



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH A KONSTRUKCE HOBBY FRÉZKY

DESIGN AND CONSTRUCTION HOBBY MILLING MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Štěpánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Vojtěch Štěpánek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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 a konstrukce hobby frézky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh modelu a zhotovení prototypu hobby frézky.

Cíle bakalářské práce:

- zhodnoťte využitím CNC Frézek v hobby segmentu
- porovnejte klíčové komponenty pro konstrukci hobby stroje oproti komerčnímu stroji
- navrhnete model a zhotovte prototyp hobby frézky
- porovnejte výkonnost obrábění a dosahovanou přesnost obrobených ploch
- vypočtete pořizovací náklady na stavbu hobby frézky

Seznam literatury:

Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, Richard G. Budynas. Konstruování strojních součástí. místo neznámé : VUT IUM, 2010. ISBN 978- 80-214-2629-0.

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

KSK Kuřim a.s. Kuličkové šrouby. [Online] 2015. [Citace: 25.11.2015.]
<http://www.ks-kurim.cz/vyrobní-program/kulickove-srouby/>.

KOMPONENTY CNC STROJŮ. 4ISP. [online]. 2015 [cit. 2015-11-25]. Dostupné z:
<https://cnc.inshop.cz/inshop/scripts/shop.aspx?action=DoChangeLevel&ClearSearch=1&level=87>

Komponenty pro automatizaci a stavbu CNC strojů. CNCshop.cz CNC & automatizace. [online]. 2015 [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá porovnáním CNC strojů. Srovnává komponenty použité v malých hobby strojích s komponentami velkých komerčních strojů. Dále je v práci proveden návrh konstrukce a stavba reálné CNC frézky značky MillVOY a jsou zde zhodnoceny poznatky z vlastního testování. Při stavbě je kladen důraz na minimalizaci nákladů použitím maxima normalizovaných součástí. Snížením pořizovacích nákladů lze zpřístupnit tyto menší frézky do každé dílny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Frézka, frézování, CNC, krokový motor, vřeteno, CNC řízení

ABSTRACT

This work deals with comparing CNC machines. It compares components used in small hobby machines with components of large commercial machines. The work also focused on the design and construction of real CNC milling machine branded as MillVOY and findings from its testing. Emphasis during the construction is laid on minimizing costs by the use of maximum of normalized parts. Lowering the cost can make these small milling machines affordable for any workshop.

KEYWORDS

Milling machine, milling, CNC, stepper motor, spindle, CNC control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTĚPÁNEK, V. *Návrh a konstrukce hobby frézky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Stavba CNC frézky** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu zdrojů či z poznatků získaných během studia.

V Brně dne 15. 5. 2016

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé práce, panu Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky během konstruování a výroby funkčního prototypu frézky. Děkuji svým rodičům za praktickou pomoc při výrobě stroje a za jejich trpělivost po celou dobu téměř dvouletého vývoje. Dále děkuji dílenskému kolektivu odboru technologie obrábění za přístup k obráběcím strojům a za pomoc při výrobě součástí. V neposlední řadě děkuji firmě VYBO Electric s.r.o. za poskytnutí frekvenčního měniče pro řízení otáček asynchronního vřetene.

OBSAH

Úvod	15
1 Komerční CNC obráběcí stroje	17
1.1 Rám komerčního obráběcího stroje	17
1.2 Vřeteno obráběcího stroje.....	19
1.3 Vedení obráběcích strojů	21
1.4 Pohybové šrouby	22
2 Hobby CNC frézky.....	25
2.1 Konstrukce.....	25
2.2 Vřeteno.....	26
2.3 Vedení.....	28
2.4 Krokové motory.....	29
2.5 Návrh lineárního pohonu	30
3 Hobby CNC frézka MillVOY 4031-2.2	33
3.1 Volba konstrukce.....	33
3.2 Volba lineárního systému	33
3.3 Volba převodu pro pohon	34
3.4 Volba vřetene.....	35
3.5 Rozvod vodního chlazení	36
3.6 Řízení CNC frézky	36
3.7 Volba krokových motorů.....	37
3.8 Bezpečnostní prvky	38
3.8.1 Koncové spínače.....	38
3.8.2 EMERGENCY STOP tlačítko	38
3.8.3 Průtokový spínač	38
3.8.4 Ochrana před dotykem se živými částmi stroje.....	39
3.9 Prostředí MACH3	39
3.10 Princip řízení krokových motorů.....	39
3.10.1 Postup výpočtu kroků krokových motorů	40
3.10.2 Výpočet posuvových rychlostí	41
3.11 Výpočet zrychlení ve směru jednotlivých os.....	42
3.11.1 Odhad hmotností částí stroje	42
4 Reálné parametry frézky millvoy 4031-2.2	47
4.1 Reálně dosahovaná posuvová rychlost	47
4.1.1 Ukázka testovacího programu „posuvová rychlost“	47
4.2 Přesnost opakovaného najetí a přesnost posunutí.....	47
4.2.1 Ukázka testovacího programu „přesnost zpětného najetí a posunutí“	48
4.3 Měření vůlí v pohybovém ústrojí	48
4.4 Průhyb vřeteníku při zatížení konstantní silou	49
5 reakapitulace nákladů	51
5.1 Kalkulace nákladů nákupu komponent na českých i zahraničních portálech	51

5.2 Kalkulace nákladů nákupu komponent pouze na českých portálech	52
Závěr	53
Seznam použitých zdrojů	55
Seznam obrázků	57
Seznam grafů.....	57
Seznam použitých zkratek	59
Seznam příloh	61

ÚVOD

Má práce týkající se stavby CNC frézky je volným pokračováním tří předchozích projektů frézek série MillVOY. V této práci je kladen důraz na minimalizaci nákladů, neboť si své projekty financuji sám. Kdo se pohybuje v této oblasti, ví, že komponenty pro stavbu takových strojů jsou velice drahé.

Během svých projektů vycházím zpravidla ze zkušeností posbíraných na internetu či různých fórech, kde se lidé setkávají s praktickou problematikou na toto téma. Dále vycházím ze svých zkušeností nabytých z předchozích projektů a vzděláním na střední a vysoké škole. Při mé práci téměř opomím silové výpočty, neboť se pro tyto aplikace téměř nedají použít metodiky školní pružnosti a pevnosti. Stejně tak lze pouze predikovat výkonost pohybových krokových motorů, protože jsou motory pořizovány jako produkty druhé jakosti s portálu ebay.com. Tyto motory zpravidla nedosahují deklarovaného krouticího momentu a stejně tak neodpovídá závislost momentu na otáčkách motoru deklarovaná pro krokové motory.

Díky výše zmíněným problémům probíhá během stavby mnoho zjednodušení a frézka je následně testována několika praktickými testy. Testy jsou jak silové, tak i dynamické zabývající se dosažitelnou rychlostí frézky. Dále provádím testy vůlí v pohybovém ústrojí. Po dokončení testování jsou na frézce obrobny různé typy materiálů a obrobky vyhodnoceny.

Po vyhodnocení obrobků zhodnotím, zda předpoklady odpovídají dosaženým výsledkům či nikoliv. Frézka je následně prodána zájemcům z řad hobby modelářů a se získanými výsledky začínám pracovat na dalším konceptu. Věřím, že i frézka MillVOY 4. generace splní očekávání a výsledkem práce bude stroj schopný obrábět dřevěné obrobky, výrobky z plastu či frézovat hliníkové slitiny.

Má práce se věnuje porovnání užitých komponent při stavbě hobby frézek a strojů použitých v profesionální oblasti. Dále stavbě frézky MillVOY, jejíž součástí je i testování hotového stroje. V poslední části mé práce se nachází i kapitola zabývající se cenovou kalkulací. Mezi hobby staviteli frézek se traduje, že pod 50 000 Kč nelze CNC frézka na gravírování hliníku postavit. Není jednodušší cesta, než to vyzkoušet.

1 KOMERČNÍ CNC OBRÁBĚCÍ STROJE

1.1 Rám komerčního obráběcího stroje

Rám stroje se skládá z lože, stojanů, sloupů nebo konzol. Rám je jednou ze základních částí obráběcího stroje. Jeho dynamická stabilita, tuhost a přesnost přímo ovlivňuje kvalitu a výkonnost obráběcího stroje.

Na výrobu jednotlivých částí rámu musí být použit kvalitní materiál. Rám musí mít dobré tlumivé účinky, musí mít dostatečnou pevnost, nesmí v sobě nést žádné vnitřní pnutí, které by se časem negativně projevilo deformací částí rámu, a musí mít co nejmenší hmotnost, neboť většina strojů se z výrobního závodu stěhuje v minimálně rozloženém stavu k zákazníkovi.

Používaných materiálů pro výrobu rámu obráběcích strojů je velká škála. Při výběru materiálu volíme kompromis mezi velkými tlumivými schopnostmi materiálu, nízkou roztažností a pevností v tahu, tlaku a ohybu.

1.1.1 Litina

Litina je v praxi jedním z nejpoužívanějších materiálů. Lože z litiny se vyrábí jako odlitky šedé nebo tvárné litiny. Tyto materiály jsou využívány zejména pro jejich velké tlumivé vlastnosti. Dalším kladem pro výběr litiny je velké rozšíření technologie výroby litinových odlitků, a proto jsou ekonomicky výhodné pro větší výrobní série. Nevýhodou litiny je její křehkost a odlitky z litiny nejsou vhodné pro kusovou výrobu (plánování odlévání, výroba modelů, forem a jader). Naopak pro litinu je velkým plusem, že vodící plochy mohou být předlity a obrobena přímo v základním tělese, tudíž nemáme potřebu montovat další vodící lišty, kluzná pouzdra a další typy vedení.

1.1.2 Ocel

Ocel se v obráběcích strojích vyskytuje v podobě ocelových svařenců. Svařovaný rám má oproti rámu odlévanému velkou výhodu, neboť při srovnatelné tuhosti s rámem litinovým má ocelový rám výrazně menší hmotnost, protože modul pružnosti v tahu je přibližně dvojnásobný. Svařovaný rám je vhodné využít při konstrukci obráběcích strojů v kusové výrobě. Svařovaný rám může mít daleko složitější tvar než rám odlévaný. Svařování nám umožňuje výrobu rámu s velkými přechody tloušťek stěn, což by technologií odlévání šlo vyrobit velmi komplikovaně nebo vůbec. Svařovaný rám má však i zápory, mezi které patří malé tlumivé účinky a zpravidla velké vnitřní pnutí, které je to rámu vneseno svařováním [1].

1.1.3 Přírodní kámen

Tento materiál se vyskytuje u velice přesných obráběcích strojů a také ve strojích měřicích. Známy jsou jako přírodní žula nebo také jako granit. Rámy z přírodního kamene vynikají skvělou teplotní stálostí, dobře tlumí vibrace a uvnitř materiálu je téměř nulové vnitřní pnutí. Nevýhodou přírodního kamene je samozřejmě obrovská hmotnost. Dále se do kamene špatně umísťují kotevní prvky pro připevnění komponent jako například valivá vedení, což musí být řešeno vhodným konstrukčním postupem. Obrábění přírodního kamene je také velkým pro-

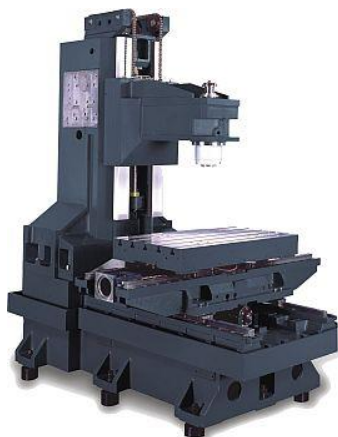
blémem a zpravidla všechny plochy musí být obrobeny nástroji s diamantovými břity nebo přebroušeny.

1.1.4 Polymerní a vysokopevnostní (HPC) betony

Polymerní beton se v praxi vyskytuje jako nový prvek konstrukce obráběcích strojů a to zejména pro svoje vynikající tlumicí účinky. V porovnání s litinou mohou tyto účinky být až 10 krát lepší. Výborné tlumicí vlastnosti v betonu tvoří zejména rozhraní mezi částicemi plniva. Plnivo tvoří přibližně 75-85 % celkového objemu polymerbetonu. Plnivem bývají zpravidla chemicky stabilní minerální materiály, jako je živec, čedič nebo žula. Stabilní musí být proto, aby neovlivňovali základní matrici. Pokud by plnivo reagovalo se základní matricí, ovlivňovalo by chemickou vytvrzovací reakci, zkracovalo by dobu zpracovatelnosti nebo naopak by směs neztvrdla vůbec. Matrice bývá tvořena pryskyřicí a příslušným tvrdidlem. Pryskyřice se důkladně promíchá s plnivem a poté se přidá tvrdidlo. Nyní již při pokojové teplotě započne chemická reakce. Pryskyřice má dobu zpracovatelnosti od 30ti minut po maximálně 1,5 hodiny. Poté už pryskyřice ztrácí vlastnosti vhodné pro zpracování. Vytvrzení na finální pevnost při teplotě 50-80 °C trvá v řádu hodin, maximálně dnů. Vše závisí na použité kombinaci pryskyřice a tvrdidla.

Výsledný polymerbeton má přibližně třetinovou hustotu než ocel a také téměř 100 krát menší pevnost v tahu. Má však větší rozměrovou stálost. Protože polymerbeton má nízkou pevnost v tahu, v praxi se uplatňuje jako tlumicí výplň ocelových rámu obráběcích strojů. Zpravidla svařovaná konstrukce se vylije touto směsí. Nespornou výhodou je, že se nemusí vyrábět žádné formy a jádra, tvar směsi určuje vnější ocelový obal. Splníme tak dvě základní podmínky rámu obráběcího stroje. Stroj má pevnost, kterou mu dodá ocelová konstrukce, ale zároveň má vynikající tlumivé účinky. Směs polymerbetonu se samozřejmě může vyskytovat i mimo ocelovou obálku. Zde však musíme dodržet podmínku, aby tyto části byly namáhány spíše tlakovým namáháním a zároveň tloušťka stěn těchto částí musí být minimálně 80 mm. Další nevýhodou polymerbetonu je, že v průběhu času může díky degradaci pryskyřice stárím, UV zářením nebo vibracemi rámu docházet k vydrolování. Proto musí konstruktér popřípadě technolog počítat s těmito jevy a správně volit tvary a velikosti dílců a volit pryskyřice vhodné pro tuto aplikaci [2].

Vysokopevnostní beton (HPC) je ve strojařské praxi relativně mladým materiálem pro výrobu rámu obráběcího stroje. Je to zejména z toho důvodu, protože bylo velice těžké rám zaformovat s požadovanou přesností. Nyní ale nejnovější technologie umí tyto problémy řešit a tím získáváme velice kvalitní materiál vhodný pro tuto aplikaci. HPC beton má hutnou strukturu, velice dobré tlumicí vlastnosti (téměř 10x lepší tlumivé účinky než ocel). Po tepelném zpracování, které můžeme označit jako tepelné stárnutí, získá odlitek z HPC betonu velice příznivé vlastnosti tepelné roztažnosti. Tepelně zpracovaný rám má velice stálé rozměry. V kombinaci s nízkou teplotní vodivostí je poté skvělou volbou pro rámy přesných brousicích strojů popřípadě 3D měřicích strojů [1].



Obr. 1 Rám CNC frézky [3]



Obr. 2 Lože karuselu z HPC betonu [2]

1.2 Vřeteno obráběcího stroje

Vřeteno obráběcího stroje bychom mohli přirovnat k srdci celého technologického procesu. Vřeteno stroje koná hlavní pracovní pohyb a to rotační. Vřeteno musí mít vysokou přesnost chodu, která se projevuje radiálním a axiálním házením vřetene. Vřeteno nesmí mít veliké ztráty v podobě tření, neboť se tento problém může projevat přehříváním a nadměrným opotřebením vřetene a samozřejmě vyšším příkonem, což je ekonomicky nežádoucí. Dále musí být vřeteno předepnuté, aby byly vymezeny vůle v ložiscích a byla zaručena přesnost chodu. Musí proto mít komponenty, které umožňují vymezení vůlí, které časem vznikají opotřebením vřetene. V neposlední řadě musí mít vřeteno dokonale přesné vedení a uložení v rámu stroje. Znamená to, že vřeteno nesmí měnit polohu v prostoru během obrábění, kdy řezné síly mění velikosti a směr. Vedení musí také absorbovat značný gyroskopický moment a coriolisovu sílu, které vznikají rotací hmoty vřetene [1].



Obr. 3 Řez vřetenem s automatickou výměnou nástroje [3]

U soustruhu se do vřetena upíná obrobek za pomoci univerzálních sklíčidel. Sklíčidla mohou být tříčelist'ová, která zajišťují osové upnutí rotačních součástí. Dále mohou být sklíčidla čtyřčelist'ová, která slouží k upnutí součástí čtvercového průřezu. Další variantou mohou být sklíčidla čtyřčelist'ová, u kterých se utahuje každá čelist zvlášť. Tyto sklíčidla slouží pro soustružení nerotačních součástí či pro vrtání a soustružení nesouosých děr. K upnutí tvarově

složitých součástí se používá tzv. lícní deska. Výše popsané způsoby upnutí jsou určeny spíše pro manuální stroje nebo pro stroje určené na kusovou výrobu. Na CNC strojích při velkosériové výrobě se používá sklíčidlo ovládané hydraulicky. Sklíčidlo se mechanicky nastaví na požadovaný průměr obrobku. Stroj už poté sklíčidlo ovládá automaticky v rozsahu jednotek milimetrů. Mechanické nastavení vřetene je zdlouhavé, naopak následné upínání obrobku je velice rychlé a přesné, a proto má tento druh upínání svojí neopomenutelnou pozici v technologii soustružení [4].

Při frézování je tomu naopak, hlavní pohyb koná nástroj upnutý ve vřeteni stroje. U moderních CNC strojů je nástroj upnut pomocí vyměnitelného nástrojového upínače. Stroj je opatřen i automatickým výměníkem nástrojů, který může stroji poskytnout jednotky až desítky různých nástrojů během procesu obrábění. Nástrojových upínačů je mnoho výrobců a druhů. Avšak na každém se nachází normalizované prvky. Mezi ně patří upínací čep, za který je držák vtahován do vřetene. Dále nesamosvorný ISO kužel, který centruje upínač v kuželové dutině vřetene. Dále se na držáku nachází unášecí drážky pro přenos krouticího momentu, které zapadají do tzv. unášecích kamenů na vřeteni.

Pro stopkové frézy se používá kleštinový upínač, či upínač Veldon. Dále můžeme mít držák s trnem pro upnutí nástrčných fréz. Mezi poměrně mladé upínače patří upínač deformační, který využívá elastických deformací upínače, a v neposlední řadě se používá upínač termický, který je založen na různých tepelné roztažnosti upínače a nástroje. Moderní vřetena také umožňují přívod procesní kapaliny vnitřní dutinou v nástroji. Moderní vřetena obráběcích strojů dosahují otáček až $80\,000\text{ ot.min}^{-1}$. U těchto strojů se aplikuje metoda HSC obrábění, kde se využívá pozitivních vlastností třísky, která je zahřáta blízko k teplotě tavení daného materiálu [4].

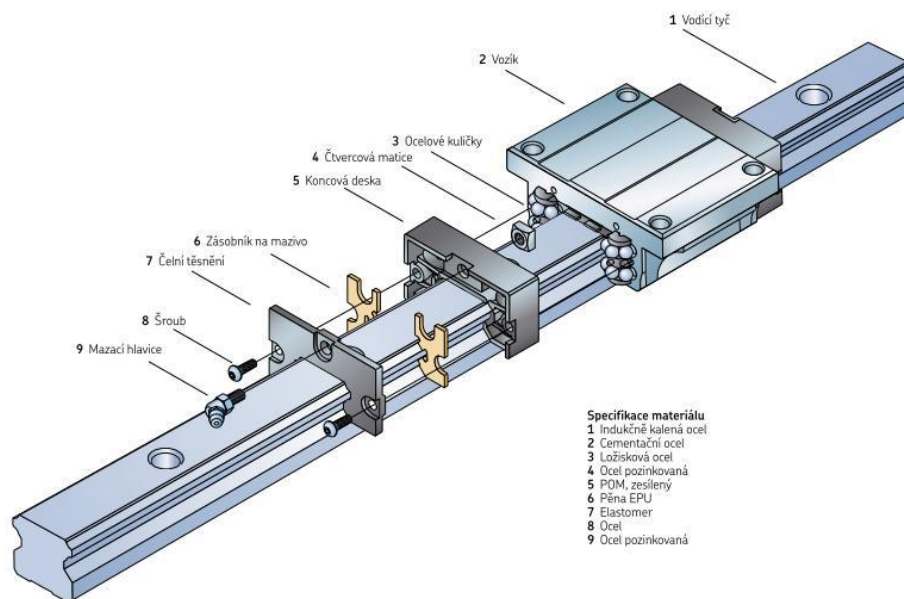


Obr. 4 CNC frézovací centrum MAZAK INTEGREX 300-IV T [5]

1.3 Vedení obráběcích strojů

U obráběcích strojů se nejčastěji setkáváme s různě tvarovaným vedením s valivými elementy. Kluzná vedení v režimu mezního mazání, jako je tomu například u manuálních soustruhů a frézek se v oblasti CNC nevyskytuje, protože takové kluzné vedení má obrovský součinitel tření, pro který by obráběcí stroj ztrácel svoji dynamiku. Pokud se v konstrukci obráběcího stroje vyskytuje kluzné vedení, zpravidla je doplněno o tlakový mazací systém a tření styčných ploch probíhá v režimu hydrostatického mazání tlakem maziva [6].

Dále se práce bude věnovat vedení s valivými elementy. V moderních CNC strojích používáme tvarové kolejnice téměř libovolné délky v kombinaci s vozíky, které dokonale kopírují tvar kolejnice. Kolejnice i vozíky se spojují s částmi rámu stroje šroubovými spoji. Toto vedení má vynikající vlastnosti díky přenosu krouticího momentu ve všech třech směrech a sil ve dvou směrech, zbývá tedy pouze pohyb ve směru pohybu lineárního vedení. Mezi vozíky a kolejnicemi přesně obíhají ocelové kuličky po uzavřených drahách. Polovina dráhy vede mezi vozíkem a kolejnicí, zatímco druhá polovina vede v dutině vozíku. Vše se odehrává v tolerancích IT7 a lepších. Tímto vedením je zajištěna libovolná délka zdvihu. Výrobci vedení je v dnešní době nespočet. Jednotlivé druhy se od sebe liší pouze tvarem a počtem oběžných drah. Počet oběžných drah bývá 4-6.



Obr. 5 Řez valivým lineárním vedením [7]

Na profesionálních strojích se můžeme setkat i s tzv. rolničkovým vedením, kde rolny (můžeme si je představit jako radiální ložiska s tvarovaným vnějším kroužkem) jezdí v drážce, která má negativní tvar profilu rolny. Tvar bývá zpravidla rádius nebo V-drážka. Vozík mívá minimálně 3 rolny a více. Dvě se opírají o spodní část lišty, třetí prostřední rolna bývá opřena o vrchní část lišty. Horní rolna bývá buď stavitelná, nebo na pružině a umožňuje vymezit vůli ve vedení. Při více rolničkovém provedení bývá uspořádání dané výrobcem.

1.4 Pohybové šrouby

Pohybový šroub, v moderních strojích zpravidla kuličkový, je společně s elektrickým servomotorem základní stavební částí pohybové soustavy stroje. Kuličkové šrouby si získaly svojí oblibu zejména díky „absenci“ tření. Protože se pohyb realizuje odvalováním kuliček mezi šroubem a maticí po šroubovících, vstupuje do výpočtů valivé tření, které má oproti tření smykovému téměř zanedbatelnou hodnotu. Mezi základní parametry kuličkového šroubu patří jeho stoupání a jmenovitý průměr. Mezi další parametry může patřit také třída přesnosti, únosnost či posuvová rychlost kuličkového převodu. Mezi parametry také patří trvanlivost šroubu. Tato veličina je však relativní, neboť záleží na čistotě šroubového převodu stejně jako rovnoběžnosti šroubu s lineárním vedením [8, 9, 10].



Obr. 6 Řez kuličkovou maticí [10]

Kuličkové šrouby se vyrábí například z materiálu ČSN 14260 a matice potom z materiálu 14209. Jedná se o nízkolegované konstrukční oceli. Součásti jsou cementovány a povrchově kaleny na tvrdost 58-63HRC. Základní technologie výroby jsou tři. Přesné válcování, okružování a broušení. Válcovaný šroub poznáme na první pohled, neboť při válcování dochází k vytlačování materiálu z oblastí malého průměru závitu d_3 do oblastí velkého průměru. Na hřebenu se poté vytváří charakteristická čára typická pro válcovaný šroub. Druhou metodou je výroba tzv. okružováním. Při této metodě vyrábíme závit obrobením kalené tyče, do které řežeme závit tvarovým nástrojem s břity z kubického nitridu boru. Těmito metodami lze vyrobit kuličkové šrouby s přesností IT5-IT7. Poslední metodou je klasické vybrušování profilu závitu tvarovým brusným kotoučem do předem vyhrubovaného polotovaru. Dosahujeme přesnosti IT1-IT3. Broušené kuličkové šrouby jsou nejdražší a používají se pro nejpřesnější aplikace [8,9,11].

Protikusem ke kuličkovým šroubům jsou kuličkové matice. Matice má dvě základní části. První je samozřejmě profil závitu a druhá je převaděč pro kuličky. Základní konstrukce převaděče kuliček jsou dvě. Buď se převod kuliček provádí v rámci jednoho závitu. Na konci závitu je umístěn plastový převaděč, který převádí kuličky o jedno stoupání zpět. Takových převaděčů může být v matici libovolně mnoho, podle počtu nosných závitů, většinou bývají 4.

Další možností je převaděč externí, kdy jsou kuličky kanálem vyvedeny mimo matici a poté převodním tunelem převedeny o několik stoupání zpět.

Matice musí zajistit nulovou axiální vůli, aby celé soustrojí fungovalo s požadovanou přesností, a proto se matice tzv. předepínají. Matice je rozdělena na dvě poloviny, mezi které se buď vkládá přesně broušená podložka, talířová matice nebo se pro vymezení vůle používá šroub, který umožňuje i seřizování opotřebení během života stroje. Specialitou v předepínání matic je montáž výběrem, kdy se pro konkrétní kuličkový šroub a konkrétní matici vybírají kuličky přesného rozměru, které zajistí dokonalé vymezení vůle. Je zřejmé, že tato metoda je pracnější, dražší a že nezahrnuje vliv opotřebení stroje [12].

2 HOBBY CNC FRÉZKY

2.1 Konstrukce

Při volbě konstrukce hobby CNC frézky musí být zohledněno, že tyto stroje vznikají zpravidla v dílenských podmínkách. Mnohdy si takové stroje staví modeláři, kteří na nich poté vyřezávají díly z balsy a dřeva na modely letadel. Tyto stroje jsou primárně určeny pro menší výkony obrábění. Používají se k obrábění dřeva a dřevotřískových desek, plastů, dřevoplastu a hliníku. Ocel se téměř neobrábí. Pokud ano, používají se velice nízké hodnoty řezných podmínek jako je hloubka záběru hlavního ostří či posuv na zub nástroje. Ačkoliv je konstrukce hobby frézky podstatně zjednodušená, ani zde se však neobejdeme bez základního vybavení v podobě manuálního soustruhu a frézky, neboť některé komponenty musí být přesně obrobena i pro použití na hobby stroji.

Ve světě hobby strojů nalezneme frézky vyrobeny z dřevěných desek (zpravidla překližkových). I takové stroje jsou samozřejmě funkční, bohužel ztrácí tuhost a bývají používány spíše jako souřadnicové vrtačky při výrobě DPS nebo na gravírování dřevěných reliéfů. Rámy hobby frézky dále bývají tvořeny jednoduchými smontovanými částmi, jako jsou ocelové jekly nebo jiné ocelové polotovary. Dále jsou velice oblíbené montované hliníkové profily. Velikou výhodou stavby stroje z těchto profilů je jejich přesnost (přímost $\pm 1\text{mm}$ na 1 metr délky), variabilní rozměry a tvarové drážky, za které můžeme jednotlivé části spojovat do sebe stejně tak, jako na ně můžeme umisťovat další periferie.

Použití normalizovaných hliníkových profilů nám zajistí, že konstrukce do sebe perfektně zapadá. Další výhodou je, že prodejce je schopen díly nařezat na požadovanou délku a úhel řezu. Takto připravenou stavebnici spojujeme šroubovými spoji a různými maticemi, které zapadají do tvarových T-drážek na Al-profilu. Pečlivou montáží poté dostáváme konstrukci, která nám zaručuje dostačující kolmost a rovinnost celého stroje. Pokud máme k dispozici lepší obráběcí stroje nebo stroje CNC, může být část hobby konstrukce obrobena z hliníkového plechu a následně opět sestavena za pomoci šroubových spojů. Menší nevýhodou použití této stavebnicové konstrukce mohou být pořizovací náklady, protože podpěrný hliníkový profil může stát až 800 Kč za metr délky a cena příslušenství v podobě spojek, matic, krytek aj. také není zanedbatelná.



Obr. 7 Hobby CNC portálová frézka [13]

Dalším typem konstrukce je rám svařovaný z různých ocelových profilů a plechů. Metoda je velice výhodná, protože vhodným návrhem lze vyrobit dostatečně tuhý rám stroje. Absence šroubového spojení eliminuje možnost kolize v případě, že by se nějaký šroubový spoj uvolnil v důsledku vibrací. Tento rám má i své nevýhody, neboť při svařování je do ocelových profilů vnášeno teplo a dochází ke změně struktury materiálu v tepelně ovlivněné oblasti, což se projevuje zejména ohýbáním součástí ve svaru. Další nevýhodou je, že svary postupně stárnou. Projevem tohoto procesu je deformování ocelového rámu. Řešením tohoto problému by bylo umělé vystárnutí svarů v peci při teplotě přibližně 150 °C a výdrži 8-12 hodin. Touto technologií však hobby dílna nedisponuje, a proto musíme dodatečnou deformaci konstrukce připustit nebo svařenec nechat několik měsíců „vystárnout“ přirozeně. Nakonec následuje přebroušení styčných ploch, pokud je hobby konstruktér ochoten vynaložit peníze navíc. Odlitky rámu se v hobby sféře vůbec nepoužívají, neboť to není v domácím prostředí proveditelné.

2.2 Vřetena

Jako vřetena hobby frézkek se používají přímé brusky, horní frézky, malé ruční frézky Dremel, Proxxon s příkonem 100 W či neznačkové 200-400 wattové DC kartáčkové motory. Je zřejmé, že výkon takových vřeten není dostačující a používají se zejména na obrobení DPS nebo dřeva. Na vřeteník obráběcího stroje se pouze namontuje držák s příslušným otvorem, do kterého zapadá válcová upínací část vřetene. Ceny takových vřeten se pohybují mezi jedním až třemi tisíci korun.



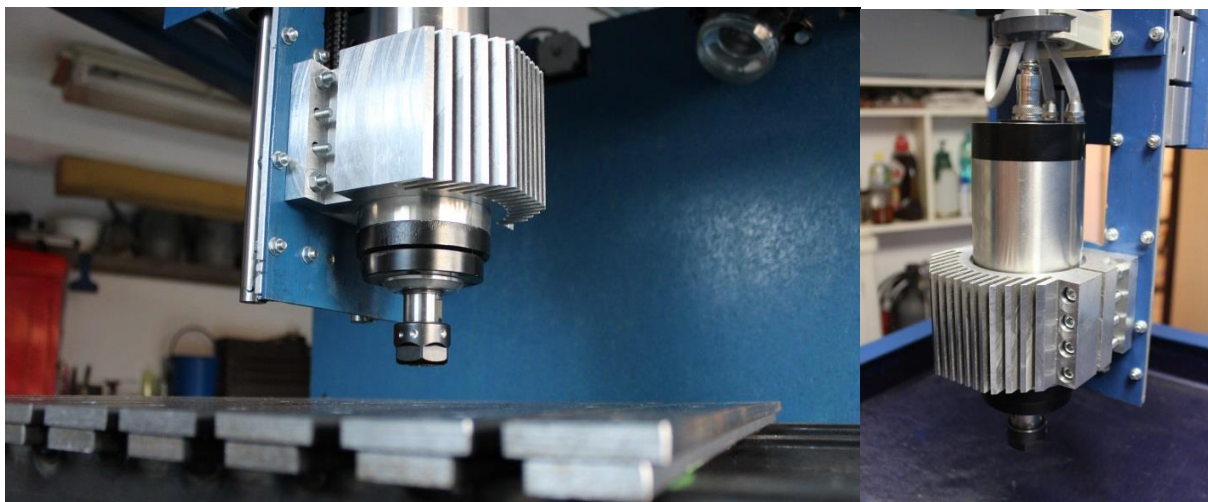
Obr. 8 12V DC vřeteno o výkonu 300 W [14]

Pokud se rozhodneme do vřetena investovat více, můžeme použít vysokootáčková vřetena Kress s výkonem kolem 1000 W a rozsahem otáček 5-30 tisíc otáček za minutu. Montáž vřetene je shodná s výše zmíněnými. Nevýhodou těchto vřeten je užití motoru s uhlíky, které se opotřebovávají a aktivní chlazení vzduchem. Chladicí ventilátor při 30 000 otáčkách za minutu dělá obrovský hluk srovnatelný s úhlovou bruskou, což je pro obsluhu stroje nepříjemné.



Obr. 9 Vysokootáčkové vřeteno Kress o výkonu 1000 W [15]

Pokud se rozhodneme do vřetena investovat větší obnos, na trhu se vyskytují i neznámková, vodou chlazená vřetena, která dosahují výkonu mezi 1,5 a 3 kW. V hobby sféře jsou tato vřetena známá jako čínská vřetena. Hřídel vřetene je přímo rotorem motoru. Díky absenci spojek nebo řemenů jsou vřetena schopna pracovat v rozmezí vyšších otáček 6-24 tisíc otáček za minutu. Vřetena fungují na principu asynchronního třífázového motoru. Ke vřetenu se dodává frekvenční měnič o shodném výkonu. Frekvenční měnič je napájen buď z třífázového vedení AC400V/50Hz nebo jednou fází AC230V/50Hz.



Obr. 10 Asynchronní vodou chlazené vřeteno o výkonu 2.2kW

Při napájení pouze jednou fází může protékat napájecími vodiči až 11 A!! Při roztáčení motoru může být protékající proud až 7 krát větší než proud protékající při konstantních otáčkách. Proto se používá tzv. rozběh. O plynulý rozběh z klidu na provozní otáčky se stará vnitřní systém frekvenčního měniče. Elektronika frekvenčního měniče mění vstupní frekvenci 50 Hz na výstupní frekvenci teoreticky nastavitelnou mezi 0-400 Hz. Prakticky se ale doporučuje frekvenční rozsah mezi 100-400 Hz, což odpovídá rozsahu otáček 6-24 tisíc otáček za minutu. Nižší frekvence než 100 Hz se nedoporučuje, neboť vřeteno v nižších otáčkách ztrácí výkon.

Do vodou chlazených vřeten musí být zajištěn permanentní průtok chladicího média použitím vhodného čerpadla s dostatečným výkonem pro naši aplikaci. Jako chladicí médium se používá destilovaná voda, aby se zabránilo usazování minerálů z vody klasické. Dále se do destilované vody přidává nemrznoucí kapalina. Vhodný je FRIDEX G48, který obsahuje inhibitory koroze a není agresivní vůči hliníkovým částem chladicího vedení uvnitř vřetene. Další přínosnou vlastností Fridexu je výskyt ethylen-glykolu, který zajistí, že se chladicí náplň nebude časem kazit.

Chlazení ohřáté kapaliny poté probíhá buď v aktivním chladiči s větrákem, nebo se používá pasivní nádrž s dostatečným objemem chladiva. Použití vodou chlazeného vřetene má velkou výhodu, protože tato vřetena jsou nesrovnatelně tišší, navzdory tomu rozvod chladicí kapaliny po stroji přináší nebezpečí s netěsnostmi. Chladicí kapalina se na hobby frézách rozvádí hadicemi zpravidla společně s elektroinstalací. Únik chladiva proto může mít fatální následky. Asynchronní vřetena se samozřejmě vyrábí i chlazená vzduchem. Odpadá potom komplet celá aparatura chlazení. Vzduchem chlazená vřetena však mají aktivní chladičí vrtuli spojenou s rotorem vřetene, a proto je hlučnější než vřeteno chlazené vodou.

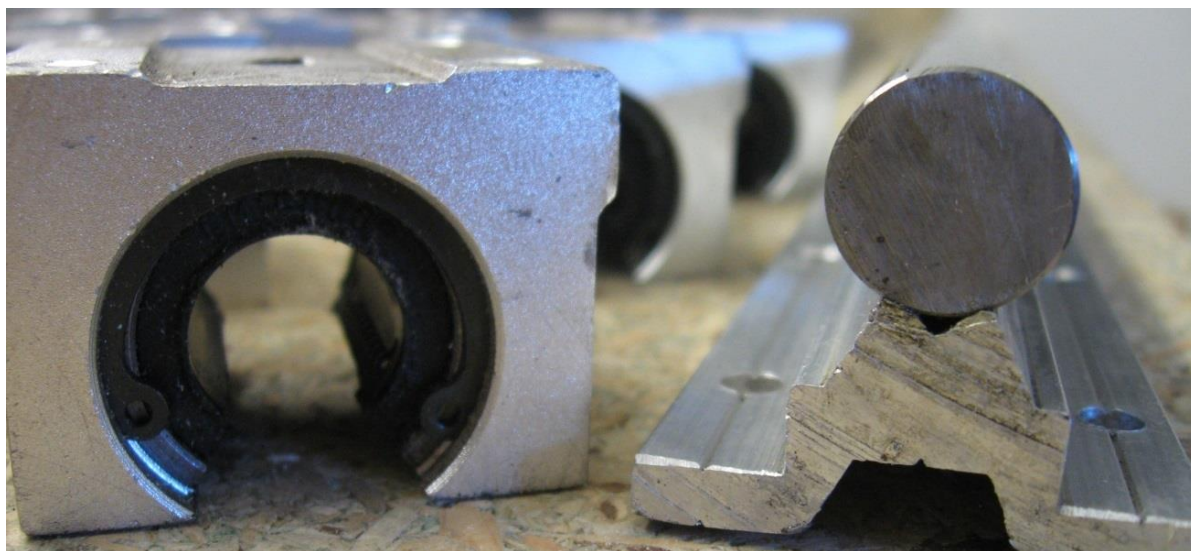
2.3 Vedení

Na vedení hobby frézky kutilové používají mnoho vlastních prototypů. Zpravidla složených ze šroubů a kuličkových radiálních ložisek, které obepínají ocelovou trubku. Jelikož tyto po domácku vyrobené systémy nejsou spolehlivé, dále se jim práce nebude věnovat. Jako další vedení se používají alternativy vedení rolničkového, totiž kuličkové výsuvy ze stolních zásuvek. Obrovskou nevýhodou takového vedení je jeho nízká únosnost. Tato vedení jsou dimenzována na zatížení kolem 35 kg a bývají schopny přenášet zatížení pouze v jednom směru. Proto jsou stroje s takovým typem vedení vhodné jako souřadnicové vyvrtávačky DPS nebo jako stroje na obrábění menších dílů z umělého dřeva, protože při obrábění vzniká pouze malá řezná síla.

Další možností pro vedení pohyblivých částí je tzv. nepodepřené vedení. Skládá se z povrchově kalené broušené tyče, která je vyrobena v rozměrové toleranci IT7 a běžně se dodává v délkách do dvou metrů, a z lineárního ložiska, které funguje podobně jako výše popsané vedení prizmatické, pouze profilem kolejnice je obyčejná kružnice. Lineární ložisko má zpravidla 4 – 8 nezávislých oběžných kuličkových drah podle výrobce. Lineární ložiska poté můžeme montovat na pohyblivé části stroje přímo za vnější válcovou část lineárního ložiska nebo existují ložiskové domky, které na konstrukci montujeme šrouby. Nepodepřené tyče se vyrábí až do průměru 50ti milimetrů. Nepodepřené vedení je v hobby sekci oblíbené pro jednoduchou montáž do stroje. Nevýhodou tohoto vedení je jeho nízká tuhost při větším rozsahu os, neboť je vedení umístěno volně v prostoru s podporou pouze na okrajích.

Nejlukrativnějším typem vedení je vedení podepřené. Kolejnice podepřného vedení se skládá z broušené kalené tyče (65HRC) o průměru do 30ti milimetrů vyrobené v toleranci IT6 a z hliníkového profilového podloží z duralu. Protikusem je opět lineární ložisko, nyní je však tvaru C a obepíná tyč přibližně z 85 %. Podepřené vedení je optimální cestou mezi vedením nepodepřeným a profesionálním vedením prizmatickým. Díky podepření v celé délce má vedení výbornou tuhost a únosnost. Únosnost podepřené tyče o průměru 20 mm je přes 1000 N na jeden vozík. Otevřená konstrukce vozíku má své klady ale i zápory. Jelikož kon-

strukce ložiska či celého vozíku není uzavřená, nesmí být vozík namáhán silovou dvojicí, neboť by se mohl díky těmto účinkům rozlomit. V aplikacích, jako jsou třeba portálové frézky nebo frézky s velkým rozvorem kolejnic a pouze jedním pohybovým šroubem uprostřed, musí být použito domečků více, aby se účinek krouticího momentu rozložil na více domečků a eliminovalo se nebezpečí rozlomení. Otevřená konstrukce lineárního ložiska má také výhody. Hliníkové ložiskové domky jsou opatřeny stavěcími šrouby, kterými se dá perfektně vymezit vůle mezi lineárním ložiskem a kolejnicí.



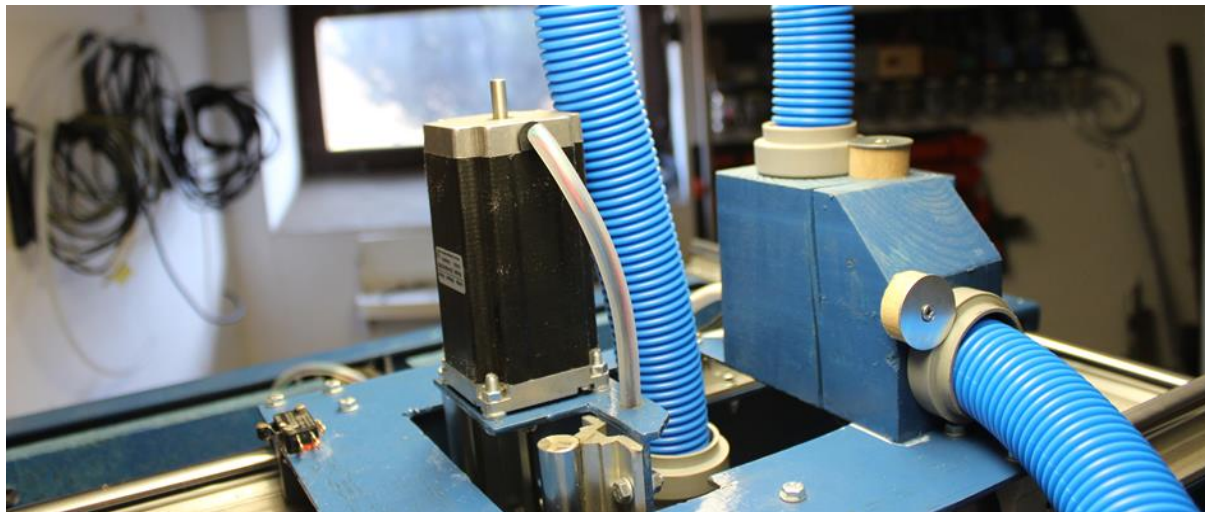
Obr. 11 Podepřené vedení SBR16 a otevřený vozík SME16

2.4 Krokové motory

V hobby CNC frézkách se setkáváme téměř výhradně s krokovými motory bez enkodéru. Oblíbené jsou zejména pro jednoduchost ovládání. Třísosá CNC frézka je ovládána trojicí krokových motorů, kde každý řídí vlastní osu. Pomocí jejich vzájemného otáčení můžeme dosáhnout různých pohybů od přímek v rovině přes 2D kružnice až po zužující se šroubovice atd. Systém řízení krokovými motory funguje velice snadno. Jedná se o řízení pomocí tzv. STEP-DIR instrukcí (STEP - krok, DIR - směr). Přenášení informací mezi řídicím PC a řídicí deskou probíhá v pulzech. Každý pulz má hodnotu STEP (0V;5V) a DIR (0V;5V). Pokud je hodnota STEP 0V, motor po tomto pulzu zůstává v klidu. Pokud je hodnota STEP 5V, motor se při tomto pulzu otočí o 1 krok. Hodnota DIR poté udává, jestli se motor pootočí v kladném smyslu otáčení, nebo ve smyslu opačném.

Vše je řízeno tzv. driverem krokového motoru, který tyto instrukce zpracovává a mění je na silové napájení magnetických cívek. Skoková změna magnetického pole poté způsobuje skokové pootočení rotoru. Krokový motor má standardně 200 krokových poloh, které jsou vytvořeny hardwarově konstrukcí motoru. Řídicí driver je poté schopen každý z dvou set kroků rozdělit na 16 mikrokroků rozdělením skokové změny napětí na cívkách na 16 napěťových mezi poloh. Krokový motor má tedy až 3200 jednotlivých poloh na jednu otáčku rotoru. Motor je schopen se pootočit o pouhých $0^{\circ}6'45''$ na jeden pulz.

Při konstrukci hobby stroje se používají nejčastěji krokové motory, které mají normalizovanou přírubu známou jako NEMA. Označení NEMA8, 11, 14, 16, 17, 23, 24, 34 a 43 poté určuje konkrétní rozměry příruby a rozteč montážních otvorů či průměr výstupní hřídele. Ke každé přírubě poté přísluší více výkonových variant motorů. Takové řešení je velice přínosné, neboť pokud se během návrhu pohybových motorů pohony poddimenzují, což se projeví špatnou dynamikou stroje, motor snadno vyměníme za silnější se stejnou přírubou, neboť je vše kompatibilní.



Obr. 12 Krokový motor s přírubou NEMA23 s krouticím momentem 3 Nm

V hobby sféře pro řízení krokových motorů lze získat tzv. „modrou desku TB6560“, na které na jedné straně vstupují řídicí signály a vstupní napětí mezi 12ti a 36ti volty, na straně druhé poté vystupují vývody k motorům označené A+, A-, B+ a B-, které se spojí přímo s magnetickými cívkami krokového motoru. Zapojení zvládne i začátečník. Takové řešení má své nevýhody, neboť pokud dojde k poškození jedné části, je zpravidla celá deska poškozena a musí se vyměnit. Proto se této situaci předchází zvolením sestavy, která je složena z oddělovací desky a driverů krokových motorů zvlášť. Zde je v případě poruchy nutné vyměnit pouze 1 vadný segment. Krokové motory dosahují poměrně malých krouticích momentů, standardně do 5ti N.m. Další nevýhodou jsou poměrně malé maximální otáčky. Krokový motor dokáže spolehlivě pracovat pouze do 300 min^{-1} . Další nevýhodou je citelný pokles krouticího momentu se vzrůstající frekvencí otáčení motoru. Při překročení maximálních otáček nebo maximálního krouticího momentu dochází ke ztrátě kroků. V praxi to znamená, že motor se měl dle řídicích signálů otočit 6x dokola, ale fyzicky provede pouze 5,5 otáčky. Taková chyba se zásadním způsobem projevuje při obrábění. Krokové motory nejsou standardně vybaveny snímačem polohy tzv. enkodérem. Protože nejsme v domácích podmínkách schopni tuto chybu elektronicky vyhodnocovat, musíme jí při konstrukci hobby stroje předcházet.

2.5 Návrh lineárního pohonu

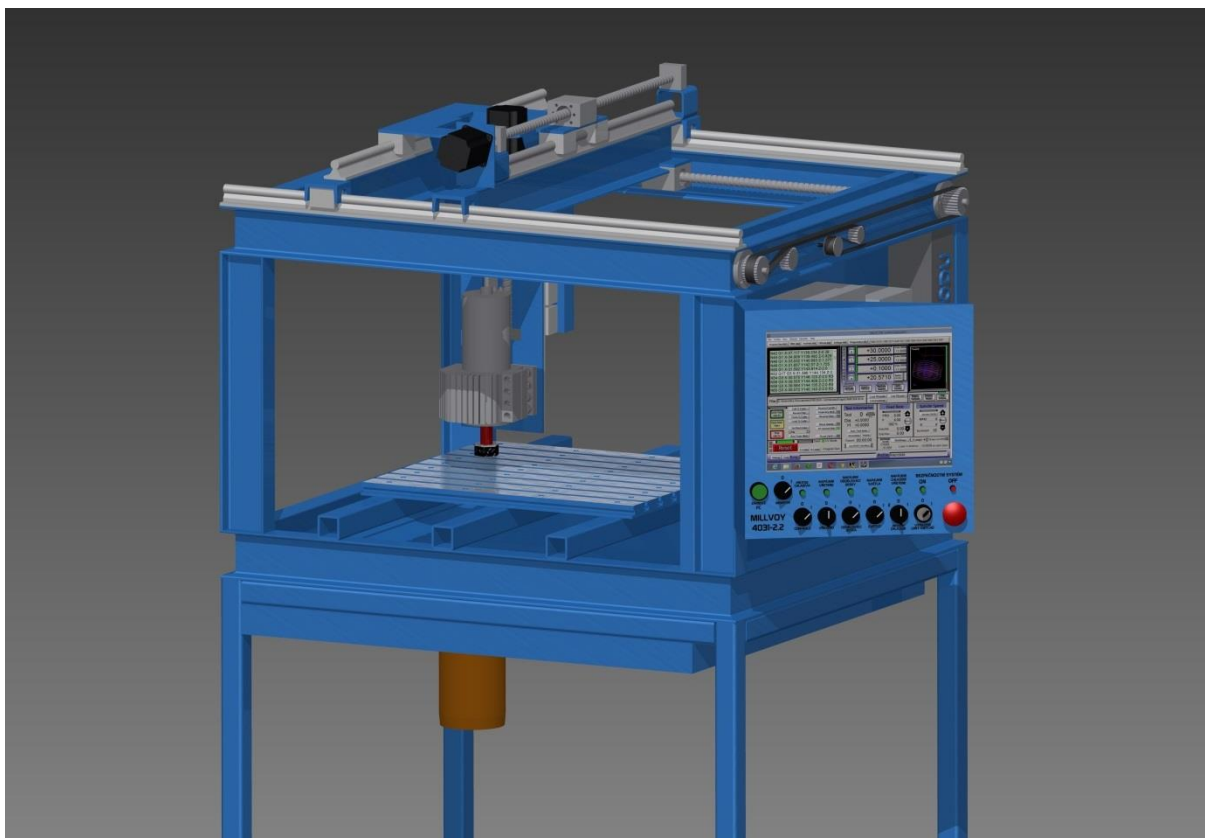
K realizaci pohybů se na hobby frézkách používají v základu dva způsoby. Prvním je přímé spojení motoru a pohyblivého segmentu za pomoci ozubené řemenice společně s ozubeným řemenem nebo řetězového kola a řetězu. Řemenice je přímo připevněna na výstupní hřídel krokového motoru. Takové spojení můžeme vidět u 3D tiskáren při polohování

extrudéru v ose X a Y. Dále takové řešení můžeme vidět u polohování souřadnicových hobby vyvrtávaček a u frézek, kde při obrábění vzniká velice malá řezná síla, neboť napnutí řemenu i řezná síla se projevují radiální silou působící na hřídel krokového motoru a způsobují jeho zvýšené opotřebení, protože je krokový motor konstruován pouze na zatížení krouticím momentem.

Další variantou jsou pohybové šrouby. Pohybové šrouby můžeme rozlišit na dva základní druhy a to jsou šrouby trapézové a šrouby kuličkové. Trapézové šrouby se používají buď v kombinaci s ocelovou či bronzovou maticí nebo se používá matice plastová. Trapézový šroub s plastovou maticí má o něco větší stoupání než šroub pro ocelové a bronzové matice. Trapézový šroub určený pro plastovou matici má také lepší kvalitu povrchu, aby se minimalizovalo abrazivní opotřebení relativně měkké matice. Tyto šrouby jsou schopny působit, dle slov prodejce, osovou silou až 700 N. Tento převod se používá u menších frézek nebo u 3D tiskáren pro realizaci vertikálního posuvu stolu či extrudéru. Přesnější stroje jsou osazeny šrouby kuličkovými, jejichž princip byl vysvětlen dříve. Cena těchto šroubů je v porovnání s trapézovými šrouby až 5 krát vyšší. Cena je ale vyvážená přesností kuličkových šroubů a větší životností. Největší výhodou použití kuličkových šroubů je díky absenci smykového tření velická dynamičnost stroje.

U hobby strojů se zpravidla používá 1 pohybový šroub uprostřed dvou lineárních vedení. Tato varianta je vhodná pro rozchod vedení do 500ti mm. Tato hodnota je experimentálně ověřena majiteli hobby frézek. Při větším rozvoru se doporučují dva pohybové šrouby v blízkosti vedení, protože při použití jednoho šroubu může docházet ke křížení pohybového stolu, namáhání linearsetů a pohybového šroubu ohybovým momentem, což může zapříčinit rozlomení linearsetu a v každém případě se zhoršuje pohyblivost celého mechanismu. Pokud je pohybový šroub v ústrojí jeden, poté se ke vhodně upravenému konci pohybového šroubu připojí krokový motor vhodnou spojkou. Osa rotace krokového motoru zpravidla není naprosto shodná s osou rotace pohybového šroubu. Proto se mezi křídél krokového motoru a pohybový šroub vkládá pružná spojka, která vyrovná malé posunutí i natočení os vůči sobě. Pokud je pohybových šroubů v ústrojí více, synchronní otáčení šroubů zajistí vhodný nepřímý převod.

3 HOBBY CNC FRÉZKA MILLVOY 4031-2.2



Obr. 13 Model frézky MillVOY 4031-2.2

3.1 Volba konstrukce

Při volbě konstrukce byla práce inspirována průmyslovou frézou typu horní gantry. Frézka typu horní gantry je známá jako typ portálové frézky. Portál však není sestaven ze dvou svislých stojanů a příčnicku, ale příčník jezdí po pevných ložích umístěných ve vrchních částech rámu. Pevná lože jsou zpravidla umístěna ve výšce přesahující výšku člověka. Celá konstrukce tvoří uzavřený rám v podobě kvádrů. U mé konstrukce je příčník rozdělen na dvě kolejnice. Jedna je hlavní, tzv. unášecí. Na hlavní kolejnici jsou fixovány jak matice kuličkových šroubů v ose X, tak i lineární systém, který poté vřeteníku umožňuje pohyb v ose Y. Druhá kolejnice je pomocná a podpírá vřeteník z druhé strany, aby se minimalizovaly účinky krouticího a ohybového momentu vzniklé během obrábění. Vřeteník je poté sestaven ze dvou hlavních součástí, které se do sebe zasouvají a jsou spojeny podepřeným vedením o průměru 16 mm. Na pohyblivé desce vřeteníku je umístěno vřeteno. Konstrukce je po částech svařena z ocelových profilů I80 a poté vhodně sešroubována.

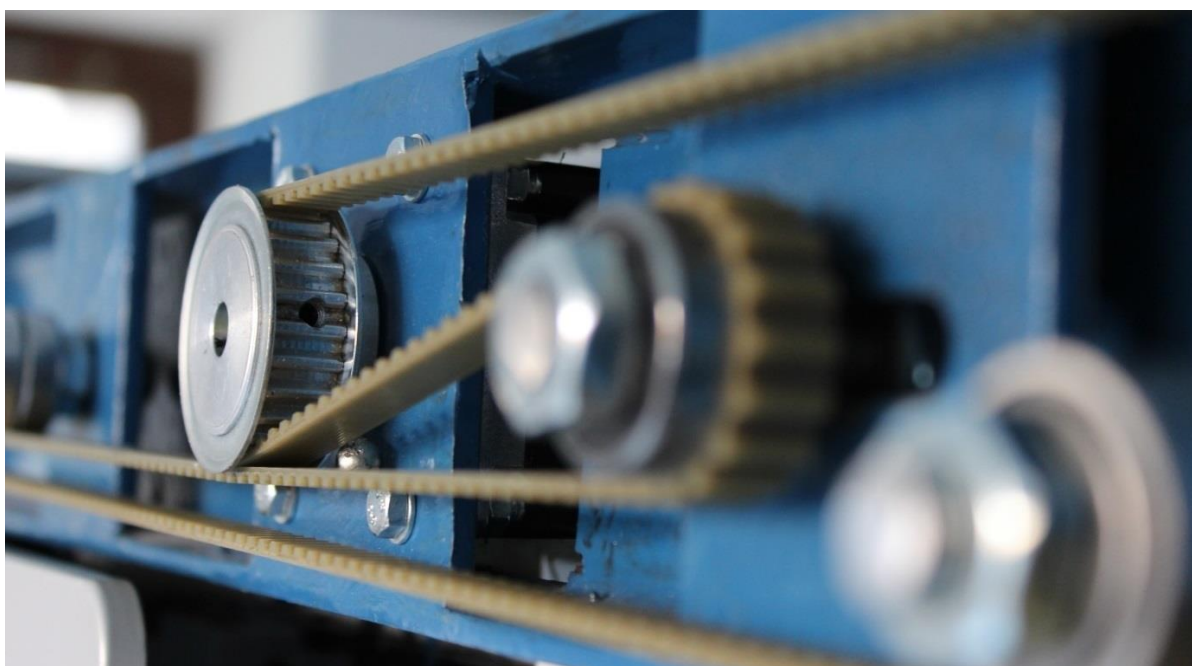
3.2 Volba lineárního systému

Při volbě lineárního systému bylo rozhodnuto ve prospěch podepřených tyčí o průměru 16 mm. Prodejcem mi bylo sděleno, že jeden lineární vozík SBR16 má únosnost 700 N, což bylo při použití vozíků v páru či v kombinaci 6ti vozíků dostačující. Protože je tento lineární systém velice drahý, byla zvolena metoda „zpětného návrhu“. Na internetu byl zakoupen

set těchto kolejnic i s vozíky s nejvýhodnější nabídkou. Na základě výchozích parametrů setu (2x 950mm, 2x 750mm a 2x 450mm) byla navržena celá konstrukce.

3.3 Volba převodu pro pohon

V hobby frézkách se vyskytuje několik způsobů realizace převodu krouticího momentu krokového motoru na axiální sílu, která pohybuje částmi stroje. Do mé frézky bylo rozhodnuto použití v podstatě nejdražšího, ale zároveň i nejefektivnějšího a nejpresnějšího typu převodu. Byl zvolen převod za pomoci kuličkových šroubů o průměru 16 mm a stoupáním deset milimetrů na otáčku. Veliká výhoda byla shledána v přesnosti výroby těchto šroubů. Obrovskou výhodou je výskyt valivého tření, které je oproti tření smykovému řádově menší, takže umožňují lepší dynamiku stroje. Výborné vlastnosti kuličkového šroubu jsou však vyváženy požadavky na velice přesné uložení. Na hobby diskusích se objevuje i nadsázka: „minimálně 100% rovnoběžnost“. Na mojí frézce byly tyto požadavky splněny přesnou výrobou domečků pro ložiska či matice kuličkových šroubů a zejména velice přesným obrobením konců kuličkových šroubů. V ose X jsou pohyblivé komponenty namontovány na rám svařovaný v domácích podmínkách. Proto byly šrouby perfektně vystředěny a domečky s nosnou konstrukcí byly vzájemně svrtány až při montáži a odladění celé konstrukce. Tím bylo dosaženo maximální rovnoběžnosti šroubů a pohyblivého příčnicku.



Obr. 14 Řemenový převod osy X, detail motorové řemenice

V předchozím odstavci bylo zmíněno obrobení konců kuličkových šroubů. Zde bylo pravděpodobně největší úskalí stavby celé frézky, neboť kuličkové šrouby se kupují nařezané na požadovaný rozměr, avšak jsou již z výroby předem tepelně zpracované. Dle prodejce by měli být povrchově kalené na tvrdost 62-65HRC do hloubky 1 mm pod povrchem. Bohužel se jedná o kuličkové šrouby z Číny a hned na začátku obrábění konců bylo zjištěno, že šrouby jsou prokaleny na tuto tvrdost v celém svém objemu. Přestože byly konce šroubů navrženy jako jednoduché válcové plochy s konci se závitem M10, nebylo možné vytvořit závitové části. Do technologie muselo být zařazeno ještě žíhání na měkko, které probíhalo při 700 -

800 °C po dobu 10ti minut [16, 17]. Ocel použitá na kuličkové šrouby naštěstí nebyla kalitelná na vzduchu, a proto bylo popuštění úspěšné a závity se podařilo s menšími problémy na koncích šroubů vytvořit.



Obr. 15 Indukčně ohřátý konec šroubu při žihání na měkko

3.4 Volba vřetene

Vřetenu se někdy říká také srdce obrábění. Takové označení je zcela přesné, neboť nekvalitní vřeteno nám vnáší do obrábění škodlivé vlivy, zejména pak házení nástroje a také kmitání. Oba jevy jsou naprosto nežádoucí a vnáší nepřesnosti do celého procesu obrábění. Při konstrukci hobby frézek jsou ale jiné priority výběru vřetene. Modelář, který vyřezává model z balzy, rozhodně nebude odměřovat setiny milimetru na výsledném obrobku. Daleko více se zde hledí na hlučnost, cenu a v neposlední řadě životnost vřetene.



Obr. 16 Frekvenční měnič asynchronního vřetene s výstupem 3x230V AC, 2.2 kW, 0-400 Hz

Výběru vřetene pro moji frézku předcházela rozvaha, jaké vřeteno zvolit. Nakonec vyhrálo neznačkové vodou chlazené vřeteno s kleštinovým upínačem ER20 z Číny. Vodou chlazené vřeteno bylo zvoleno zejména kvůli hlučnosti. Nákup vřetene z Číny by se dal přirovnat ke koupi „zajíce v pytli“, neboť zákazník kupuje zpravidla kusy, které neprojdou testem kvality. Největším úskalím těchto vřeten je vadně vybroušený vnitřní kužel v hřídeli vřetene, do kterého zapadají kleštiny pro upínání nástroje. Nesouosost osy vybroušeného kužele a osy rotace hřídele vřetene způsobuje házení nástroje. K házení nástroje také přispívá přesnost uložení ložisek. Na frézce bylo provedeno měření radiálního házení na dřívku nástroje. Naměřená odchylka byla 0,02 mm.

3.5 Rozvod vodního chlazení

Chladicí okruh pro vodou chlazené vřeteno je na mé frézce sestaven jako chladicí okruh s aktivním chlazením. Oběh chladiva zajišťuje oběhové čerpadlo, které je schopno čerpat chladivo okruhem s průtokem 100 litrů za hodinu. Jako chladivo je použitý roztok destilované vody a Fridexu G48. Destilovaná voda se používá proto, aby se neusazovaly minerály na vnitřních stěnách chladiče a vřetene. Fridex je do roztoku přidán jako inhibitor koroze a také jako konzervační prostředek pro zajištění delší životnosti náplně. Součástí chladicího okruhu je také aktivní chladič se dvěma ventilátory o průměru 120 mm. Dále se v okruhu nachází průtokový snímač, který slouží jako bezpečnostní prvek a v neposlední řadě také zásobní nádrž, která pojme až 30 litrů chladiva.

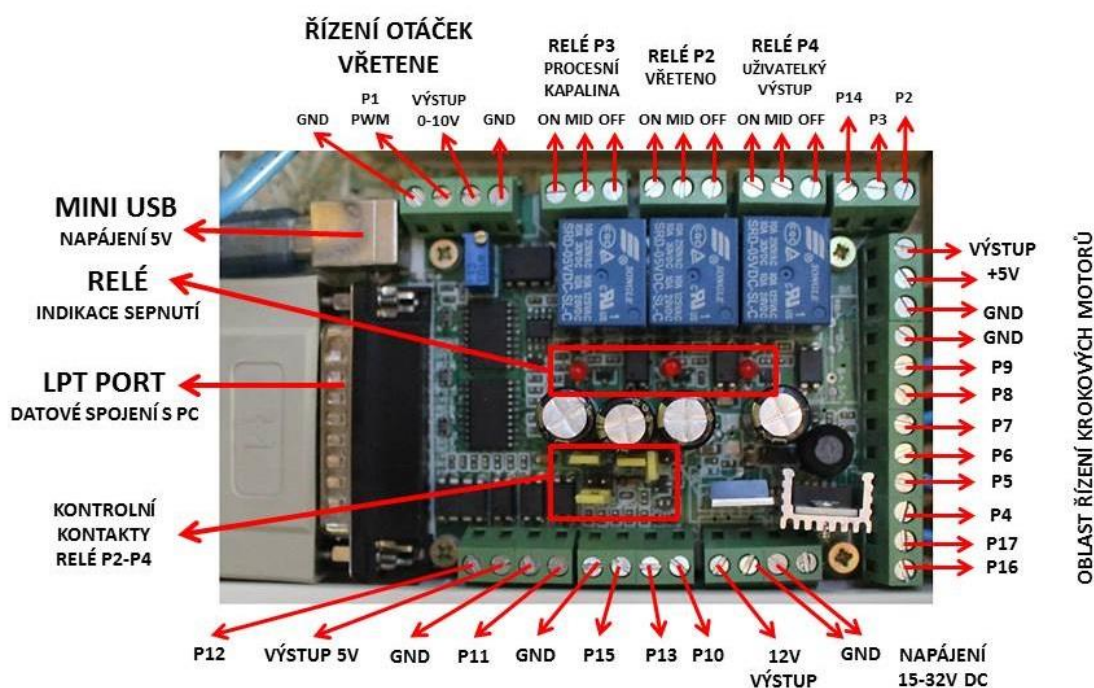


Obr. 17 Oběhové čerpadlo chladičí kapaliny, vlevo expanzní nádrž o objemu 30 litrů

3.6 Řízení CNC frézky

Pro ovládání frézky byl zvolen systém MACH3, který se pohodlně instaluje do klasického PC. Mezi počítačem a krokovými motory se poté nachází další elektronické prvky. Z počítače je za pomoci paralelního LPT portu připojena tzv. oddělovací deska. Tato deska má za úkol galvanické oddělení počítače od silové části řídicího obvodu. Oddělovací deska je napájena zdrojem 24 V. Oddělovací deska obsahuje 3 relé. Relé ovládající spínání vřetene, čerpadla procesní kapaliny a dále oddělovací deska obsahuje třetí libovolně využitelné relé. Z oddělovací desky jsou poté řídicí signály, nyní už separované pro jednotlivé osy, vedeny do silových driverů krokových motorů.

Každý driver má v sobě integrovaný obvod Toshiba TB6600, který dokáže ovládat krokové motory s řídicím proudem až 5A. Zapojení řadiče krokového motoru je velice snadné, neboť do něj vedou pouze 4 řídicí vodiče, napájení GND a 36V a z řadiče vedou 4 silové vodiče přímo ke krokovému motoru. Zapojení této elektroniky tedy zvládne i naprostý začátečník. Do oddělovací desky je možno přivést až 5 externích signálů. Tyto vstupy se používají pro referenční spínače nebo pro spínače limitní. Má frézka je určena pro jednodušší operace a je připravena pro obrábění s tzv. pracovní nulou. Pracovní nula se zvolí libovolně, zpravidla v rohu nebo uprostřed polotovaru. Stroj se přesně ustaví vůči této poloze a všechny souřadnice jsou vztaženy k pracovní nule. Proto tzv. referování os není vyžadováno.



Obr. 18 Oddělovací deska s popisem jednotlivých vstupů a výstupů [18]

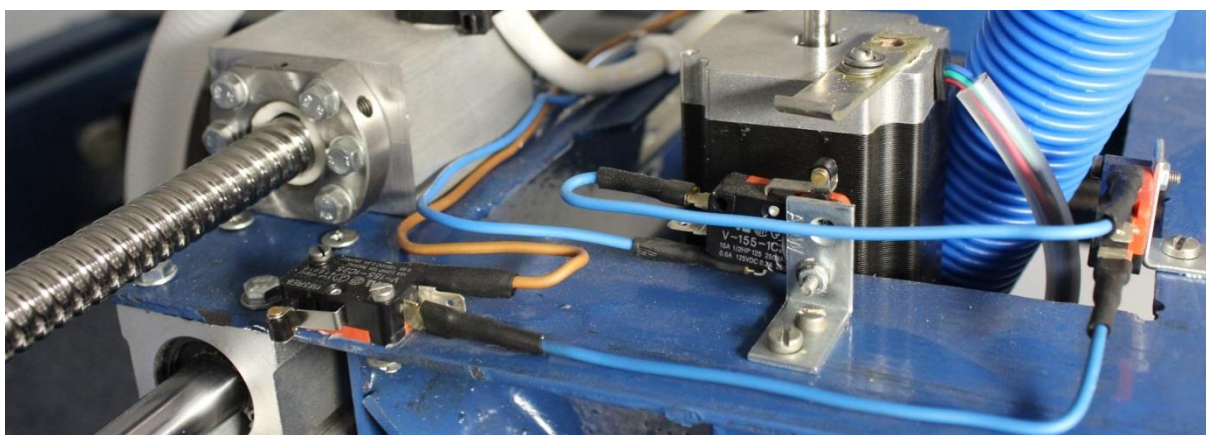
3.7 Volba krokových motorů

Jak už bylo dříve zmíněno, krokové motory nevynikají svým výkonem. Otáčky se doporučují volit do 300 min^{-1} . V hobby sekci se setkáváme s rozměry příruby NEMA14 – NEMA34. Na mých konstrukcích bývají voleny krokové motory s přírubou NEMA23. Tato příruha je využívána jako rozměrový standart a v mé dílně jsou na ni připraveny různé šablony a měrky pro vrtání montážních otvorů. To byl důvod volby této příruby i při návrhu této konstrukce. Do své frézky MILLVOY 4031-2.2 byly zvoleny téměř nejsilnější krokové motory této velikosti. Byly zvoleny krokové motory s řídicím proudem 3A, které jsou schopny vyvolat krouticí moment až 3 N.m. S rostoucí rychlostí otáčení však krouticí moment znatelně klesá, a proto bude během další výpočtů uvažován krouticí moment pouze 2 N.m. Velký krouticí moment zajišťuje lepší dynamiku stroje a především, což je pro důležitější parametr, předchází přeskakování motorů tzv. ztrátě kroku, která je během procesu obrábění nepřijatelná.

3.8 Bezpečnostní prvky

3.8.1 Koncové spínače

Každý stroj musí chránit především zdraví obsluhy stejně, jako musí chránit sám sebe. Má frézka je vybavena koncovými spínači, které nedovolí vyjetí pohyblivých částí mimo jejich bezpečný rozsah. Opření pohyblivých částí o pevný rám stroje by mohlo způsobit ohnutí částí rámu či poškození pohybové matice. Z tohoto hlediska je výhodný omezený krouticí moment krokových motorů, neboť při překročení krouticího momentu dojde ke ztrátě kroků, zastavení motoru a stroj se trvale nepoškodí. Frézka je opatřena celkem 6ti koncovými spínači. Jsou umístěny v limitních pozicích os X+, X-, Y+, Y-, Z+, Z-. Koncové spínače jsou sériově propojeny, takže rozepnutí jednoho spínače či přerušení spojujících vodičů odstaví celý obvod. Jelikož má frézka jednodušší elektronické zapojení, při najetí na koncový spínač nelze strojem pohybovat. Proto je stroj opatřen klíčovým spínačem, který je zapojen paralelně s limitními spínači. Při sepnutí klíčového spínače se přemostí spínače koncové a stroj se může opět pohybovat. Zde záleží na pečlivosti obsluhy, neboť odjetí z koncové polohy musí provést správným směrem.



Obr. 19 Sestava koncových spínačů umístěných na vřeteníku

3.8.2 EMERGENCY STOP tlačítko

Dalším bezpečnostním prvkem na frézce stejně jako na většině pracovních strojů je EMERGENCY STOP tlačítko. Toto tlačítko funguje pro nouzové zastavení stroje, pokud hrozí například kolize nástroje s obrobkem, dojde ke zlomení nástroje volbou nevhodných řezných podmínek, uvolnění obrobku z upínače či jiné kolizní situaci. EMERGENCY STOP tlačítko zajistí, že se zastaví veškeré posuvy stroje a hlavní pohyb vřetene v nejkratším možném čase.

3.8.3 Průtokový spínač

Průtokový spínač má za úkol kontrolu průtoku chladiva vřetenem, neboť přehřátí vřetene by mělo fatální následky. Průtokový spínač je umístěn na konci chladicího okruhu vřetene, těsně před expanzní nádobou. Na konci okruhu je umístěn z jednoduchého důvodu. Pokud by nefungovalo čerpadlo chladicí kapaliny nebo by chladicí kapalina unikala z okruhu, průto-

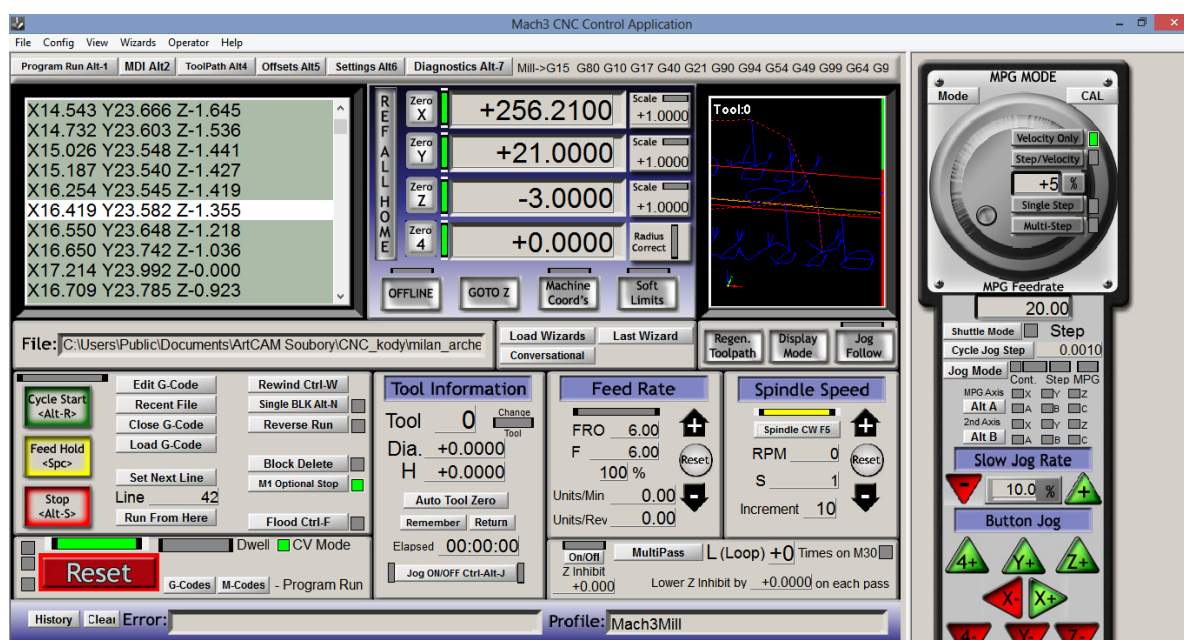
kový snímač by se přestal otáčet a vyhodnotil by situaci jako chybový stav a zastavil by frézku nezávisle na obsluze.

3.8.4 Ochrana před dotykem se živými částmi stroje

Ochrana proti dotyku obsluhy se živými částmi stroje je tvořena za pomoci krytů z polystyrolové nebo polyvinylchloridové desky. Kovové části jsou potom kompletně uzemněny zemnicím vodičem žlutozelené barvy, takže nemůže dojít k přechodu proudu na obsluhující osobu při dotyku s kovovými částmi. Při poruše je tento proud odveden zemnicím vodičem. Tento stav je poté jističem vyhodnocen jako zkrat a dojde k bezpečnému odpojení zařízení od zdroje. Zemnicí vodič také slouží k bezpečnému odvodu náhodně vzniklé statické elektřiny.

3.9 Prostředí MACH3

MACH3 je v hobby sféře velice rozšířený řídicí systém. Jeho velikou výhodou je, že se řídí známým G-kódem, takže se pro něj dají generovat kódy v téměř libovolném CAM software. Strukturou je kód pro MACH3 nejvíce podobný G-kódu pro řídicí systém FANUC. Velkou výhodou programu MACH3 jsou sledávány tzv. wizardy. Wizardy umožňují generovat CNC kódy pro jednoduché operace jako je hrubování kruhových a obdélníkových kapes či profilování kapes. Mezi další operace pak lze zařadit přefrézování čelní plochy tzv. meandrem nebo získávání nulových bodů obrobku za pomoci mechanické dotykové sondy. Další výhodou tohoto programu je i přehledná tabulka podporovaných G a M funkcí.



Obr. 20 Uživatelské prostředí řídicího systému MACH3

3.10 Princip řízení krokových motorů

Princip řízení krokových motorů byl již několikrát zmíněn. Program MACH3 generuje STEP-DIR instrukce v pulzech podle předem nastavených parametrů. Instrukce STEP znamená „KROK“ a instrukce DIR poté znamená směr, ve kterém se má motor pootočit.

V programu se předem nastaví, kolik kroků je potřeba vykonat na posunutí osy o 1 mm. U rotačních os se poté nastavuje počet kroků na jednu otáčku rotační osy [19].

3.10.1 Postup výpočtu kroků krokových motorů

Krokový motor je hardwarově rozdělen na 200 kroků. Drivery krokových motorů jsou schopny každý krok dělit na 1/2, 1/4, 1/8 nebo 1/16. Dělení probíhá softwarově, kdy se skoková změna magnetického pole odpovídající jednomu kroku elektronicky rozdělí na 2, 4, 8 nebo 16 dílčích mezi změn. Při nastavování frézky je používáno 1/8 nebo 1/16 dělení kroku. Frézka je poté schopna natáčet rotor krokového motoru s větší přesností a také je běh krokového motoru plynulejší. Když je bráno v potaz i „nestrojařské“ hledisko, motory s větším dělením kroku mají při rotaci lepší zvuk [19].

Nyní se budeme věnovat nastavení programu MACH3. V ose X je motor spojen se dvěma ozubenými řemenicemi. Ozubená řemenice na krokovém motoru má 24 zubů. Ozubené řemenice na kuličkových šroubech mají zubů 30. Kuličkový šroub má stoupání 10 mm.ot⁻¹. Počet požadovaných kroků krokového motoru, aby se příčnick ve směru X posunul o 1 mm, vyjádříme pomocí trojčlenky finální vztah (1).

$$k_x = \frac{h \cdot m \cdot z_2}{p \cdot z_1} [\text{krok} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (1)$$

$$k_x = \frac{200 \cdot 16 \cdot 30}{10 \cdot 24} = 400 \text{ krok} \cdot \text{mm}^{-1}$$

k	počet pulzů na 1 otáčku krokového motoru
h	počet hardwarových kroků na jednu otáčku motoru
m	počet mikrokroků na 1 hardwarový krok
z ₁	počet zubů řemenice na krokovém motoru
z ₂	počet zubů řemenice na pohybovém šroubu
p [mm]	stoupání kuličkového šroubu

V ose Y a v ose Z je kuličkový šroub přímo spojen s výstupní hřídelí krokového motoru. Tudíž ze vzorce pro výpočet počtu kroků potřebných pro posuv pohyblivé části osy o 1 mm vypadne poměr počtu zubů pohybových řemenic. Vzorec (2) se tedy výrazně zjednoduší.

$$k_y = k_z = \frac{h \cdot m}{p} [\text{krok} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2)$$

$$k_y = k_z = \frac{200 \cdot 16}{10} = 320 \text{ krok} \cdot \text{mm}^{-1}$$

k	počet pulzů na 1 otáčku krokového motoru
h	počet hardwarových kroků na jednu otáčku motoru
m	počet mikrokroků na 1 hardwarový krok
p [mm]	stoupání kuličkového šroubu

Výpočtem bylo zjištěno, že pro posuv jednotlivých komponent vychází 400 a 320 kroků. mm^{-1} . Nyní následuje výpočet maximální rychlosti posuvu.

3.10.2 Výpočet posuvových rychlostí

Pokud bylo spočítáno, kolik kroků je potřeba vykonat pro posunutí osy o 1 mm, není problém dopočítat maximální rychlost, s jakou je osa schopna se pohybovat. Krokový motor má zajištěné mechanické vlastnosti, pokud se otáčí do 300 otáček za minutu. Na jedno otočení krokového motoru potřebujeme $200 \cdot 16 = 3200$ pulzů. Pokud podle vzorce (3) vynásobíme maximální otáčky pulzy na jedno otočení, získáme maximální hodnotu kroků za minutu, kterými lze krokový motor spolehlivě řídit. [19]

$$p_{max} = h \cdot m \cdot n_{max} [\text{krok} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3)$$

$$p_{max} = 200 \cdot 16 \cdot 300 = 960000 \text{ krok} \cdot \text{min}^{-1}$$

p_{max}	maximální počet pulzů za minutu
h	počet hardwarových kroků na jednu otáčku motoru
m	počet mikrokroků na 1 hardwarový krok
$n_{max} [\text{min}^{-1}]$	maximální otáčky krokového motoru

Podělením minutového počtu kroků, který je krokový motor schopen vykonat, počtem kroků, které jsou potřeba k posunutí komponenty o 1 mm, získáme maximální teoretickou posuvovou rychlost v jednotlivých osách dle vzorce (4).

$$f_x = \frac{p_{max}}{k_x} [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4)$$

$$f_x = \frac{960000}{400} = 2400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$f_y = f_z = \frac{p_{max}}{k_y} = \frac{p_{max}}{k_z} [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$f_y = f_z = \frac{960000}{320} \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$f_y = f_z = 3000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

p_{max}	maximální počet pulzů za minutu
$f [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	posuvová rychlost

Maximální posuvovou rychlost nástroje v prostoru poté může být spočítána jako vektorový součet třech jeho navzájem kolmých složek.

(5)

$$f_{max} = \sqrt{(f_x)^2 + (f_y)^2 + (f_z)^2} \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$f_{max} = \sqrt{2400^2 + 2 \cdot 3000^2} = 4874 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

Maximální posuvová rychlost nástroje v prostoru je téměř 5 metrů za minutu. Nyní byl spočítán druhý ze třech základních parametrů. Již byla vyjádřena závislost posunutí na počtu kroků krokového motoru, dále byla zjištěna maximální rychlost jednotlivých komponent. Dále musí být zjištěn ještě jeden parametr vyjadřující dynamiku obráběcího stroje. Tento parametr se nazývá zrychlení.

3.11 Výpočet zrychlení ve směru jednotlivých os

Na dynamiku celého stroje má téměř absolutní vliv osová síla, kterou jsou v hobby sekci motory krokové, v profesionální sekci poté servopohony, schopny vytvořit. Osová síla v kuličkovém šroubu je přímo závislá na stoupání kuličkového šroubu, krouticím momentu a také tzv. účinnosti převodu kuličkových šroubem. Osová síla lze vypočítat dle následujícího vzorce (6):

$$M = \frac{F_{osová} \cdot p}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (6)$$

M [N.m]	krouticí moment krokového motoru
$F_{osová}$ [N]	osová síla v kuličkovém šroubu
p [mm]	stoupání kuličkového šroubu
η [-]	účinnost kuličkového šroubu

Tento vzorec pro naši aplikaci, kdy známe krouticí moment, přechází do tvaru (7):

$$F_{osová} = \frac{2000 \cdot M \cdot \pi \cdot \eta}{p} \text{ [N]} \quad (7)$$

$$F_{osová} = \frac{2000 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0.75}{10} = 942.48 \text{ N}$$

3.11.1 Odhad hmotností částí stroje

Pro základní odhad dynamického chování stroje nám vystačí vzorec (8).

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (8)$$

Jelikož bude výpočet prováděn pro každou osu zvlášť, bude v následujících výpočtech vynecháno vektorové značení. Ve vzorci se vyskytuje suma sil, která vyjadřuje výsledné silové působení na pohybovanou část, dále tam vystupuje hmotnost, jež bude interpretována jako hmotnost části rámu, kterou bude pohybováno, a nakonec vlastní zrychlení. Odhad hmotnosti bude proveden na základě vytvořeného modelu v programu Autodesk Inventor a technických listů normalizovaných dílů. Výpočet je vynásoben koeficientem 1,2, který reprezentuje nepřesnost výpočtu a také pasivní odpory vyvolané přívodními kanály pro chlazení vřetene a řízení pohybu.

Odhad zrychlení části rámu, která se pohybuje ve směru osy Z

Na základě modelu byla odhadnuta hmotnost vytvořených součástí na 12,1 kg. Dále ke hmotnosti přispívá hmotnost vřetene 5 kg a hmotnost 0,9 metru podepřené kolejnice SBR16, která má hmotnost 2,55 kg na metr délky. Výpočet hmotností reprezentuje vzorec (9).

$$m_z = \sum_{i=1}^n m_{z_i} \text{ [kg]} \quad (9)$$

$$m_z = (12,1 + 5 + 0,9 \cdot 2,55) \cdot 1,2 = 23,3 \text{ kg}$$

Nyní bude proveden silový rozbor pro zvedání. Pro spouštění je rozbor vynechán, neboť tento stav není silově tolik náročný. Na pohyblivou část ve směru osy Z působí tíhová síla směrem dolů a zároveň osová síla šroubu, která míří vzhůru. Pro výslednou sílu tedy platí vztah dle vzorce (10):

$$F_{\text{výsledná}} = -F_G + F_{\text{osová}} \text{ [N]} \quad (10)$$

$$F_{\text{výsledná}} = -m \cdot g + F_{\text{osová}} \text{ [N]}$$

$$F_{\text{výsledná}} = -23,3 \cdot 9,81 + 942,48 = 713,9 \text{ N}$$

Nyní už stačí dosadit do vzorce $\sum F = m \cdot a$ a bude získáno zrychlení stroje ve směru osy Z dle vzorce (11).

$$a_z = \frac{F_{\text{výsledná}}}{m} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (11)$$

$$a_z = \frac{713,9}{21,6} = 33,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Odhad maximální řezné síly

Posuv ve vertikálním směru již byl vyřešen, ve směru horizontálním se nyní změní metodika výpočtu. V předchozím případě byl naprosto zanedbán vliv obráběcích sil. Vliv sil byl zanedbán, neboť síly působí zejména v radiálním směru os X a Y. Dle informace prodejce dosahuje vřeteno největšího krouticího momentu při 20 000 min⁻¹. Deklarovaný výkon vřetene je 2,2 kW. Maximální krouticí moment vyjádříme za pomoci vzorce (12).

$$M_k = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot f} \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (12)$$

$$M_k = \frac{2200}{2 \cdot \pi \cdot \frac{20000}{60}} = 1,05 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Při obrábění bude použita fréza nejmenší fréza o průměru 3,175mm, tečnou složku řezné síly lze spočítat z následujícího vzorce (13).

$$F_{tečná} = \frac{2 \cdot M_K}{D} [N] \quad (13)$$

$$F_{tečná} = \frac{2 \cdot 1,05}{3,175 \cdot 10^{-3}} = 661 N$$

Výsledná síla, která se podílí zrychlení pohyblivých částí, získáme jako rozdíl $F_{osová}$ a $F_{tečná}$ dle vzorce (14)

$$F_{výsledná} = F_{osová} - F_{tečná} [N] \quad (14)$$

$$F_{výsledná} = 942,48 - 661 = 281,48 N$$

Odhad zrychlení části rámu, která se pohybuje ve směru osy Y

Na základě modelu byla odhadnuta hmotnost vytvořených součástí na 15,563 kg. Dále ke hmotnosti přispívá hmotnost vřetene 5 kg, hmotnost 0,9 metru podepřené kolejnice SBR16, která má hmotnost 2,55 kg na metr délky a hmotnost 11ti vozíků SME16. Vše je vyjádřeno dle vzorce (15).

$$m_y = \sum_{i=1}^n m_{y_i} [kg] \quad (15)$$

$$m_y = (15,563 + 5 + 0,9 \cdot 2,55 + 11 \cdot 0,135) \cdot 1,2 = 29,21 kg$$

Pro výsledné zrychlení ve směru osy Y tedy platí vztah (16):

$$a_y = \frac{F_{výsledná}}{m_y} [m \cdot s^{-2}] \quad (16)$$

$$a_y = \frac{281,48}{29,21} = 9,64 m \cdot s^{-2}$$

Odhad zrychlení části rámu, která se pohybuje ve směru osy X

Na základě modelu byla odhadnuta hmotnost vytvořených součástí na 28,655 kg. Dále ke hmotnosti přispívá hmotnost vřetene 5 kg, hmotnost 2,4 metru podepřené kolejnice SBR16, která má hmotnost 2,55 kg na metr délky a hmotnost 15ti vozíků SME16. Součet hmotností je dán vztahem (17).

$$m_x = \sum_{i=1}^n m_{x_i} [kg] \quad (17)$$

$$m_x = (28,655 + 5 + (0,9 + 1,5) \cdot 2,55 + 15 \cdot 0,135) \cdot 1,2 = 50,16 kg$$

Pro výsledné zrychlení ve směru osy X tedy platí vztah (18):

$$a_x = \frac{F_{\text{výsledná}}}{m_x} [m \cdot s^{-2}] \quad (18)$$

$$a_x = \frac{281,48}{50,16} = 5,61 m \cdot s^{-2}$$

Výpočet zrychlení nástroje v prostoru (19)

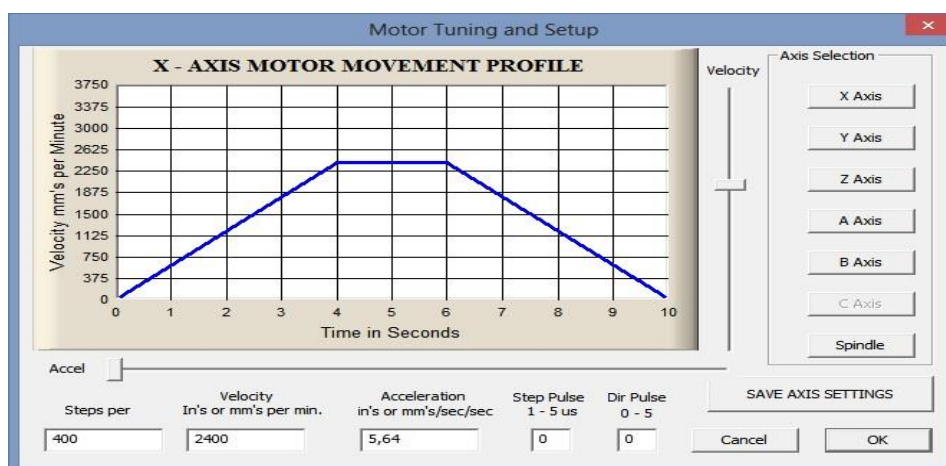
$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} [m \cdot s^{-2}] \quad (19)$$

$$a = \sqrt{5,61^2 + 9,64^2 + 33,1^2} = 34,93 m \cdot s^{-2}$$

Po vypočtení posledního zrychlení a_x byl vypočten poslední neznámý parametr, který je nutný ke správné konfiguraci programu MACH3. Pro zadávání těchto parametrů je v systému MACH3 připraveno intuitivní dialogové okno, které námi zadané výsledky přímo zobrazuje v přehledném grafu. Toto dialogové okno vyvoláme nabídkou „Motor Tuning and Setup“

Zjištěné parametry jsou:

počet pulzů pro posuv o 1mm v ose X= 400	teoretický posuv nástroje v prostoru= 5 m.min ⁻¹
počet pulzů pro posuv o 1mm v ose y= 320	maximální krouticí moment vřetene= 1,05 N.m
počet pulzů pro posuv o 1mm v ose Z= 320	zrychlení v ose Z = 33,1 m.s ⁻²
maximální posuv v ose X = 2 400 mm.min ⁻¹	zrychlení v ose y = 9,64 m.s ⁻²
maximální posuv v ose Y = 3 000 mm.min ⁻¹	zrychlení v ose X = 5,61 m.s ⁻²
maximální posuv v ose Z = 3 000 mm.min ⁻¹	zrychlení nástroje v prostoru = 34.9 m.s ⁻²



Obr. 21 Okno „Motor Tuning and Setup“ pro zadávání základních parametrů motorů

4 REÁLNÉ PARAMETRY FRÉZKY MILLVOY 4031-2.2

4.1 Reálně dosahovaná posuvová rychlost

Při tomto experimentu byla posuvová rychlost komponent postupně zvedána po 500 mm.min⁻¹. Po zvýšení posuvové rychlosti následoval jednoduchý program, který po dobu dvou minut opakovaně přejížděl přes celý rozsah os. Po celou dobu krokový motor nesměl ztratit krok. Tato chyba byla zřejmá na první pohled, neboť při ztrátě kroku v tak vysokých otáčkách krokového motoru docházelo k zastavení rotoru, neboť motor není schopen se za takových podmínek vrátit do synchronního pohybu. Ztráta kroku byla způsobena rapidním poklesem krouticího momentu na rotoru při vyšších otáčkách, který již nestačil ani na překonání pasivních odporů k dosažení konstantní rychlosti pohybu. Tento test byl postupně proveden pro všechny tři osy a následoval program, který kombinoval pohyby všech os dohromady. Při testovacím programu maximální rychlostí docházelo ke značným vibračním konstrukce, a proto jsou maximální provozní posuvové rychlosti poloviční.

Při experimentu byla pro osu X experimentálně určena maximální posuvová rychlost 5500 mm.min⁻¹, pro osu Y poté 6500 mm.min⁻¹ a pro osu Z byla naměřena rychlost 4000 mm.min⁻¹. V ose Z byla naměřená rychlost nejmenší, protože motor pohybuje vertikálně s celou tíhou vřeteníku. Celkovou maximální rychlost v prostoru zjistíme z matematického vztahu pro pohyb v prostoru.

$$f_{max} = \sqrt{f_{x_{max}}^2 + f_{y_{max}}^2 + f_{z_{max}}^2} \text{ [mm/min]} \quad (20)$$

$$f_{max} = \sqrt{5500^2 + 6500^2 + 4000^2} = 9407 \text{ mm/min}$$

4.1.1 Ukázka testovacího programu „posuvová rychlost“

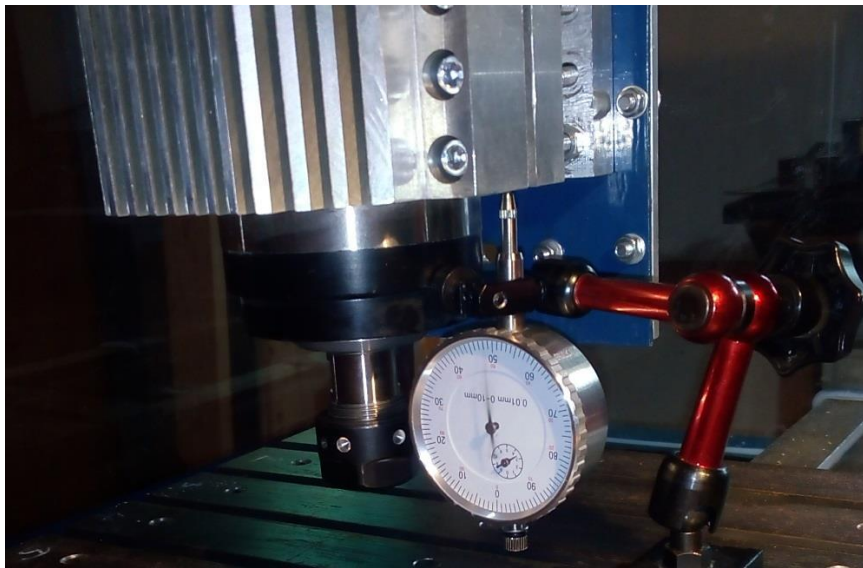
Následující program sloužil k testování posuvové rychlosti. Během testu byla kontrolována ztráta kroku. Program byl po dvou minutách manuálně ukončen, neboť příkaz M47 zajišťuje nekonečné opakování programu. Pro osu Y a Z byl testovací program modifikován pouze v rozsahu pohybu.

%	ohraničení programu
G90	programování v absolutních souřadnicích
G0 X400	pohyb rychloposuvem na souřadnici X=400 mm
G0 X0	pohyb rychloposuvem na souřadnici X=0 mm
M47	začít program od 1. řádku
%	ohraničení programu

4.2 Přesnost opakovaného najetí a přesnost posunutí

Tento test spojoval dva testy do jednoho. První fáze byla přesnost opakovaného najetí. Princip testu byl velice jednoduchý. Spočíval v odjetí rychloposuvem a pak ze zpětného návratu na původní místo. Aby tento test nebyl zkreslen vůlí v pohybovém ústrojí, najíždění probíhalo pokaždé ze stejné strany. Po první části následovala část druhá. Ta se zabývala kontrolou, jestli se osa pohybuje opravdu o deklarovanou hodnotu. Proto bylo naprogramované posunutí o dalších 5-10 mm ve směru pohybu. Celé měření bylo prováděno pomocí číselníko-

vého úchylkoměru s přesností 0,01 mm a měření probíhalo po 10 opakování. Po dokončení měření bylo vyhodnoceno, že frézka je schopna zpětného najetí a posunutí s přesností 0,02 mm.



Obr. 22 Měření přesnosti polohování v ose Z

4.2.1 Ukázka testovacího programu „přesnost zpětného najetí a posunutí“

%	ohraničení programu
G90	programování v absolutních souřadnicích
G0 X0	odjezd rychloposuvem na souřadnici X=0 mm
G1 X-2 F100	pohyb na souřadnici X=-2 mm pracovním posuvem 100 mm/min
G4 P2	pauza 2 vteřiny (pro odečtení hodnoty na úchylkoměru)
G91	programování v relativních souřadnicích
G1 X-7	pohyb ve směru -X o 7mm pracovním posuvem 100 mm/min
G4 P5	pauza 2 vteřiny (pro odečtení hodnoty na úchylkoměru)
M47	začít program od 1. řádku
%	ohraničení programu

4.3 Měření vůlí v pohybovém ústrojí

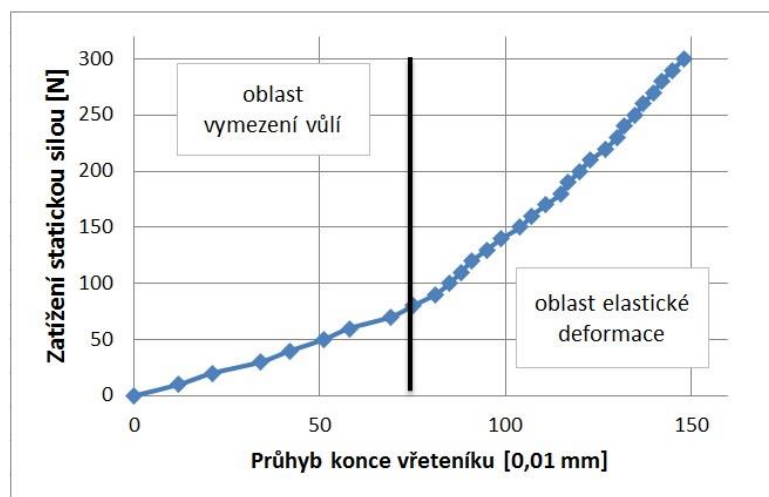
Další částí bylo měření vůlí v pohybovém ústrojí. V našem případě v kuličkovém šroubu s nepředepnutou maticí. Vůle v pohybovém ústrojí způsobí hysterezi v polohování při reverzaci otáček. Znamená to, že při změně směru otáčení dojde nejprve k vymezení vůle. Při pohybu v této oblasti konstrukce stojí. Teprve po vymezení vůle v reverzním směru dochází k rozpohybování pohyblivé části konstrukce. Tato vůle byla opět změřena číselníkovým úchylkoměrem jako v předchozím případě následujícím způsobem. Proběhlo najetí na danou polohu a poté krokovým způsobem po 0,01 mm probíhalo postupné odjetí. Délka oblasti, kdy se krokový motor otáčel, avšak konstrukce se nepohybovala je právě vůle v pohybovém ústrojí. Pro osu X byla naměřena hodnota 0,06 mm, pro osu Y 0,04 mm a pro osu Z 0 mm, neboť tíha vřeteníku stále vůli vymezuje. Tyto hodnoty se zapíší do systému MACH3 pod záložkou „BACKLASH“. Systém poté během obrábění při reverzaci směru otáčení stanoveným posuvem nejprve vymezí vůli a poté zahájí pracovní pohyb.

4.4 Průhyb vřeteníku při zatížení konstantní silou

Poslední test se týkal statického zatěžování. Vřeteník byl zatížen statickou silou ve směru osy Y. Byl zvolen tento směr zatížení, protože vřeteník má v tomto směru menší „kvadratický moment průřezu“. V uvozovkách je napsán, protože tato složitější sestava se podle vzorečků z předmětu Pružnost a pevnost I téměř nedá řešit. Pro odhad tvaru průhybu jsem využil statickou analýzu programu Autodesk Inventor 2013. Pro vytvoření síly jsem použil číselníkový siloměr, aby bylo možné hodnoty pohodlně odečítat. Výsledky testu však byly překvapující. Průhyb nosníku se nechová lineárně, jak by se tomu v pružné oblasti zatěžování dalo předpokládat. Na počátku dochází k velkým deformacím a posléze se deformace zbrzdí a chová se přibližně lineárně. Průhyb vřeteníku však naprosto zklamal mé očekávání, neboť při zatížení silou 300 N se vřeteník prohnul ve směru osy y o nepřijatelných 1,5 mm, avšak statická analýza předpokládala průhyb pouhé dvě setiny milimetru.

Byl proveden výzkum, kde se skrývá viník tohoto obrovského prohnutí. Netrvalo dlouho a původ prohnutí byl objeven. Způsobují ho domečky otevřených linearsetů SME-16. Již při zatížení malou silou je zřejmé, že se podepřená tyč do domečku „zabořuje“, ačkoliv by měl být domeček v tomto směru naprosto tuhý. Tento fenomén se projevuje při zatěžování menší silou. Při vymezení této vůle začíná mít průhyb lineární závislost a je způsoben elasticitou deformací otevřených domečků SME16

Jednotlivá měření byla prováděna s přírůstkem 10 N. Pro každou hodnotu zatěžující síly byla zaznamenána hodnota průhybu a výsledky byly zaneseny do grafu. Z grafu je na první pohled zřejmé, že se skládá ze dvou částí deformace. Pokud tyto části přirovnáme k tahové zkoušce, poté první část grafu reprezentuje vymezení vůle v konstrukci a poddajnost pryžových částí linearsetů. Zbytek reprezentuje elastickou deformaci. Deformace se při velkém vyložení vřetene projevuje fatálním způsobem.



Graf 1 Závislost deformace na zatížení při statickém zatěžování vřeteníku

Obr. 23 Měřicí aparatura průhybu osy Y

5 REKAPITULACE NÁKLADŮ

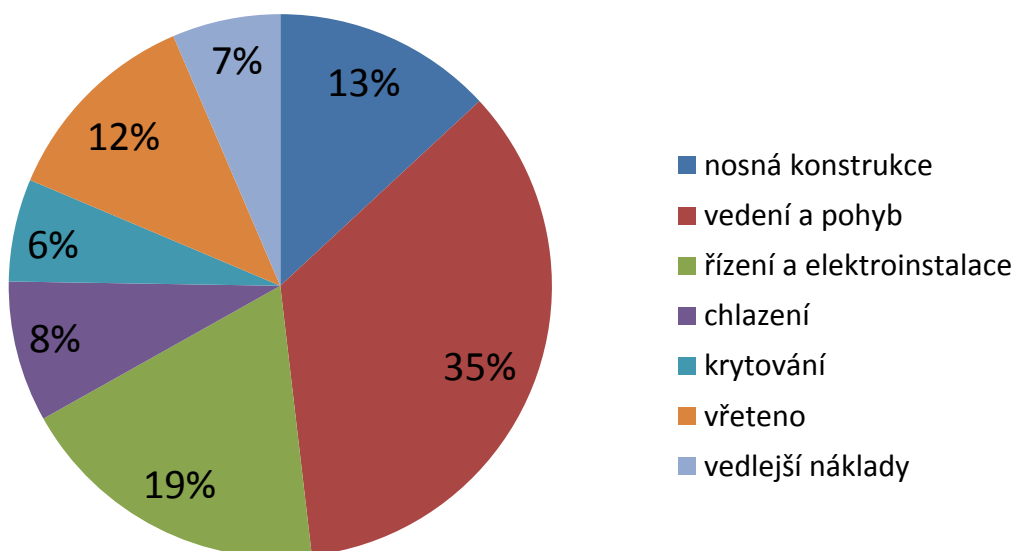
Při návrhu konstrukce bylo použito maximum normalizovaných dílců pro minimalizaci nákladů. Nosná konstrukce je svařovaná z profilů I80. Volba této varianty vycházela z dostupnosti a ceny těchto hutních polotovarů. Při návrhu bylo použito „reverzní inženýrství“, neboť lineární podepřené tyče byly nakoupeny jako výhodný set kolejnic daných délek. Dle kolejnic byl potom navrhnut celý rozměrový koncept stroje. Řídící elektronika byla vybrána mezi základními, lehce dostupnými komponenty požadovaného výkonu. Další peníze byly ušetřeny díky použití komponentů z bazaru. Mezi ně patří dotykový monitor či 3 mm silné plechy, ze kterých je svařen vřeteník, nosné prvky příslušenství či interaktivní ovládací panel. Nelze také opomenout nákup prvků druhé jakosti z nákupního portálu ebay.com. I zde však byl kladen důraz na nákup od kladně hodnocených prodejců pro dosažení přijatelné kvality výrobků.

5.1 Kalkulace nákladů nákupu komponent na českých i zahraničních portálech

Během stavby byly pečlivě zaznamenávány ceny jednotlivých komponent. Celkem 53 různých součástí, balení či polotovarů bylo rozděleno do sedmi základních skupin.

Nosná konstrukce	6326 Kč
Vedení a pohyb komponent	16923 Kč
Řízení a elektroinstalace	9040 Kč
Chlazení	4049 Kč

Krytování	2930 Kč
Vřeteno	5890 Kč
Vedlejší náklady	3110 Kč
CELKEM	48288 Kč



Graf 2 Podíl nákladů při využití zahraničního trhu

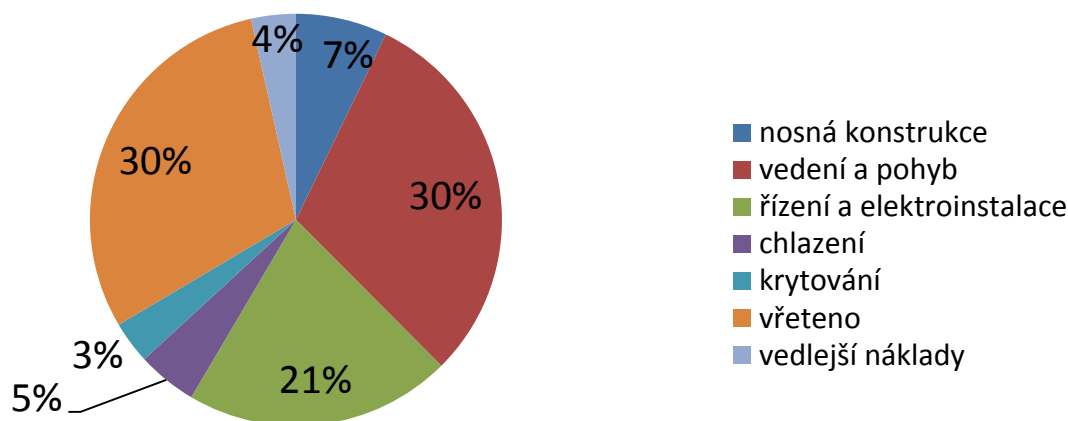
Z tabulky či z grafu je zřetelně viditelné, že nejdražší položkou na celé konstrukci je zajištění přesného lineárního vedení, zajištění přesného pohybového ústrojí a zajištění dostatečné osově síly, která celým strojem hýbe. Následuje řídicí elektronika, která společně s oblastí pohybu tvoří pomyslný základ celého stroje.

5.2 Kalkulace nákladů nákupu komponent pouze na českých portálech

Pro zajímavost byla provedena ještě kalkulace nákladů při nákupu veškerých komponent na území České republiky. Pro názornost bylo zachováno rozdělení komponentů do skupin.

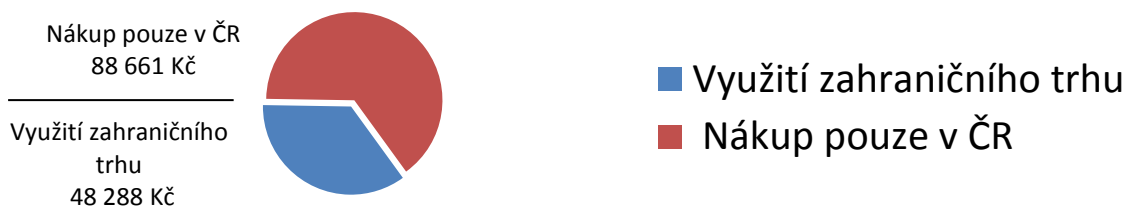
Nosná konstrukce	6377 Kč
Vedení a pohyb komponent	26900 Kč
Řízení a elektroinstalace	18575 Kč
Chlazení	4153 Kč

Krytování	2950 Kč
Vřeteno	26596 Kč
Vedlejší náklady	3110 Kč
CELKEM	88661 Kč



Graf 3 Podíl nákladů při nákupu pouze v České republice

Pokud by byly veškeré komponenty nakoupeny v České republice, narůstá cenový přírůstek zejména při nákupu vřetene. Podíl vřetene se zvýšil o celých 18 %. Je to způsobeno tím, že vřeteno ve frézce MillVOY bylo nakoupeno na portálu ebay.com, kde se nakupuje jako zboží 2. jakosti. Nevýhodou této volby může být problém s životností ložisek či házením vřetene. Vřeteno zakoupeno v ČR je testováno a dovozní náklady, testy a záruka se projevují v jeho ceně. Cena frézky z komponentů nakoupených pouze v České republice je o 40 000 Kč vyšší. Procentuální podíl nákupních hodnot je přehledně viditelný v následujícím grafu.



Graf 4 Porovnání nákladů

ZÁVĚR

První část této práce byla věnována porovnání komponentů, které se používají v profesionálních strojích a ve strojích pro domácí použití. Bylo zřejmé, že každé odvětví využívá při návrhu konstrukce jinou metodiku. Profi stroje se předhání v přesnosti polohování, výkonosti obrábění, dynamikou stroje a v neposlední řadě také konektivitou strojů mezi sebou v rámci firmy. Naopak hobby stroje jsou založeny na jednoduchosti, aby si takový stroj mohl postavit i člověk, který se s průmyslovou automatizací a elektronikou profesionálně nezabývá. Dalším aspektem výběru je cena. V komerční sféře je stroj postaven za daným účelem uspokojení potřeb zákazníka. Již před započítáním návrhu je přesně stanovena životnost, účel, dynamika či přesnost stroje. Naopak u hobby strojů předchází realizaci touha kutit vlastní něco jiného než ostatní a rozvaha nad využitím stroje je opomíjena.

Na začátku práce byla nastolena otázka, zda je možné postavit CNC frézku za 50 000 Kč. Ať již funkční prototyp či cenová kalkulace jsou důkazem, že to realizovatelné je. Díky použití různých normalizovaných součástí, součástí z druhé ruky či součástí druhé jakosti se podařilo cenu minimalizovat. Během stavby a testování se však objevily konstrukční problémy. Doma svařovaná konstrukce, či ručně vrtané montážní otvory vnesly do konstrukce nepřesnosti, které bylo nutné operativně řešit. Všechny drobné nepřesnosti se však s pilníkem v ruce daly opravit a funkční stroj je odměnou za 4 měsíce práce na montáži.

Následné testování frézky ukázalo, že stroj je schopen polohovat s přesností na 0,02 mm. Takové číslo by bylo uspokojivé, avšak zatěžování statickou silou ukázalo, že frézka není vhodná pro obrábění s velkou řeznou silou. Frézka měla být původně navržena pro obrábění dřeva, plastů či barevných kovů. Výsledný stroj je schopen obrábět dřevo a plasty. Do barevných kovů bylo doporučeno pouze gravírování s malou velikostí třísky.

S výsledkem své práce jsem spokojen. Jsem rád, že jsem si mohl vyzkoušet na jednu stranu jednoduché, na stranu druhou velice komplexní řešení stavby CNC frézky. Vyzkoušel jsem si spoustu technologií. Od svařování MAG, přes výrobu komponentů soustružením a frézováním v dílně ÚST po indukční žíhání kalených šroubů. Dále jsem si vyzkoušel zapojení rozvodu elektrické energie stejně jako rozvod chladicí kapaliny celou konstrukcí. Vyzkoušel jsem si osazení dotykového panelu a řídicích prvků a v neposlední řadě jsem pronikl do principů fungování řízení za pomoci programu MACH3 a základní editaci G-kódu.

Největším problémem, na který jsem narazil, bylo paradoxně použití větších krokových motorů. Větší motory by měly mít větší výkon a větší sílu. Avšak v konstrukci se jejich výkon neprojevil. Tato „ztráta“ výkonu byla způsobena veličinou, kterou jsem se dosud nezabýval. Touto veličinou byla indukance motoru. V podstatě by se dala přirovnat k odporu cívky proti přemagnetování. Při nízkých frekvencích se tato veličina neprojevuje, ale při vyšších frekvencích změny magnetického pole cívka brání průchodu proudu a krokový motor tudíž ztrácí výkon. Z tohoto důvodu jsem musel přejít z napájecího napětí 24V DC na vyšší napětíovou hladinu 36V DC, která již byla schopna tento efekt potlačit.

Frézka MillVOY 4031-2.2 byla jedním z mých projektů. Dále bych chtěl vytvořit 4. rotační osu pro frézku MillVOY, pro kterou má frézka již integrovaný driver, či sestavit robotický základac polotovarů řízený vývojovou deskou Arduino.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MAREK, J. a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2. vydání. Praha : MM publishing, s. r. o, 2010. ISBN 978-80-254-7980-3.
2. Všeobecně o vibracích v obráběcích strojích (6). *T-support* [online]. 2013 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/vseobecne-o-vibracich-v-obrabecich-strojich-6>
3. Vertikální obráběcí centra - řada QMP, typ QMP-40SA. *STRÁNSKÝ A PETRŽ- NÍK* [online]. 2016 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.stranskyapetrzik.cz/stroje/feeler/vmc/qm/qm-40/qm-40-konstrukce/>
4. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 1. část* [online]. Fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
5. INTEGREGX 300-IV S. MAZAK [online]. 2015 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <https://www.mazakeu.cz/cs/machines/integrex-300-iv-s/>
6. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Překlad Martin Hartl. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
7. Linární vedení s profilovou tyčí. *EXVALOS* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.exvalos.cz/linearni-vedeni/linearni-vedeni-skf/linearni-vedeni-s-profilovou-tyci/>
8. SKF. *Kuličkové a válečkové šrouby* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/linear-motion/ball-and-roller-screws/index.html>
9. INTELLIGENCE IN MOTION - KULIČKOVÉ ŠROUBY. *HIWIN* [online]. 2015 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://www.hiwin.cz/media/files/CZ_kulickove_srouby_2016.pdf
10. Volba kuličkových šroubů. *PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM* [online]. 2016 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/volba-kulickovych-sroubu.html>
11. Technické informace. *KSK PRECISE MOTION: Kuličkové šrouby* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.ks-kurim.cz/kulickove-srouby/technicke-informace/>
12. Typy maticových jednotek. *KSK PRECISE MOTION: Kuličkové šrouby* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.ks-kurim.cz/kulickove-srouby/typy-maticovych-jednotek/>
13. My CNC Engraver (Part 1). *Hobby Robotics* [online]. 2011 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.glacialwanderer.com/hobbyrobotics/?p=17>
14. DC Vřeteno 300W ER-11. *4isp REL CUT* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/stejnosemerna-vretena/dc-vreteno-300w-er-11>

15. 1050 FME Horní frézka - pohon 1050 W. *Nářadí Kress* [online]. 2010 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.kress-naradi.cz/1050-fme-horni-frezka-pohon-1050-w.html>
16. Materiálový list OCEL 14209. *Knife.cz, vše o nožích* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.knife.cz/DesktopModules/YetAnotherForumDotNet/resource.ashx?a=101014>
17. Tabulky teplot. *Amatérský kovář* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://kovarna.webzdarma.cz/stranky/zakladni_postupy/tabulky_teplot.htm
18. CNC breakout board. *Pennybuying* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: [http://www.pennybuying.com/ebayp3/A145\(1\).jpg](http://www.pennybuying.com/ebayp3/A145(1).jpg)
19. ŠTĚPÁNEK, V. *Návrh a konstrukce hobby frézky*. Jihlava: Střední průmyslová škola Jihlava, 2013. 29 s. Vedoucí dlouhodobé práce Ing. Michal Hill.
20. Technický list krokového motoru 23HS9430. *LINUXCNC* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <https://forum.linuxcnc.org/media/kunena/attachments/17813/23HS9430.pdf>

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1	RÁM CNC FRÉZKY [3].....	19
OBR. 2	LOŽE KARUSELU Z HPC BETONU [2].....	19
OBR. 3	ŘEZ VŘETENEM S AUTOMATICKOU VÝMĚNOU NÁSTROJE [3].....	19
OBR. 4	CNC FRÉZOVACÍ CENTRUM MAZAK INTEGREX 300-IV T [5]	20
OBR. 5	ŘEZ VALIVÝM LINEÁRNÍM VEDENÍM [7].....	21
OBR. 6	ŘEZ KULIČKOVOU MATICÍ [10]	22
OBR. 7	HOBBY CNC PORTÁLOVÁ FRÉZKA [13]	25
OBR. 8	12V DC VŘETENO O VÝKONU 300 W [14].....	26
OBR. 9	VYSOKOOTÁČKOVÉ VŘETENO KRESS O VÝKONU 1000 W [15].....	27
OBR. 10	ASYNCHRONNÍ VODOU CHLAZENÉ VŘETENO O VÝKONU 2.2KW.....	27
OBR. 11	PODEPŘENÉ VEDENÍ SBR16 A OTEVŘENÝ VOZÍK SME16	29
OBR. 12	KROKOVÝ MOTOR S PŘÍRUBOU NEMA23 S KROUTICÍM MOMENTEM 3 NM	30
OBR. 13	MODEL FRÉZKY MILLVOY 4031-2.2	33
OBR. 14	ŘEMENOVÝ PŘEVOD OSY X, DETAIL MOTOROVÉ ŘEMENICE.....	34
OBR. 15	INDUKČNĚ OHŘÁTÝ KONEC ŠROUBU PŘI ŽIHÁNÍ NA MĚKKO	35
OBR. 16	FREKVENČNÍ MĚNIČ ASYNCHRONNÍHO VŘETENE S VÝSTUPEM 3X230V AC, 2.2 KW, 0-400 HZ.....	35
OBR. 17	OBĚHOVÉ ČERPADLO CHLADICÍ KAPALINY, VLEVO EXPANZNÍ NÁDRŽ O OBJEMU 30 LITRŮ.....	36
OBR. 18	ODDĚLOVACÍ DESKA S POPISEM JEDNOTLIVÝCH VSTUPŮ A VÝSTUPŮ [18].....	37
OBR. 19	SESTAVA KONCOVÝCH SPÍNAČŮ UMÍSTĚNÝCH NA VŘETENÍKU	38
OBR. 20	UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ ŘÍDICÍHO SYSTÉMU MACH3	39
OBR. 21	OKNO „MOTOR TUNING AND SETUP“ PRO ZADÁVÁNÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ MOTORŮ	45
OBR. 22	MĚŘENÍ PŘESNOSTI POLOHOVÁNÍ V OSE Z.....	48
OBR. 23	MĚŘICÍ APARATURA PRŮHYBU OSY Y	49

SEZNAM GRAFŮ

GRAF 1	ZÁVISLOST DEFORMACE NA ZATÍŽENÍ PŘI STATICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ VŘETENÍKU .	49
GRAF 2	PODÍL NÁKLADŮ PŘI VYUŽITÍ ZAHRAČNÍHO TRHU	51
GRAF 3	PODÍL NÁKLADŮ PŘI NÁKUPU POUZE V ČESKÉ REPUBLICE	52
GRAF 4	POROVNÁNÍ NÁKLADŮ	52

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

zkratka	Popis
CNC	Computer numeric control
HPC	High-performance concrete
3D	Trojrozměrný prostor
AC	Střídavé napětí
aj.	A jiné
Al	chemická značka hliníku
CAM	Computer aided manufacturing
ČR	Česká republika
ČSN	Česká státní norma
DC	Stejnoseměrné napětí
DIR	Instrukce - SMĚR, direction
DPS	Deska plošných spojů
ER20	Označení normalizovaného kleštinového upínače
HRC	Hardness Rockwell C
I80	Profil I válcovaný za tepla, výška průřezu 80 mm
ISO	International Organization for Standardization
IT	International Tolerance
LPT	Line printer terminal
M10	Označení metrického závitu o jmenovitém průměru 10 mm
MAG	Metal aktiv gas - metoda svařování v ochranné aktivní atmosféře
PC	Personal computer
SBR16	Podepřené lineární vedení o průměru 16 mm
SME16	Domeček pro podepřené lineární vedení o průměru 16 mm
STEP	Instrukce - KROK
tzv.	Tak zvaně, tak zvaný, tak zvané
ÚST	Ústav strojírenské technologie

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1	MARKETINGOVÝ LETÁK MILLVOY 4031-2.2	P1
PŘÍLOHA 2	TECHNICKÝ LIST FREKVENČNÍHO MĚNIČE.....	P2
PŘÍLOHA 3	VÝKONOVÉ VARIANTY FREKVENČNÍCH MĚNIČŮ.....	P3
PŘÍLOHA 4	TECHNICKÝ LIST KROKOVÝCH MOTORŮ [20].....	P4
PŘÍLOHA 5	PRŮHYB VŘETENÍKU.....	P5
PŘÍLOHA 6	CENOVÁ KALKULACE FRÉZKY	P6