní, kdy jsou všechny souřadnice programu vždy orientovány vzhledem k nulovému bodu obrobku. [5,6]

Popis dráhy, kterou má konat nástroj či obrobek, je předán stroji přes CNC program. Reálný pohyb je realizován vždy pomocí přímých úseček, pokud je vytvářen rádius není realizován jako souvislá křivka, ale sledem schodů o téměř infinitezimálním kroku. CNC program je soubor alfanumerických znaků a sestává se z vět, přičemž každá jeho věta obsahuje popis dráhy nástroje pomocí souřadnice, na kterou se má nástroj či obrobek dostavit a jakým způsobem.

Každá jednotlivá věta tvořící program obsahuje geometrické, technologické, pomocné a doplňující informace pro stroj a obsluhu. [5,6]

Ukázková věta:

N10 G01 X5. Y5. Z5. M03 S500 F300 T6D6

kde:

- N dává informaci o umístění dané věty v programu.
- G dává geometrickou informaci, zda má být pohyb realizován lineární interpolací, strojním či maximálním posuvem nebo kruhovou interpolací.
- X, Y, Z udává hodnotu v souřadnicích, vztažených k nulovému bodu, kam se má nástroj přesunout.
- M přiřazuje pomocné funkce stroje jako je roztočení vřetena, spuštění emulze a další.
- F určuje velikost posuvové rychlosti v $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$.
- S určuje počet otáček. Pokud je tato funkce ve větě, musí být přítomná i pomocná funkce určující směr otáčení vřetena ve směru hodinových ručiček M3 nebo M4 pro otáčení proti směru hodinových ručiček.
- D přiřazuje k nástroji korekci, ze které stroj načte rozměry nástroje, které definují, v jaké vzdálenosti od referenčního bodu R je břit nástroje.
- T udává číslo nástroje v zásobníku.

Doporučený sled informací ve větě je N G (M) X Y Z F S T D. Jedná se o doporučení pouze z hlediska přehlednosti v programu [6]. Zpravidla se příkazy pro výměnu nástrojů a podobné nedávají do jedné věty s příkazem, který vede k obrábění.

2.2.3 Charakteristika systému Mach3

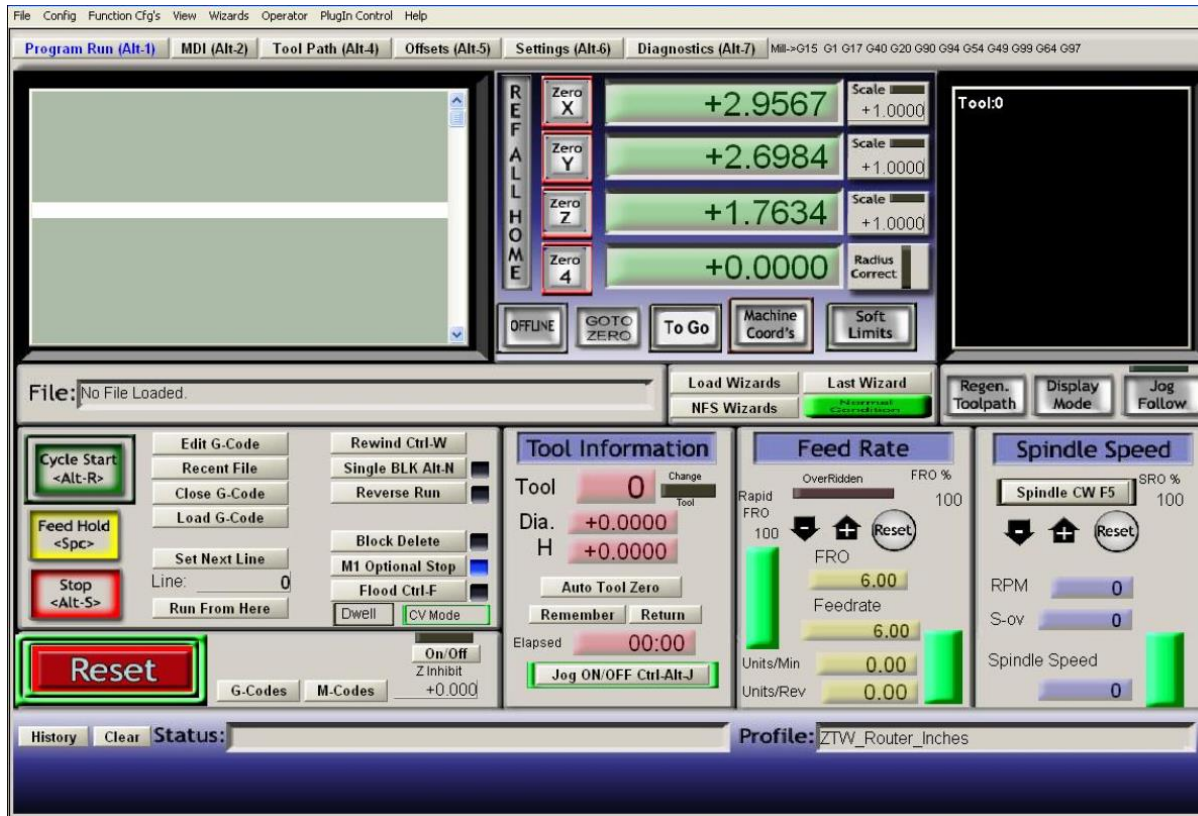
Mach3 je balík programů společnosti Artsoft Consult, který pracuje na osobním počítači a přeměňuje ho na levný řídicí systém [24]. Pro řízení hobby CNC stroje je v současnosti možné využít free demoverzi Mach3, jenž je limitována prací ve třech osách a velikost programu je omezena na 500 řádků kódu. Plná verze je aktuálně dostupná v českých či zahraničních e-shopech od 4000 Kč.

Drivery, které ovládají elektromotory musí disponovat řízením STEP/DIR, kdy STEP zadává pulz kroku a DIR určuje směr otáčení. Toto řízení je však podporováno téměř všemi drivery krokových motorů. Komunikace počítače s oddělovací deskou je realizována tiskovým LTP portem, případně sériovým COM portem. [25]

Hardwarové požadavky na systém Mach3 nejsou příliš vysoké s ohledem na výkon dnešních počítačů. Minimálními požadavky na PC jsou: frekvence procesoru alespoň 1GHz a paměť RAM minimálně 520Mb. Instalace programu Mach3 nevyžaduje žádné speciální dovednosti, co se znalosti PC týče. Jako jeden z problémů se může zdát jen Reebot počítače pro nastavení programu Mach3 jako Kerner level program. To zajišťuje, že činnost programu nemůže být přerušena operačním systémem a program může využívat téměř všechny výpočetní výkon PC. Mnoho stavitelů CNC routerů upřednostňuje systém Mach3, jelikož se jedná o velmi uživatelsky přívětivý program, k němuž je poskytnut podrobný obsáhlý návod, který popisuje nejen kompletní proces instalace programu či pokyny k oživení stroje, ale také popis správného sestavení elektronických obvodu včetně ochranných prvků stroje. Dále z něj lze vyčíst mnoho praktických rad, které lze zohlednit již při návrhu stroje. Za jednu z nevýhod tohoto řídicího systému lze uvažovat nemožnost užití jakýchkoliv enkodérů pro zpětnovazební řízení, jelikož

Mach3 je schopen pouze poskytovat informaci o poloze, avšak nedokáže tuto informaci zpracovat a dle její hodnoty upravovat dráhu nástroje.

Systémové prostředí odpovídá běžným řídicím systémům a působí velice intuitivně. Ovládání probíhá přes myš počítače, ale při zakoupení speciálního displeje ovládat stroj dotykově na obrazovce zpravidla umístěné přímo na stroji. Ovládací panel lze vidět na obrázku 6.



Obr.6 Systémové prostředí Mach3Mill [26].

2.3 Části CNC frézky

Tato část práce popisuje mechanické a funkční prvky ze kterých jsou CNC frézky skládány a konstruovány. Jsou zde posuzovány klady a zápory daných typů prvků. Dále také nastínění principu jejich funkce a jejich aplikovatelnost v návrhu hobby stroje.

▪ Nosná soustava

Nosná soustava neboli rám stroje mají velkou váhu, co se týče celkové výsledné statické a dynamické tuhosti stroje. Při návrhu nosné soustavy u hobby stroje je třeba brát ohled zejména na jednoduchost výroby a efektivitu návrhu. Dále je třeba navrhnout dobré uložení stroje na základ. Hmotnosti hobby frézek se obvykle pohybují v rozmezí hmotnosti od 10 do 200 kg v závislosti na požadovaných rozjezdech stroje a není tedy nutné stroj ukládat na speciální povrch. U přesných strojů je též potřeba zohlednit tepelné namáhání a následnou roztažnost jednotlivých komponent při výrobě. [11]

Nosné soustavy rozdělujeme na pohyblivé a nepohyblivé soustavy, dále na soustavy nesoucí nástroj a nesoucí obrobek. V hobby sféře jsou navrhovány a konstruovány zejména soustavy nesoucí nástroj pro jejich jednodušší výrobu, realizovatelnost v hobby podmínkách, nižší hmotnost a celkově nižší pořizovací cenu. Dle toho, zda je soustava pohyblivá či nepohyblivá

rozdělujeme tyto stroje zejména na horní (viz obr. 7) a spodní gántry (viz obr.8). Jedná se o nejpoužívanější typy nosných soustav v hobby sféře. Stroje typu spodní gántry se vyznačují nižší hmotností a jsou používány u frézek menších rozměrů, CNC laserů a gravírovacích strojích. Pro větší hobby stroje jsou využívány soustavy horní gántry, jelikož mají vyšší tuhost.

Pro rámy CNC strojů jsou využívány zejména materiály jako je litina, ocelolitina, ocel. Pro velmi přesné obráběcí stroje, ale také měřicí aparáty jsou využívány i neželezné materiály jako beton, polymer beton či HPC beton. Od nosných materiálů je vyžadována vysoká tuhost, tepelná stabilita, schopnost útlumu vibrací, minimální vnitřní pnutí a další. V praxi se využívají i kombinace těchto materiálů, kdy je např. ocelový rám z dutých profilů vyplněn polymer betonem [11]. U hobby strojů se často setkáváme i s konstrukcemi, jež využívají desky a profily z slitin hliníků. Ty jsou vhodné pouze pro obrábění dřeva, balsy, plastů a dalších měkkých materiálů, jelikož hliník nedisponuje takovými tuhostmi jako kupříkladu ocel. [11]

Při volbě konstrukce je nutné zvážit i jakým způsobem bude rám spojen. Zatímco u hobby strojů převažuje šroubové spojování, u profesionálních strojů se setkáme zejména s odlitím rámu z litiny či betonů nebo svařováním zaručeně svařitelných plechů či profilů k sobě. Svařování vnáší do soustavy možná vnitřní pnutí a jsou proto voleny svary malých velikostí. Tento typ rámu je ekonomicky výhodný pouze při kusové výrobě.



Obr. 7 Fréza typu dolní gántry zn. CauCau [12].



Obr. 8 Fréza typu horní gántry zn. Zimmermann [13].

2.3.1 Lineární Vedení a jeho pohon u CNC strojů

Lineární vedení CNC stroje zajišťují přesné přesuny suportů stroje s minimálním možným třecím odporem. Vzniká požadavek na co nejdokonalější plynulost pohybu, jelikož na jejich přesnosti velmi závisí výsledná nájezdová přesnost. Od vedení požadujeme nízký součinitel tření, možnost vymezení vůlí, vysokou životnost a přesnost pohybu při malých i velkých rychlostech pohybu. [11]

Vedení CNC strojů lze rozdělit na vedení valivá, kluzná a kombinovaná. Vzhledem ke komplikovanosti konstrukce a finančně náročné stránce kluzných vedení nepřipadá v úvahu jejich užití v rámci hobby strojů. Vzhledem k této skutečnosti již nebudou tato vedení dále rozebírána. Valivá vedení převažují u většiny hobby strojů od 3D tiskáren přes CNC lasery až po třískové obráběcí stroje. Jejich výhodou spočívá v jednoduché konstrukci bez nutnosti dalších zařízení, avšak nejsou stavěny na velké rázy a kvůli nárokům na přesnost výroby jsou finančně

náročná. Dále je nutné vedení chránit před vnikem cizích částic například třísek, prachových částic či procesních kapalin, což přináší další ekonomickou zátěž. V praxi jsou pro vedení hobby strojů používány tři typy valivých vedení. [11, 14]

Prvním z nich je použití vodících kruhových tyčí vetknutých v rámu, na kterých jsou uloženy vozíky s valivými elementy. Tento způsob je vhodný zejména pro namáhání velmi malými silami. Při působení velkých sil dochází k výrazným průhybům, a tedy k nepřesnostem najíždění. [11, 14]

Druhým způsobem je použití podepřených kruhových tyčí. Jedná se o sestavu broušených tyčí přišroubovaných k podpěrným kolejničím, na které tyče přiléhají po celé délce. Kolejnice je přišroubována k rámu stroje a na tyči je usazen vozík s valivými elementy. Podepřené tyče jsou pro stavitele hobby strojů vhodným kompromisem mezi cenou a tuhostí. [11, 14]

Posledním a zároveň nejvhodnějším způsobem je užití kolejnice s prizmatickým profilem (viz obr. 9) a vozíkem s valivými elementy. Toto řešení nejlépe odolává namáhání z různých směrů, avšak se jedná o nejdražší variantu valivého vedení. [11, 14]



Obr. 9 Lineární vedení [15].

▪ Pohon os

Hlavním úkolem pohonů je přeměna dodávané, povětšinou elektrické energie, na energii mechanickou zaručující pohyb strojních částí. Pohony prvotně dělíme na pohony elektrické a hydraulické. Hydraulické pohony jsou u CNC strojů užívány zejména pro ovládání upínacích mechanismů. U hobby strojů však nejsou hojně používány a nebudou tedy dále popisovány.

Elektromotory slouží jak pro vytváření točivých momentů pro vřetena, tak i pro roztáčení pohybových šroubů zajišťující pohyb v jednotlivých osách. V této části se budeme zabývat motory pro pohony jednotlivých os. V hobby sféře jsou nejčastěji používány krokové motory s axiálně polarizovaným permanentním magnetem. Ty jsou schopny otáčku rozdělit na 200 kroků bez použití mikrokrokování. Pro profesionální stroje jsou užívány AC synchronní motory. Pro hobby účely jsou z finančního hlediska použitelné spíše krokové motory, jelikož jejich cena je mnohonásobně nižší než cena servomotoru. Krokové motory se vyznačují přesným polohováním a téměř nulovými požadavky na údržbu, avšak mají v porovnání se servomotory nižší rychlost krokování, sami o sobě nedávají uživateli zpětnou vazbu a při velkých otáčkách a zatížení může dojít ke ztrátě kroku. Při nákupu krokových motorů je směrodatným parametrem kroutící moment motoru a velikost příruby označovaná zkratkou

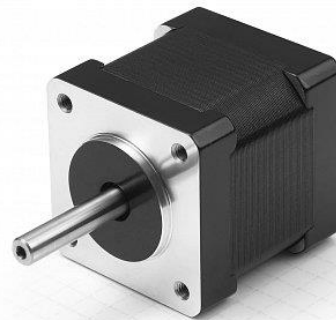
NEMA xx. Příruby běžných motorů se pohybují v rozměrech od NEMA 8 s kroutícím momentem od 0,22 N·m, do NEMA 42 s kroutícím momentem až 25 N·m. [11, 17]

K přeměně rotačního pohybu motoru na pohyb lineární používáme ocelové pohybové šrouby. Dle požadované přesnosti stroje volíme mezi použitím ocelových trapézových šroubů a bronzových matic nebo kuličkových šroubů s předepnutými maticemi. Při použití trapézových šroubů je nutné počítat s vůlí při změně směru otáčení a popřípadě ji vymežit. Matice kuličkových šroubů se pro tuto využití volí předepjaté, u nichž je možné mechanicky vymežit vůli. Pokud to situace dovoluje, je odborníky doporučeno i přes vyšší cenu volit šrouby kuličkové, jelikož se vyznačují vyšší přesností, nižším součinitelem tření a vysokou účinností. Mezi nevýhody, kromě vyšší ceny, patří také nutnost mazání a izolování sestavy od vnějších negativních vlivů jako jsou prachové částice či třísky. Jejich směrodatným parametrem je průměr šroubu, stoupání šroubovice, délka, třída přesnosti IT, způsob výroby či trvanlivost šroubu. Pro přenos pohybu po dlouhých osách je možné použít přenos přes ozubený pastorek a hřeben. Tato soustava je ale finančně velmi náročná a vyplatí se opravdu jen pro přesné stroje s dlouhými rozjezdy. [11, 14]

Spojení mezi hřídelí elektromotoru a pohybovým šroubem je realizováno dle vzájemné polohy os přes pružnou spojku, pokud jsou osy kolineární a součásti blízko u sebe. V ostatních případech je nutné použít převod ozubeným řemenem či jejich kombinace. [11, 14, 16]



Obr. 10 Kuličkový šroub s přírubovou maticí [16].



Obr. 11 Krokový motor NEMA 14 [17].

▪ Polohování os

Pro zajištění opakované přesnosti najíždění v hodnotách mikrometrů, jsou stroje vybaveny prvky odměřujícími polohu. Opakovanou přesností je myšleno, že rozměry prvního i například tisícího kusu budou identické. Odměřující prvky odesílají signály s informací o okamžité poloze diferenčnímu členu, který tyto signály ihned zpracuje a porovná okamžitou polohu s polohou cílovou. Nepřesné najíždění narušuje rozměrovou stálost obrobku a jeho přesnost je ovlivněna mnoha vnějšími faktory. Mezi hlavní faktory ovlivňující opakovanou přesnost najíždění patří tepelná roztažnost strojních částí, vůle v ložiscích a vedení a také pružné deformace. Charakteristickým parametrem odměřování je jeho základní inkrement, který definuje nejmenší možnou rozlišitelnou délku. Odměřování rozdělujeme dle způsobu snímání, druhu získané informace a druhu odměřovacího signálu.

Dělení dle způsobu měření se rozlišuje na přímé a nepřímé. U přímého odměřování jsou informace získávány pomocí lineárního snímače umístěného rovnoběžně s osou pohybu a je

snímána skutečná poloha stolu či suportu. Přímý snímač se většinou sestává z pevného pravítka a jezdce upevněného na posuvovou část dané osy. Rotační snímač používá pro určení polohy natočení kuličkového šroubu a nepřímo tedy určuje polohu přepočtem otáček vzhledem ke stoupání pohybového šroubu. Bývá upevněn přímo na konci pohybového šroubu nebo je možné využití zpětné vazby při použití AC servomotorů pro pohon jednotlivých os. [11]

Odměrovací signály dělíme na induktivní, magnetické, laserové a fotoelektrické. Induktivní snímače jsou dnes již překonány. Induktivní snímače byly užívány zejména u prvních NC strojů, kde nejjednodušším případem bylo orientování nástrojového revolveru. Magnetické snímače využívají magneticky tvrdé pravítka a jezdce který má v těle umístěné střídavě polované magnety. Jejich inkrement může být až 0,001 mm a jsou tedy vhodné i pro velmi přesné stroje. Fotoelektrické snímače využívají světelné paprsky, které svítí na pravítka. Je využívání metoda dělení Autodur či Diadur, kdy Autodur je zhotovení pravítka s vysoce reflektivními zlatými ryskami a matnými mezerami obvykle na ocelové nosiče. Metoda dělení Diadur je složena z extrémně tenkých vrstev chromu. Obvykle na nosiči ze skla či keramiky. Fotočlánky těchto metod zaznamenávají změny světelných podmínek a generují periodický signál, který je přenášen a zpracován v diferencním členu. Laserové odměřování pracuje na principu laserového Dopplerova metru. Tato metoda pracuje s vysokým rozlišením, přesností a její konstrukční začlenění je velice kompaktní, avšak zdroj a odrazecí zrcátko musí být velmi dobře chráněny, aby v jejich dráze nebyly přítomny nečistoty, které by mohly způsobit chyby měření.[11]

Získané informace mohou být absolutní v případě, kdy je poloha známá vůči referenčnímu bodu stroje, anebo inkrementální, kdy se daná informace o souřadnici vztahuje vždy vzhledem k poslední dosažené poloze. U inkrementálních systémů není zachována informace o poloze v paměti po přerušení proudu, a je tedy nutný zásah obsluhy, který zajistí najetí stroje do referenčního bodu. [11]

2.3.2 Vřetena frézovacích strojů

Vřeteno obráběcího stroje slouží pro upnutí nástroje či obrobku a dále mu předává hlavní pracovní pohyb, který je rotační. Charakteristické vlastnosti vřetena jako je tuhost, přesnost chodu, výkon, kroutící moment a pracovní otáčky se podílí na celkové výkonnosti obráběcího stroje. Na vřetena obráběcích strojů jsou kladeny vysoké nároky, jelikož přímo ovlivňují výsledné rozměry a tvary obrobku. Oproti konvenčním strojům je již nutné vymezení jakékoliv vůle vřetena ve vřeteníku a zároveň zachovat minimální tření. Vřetena běžných CNC vertikálních fréz obrábějících ocel většinu času pracují v rozsahu otáček 600-6000 1/min. V těchto vysokých otáčkách působí elektromotor a ložiska jako zdroje tepla, což může způsobit změnu rozměrů danou teplotní roztažností, je tedy žádoucí vřetena chladit. Moderní CNC stroje mají tedy hřídele vřeten vnitřně chlazená vzduchem či vodou, čímž snižují teplotu vřetena a prodlužují jeho životnost. Vřetena jsou poháněna elektromotory. K přenesení točivého momentu z motoru na vřeteno může být užito buď přímé spojení hřídelí spojkou, nebo za pomoci rotačních servopohonů, kdy je moment přenášen řemenovým převodem, šnekovým převodem či převodem ozubenými koly. Opět zde vznikají požadavky na krytování, aby nedocházelo k poškození třecích ploch vnikem cizích částic, či úniku provozních kapalin. Jelikož návrh vřetene a vřeteníku je konstrukčně, výpočetně a finančně velmi náročný. Nepřipadá v úvahu vyrobit vřeteno v hobby podmínkách. Jsou proto tedy v této oblasti užívány buď malá vřetena chlazená vodou či vzduchem, anebo jsou používány přímé frézky. [11, 18]

Nástroje jsou upínány do vřeten hobby strojů přes kleštiny. Upínací kleštiny jsou vyráběny v označení ER8 až ER50, kde číslo udává vnější průměr kleštiny. Upínací rozsah se pohybuje od 0,5 mm až po 2 mm. Pro regulaci otáček těchto vřeten jsou používány

frekvenční měniče, které jsou schopny za pomoci současné změny frekvence a napětí vstupujících do vřetena regulovat jeho otáčky.



Obr. 12 Vřeteno Teknomotor série DB [19].

2.4 Dostupná řešení na trhu

V této části jsou popsány vybrané stroje, jenž se dají na tuzemském či zahraničním trhu zakoupit a jsou vhodné zejména pro hobby užití. Nejedná se tedy o profesionální stroje. Jedná se především o malosériově vyráběné stroje. Společným rysem těchto strojů je konstrukce jako soustava nosící nástroj, což potvrzuje tvrzení z kapitoly 2.3, že hobby stroje jsou konstruovány zejména jako horní či dolní gántry.

▪ Frézka CNCH-4030-800W

Jedná se o dle vzhledu povedenou konstrukci typu dolní gántry s vodou chlazeným vřetenem a možností doplnění o čtvrtou osu. Výrobce garantuje polohovací přesnost 0,05 mm. Jedná se o český výrobek osazen kvalitními komponentami a tomu také odpovídá cena stroje.



Obr. 13 Frézka CNCH-4030 [20].

Tab. 1 Technické parametry frézky CNCH [20]

Technické parametry	
Pracovní plocha	400x300x80 [mm]
Výkon vřetena	800 [W]
Otáčky vřetena	3000-24000 [1/min]
Upínací kleština	ER-11
Vedení	Kombinace podepřených a broušených tyčí
Obráběné materiály	Dřevo a plast
Cena	87 900 Kč bez DPH

▪ Vevor CNC Machine

Jedná se o zástupce hobby CNC strojů nižší kvality, jež jsou dostupné na zahraničních webech jako je ebay, aliexpress či amazon za nízké ceny, čemuž ale odpovídá kvalita strojů. Obvykle jsou konstruovány z hliníkových profilů sešroubovaných k sobě. Vedení bývá zpravidla realizováno nepodepřenými tyčemi.



Obr. 14 Vevor CNC machine [21].

Tab. 2 Technické parametry frézky CNCH [21]

Technické parametry	
Pracovní plocha	600x395x70 [mm]
Výkon vřetena	1000 [W]
Otáčky vřetena	0-24000 [1/min]
Upínací kleština	neuveдено
Vedení	Broušené nepodepřené tyče
Obráběné materiály	Dřevo a plast
Cena	24 000 Kč

▪ CauCau Kompas H1000KIT

Firma CauCau je malá slovenská firma prodávající hobby i profesionální portálové stroje dobré kvality. Jejich stroje jsou většinou vybaveny vedením z podepřených tyčí a jsou tedy schopny pracovat v uspokojivých přesnostech pro hobby účely. Zejména tedy při obrábění dřeva. Dle zkušeností vlastníků nejsou tyto stroje vhodné pro frézování hliníků, jelikož přitom dochází k vzniku rezonancí a nepřesností. Obrábět hliník na tomto stroji lze tedy s malým nástrojem a velmi malou hloubkou záběru cca 0,2 mm.



Obr. 15 CauCau CNC frézka KOMPAS H1000HF [22].

Tab. 3 Technické parametry frézky CNCH [22].

Technické parametry	
Pracovní plocha	850x600x150 [mm]
Výkon vřetena	1500 [W]
Otáčky vřetena	6000-24000 [1/min]
Upínací kleština	ER11
Vedení	Podepřené tyče
Obráběné materiály	Dřevo a plast
Cena	68 600 Kč bez DPH

▪ Numco CNC router SHG 0404

Tuzemské stroje firmy Numco jsou skládány z kvalitních komponent, což se projevuje na kvalitě, ale i ceně strojů. Tyto stroje jsou vhodné jak pro hobby, tak i pro poloprofesionální užití. Tento stroj je oproti ostatním schopen obrábět hliníkové slitiny bez větších obtíží při užití optimálních řezných podmínek.



Obr. 16 Numco CNC router SHG0404 [23].

Tab. 4 Technické parametry frézky SHG0404 [23].

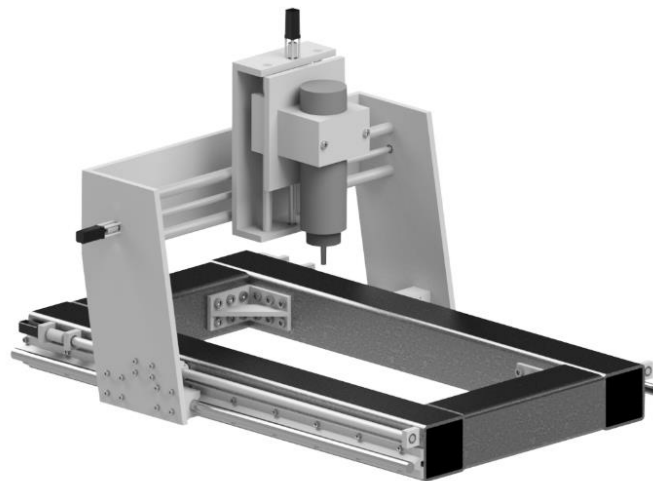
Technické parametry	
Pracovní plocha	400x400x100 [mm]
Výkon vřetena	1500 [W]
Otáčky vřetena	0-24000 [1/min]
Upínací kleština	ER16
Vedení	Podepřené tyče
Obráběné materiály	Dřevo, plast a hliník
Cena	220 000 Kč bez DPH

3 NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

V této části práce je popsán a odůvodněn výběr komponent a popis jejich implementace do stroje. Dále jsou zde analyticky či numericky vypočteny pohybové a tuhostní charakteristiky. Za účelem vypracování byly postupně vytvořeny tři koncepty rozdílných konstrukcí se zohledněním poznatků uvedených v druhé kapitole této práce. Tyto koncepty byly následně porovnány a dle výsledného zhodnocení byl vybrán koncept dále upravován a přetvořen na komplexní návrh.

3.1 Koncepty

- **Koncept I FDG**



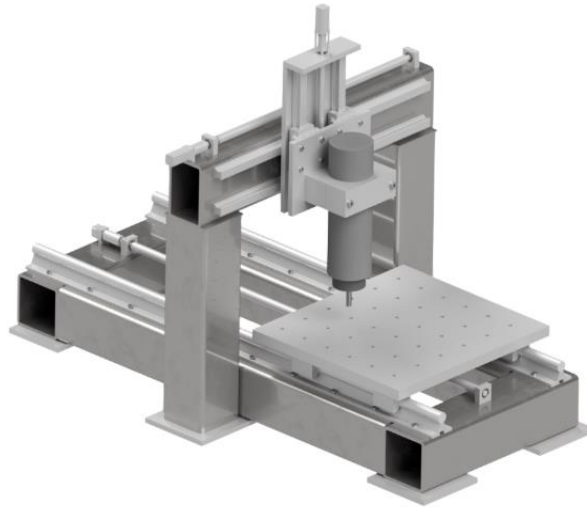
Obr. 17 Koncept I FDG

Tento koncept je konstruován ve stylu dolní gántry. Obdélníkový rám je tvořen uzavřenými čtvercovými profily, které jsou k sobě spojeny přes vyrobené ocelové úhelníky. Úhelníky tyto profily nejen spojují, ale také zajišťují jejich vzájemnou kolmost. Vedení je v ose X realizováno podepřenými tyčemi přišroubovanými z boku rámu. Vedení v ose Y je poté realizováno broušenými tyčemi, které jsou vetknuté v bočních deskách. Vedení osy Z je opět zajištěno dvěma broušenými tyčemi, jež jsou zde však vetknuté v deskách suportu. Veškerý pohyb je zde vytvářen krokovými motory uloženými na koncích os. Tento pohyb je přenášen na pojezd přes kuličkové šrouby a předepruté matice. Upínací stůl se závitovými dírami, jenž není na obr. 15 zobrazen, by měl být uložen na příčně uložených čtvercových profilech po délce celé konstrukce.

Pro zlepšení tuhosti konstrukce je možné čtvercové profily rámu po sešroubování svařit k sobě, avšak vzhledem k problémům svařovaných konstrukcí uvedeným v rešerši je nutné volit svary malých tloušťek a krátkých délek. Dále by ke zvýšení tuhosti přispělo jiné konstrukční řešení, a to spojení boční desky a vedení s možností vytvoření žebra na vyztužení boční desky.

Nevýhody této konstrukce spočívají ve slabé tuhosti osy Y způsobené tenkými nevyztuženými bočnicemi. Tento problém souvisí i s omezeným maximální výškou osy Z, jelikož se zvyšující se výškou bočnice bude tuhost soustavy klesat. Nelze tedy uvažovat velké rozjezdové vzdálenosti Z, a proto je tato konstrukce nevhodná vzhledem k vstupním parametrům stroje. Rám je spíše vhodný pro laserové či plazmové rezačky.

- **Koncept II FPS**

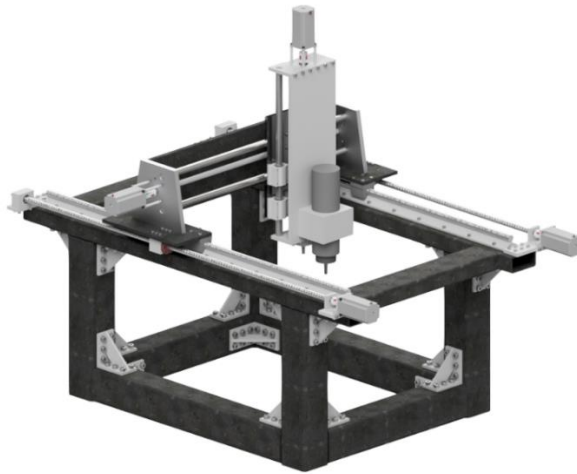


Obr. 18 Koncept FPS

Tento koncept má podobný systém pohybu kratších os Y a Z jako předchozí koncept FDG, ale v ose X není pohyb realizován pohybem ramen a nástroje, avšak podélným pohybem stolu. Pohybová energie je opět předávána krokovými motory na kuličkové šrouby, které přes předepnuté matice přenáší pohyb do jednotlivých strojních uzlů. Vedení osy X je také provedeno podobně jako v konceptu FDG, ale podepřené tyče jsou zatíženy shora, což je vhodnější než zatížení z boku. Osa Y je vedena kolejnicemi typu HG, jenž se vyznačují vyšší tuhostí a únosností oproti podepřeným tyčím. Osa Z je konstruována identicky jako na konceptu FDG. Vzájemné spojení profilů je realizováno svařováním a je tedy doporučeno soustavu po svaření tepelně zpracovat žíháním ke snížení pnutí.

Oproti konceptu FDG se jedná o tužší konstrukci, jenž bude schopna odolávat větším silám které budou při obrábění vznikat. Nevýhodou této konstrukce je nutnost menšího upínacího stolu vzhledem k velikosti stroje. Dále bude tento stroj dražší, co se týče výroby, jelikož je nutné soustavu tepelně zpracovat. Nákupní cena vedení v ose Y je též násobně dražší než často používané podepřené tyče. Jako další výdaj lze uvažovat nutnost zakrytí vedení osy X, aby bylo zabráněno vnikání nečistot na vodící plochy. Pro optimální pohyb osy X je též hobby staviteli experimentálně ověřen systém použití dvou kuličkových šroubů na osy, které jsou svým rozvorem vzdáleny více než 500 mm, čímž zamezíme vzpříčování stolu.

- **Koncept III FHG**



Obr. 19 Koncept FHG

V tomto konceptu je použita nepohyblivá soustava nosící nástroj. Spojení jednotlivých částí rámu je realizováno šroubovým spojením úhelníků a profilů. Pouze horní obdélník, který je tvořen z nižších a tenčích profilů, je z konstrukčních důvodů svařen v koutech. Na vedení osy X je opět užito podepřené vedení v kombinaci s kuličkovým šroubem. Osy Y a Z jsou vedeny nepodepřeny kalenými broušenými vodícími tyčemi. Ty jsou s malým přesahem uloženy v bočních deskách suportu. Pro vyztužení je mezi tyto desky vložena obdélníková deska. Ta bude zároveň sloužit pro uchycení napájecích kabelů vedoucích ke krokovým motorům. Jak je již nastíněno, krouticí moment bude realizován krokovými motory přes kuličkové šrouby až na pohyblivé supporty.

Nevýhodami tohoto řešení je například obtížnější manipulace s obrobkem a nároky na obrábění více stykových ploch. Dále jako slabý článek této sestavy působí podepřené tyče, jež mohou mít tendence se prohýbat a vytvářet tak nepřesnosti při obrábění.

Na základě srovnání a sumarizace výhod a nevýhod jednotlivých konceptů z hlediska vstupních požadavků, náročnosti realizace, finanční náročnosti a dostupnosti technologií užitých pro výrobu, je práce dále zaměřena na podrobný návrh stroje dle konceptu III FHG.

3.2 Návrh jednotlivých komponent

V této části budou následně rozpracovány konstrukční řešení zvoleného konceptu III FHG.

- **Rám**

Rám zvolené konstrukce odpovídá typu horní gántry, kdy inspirací byla průmyslovou portálovou frézou TYC FPPC 250/2, na níž jsem měl možnost pracovat. Počáteční rozměry profilů byly zvoleny 80x80x5 pro profily spodního rámu a stojen, dále pak profily 100x50x5 a 90x50x3 pro profily tvořící horní obdélník. Zavěření budou zajišťovat profily 90x50x3. Vzájemná poloha bude zajištěna vyrobenými úhelníky a deskami, které budou přišroubovány z boků profilů. Úhelníky jsou sešroubovány k částem rámu celkem osmi šrouby a desky deseti šrouby. Takto jsou realizovány spoje téměř všech částí rámu k sobě, s výjimkou profilů tvořící horní obdélník, jenž je pro efektivnější využití délky vedení svařen. Pokud by tato část nebyla svařována, tak by bylo nutné navrhnout užší úhelníky či zvolit jiný způsob spojení. Rámová konstrukce bude usazena na pryžové silnostěnné podložky, které budou tlumit vibrace přenášené do země.

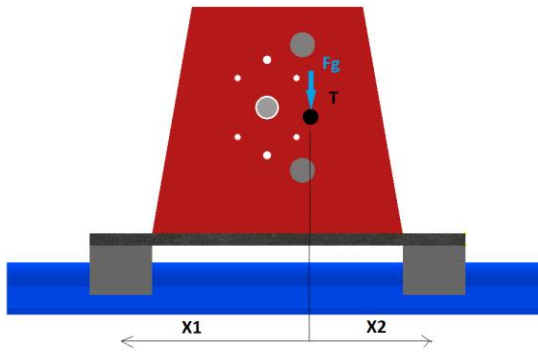
▪ Volba vřetena

Jak je již v první kapitole uvedeno, primárním účelem stroje bude obrábění dřeva, zároveň ale musí být stroj schopný obrábět lehké slitiny. Vzhledem k předpokládané tuhosti soustavy je proto do stroje zvoleno vřeteno s výkonem 2200 wattů. Tato vřetena disponují upínačem ER16-ER20. Pro účel stroje je to plně dostačující, avšak předpokládaný největší průměr používaných fréz bude 10 mm. Při rozhodování mezi vodou či vzduchem chlazeným vřetenem bylo nakonec zvoleno vodní chlazení, vzhledem ke skutečnosti, že vřeteno bude pracovat ve velmi prašném prostředí, jeho hlučnosti a nemožnost přehřátí při buzení nižších frekvencí. Bylo zvoleno vodou chlazené vřeteno Huanyang 2.2KW 220V CNC HY, které je nabízeno přímo s frekvenčním měničem. Tento měnič je schopen budit frekvenci 0-400 Hz, a tedy otáčky od 0-24000. Je však z charakteristiky tohoto typu motoru známo, že s klesající frekvencí klesá točivý moment a není tedy prakticky možné použití frekvence pod 100 Hz, což tedy upravuje pracovní rozsah otáček na 6000-24000 tisíc 1/min. Zároveň je nutné podotknout, že vřetena této konstrukce nebývají konstruovány s axiálním ložiskem pro záchyt axiální složky síly a není tedy vhodné tyto vřetena užívat k technologiím, kde na nástroj působí velká osová síla. Příkladem takové technologie může být vrtání. Jelikož se však nelze vždy obejít bez hloubení děr, je v tomto případě pro frézování kapes doporučeno volit sestup nástroje po šroubovici pro minimalizaci osová síly. Pro rozvod chladicí kapaliny vřetena bude vytvořen jednoduchý chladicí okruh složený z oběhového vodního čerpadla s průtokem minimálně 2,2 l·min⁻¹, výměníku tepla s ventilátorem a rezervoáru na vodu.

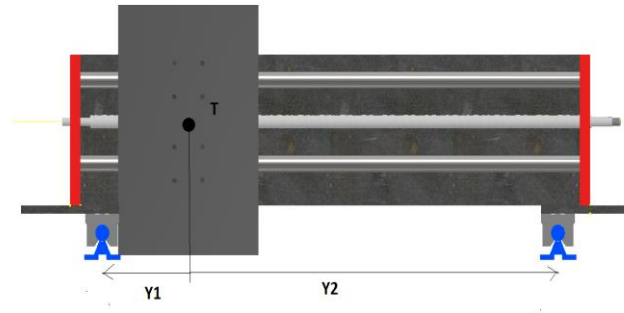
▪ Lineární vedení

Lineární vedení pro osy X je na stroji realizováno, hobby staviteli hojně využívanou a ekonomicky výhodnou, soustavou popřených tyčí. Při použití podepřených vedení na portálových frézkách, je nutné použití nejméně dvou vozíků na každé tyči, aby byl eliminován kroučící moment, jenž by mohl zapříčinit rozlomení vozíku. Průměr tyčí je určován dle povoleného zatížení na pojezdový vozík vedení. Navržená soustava pro osu X sestává z tyče průměru 20 mm a vozíku AG-OP-20 s nastavitelnou vůlí a dynamickou únosností 4800 N na jeden vozík. Pro přesný výpočet zatížení vozíku musíme provést silový rozklad a určit výsledné zatížení na jednotlivé vozíky od síly tíhové a síly vznikající od řezné síly působící na vřeteno.

Odhadovaná hmotnost soustavy, která je vedena vozíky v ose X vyčtená z programu Autocad inventor je 85 kg, z čehož 46 kg je hmotnost dílců, které se mohou pohybovat zároveň v ose Y a 39 kg je hmotnost dílců, jenž nebudou měnit svou polohu vůči ose Y v čase. Těžiště horního supportu není souměrně mezi vozíky a bude tedy jeden vozík na stejné kolejnici namáhán více než druhý. Tyto vzdálenosti byly taktéž vyčteny z již zmíněného programu. Zároveň bude rozložení tíhové síly ovlivněno pozicí suportu v ose Y. Ze znalosti statiky víme, že s klesajícím ramenem mezi podporou a silou, se reakční síla bude limitně blížit k hodnotě působící síly. Z logické úvahy lze tedy předpovědět, že největší tíhová síla, která může vzniknout bude působit na vozík číslo 2 či 4 v momentě kdy je suport v ose Y v koncovém bodě. Zatížení lineárních setů osy X bude řešeno pro přehlednost nejdříve pouze pro tíhovou silou a poté pro zatížení od řezné síly.



Obr. 20 náhled pozice těžiště X



Obr. 21 Náhled pozice těžiště Y

Lze určit tíhovou sílu jenž se nebude s měnit s polohou suportu:

$$F_{TS} = m_s \cdot g = 39 \cdot 9,81 = 383 \text{ [N]} \quad (3.1)$$

kde: m_s – hmotnost částí jenž nemění polohu v ose Y [kg]

g – tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

Tato síla se dle momentové a silové rovnováhy v ose X projeví na vozíku 2 (na obr. 20 vpravo) a 4 (na obr. 20 vlevo) jako:

$$F_{TS_2} = \frac{F_{TS} \cdot x_1}{2(x_1 + x_2)} = \frac{383 \cdot 165}{2(165 + 85)} = 127 \text{ [N]} \quad (3.2)$$

Tíhová síla působící na vozík 2 od suportu, když se nachází na koncovém bodě v ose Y:

$$F_{TD_2} = \frac{\frac{m_d \cdot g \cdot y_1}{(y_1 + y_2)^2} \cdot x_1}{(x_1 + x_2)} = \frac{\frac{46 \cdot 9,81 \cdot 558}{(558 + 154)^2} \cdot 165}{(165 + 85)} = 117 \text{ [N]} \quad (3.3)$$

kde: m_d – hmotnost dílců pohyblivých vzhledem k ose Y

x_i – vzdálenosti vazeb od působíště v ose X

y_i – vzdálenosti vazeb od působíště v ose Y

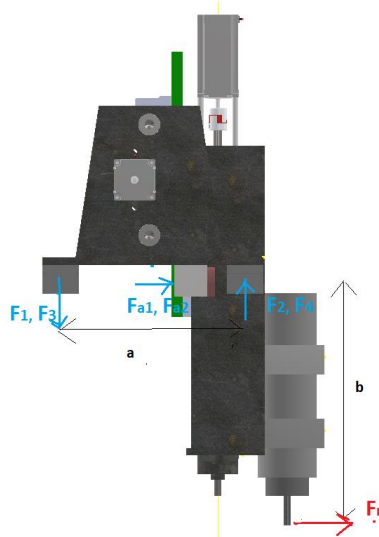
Výslední špičková tíhová síla působící na vozík je vyjádřena tímto vztahem:

$$F_{T_2} = F_{TS_2} + F_{TD_2} = 127 + 117 = 244 \text{ [N]} \quad (3.4)$$

Pro určení síly působící na lineární vedení od nástroje, je nejprve nutné znát velikost řezné síly působící na frézu. Uvažujeme tedy hodnotu 100 N viz vztah 3.31 a komentář pod ním.

Zatížení vedení osy X

Pro osu X je navržena čtveřice lineárních setů AG-OP-20-KS s dynamickou únosností 2020 N.



Obr. 23 Statický rozklad sil na vedení X

Reakční síly:

$$F_1 = -F_2 = F_3 = -F_4 \quad (3.5)$$

$$F_{a1} = F_{a2} = \frac{F_r}{2} = 50 \text{ [N]} \quad (3.6)$$

$$F_1 = \frac{F_r \cdot b}{2 \cdot a} = \frac{100 \cdot 314,5}{2 \cdot 250} = 63 \text{ [N]} \quad (3.7)$$

$$F_{cel} = |F_2| + |F_{T2}| = 307 \text{ [N]} \quad (3.8)$$

$$F_{cel} < C_{dyn} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Životnost [16]:

$$L = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot C_{dyn}}{f_W \cdot F} \right)^3 \cdot 50000 = \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 2020}{1,2 \cdot 307} \right)^3 \cdot 50000 = 8242 \cdot 10^3 \text{ [m]} \quad (3.9)$$

kde: L – nominální životnost

f_H – faktor tvrdosti

f_T – faktor teplota

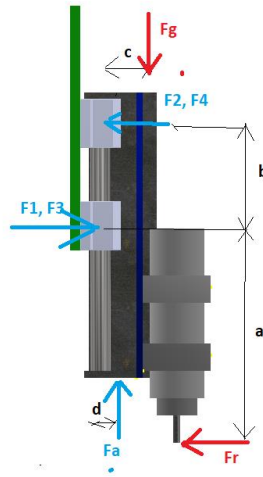
f_W – faktor zatížení

C_{dyn} – dynamická únosnost

P – nominální zatížení

Zatížení vedení osy Z

Pro osu Z je navržena čtveřice lineárních setů SC-30-UU s dynamickou únosností 1600 N.



Obr. 24 Statický rozklad sil na vedení Z

Reakční síly:

$$F_1 = F_3, F_2 = F_4 \quad (3.10)$$

$$F_a = F_g \quad (3.11)$$

$$F_2 = \frac{+F_r \cdot a + F_g \cdot c - F_a \cdot d}{2 \cdot b} = \frac{100 \cdot 318,5 + 33 \cdot 9,81 \cdot 0,045 - 33 \cdot 9,81 \cdot 0,022}{2 \cdot 155,5} = 103 \text{ [N]} \quad (3.12)$$

$$F_1 = \frac{F_r + 2 \cdot F_2}{2} = \frac{100 + 2 \cdot 103}{2} = 153 \text{ [N]} \quad (3.13)$$

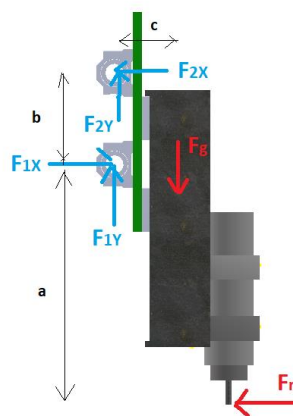
$$F_1 < C_{dyn} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Životnost [16]:

$$L = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot C_{dyn}}{f_W \cdot F} \right)^3 \cdot 50000 = \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 1600}{1,2 \cdot 153} \right)^3 \cdot 50000 = 33091 \cdot 10^3 \text{ [m]} \quad (3.14)$$

Zatížení vedení osy Y

Pro osu Y je navržena čtveřice lineárních setů SC-30-UU s dynamickou únosností 1600 N.



Obr. 25 Statický rozklad sil na vedení Y

Reakční síly:

$$F_1 = F_3; F_2 = F_4 \quad (3.15)$$

$$F_{1Y} = F_{2Y} \quad (3.16)$$

$$F_g = m_y \cdot g = 46 \cdot 9,81 = 451,3 \text{ [N]} \quad (3.17)$$

$$F_{2X} = \frac{F_g \cdot c + F_r \cdot a}{2 \cdot b} = \frac{451,3 \cdot 100,5 + 100 \cdot 393,5}{2 \cdot 150} = 282,4 \text{ [N]} \quad (3.18)$$

$$F_{1x} = \frac{F_r + 2 \cdot F_{2X}}{2} = \frac{100 + 2 \cdot 282}{2} = 332 \text{ [N]} \quad (3.19)$$

$$F_{1Y} = \frac{F_g}{4} = \frac{451,3}{4} = 113 \text{ [N]} \quad (3.20)$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1X}^2 + F_{1Y}^2} = \sqrt{332^2 + 113^2} = 350 \text{ [N]} \quad (3.21)$$

$$F_2 = \sqrt{F_{2X}^2 + F_{2Y}^2} = \sqrt{282,4^2 + 113^2} = 304 \text{ [N]} \quad (3.22)$$

$$F_1 < C_{dyn} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

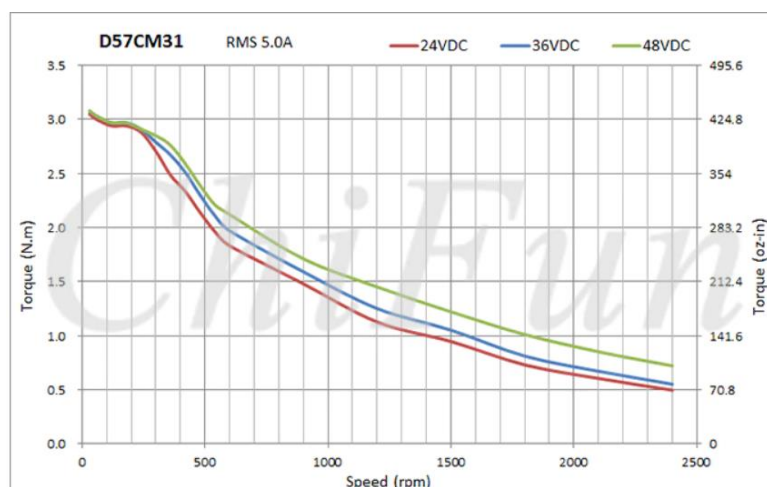
Životnost [16]:

$$L = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot C_{dyn}}{f_W \cdot F} \right)^3 \cdot 50000 = \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 1600}{1,2 \cdot 350} \right)^3 \cdot 50000 = 2764 \cdot 10^3 \text{ [m]} \quad (3.23)$$

Z vypočtených výsledných zatížení jednotlivých lineárních setů vzhledem k jejich dynamické únosnosti může vedení působit jako předimenzované. Je však třeba mít na paměti, že s klesajícím průřezem vodicích prvků roste jejich deformace a tím může vznikat vyšší nepřesnost daného stroje při obrábění.

▪ Lineární pohon

Pro uskutečnění pohybu jsou všechny osy osazeny stejnými krokovými motory NEMA 23 typu D57CM31 s nominálním kroutícím momentem 3 N·m. Tyto motory budou napájeny vyšším možným napětím, tedy 36 V DC, jelikož při tomto či vyšším 48 V napětí by neměla vznikat ztráta výkonu vlivem indukance, která se projevuje poklesem výkonu hlavně při buzení vyšších frekvencí. Zároveň je z grafu na obr. 22 zřejmé, že s vyšším napájecím napětím má motor lepší momentovou charakteristiku. Maximální otáčky motorů budou softwarově omezeny na hodnotu 500 1/min, jelikož při vyšších rychlostech motory pracují s příliš nízkým kroutícím momentem. V budoucích výpočtech je tedy užita nejnižší hodnota momentu což je 2,25 N·m.



Obr. 26 Průběh momentu krokového motoru D57CM31 v závislosti na otáčkách a napětí [27].

Na základě poznatků shrnutých v rešerši je nejdelší osa X osazena dvěma motory a šrouby, čímž bude převedeno křížení stolu při obrábění s následkem ohybového namáhání šroubů a vedení. Zbylé osy Y a Z disponují každá pouze jedním motorem a pohybovým šroubem. Pro zachování jednoduchosti jsou všechny osy osazeny kuličkovým šroubem s průměrem 16 mm se stoupáním 10 mm. Na šroubech jsou umístěny předepjaté matice uloženy a přišroubovány v pouzdrech, která jsou pevně spojena s pohyblivým suportem stroje. Přenos momentu z krokového motoru na kuličkový šroub je realizován pružnou spojkou, což je ideální volba vzhledem k přesnosti kuličkových šroubů. Zároveň budou tyto spojky schopny zachytávat menší radiální nesouososti mezi šroubem a motorem.

Při volbě kuličkových šroubů je nutné předem nadimenzovat jejich průměr tak, aby nemohlo dojít k meznímu stavu ztráty vzpěrné stability a zároveň, aby nebylo dosaženo rezonanční frekvence při otáčení šroubu. Frekvence otáčení, kdy dochází k maximální amplitudě výchylky klesá s délkou a průměrem šroubu. Nejkritičtěji tedy působí šrouby v ose X. Mezní stav vzpěrné stability nastává při velkém zatížení na dlouhé délce štíhlého tělesa. Z tohoto důvodu bude opět kontrolován pouze šroub v ose X. Vztahy pro výpočet jsou převzaty od výrobce Hiwin [16].

Maximální síla bude určena dle maximální síly, jež bude schopen vyvodit krokový motor na matici:

$$F_{a3Nm} = \frac{M \cdot 2 \cdot \eta \cdot \pi}{P} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0,88 \cdot \pi}{0,01} = 1659 \text{ [N]} \quad (3.25)$$

Kde: M – krouticí moment [N·m]

F_{a3Nm} – axiální síla [N]

P – stoupání závitu [m]

η – účinnost kuličkového šroubu [-]

Rezonanční frekvence byla odečtena z grafu poskytnutého výrobcem [16]:

$$n_k = 1600 \text{ [1} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.26)$$

$$n_{max} = n_k \cdot 0,8 = 1280 \text{ [1} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.27)$$

$$n_{motor} < n_{max}$$

$$500 < 1280$$

Kde: n_k - kritické otáčky

n_{max} - maximální dovolené otáčky

Kontrola vzpěrné stability [16]:

$$F_k = k_k \cdot \frac{(d_k \cdot 10^3)^4}{(L_k \cdot 10^3)^2} \cdot 10^5 = 2,05 \cdot \frac{(12,9 \cdot 10^3)^4}{(870 \cdot 10^3)^2} \cdot 10^5 = 7500 \text{ [N]} \quad (3.28)$$

$$F_{dov} = 0,5 \cdot F_k = 3750 \text{ [N]} \quad (3.29)$$

$$F_{a3Nm} < F_{dov}$$

$$1659 < 3750$$

kde: F_k – maximální teoretická dovolená axiální síla

k_k - koeficient závislosti uložení

d_k – průměr jádra hřídele

L_k – nepodepřená délka hřídele

F_{dov} – maximální dovolena provozní axiální síla

Navržený šroub lze považovat za téměř ideální volbu, jelikož hodnoty dovolené a zatěžující se od sebe příliš řádově neliší a není šroub příliš předimenzovaný. Jak již bylo uvedeno, maximální otáčky krokových motoru nepřejdou přes hodnotu 500 1/min. Zvolený šroub nebude tedy pracovat v rezonanční frekvenci.

▪ Bezpečnostní prvky

Kvůli možnému zničení zejména elektronických a mechanických částí stroje, je stroj osazen několika kontrolními bezpečnostními prvky, které při dosažení určitých parametrů zajistí zastavení chodu stroje a tím předejdou poškození.

- Aby bylo předejito problému, kdy bude stroj chtít přejet maximální rozjezdovou souřadnici osy, bude stroj vybaven jednoduchým pákovým spínačem. Ve spínači bude během chodu stroje neustále procházet elektrický proud a pokud dojde ke kontaktu spínače s dotykovou plochou, dojde k rozpojení spínače, přerušení proudu jdoucího do všech motorů a stroj přestane vykonávat pohyb. Tyto snímače musí být tedy zapojeny do série, aby došlo k zastavení všech os. Každá osa bude osazena dvěma spínači, na každém konci osy jeden. Aby nedošlo k rozdrčení spínače vlivem setrvačné energie soustavy, je vhodné spínač umístit na pružinu jenž umožní krátký posuv podél dané osy.
- Dále je třeba hlídat, zda dochází k chlazení vřetena. Zvyšování teploty má negativní vliv na vlastnosti vřetena a přehřátím může být nenávratně zničeno. Bude proto před vstupem do expanzní nádoby umístěn průtokový spínač, jenž bude dávat informaci, zda protéká či neprotéká kapalina a v případě delší prodlevy, kdy nebude protékat kapalina budou zastaveny krokové motory a vřeteno stroje.
- Jelikož je pohyb realizován pomocí kuličkových šroubů, je nutné zajistit polohu suportu v ose Z v případě výpadku proudu. Kuličkový šroub disponuje minimálním třením a není tedy samosvorný. V případě výpadku proudu dojde k přerušení napájení krokových motorů a ty přestanou vytvářet moment, který udržuje kuličkový šroub nehybný. Tato skutečnost je irelevantní v ose X a Y, ale v ose Z by vlivem výpadku proudu došlo k přesunu vřetena vlivem tíhového zrychlení do stolu a v nejhorším případě by mohlo dojít ke zlomení nástroje. Tento problém je řešen metodou náhradního zdroje, kdy bude vytvořen jednoduchý obvod se spínacím relé, které v případě přerušení proudu od zdroje k driveru motoru umožní průchod proudu od náhradního zdroje do driveru, čímž nedojde ke sjetí vřetena. Náhradní zdroj je realizován klasickou autobaterií o jmenovitém napětí 12 V.
- Jako poslední bezpečnostní prvkem na stroji bude manuální emergenci-stop tlačítko jenž při sepnutí obsluhou přeruší proud protékající motory a vřetenem. Toto tlačítko se užívá na všech CNC strojích pro nouzové zastavení při hroící kolizi. Příkladem může být přejezd nástroje, kdy může dojít ke kolizi mezi nástrojem a upínačem.

3.3 Řídicí software a elektronické části stroje

Jak může být zřejmé z teoretické části, bude pro řízení stroje užít program Mach3. V této části bude nastíněn proces zapojení jednotlivých částí do oddělovací desky. Jako deska bude užita CNC IO board, jenž disponuje zapojením až čtyř motorů a je vybavena spínacími relé.

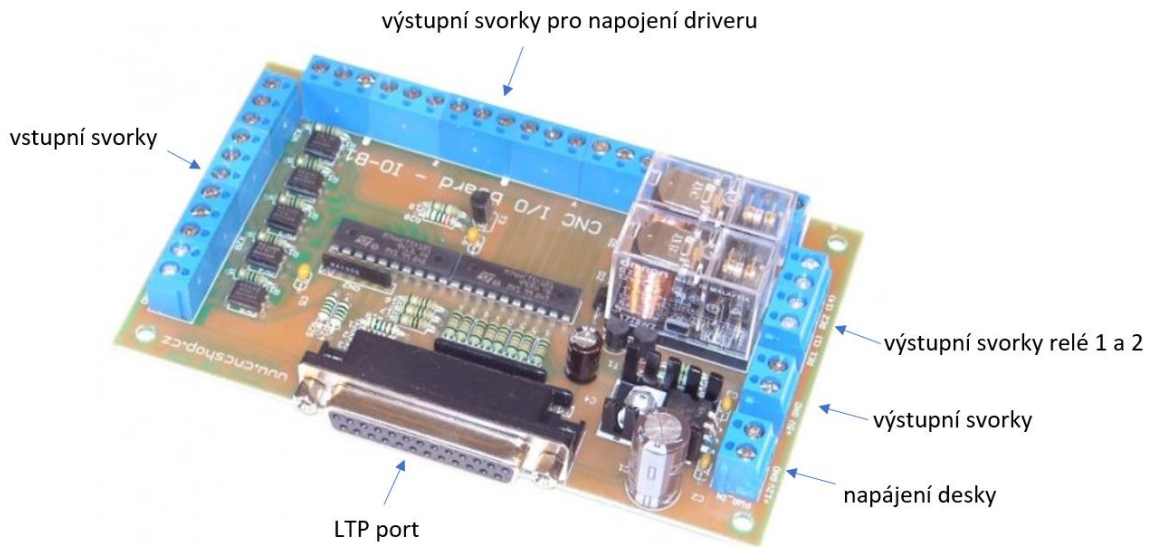
Oddělovací deska je součástí spojující všechny elektronické části frézky do sebe. Přenáší informace z řídicího systému přímo do součásti, na níž je daná informace směřována. Samotná deska je většinou napájena přes USB port napětím 5 V. Pro komunikaci s počítačem je na desce umístěn LPT port. Dále je deska osazena mnoha dalšími svorkami umístění vodičů od motorů, frekvenčního měniče vřetena, ochranných prvků.

Ačkoliv se to může zdát z počátku složité, je zapojení driverů a ostatních součástí vcelku jednoduché, jelikož manuál k řídicímu systému Mach3, mimo jiné, popisuje správně připojení komponent k oddělovací desce. Správně zapojení driverů do oddělovací desky je zobrazeno v příloze číslo 1. Při navrhování se vyskytl problém s připojením driveru k desce, jelikož osa X je osazena dvěma krokovými motory a každý má svůj vlastní driver. Po následné analýze problému byla objevena dvě možná řešení. Jedním řešením je použití desky pro čtyři krokové motory, kdy se předpokládá, že čtvrtý motor bude pohánět rotační osu. Po zapojení do druhého motoru na ose X stačí v řídicím systému nastavit, že na výstup rotační osy mají být posílány tytéž signály, co jdou do prvního zapojeného motoru. Druhým a jednodušším řešením tohoto problému je napojení obou driverů do jedné výstupů oddělovací desky. Jelikož stroj není zatím realizován, tak nelze usoudit jaká z variant se zdá vhodnější. Proto bude proto stroj navrhnout tak, aby bylo možné vyzkoušet obě možnosti.

Dále bude na desku připojen frekvenční měnič, a to konkrétně na spínací relé. Otáčky vřetena budou řízeny ručně a deska bude pouze posílat signál o zapnutí či vypnutí vřetene. Tato informace bude odeslána vždy při zaznamenání funkce M3, M4 či M5 v aktuální větě programu.

Co se týče ochranných prvků, tak koncové spínače zapojené v sérii jsou jednoduše napojeny na vstupní svorky 1 a 2 a při jejich sepnutí dojde k zastavení krokových motorů a vřetena. Bezpečnostní tlačítko emergencí stop je také pouze napojeno na vstupní svorky 1 a 2 a při sepnutí dojde ke stejnému efektu jako u sepnutí koncového snímače. Detailní zapojení je rozkresleno v manuálu na webu, jenž poskytuje prodejce desky. Průtokový spínač, jenž kontroluje chod čerpadla a tím tedy chlazení vřetene bude připojen k relé na oddělovací desce. Pokud spínač vyhodnotí, že neprochází proud vody, bude relé rozepnuto a stroj ihned přestane pracovat.

Kromě koncových snímačů může být stroj osazen i referenčními snímači pro možnost referování polohování jednotlivých os. Tím zajistíme při každém zapnutí stroje stejnou polohu supportu vůči absolutnímu souřadnému systému. Jelikož je však navrhovaný stroj určen zejména pro jednodušší série a zároveň nebude vybaven zpětnovazebním odměřovaným, není referenční spínač součástí návrhu tohoto stroje.



Obr. 27 oddělovací deska CNC IO [28].

3.4 Výpočet charakteristik stroje

Kromě rozsahu jednotlivých os jsou dalšími parametry, jež prvotně popisují obráběcí stroj řezné a posuvové rychlosti, jejich zrychlení či obráběcí výkon. V této podkapitole budou určeny tyto parametry stroje, které vychází z parametrů komponent zvolených v předchozích kapitolách. Tyto hodnoty je nutné znát pro správnou konfiguraci systému řídicího systému Mach3. Je proto nutné zjistit maximální zrychlení jednotlivých os, maximální posuvovou rychlost a počet pulzu na jednu otáčku KM.

- **Řezné podmínky**

Maximální možná řezná síla

$$M_{kmax} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2200}{2 \cdot \pi \cdot \frac{20000}{60}} = 1,05 [N \cdot m] \quad (3.30)$$

$$F = \frac{M_{kmax}}{\frac{D_{min}}{2}} = 525 [N] \quad (3.31)$$

Maximální možná řezná síla je, dle předběžných simulací v programu Ansys 2021, příliš velká vzhledem k tuhosti stroje. Maximální dovolená hodnota pro řezné síly je pro koncept stanovena s ohledem na data z předběžných numerických simulací zvolena na 100 N. Přesnou dovolenou hodnotu je třeba změřit přímo na stroji a určit vzhledem k požadované přesnosti stroje. S ohledem na tento parametr byly zvoleny následující obráběcí parametry.

Jako Nástroj uvažujeme dvoubřitou frézu o průměru 10 mm, jelikož je vhodná jak pro frézování dřeva, tak i hliníku.

průměr nástroje D	10 mm
řezná rychlost V_c	$500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
úhel stoupání šroubovice	30°
posuv na zub f_{zub}	0,023
počet zubů z	2
úhel nastavení hlavního ostří κ	90°
úhel posuvového pohybu θ	90°
úhel čela γ	12°
hloubka záběru A_p	2 mm
šířka záběru A_e	10
materiál	hliníková slitina
měrný řezný odpor K_{c1}	900 Mpa
exponent vlivu tloušťky třísky x	0,75

Tab. 1 řezné podmínky a parametry nástroje

Výpočet řezné síly [1]:

Jmenovitá tloušťka třísky:

$$h_D = \sin(\kappa) \cdot \sin(\theta) \cdot f_{zub} = \sin(90^\circ) \cdot \sin(90^\circ) \cdot 0,023 = 0,023 \text{ [mm]} \quad (3.32)$$

Jmenovitá šířka třísky:

$$b_{Di} = \frac{A_p}{\sin(\kappa)} = \frac{2}{\sin(90^\circ)} = 2 \text{ [mm]} \quad (3.33)$$

Jmenovitý průřez třísky pro i-tý zub:

$$A_{Di} = h_D \cdot b_{Di} = 0,023 \cdot 2 = 0,046 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.34)$$

Počet zubů v záběru:

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{\frac{360^\circ}{z}} = \frac{180^\circ}{\frac{360^\circ}{2}} = 1 \quad (3.35)$$

Měrná řezná síla:

$$K_C = \frac{K_{c1}}{h_D^{1-x}} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right) = \frac{900}{0,023^{1-0,75}} \cdot \left(1 - \frac{12}{100}\right) = 2034 \text{ [Mpa]} \quad (3.36)$$

Řezná síla:

$$F_C = \sum_{i=1}^{n_z} K_C \cdot A_{Di} = 2034 \cdot 0,046 = 93,6 \text{ [N]} \quad (3.37)$$

▪ **Potřebný výkon vřetene:**

$$P = M_k \cdot \omega = F_C \cdot \frac{D}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = F_C \cdot \frac{D}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{V_c}{\pi \cdot D \cdot 60} = F_C \cdot V_c = 468 \text{ W} \quad (3.38)$$

Výkon námi zvoleného vřetene je dostatečný a bylo by možné pracovat s větší hloubkou záběru z hlediska výkonu vřetene. Avšak se zvyšující se hloubkou bude růst síla působící na soustavu a mohly by vznikat příliš velké průhyby ve vedení stroje, což by zapříčiňovalo výrobní nepřesnost na obrobku. Výkon obrábění nebude u tohoto stroje tedy záviset na výkonu vřetene, nýbrž na tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek.

▪ Rychlosti a zrychlení daných os

Pro výpočet rychlostí jsou v tomto případě podstatné zejména pracovní otáčky krokových motorů a stoupání použitých kuličkových šroubů. Pro následný výpočet zrychlení bude nutné odhadnout celkovou hmotnost pohybujících se součástí na dané ose. Všechny osy jsou osazeny totožnými krokovými motory a kuličkovými šrouby, které se odlišují pouze v délce. Proto budou maximální posuvové rychlosti ve všech třech osách stejné.

Kuličkový šroub má stoupání 10 mm a při otočení o jednu otáčku dojde k posunutí matice o 10 mm. Při provedení součinu maximálních otáček a stoupání šroubu získáme maximální hodnotu posuvu v $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

posuvová rychlost:

$$f_X = f_Y = f_Z = P \cdot n_{motor} = 10 \cdot 500 = 5000 \text{ [mm}\cdot\text{min}^{-1}] \quad (3.39)$$

kde: P – stoupání šroubu

n_{motor} – maximální otáčky krokového motoru

Posuvová rychlost v obráběcí rovině XY:

$$f_{maxXY} = \sqrt{f_X^2 + f_Y^2} = \sqrt{5000^2 + 5000^2} = 7071 \text{ [mm}\cdot\text{min}^{-1}] \quad (3.40)$$

Posuvová rychlost v prostoru:

$$f_{maxXY} = \sqrt{f_X^2 + f_Y^2 + f_Z^2} = \sqrt{5000^2 + 5000^2 + 5000^2} = 8660 \text{ [mm}\cdot\text{min}^{-1}] \quad (3.41)$$

Vypočtená hodnota nám uvádí maximální posuvovou rychlost při obrábění, jelikož v tuto chvíli je třeba stabilní a silný krok motoru. Kdežto při přejíždění supportu rychloposuvem neklade soustava téměř žádný odpor proti pohybu a nehrozí tedy ztráta kroku. Je možné na rychloposuv užít otáčky nad 500 1/min, avšak experimentálně doporučená maximální hodnota je 1500 1/min.

Dynamiku stroje určuje parametr zrychlení. To lze určit na základě druhého Newtonova zákona, do kterého v našem případě vstupuje odhadnutá hmotnost součástí a axiální síla (3.12), kterou vyvodí kroutící moment na matici. Axiální síla bude však v tomto případě nižší než při výpočtu bezpečnosti šroubu, jelikož je řešena průměrná hodnota zrychlení, a proto pracujeme s průměrným kroutícím momentem v pracovních otáčkách. Odhad hmotnosti je realizován odečtem hmotnosti z programu autocad inventor 2022 v němž je stroj navrhován. Odhady jsou zapsány v následující tabulce 1.

Tab. 1 Hmotnosti částí stroje.

Hmotnost součástí pohybujících se po dané ose	Hmotnost součástí pohybujících se po dané ose [Kg]
Osa X	85
Osa Y	46
Osa Z	33

Tab. 2 Odhadované hmotnosti supportů stroje

$$F_{a2,25Nm} = \frac{M \cdot 2 \cdot \eta \cdot \pi}{P} = \frac{2,25 \cdot 2 \cdot 0,88 \cdot \pi}{0,01} = 1244 \text{ [N]} \quad (3.42)$$

Zrychlení v ose X:

Osa X je vybavena dvěma KM a lze tedy očekávat nejvyšší zrychlení v této ose. Do výpočtu navíc vstupuje řezná síla působící na nástroj při frézování. Za tuto sílu bude dosazena hodnota 100 N viz vztah 3.31 a jeho komentář.

$$F = m \cdot a \rightarrow a = \frac{F}{m} \quad (3.43)$$

$$a_X = \frac{2 \cdot F_a - F_c}{m_X} = \frac{2 \cdot 1244 - 100}{91} = 26,2 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3.44)$$

Zrychlení v ose Y:

$$a_Y = \frac{F_a - F_c}{m_Y} = \frac{1244 - 100}{46} = 24,9 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3.45)$$

Zrychlení v ose Z:

Do zrychlení osy Z nevstupuje řezná síla jako u předchozích dvou případů, ale bude zde působit tíhová síla supportu.

$$a_Z = \frac{F_a - F_g}{m_Z} = \frac{1244 - 9,81 \cdot 33}{33} = 27,9 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3.46)$$

Zrychlení nástroje v obráběcí rovině XY:

$$f_{maxXY} = \sqrt{a_X^2 + a_Y^2} = \sqrt{26,1^2 + 24,9^2} = 36,1 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3.47)$$

Zrychlení nástroje v prostoru:

$$f_{maxXY} = \sqrt{f_X^2 + f_Y^2 + f_Z^2} = \sqrt{26,1^2 + 24,9^2 + 36,1^2} = 45,66 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3.48)$$

Moderní KM v reakci na jeden puls natočí rotor o $1,8^\circ$. Samy tedy z principu konstrukce rozdělují jednu otáčku na 200 kroků. Tato hodnota je však pro CNC stroj nepoužitelná, jelikož by stroj pracoval s velkým posuvovým inkrementem. Pro řešení tohoto problému je schopen driver krokového motoru každý jeden krok rozdělit až na 16 mikrokroků. Mikrokrokováním také dosáhneme hladšího chodu KM. Volím proto mikrokrokování 1/16 a dojde tedy k rozdělení každého kroku KM na 16 mikrokroků. Jelikož všechny osy jsou osazeny stejnými KM s kuličkovými šrouby spojeny přes pružnou spojku, platí výpočet pro všechny osy.

Minimální posuvový přírůstek:

$$\Delta x = \frac{P}{k_{motor}} \cdot k_{mikro} = \frac{10}{200} \cdot \frac{1}{16} = 3,125 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]} \quad (3.49)$$

kde: k_{motor} – počet pulzů KM na jednu otáčku

k_{mikro} – zvolené rozdělení kroků driverem

Počet kroků na pro posun 1 mm:

$$S_{pu} = \frac{1}{\Delta x} = \frac{1}{3,125 \cdot 10^{-3}} = 320 \text{ [krok} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (3.50)$$

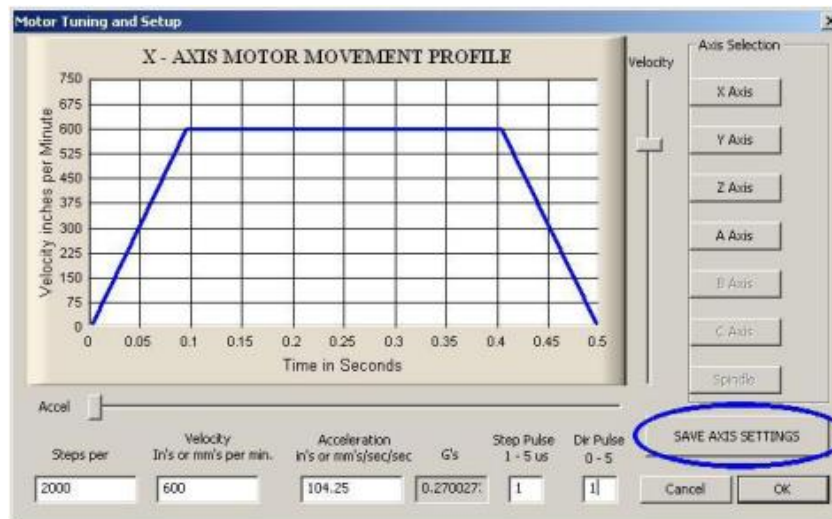
Počet kroků na otáčku:

$$S_{pr} = \frac{k_{motor}}{k_{mikro}} = \frac{200}{\frac{1}{16}} = 3200 \text{ [krok} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (3.51)$$

Maximální počet pulsů za sekundu:

$$P_{max} = n_{motor} \cdot Spr = \frac{500 \cdot 3200}{60} = 26667 [Hz] \quad (3.52)$$

Hodnoty jednotlivých posuvů, zrychlení, počtu kroků na 1 mm a počtu kroků na jednu otáčku byly vypočteny za účelem kalibrace posuvové soustavy při zprovoznování stroje. Hodnoty jsou při ožívování stroje zapisovány do okna na obr. 29. Maximální počet pulzů byl spočítán pro ověření, zda je PC s minimálními požadavky pro provoz Mach3 vhodné pro provoz navrhované frézky. Výrobce systému Mach3 garantuje, že PC s minimálními požadavky je schopno generovat až 35 000 pulzů za vteřinu pro současné až 6 os. Pro navrhovaný stroj tedy vyhovuje PC s minimálními požadavky.



Obr.29 Tabulka pro kalibraci pohybu os [24].

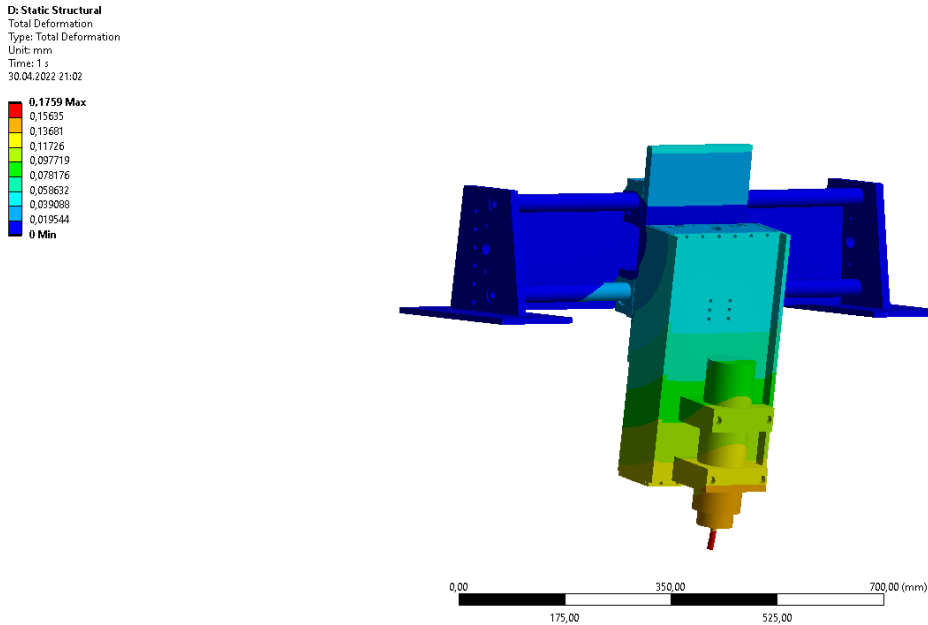
3.5 Numerická simulace výchylky vřetena při obrábění

Před samotnou realizací stroje je vhodné provést odhad deformace jeho částí vznikajících vlivem řezných sil. Tyto deformace mají přímý vliv na přesnost a jakost obráběných ploch. Jelikož do procesu obrábění vstupuje mnoho proměnných, je ve výsledku stejně nutné maximální dovolené parametry obrábění určit při reálných testech na stroji. Numerická simulace nám dává pouze předběžný odhad toho, jak bude možné stroj zatěžovat a jaké u toho budou vznikat deformace.

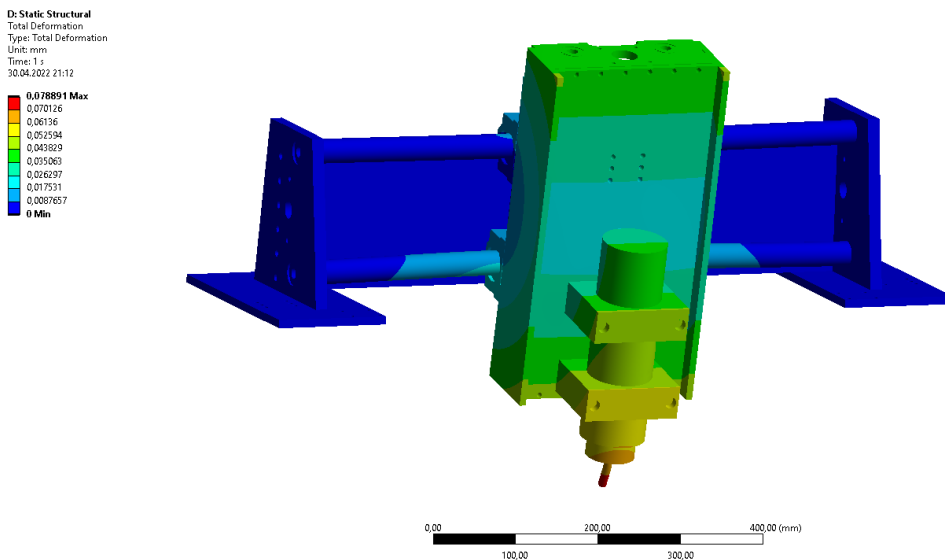
Numerická simulace MKP bude provedena ve výpočetním programu Ansys 2021 při zatížení vřetena silou 100 N, což odpovídá řezné síle vzniklé při obrábění dle parametrů uvedených v předchozí části práce. Zátěžná síla bude umístěna na hranu nástroje ve vřetenu.

Budou provedeny celkem čtyři simulace, kdy jedním parametrem bude směr působící síly a druhým délka vyložení vřetena. Síly budou orientovány nejdříve podél osy X poté podél osy Y. Simulace bude nejdříve probíhat s vysunutím osy Z do nejzazšího bodu a poté s vysunutím Z do minimální hodnoty vyložení vřetene.

Jelikož simulace byly prováděny na výukovém PC a nikoli výpočetném, bylo nutné experimentovat s velikostí jednoho elementu mřížky do doby, než došlo k hlášení chyby výpočtu z nedostatku výpočetní paměti. Výsledná velikost elementu je 3 mm pro všechny části kromě bočnic, vyztužovací desky a desek pro usazení na vozíky osy X, kde byla použita velikost elementu 5 mm. Model kromě řezné zatěžující síly obsahuje i zahrnutí tíhové síly. Na obr. 30 lze pozorovat výchylku při maximálním vyjetí vřetene, kdežto na obr. 31 při minimálním vysunutí. Další výsledky lze vidět v příloze 2.



Obr. 30 Průhyb vřetene při zatížení 100 N.



Obr. 31 Průhyb vřetene při zatížení 100 N.

Výsledky simulace lze považovat za uspokojivé, jelikož maximální výchylka pořád spadá do hrubovacího přídávku na obrábění. Po posledním měření přišla otázka, co je kritickým místem dané sestavy. Po několika dalších simulacích bylo zjištěno, že kritickým místem jsou vodící tyče v ose Y. Při simulaci, kdy byly dané tyče konfigurovány jako absolutně tuhé, došlo k průhybu pouhých 0,04 mm při maximálním vyložení vřetene a zatížení 100 N. Pokud by byla požadována vyšší ohybová tuhost suportu, je jednou z možností zvětšení průměru vodících tyčí osy Y, popřípadě vedení dané osy realizovat jiným způsobem. Možnou úpravou by mohlo být využití pohyblivého stolu v ose Z a nepohyblivého vřetena v této ose. Tento návrh by pravděpodobně pracoval s menšími průhyby. Pro vstupní požadavky práce je však hodnota dosažená při užití pevného stolu a pohyblivého vřetena dostačující.

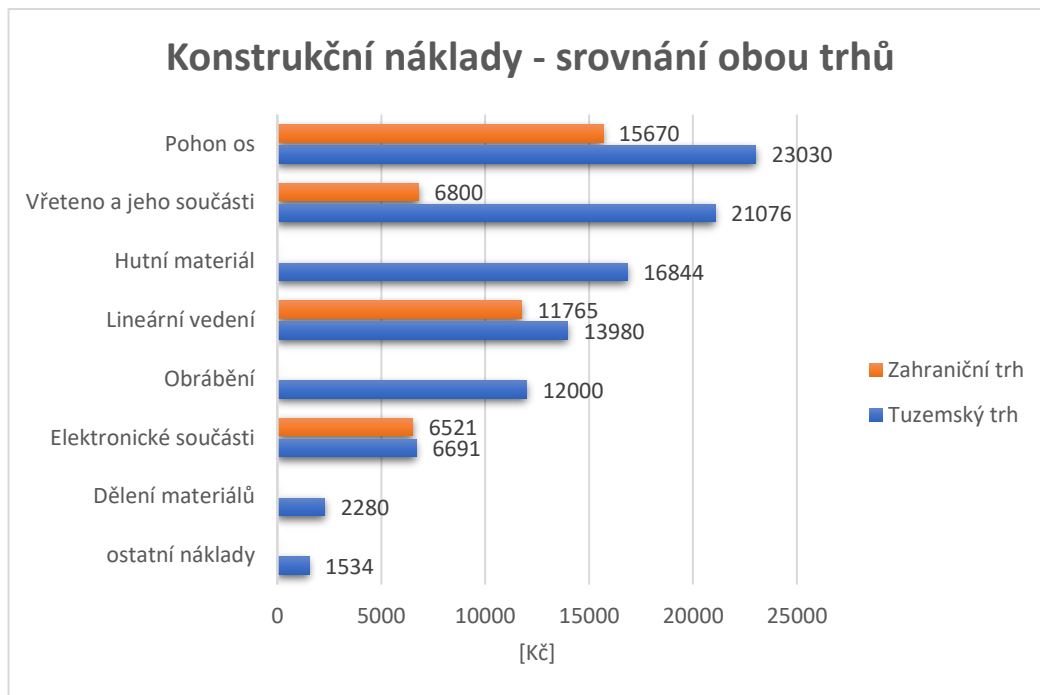
4 KALKULACE CELKOVÝCH NÁKLADŮ NA VÝROBU

Jelikož je konstrukční návrh cílen pro realizaci v hobby prostředí, tak v tomto důsledku bylo žádoucí užití co nejvíce možných normalizovaných součástí. Ekonomickou náročnost realizace stroje dále může snižovat použití součástí zakoupených na zahraničních webech nebo bazarech. Na zahraničních webech kupříkladu amazon.de, ebay.com či AliExpress.com lze zakoupit potřebné díly druhé jakosti s úsporou nákladů až do výše 75 % oproti českému trhu. Tyto úspory jsou dle doporučení zkušenějších hobby stavitelů vhodné provádět pouze co se týče mechanických částí stroje, jako jsou pohybové šrouby či valivá vedení. Nákup elektronických součástí jako například krokových motorů, driverů motorů a vřeten je již větším riskem, kdy součásti častěji nesplňují předepsané požadavky.

Ve výsledné ceně jsou započteny náklady na nákup veškerých komponent pro realizaci stroje. Tedy hutních materiálů, elektronických součástí, vodících prvků, spojovacích prvků, nástrojů, softwarových licencí, ale také ostatních výdajů jako jsou například antikorozi barvy. Dále je v ceně zahrnuta naceněná kooperace výroby některých částí konstrukce. V kooperaci se předpokládá obrábění čel profilů rámu, frézování ploch pro uložení lineárního vedení a frézování některých stykových ploch. Zahrnuta je i cena dělení materiálu laserovým a plazmovým paprskem. Do nákladů nejsou zahrnuty náklady na obrábění dílů, které je možné opracovat metodami vrtání, soustružení, sváření, pilování či ruční řezání. Vzhledem ke skutečnosti, že tyto technologie má autor k dispozici bezplatně. Podrobnější rozpis viz příloha 3. Jednotlivé ceny komponent byly následně rozděleny do několika základních skupin a zobrazeny v tabulce č. 3 a obrázku č. 32. Z tabulky č. 2 lze vypočítat, že při zahrnutí zahraničního trhu vznikne nemalá úspora financí zejména při nákupu vřeten a krokových motorů. Ceny vřeten však na českém trhu výrazně klesají s jejich nominálním výkonem, kdežto na zahraničních trzích se ceny výhodných setů s klesajícím výkonem příliš nemění. Grafické srovnání cen na jednotlivých trzích viz obrázek č. 32.

Tab. 2 Ceny jednotlivých skupin položek.

Položky\Typ trhu	Český trh [Kč]	Zahraniční trh [Kč]
Ostatní náklady	1534	-
Dělení materiálů	2280	-
Elektronické součásti	6691	6521
Obrábění	12000	-
Lineární vedení	13980	11765
Hutní materiál	16844	-
Vřeteno a jeho součásti	21076	6800
Pohon os	23030	15670
Celkem	97435	73414



Obr.32 Grafické znázornění nákladů jednotlivých částí stroje.

Při požadavku na snížení nákladů je jednou z možností pořízení slabšího vzduchem chlazeného vřetena, čímž dojde k úspoře nejen za samotné vřeteno, ale také tím odpadá nákup příslušenství pro chlazení vřetena. Dále je možné snížit náklady pořízením obyčejných nepředepnutých matic, kde je výrobcem udávána maximální vůle 0,05 mm, což by mohlo být pro určité aplikace stále dostačující. Na obrázku 35 je vyobrazen render finálního návrhu stroje.



Obr. 35 Finální verze návrhu

ZÁVĚR

Primárním cílem bakalářské práce byl konstrukční návrh frézky pro hobby účely a cenová kalkulace možné realizace tohoto návrhu. V první části byl proveden popis problému a určeny vstupní parametry návrhu. Druhá kapitola se zabývala teoretickým shrnutím o funkci, konstrukci a řízení frézovacích strojů a jejich hlavních komponent. Na konci druhé kapitoly byla provedena stručná analýza dostupných strojů na českém a zahraničním trhu. Třetí část práce se již zabývala samotným návrhem jednotlivých částí stroje. Volené komponenty byly vždy navrhovány s ohledem na rešerši a vstupní parametry navrhovaného stroje.

Při návrhu stroje byly nejprve vytvořeny tři koncepční návrhy, které se více či méně liší hlavně v konstrukci rámu, pohyblivých suportů a výrobních technologií. Tyto koncepty byly následně zhodnoceny dle výhod a nevýhod dané konstrukce vzhledem k vstupním parametrům. Koncepční návrh, který byl vyhodnocen jako nejvhodnější byl poté hlouběji rozpracován a přetvořen na komplexní návrh funkčního stroje. V dalších podkapitolách třetí části byly vybírány komponenty s ohledem na výslednou bezpečnost, životnost, tuhost, ale i jednoduchost montáže dané komponenty v dílenských podmínkách. Některé prvky jako je vřeteno, či krokové motory se mohou zdát příliš naddimenzované vzhledem k výpočtům, které určují potřebné výkony a momenty. Tyto komponenty jsou však takto zvoleny z technologických a ekonomických důvodů. Kromě návrhu mechanických částí stroje je v třetí kapitole též popsána volba hardwarových komponent a elektronického příslušenství pro stavbu navrženého CNC stroje. Dále jsou uvedeny bezpečnostní prvky a jejich zapojení do silového obvodu CNC stroje, které zajišťující bezpečný chod stroje.

Poslední část třetí kapitoly popisuje prováděné numerické simulace metodou konečných prvků. Tyto simulace umožní analyzovat kritická místa daného návrhu ještě před jeho realizací a zároveň poskytují určitý odhad, s jakými průhyby a deformacemi bude stroj během obrábění pracovat.

Čtvrtá kapitola zobrazuje odhadovaný výpočet nákladů na výrobu navržené frézky. Do ekonomické náročnosti stroje se znatelně promítlo zvýšení ceny hutních materiálů o více než 80 % v posledních měsících, a proto může výsledná cena stroje působit jako příliš vysoká v porovnání se stroji komerčními. Při užití zahraničního trhu dojde k úspoře nákladů cca 25 % při objednání dílů od ověřených zahraničních prodejců. Největší úspora při užití zahraničního trhu je na pořízení vřetena a krokových motorů. Zajímavým paradoxem je, že nepodepřené vodící tyče jsou na zahraničních trzích poříditelné pouze za cenu vyšší než u většiny prodejců na tuzemském trhu. Vzhledem k výše uvedenému nebyla úspora, co se tyče lineárního vedení tak výrazná.

Návrh tohoto stroje byl pro mne prvním větším návrhem jakéhokoliv stroje a jelikož zatím nebyla realizována stavba, nelze tedy popsat jeho reálné parametry. Konečný model má tedy rozjezdy nástroje X/Y/Z v hodnotách 730x375x180 mm a váhou 250 kg. Navržený stroj by měl být schopen hladce obrábět dřevo, plasty, balsu, ale také s dostatečnou přesností hliník. Konstrukce dovoluje při pár menších úpravách přidělat vodní chlazení obrobků. Taktéž je konstrukce připravena pro možné doplnění o čtvrtou osu a pátou osu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
 2. BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II – 1. díl*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8
 3. Frézování. *Strojírenská technologie* 3. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, s. 53-71. ISBN 80-7183-337-1.
 4. Strojírenství. *ELUC.cz* [online]. Olomoucký kraj, 2014 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1824>
 5. ŠTULPA, Miloslav. *CNC: obráběcí stroje a jejich programování*. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 126 s. : il. (některé barev.). ISBN 80-7300-207-8.
 6. ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015, 240 s. : il. ISBN 978-80-247-5269-3.
 7. SVOBODA, Rostislav. Řídicí systémy CNC strojů? Poznejte různé typy řízení. In: *Magazín o průmyslové automatizaci a robotice* [online]. Praha: FANUC Czech, 2015, 26.5.2015, s. 1 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/ridici-systemy-cnc-stroju-poznejte-ruzne-typy-rizeni/>
 8. Factory automation: 10 dat z historie obrábění na CNC strojích [online]. 2016 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/10-dat-z-historie-obrabeni-na-cnc-strojich-kam-saha-historie-cnc-obrabeni/>
 9. Types of Milling Cutter Tools. In: *Engineering Learn* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://engineeringlearn.com/types-of-milling-cutter-tools-and-their-uses-with-pictures/>
 10. Kompaktní pětiosé vertikální obráběcí centrum nové generace. *Mazak* [online]. 2020 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.mazakeu.cz/novinky-a-udalosti/produktove-novinky/variaxis-c600/>
 11. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 1. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. : il. ISBN 978-80-260-6780-1.
 12. CauCau CNC frézka KOMPAS. *Caucau* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: https://www.caucau.cz/cnc_stroje/caucau-cnc-frezka-kompas-f300-2-2kw-asyn--200x300x150mm-/
 13. FZ42. In: *Milling machines: FZ42* [online]. Zimmermann, 2019 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.f-zimmermann.com/us/gantry-machines/fz42/>
 14. Lineární vedení. *T.E.A. TECHNIK s.r.o.* [online]. Popůvky u Brna [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/linearni-vedeni/>
 15. Linear motion assemblies. In: *Isutami* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://isutamisolutions.com/products/linear-motion-assemblies/>
 16. Kuličkové šrouby. *HIWIN* [online]. Brno [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby>
-

-
17. Elektromotory. *M B M Technik* [online]. Brno [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.mbmtechnik.cz/elektromotory>
 18. *Průmyslové spektrum: odborné strojírenské zpravodajství* [online]. 2018 [cit. 2022-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vretena-frezovacich-stroju>
 19. Teknomotor série DB. *CNCshop* [online]. Holasovice [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/teknomotor-serie-db>
 20. Frézky, Routery. *Eurazio* [online]. Modletice, 2022 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.eurazio.eu/cs/produkt/cnch-4030-800w>
 21. Wood Engraving Machine. *Vevor* [online]. 2020 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: https://www.vevor.com/wood-engraving-machine-c_11142/3-axis-cnc-6040-engraving-milling-machine-chrome-plate-shaft-pvc-engraving-p_010645651278
 22. CauCau s.r.o [online]. Bratislava: CauCau, 2020 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.caucau.cz/cnc-frezky-kompas-h1000/caucau-cnc-frezka-kompas-h1000hf/>
 23. CNC routery. *První hanácká BOW* [online]. Olomouc [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.bow.cz/produkt/RO100001/cnc-router-numco-shg-0404>
 24. *Mach3Mill Manual*. 1. Livermore Falls: Art Fenerty and John Prentice, 2008. Dostupné z: http://www.cnc1.eu/files/images/stories/mach3/Mach3Mill_CZ.pdf
 25. ŠTĚPÁNEK, V. Návrh a konstrukce hobby frézky[online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016[cit. 2022-04-08]. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.
 26. Screensets. *Artsoft* [online]. Livermore Falls [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.machsupport.com/downloads-updates/screensets/>
 27. *[Momentová charakteristika motoru D57CM31]* [online]. In: Šanghaj [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/32966473891.html?spm=a2g0o.seodetail.topbuy.1.14fd6f6beQEbn5i>
 28. CNC IO Board. In: *CNCSHOP* [online]. Opava [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/cnc-io-board-oddelovaci-deska-pro-paralelni-port>
 29. HY driver HY. In: *Laskakit* [online]. Rychnov nad kněžnou [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/hy-driver-hy-div268n-5a-toshiba-tb6600-pro-krokovye-motory-5a-42v/>
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
A_{Di}	jmenovitý průřez třísky	[mm ²]
A_e	šířka záběru	[mm]
A_p	hloubka záběru	[mm]
C_{dyn}	dynamická únosnost	[N]
D	průměr	[mm]
F_a	síla axiální	[N]
F_c	síla řezná	[N]
F_g	síla tíhová	[N]
F_r	síla radiální	[N]
F_T	síla tíhová zatěžující vozík	[N]
F_{TD}	síla tíhová zatěžující vozík měnící se s polohou suportu	[N]
F_{TS}	síla tíhová zatěžující vozík neměící se s polohou suportu	[N]
K_C	koeficient materiálu	[-]
M_k	kroučící moment	[N·m]
P	stoupání závitu	[mm]
S_{pr}	počet pulzů na posun o 1 mm	[-]
S_{pu}	počet pulzů na otáčku	[-]
L	životnost vodící tyče	[m]
L_k	nepodepřená délka tyče	[mm]
a_x	zrychlení osy X	[m·s ⁻²]
a_y	zrychlení osy Y	[m·s ⁻²]
a_z	zrychlení osy Z	[m·s ⁻²]
b_D	jmenovitá šířka třísky	[mm]
d_k	průměr jádra	[mm]
f_i	posuvová rychlost	[mm·min ⁻¹]
f_H	faktor tvrdosti	[-]
f_T	faktor teploty	[-]
f_W	faktor zatížení	[-]
f_{zub}	posuv na zub	[-]
g	tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
k_{c1}	měrný řezný odpor	[Mpa]
k_k	koeficient závislosti uložení	[-]
k_{mikro}	zvolené rozdělení kroku driverem	[-]
k_{motor}	počet pulzů KM na jednu otáčku	[-]
m_d	hmotnost částí pohybující se po ose Y	[kg]
m_s	hmotnost částí jenž nemění polohu v ose Y	[kg]
m_x	hmotnost dílu ležících na vedení osy X	[kg]
m_y	hmotnost dílu ležících na vedení osy Y	[kg]
m_z	hmotnost dílu ležících na vedení osy Z	[kg]
n	otáčky	[1/min]
n_k	kritické otáčky kuličkového šroubu	[1/min]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
β	úhel stoupání šroubovice	[°]
γ	úhel čela	[°]

η	účinnost	[-]
θ	úhel posuvového pohybu	[°]
κ	úhel nastavení hlavního ostří	[°]
ω	úhlové zrychlení	[rad·s ⁻¹]
Δx	minimální posuvový přírůstek	[mm]

Zkratky

Označení	Legenda
1D	Jednodimenzionální
AC	Střídavý proud
CAD	Computer aided desing
CAM	Computer aided machining
CNC	Computer numeric control
DC	Stejnoseměrný proud
DIR	Instrukce-směr
ER	Normalizovaný tvar upínací kleštiny
HPC	High-performance concrete
ISO	Insternational organization for standardization
MKP	Metoda konečných prvků
NC	Numerical control
PC	Personal computer
RAM	Random acces memory
STEP	Instrukce-krok

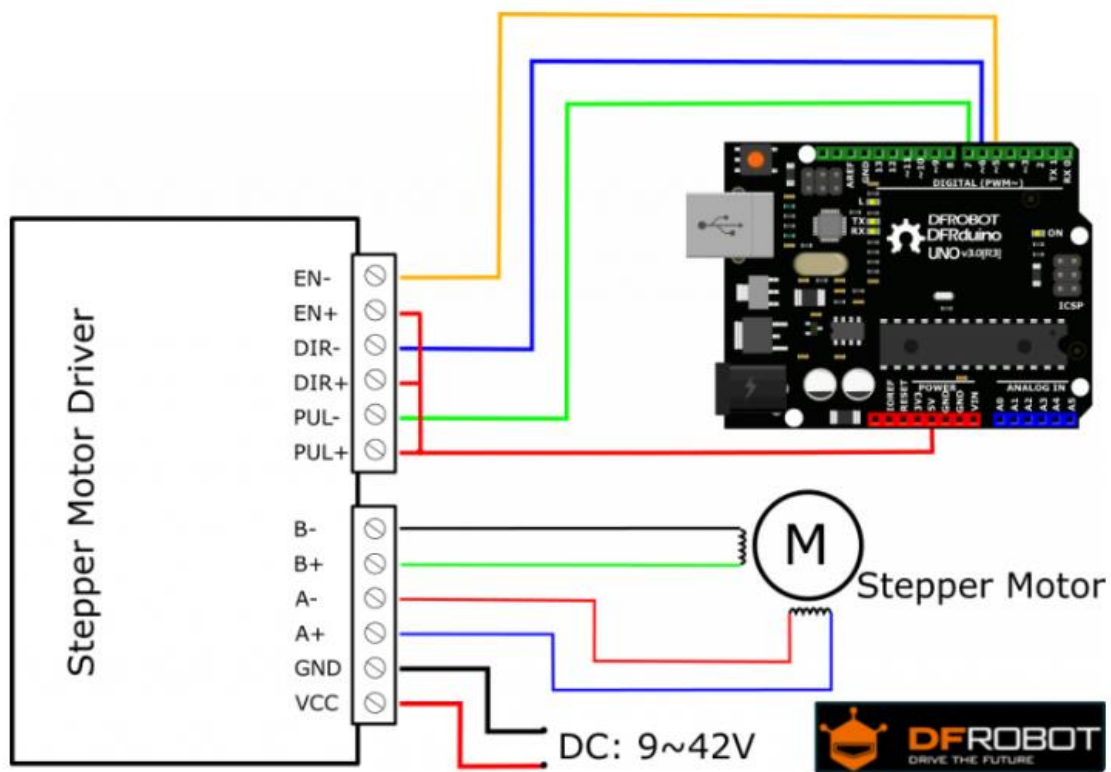
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Správně zapojení driveru do oddělovací desky.
Příloha 2 Numerická simulace při zatížení podél osy
Příloha 3 Cenová kalkulace

Seznam výkresů

- Frézka; 2022-BP-217740-00
Profil rámu SD; 2022-BP-217740-01
Profil rámu SK; 2022-BP-217740-02
Profil rámu stojna; 2022-BP-217740-03
Profil rámu HD; 2022-BP-217740-04
Profil rámu HK; 2022-BP-217740-05
Spojovací L; 2022-BP-217740-06
Úhelník; 2022-BP-217740-07
Deska pro ložisko; 2022-BP-217740-08
Deska pro motor a ložisko; 2022-BP-217740-09
Kuličkový šroub osy X; 2022-BP-217740-10
Kuličkový šroub osy Y; 2022-BP-217740-11
Držák matice X; 2022-BP-217740-12
Domeček kosoúhlého ložiska; 2022-BP-217740-13
Deska příruba motoru; 2022-BP-217740-14
Držák kul. ložiska X; 2022-BP-217740-15
Příčky stolu; 2022-BP-217740-16
Držák motoru Y/Z; 2022-BP-217740-17
Kuličkový šroub osy Z; 2022-BP-217740-18
Sestava suportu; 2022-BP-217740-19
Deska nosná X; 2022-BP-217740-1901
Boční deska; 2022-BP-217740-1902
Deska středová; 2022-BP-217740-1903
Deska vřetene; 2022-BP-217740-1904
Deska spojná; 2022-BP-217740-1905
Deska Z horní; 2022-BP-217740-1906
Deska Z spodní; 2022-BP-217740-1907
Držák matice osy Y; 2022-BP-217740-20
Pouzdr omatice osy Z horní; 2022-BP-217740-21
-

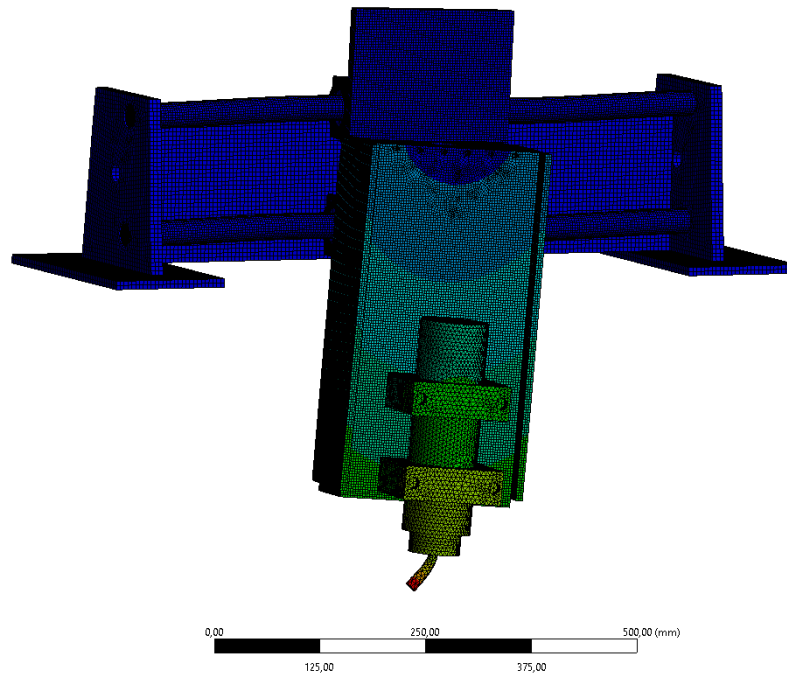
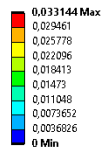
Příloha 1
Správné zapojení driverů do oddělovací desky [29].



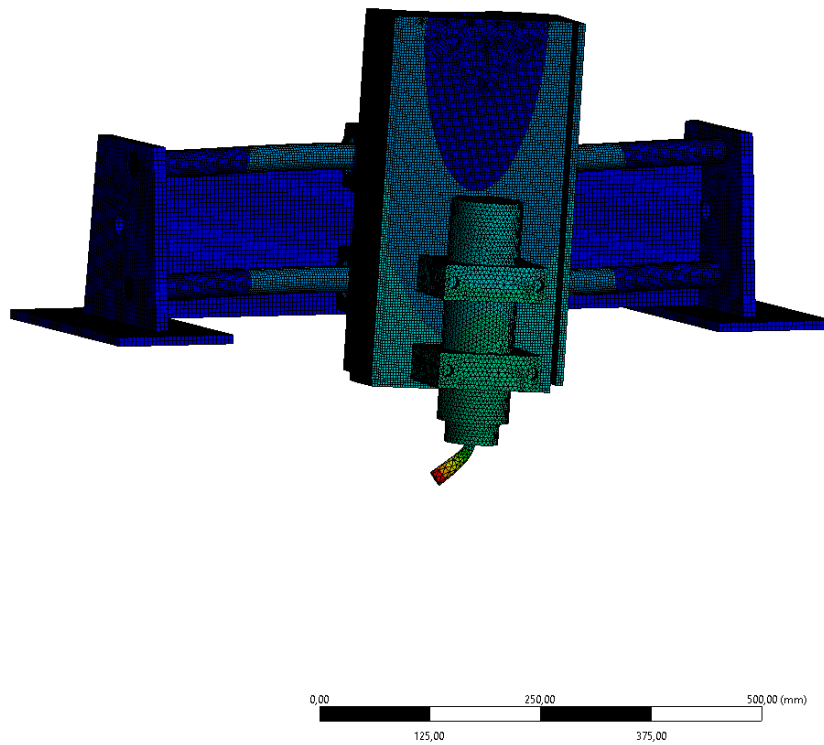
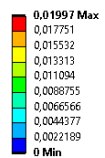
Příloha 2

Numerická simulace při zatížení osy podél osy Y

D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
30.04.2022 15:25



D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
30.04.2022 15:56



Příloha 3
Náklady na jednotlivé díly

Část	počet kusů/m/kg	jednotková cena ČR	celkem	jednotková cena zahraničí	Celkem
Rám					
Profil 100x100x5	4,18	1123	4694,14	-	0
Profil 90x50x3	1,1	550	605	-	0
Profil 100x50x5	2,6	585	1521	-	0
Spojovací úhelník tl8	0,18864	4093	772,10352	-	0
desky vyztuha tl8	0,672	4093	2750,496	-	0
Spojovací L tl8	0,015744	4093	64,440192	-	0
profil 30x3	4,9	148	725,2	-	0
plechy tl 15	0,155	9039,55	1401,1303	-	0
desky tl10	0,3663	5759	2109,5217	-	0
deska na stul tl10	0,3666	5759	2111,2494	-	0
deska motor tl6	0,0263	3406	89,5778	-	0
Celková cena			16843,859		0
Lineární vedení					
podepřená tyč 20+ kolejnice	2,4	1323	3175,2		
Vozík X	4	230	920	set	2200
nepodepřená tyč 30	2,316	2023	4685,268	nevýhodné	4685
vozik Y a Z	8	650	5200	610	4880
Celková cena			13980,468		11765
Pohon os					
Krokový motor + driver+ zdroj	4	2325	9300	SET	6700
Kuličkový šroub d16	5,2	1473	7659,6		
matice kuličková	4	925	3700	set	6600
Ložisko přírubové	2	140	280	-	280
ložisko koso. Dvouřadé	2	610	1220	-	1220
pružná spojka	4	100	400	-	400
tyčky motorů d8-80	16	5	80	-	80
pouzdro 55x50x50					
pouzdro 70x70x50					
pouzdro 60x45x30	6,5	60	390	-	390
celkem			23029,6		15670
Vřeteno					
vřeteno+frekvenční měnič	1	19000	19000	4000	4000
držák vřetena 100x120x40	2	již započteno		500	1000
příslušenství chlazení vřetena	1	2076	2076		1800
celkem			21076		6800
Elektronika					
oddělovací deska	1	870	870	700	700
Pc sestava + software	1	4500	4500	-	4500
kabeli		odhad	1000	-	1000
tlačítko, koncové dorazy	1+6	121	121	-	121
zdroj k desce	1	200	200	-	200
celkem			6691		6521
spojovací materiál	1	1	300	-	300
antikorozi barva	1	1	234	-	234
Cena obrábění	1	1	12000	-	12000
Cena dělení materiálů	1	1	2280		1400