MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav základního zpracování dřeva

Návrh a výroba jednoduché tříosé CNC frézky

Diplomová práce

2016 Bc. Lukáš Fukan

Prohlašuji, že jsem práci Návrh a výroba malé tříosé CNC frézky zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací. Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona. Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne 8. dubna 2016 .....

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Zdeňku Kopeckému, CSc. za odborné vedení, věcné připomínky a za čas, který mi věnoval v průběhu zpracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval panu Tomáši Mokrému za technické rady při tvorbě CNC stroje. Děkuji i své rodině, která při mně stála po dobu celého studia.

Jméno / Name: Lukáš Fukan

Název diplomové práce: Návrh a výroba jednoduché tříosé CNC frézky

Diploma thesis title: Elementary CNC mill construction

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku CNC obráběcích strojů. V teoretické části práce je popsán historický vývoj CNC obráběcích strojů. Podstatná část práce je věnována popisu konstrukce CNC, popisu základů programování CNC strojů a tvorby NC kódu. V poslední kapitole teoretické části práce je provedena rešerše malých komerčně dostupných CNC frézek. Praktická část popisuje návrh a výrobu malé tříosé CNC frézky, na které jsou vyrobeny zkušební vzorky sloužící pro vyhodnocení rozměrové přesnosti stroje. V závěrečné části práce je vyhodnocena přesnost CNC frézky a jsou zde uvedeny doporučené provozní parametry, možnosti vylepšení a modifikace stroje.

Klíčová slova: CNC, NC, frézka, frézování, G kód, ISO kód

Abstract

The thesis is focused on CNC machines. The theoretical part describes the historical development of CNC machines. A substantial part is devoted to CNC machine construction description. The elementary principles of CNC machine programming and NC code formation are described. There is a research of small commercially available CNC milling machines. Practical part deals with design and construction of small three axis CNC milling machine. Set of samples is machined for analysis of CNC router dimensional accuracy. CNC milling precision is evaluated in the end of the thesis. Recommended operating parameters machine improvement and modification possibilities are described.

Key words: CNC, NC, router, milling, G code, ISO code

Obsah

1 Úvod 8

2 Cíl práce 9

3 Literární přehled 10

3.1 Historický vývoj CNC zařízení 10

3.2 CNC zařízení 12

3.3 Dělení CNC strojů 13

3.4 Základní hardwarové prvky CNC stroje 14

3.4.1 Nosná konstrukce stroje (lože a rám) 14

3.4.2 Pohony 15

3.4.3 Vodicí plochy 15

3.4.4 Systémy upínání nástrojů 16

3.4.5 Systémy výměny nástrojů 17

3.4.6 Pracovní stoly 18

3.5 Obráběcí nástroje na CNC 19

3.5.1 Dělení nástrojů 20

3.5.2 Materiály pro výrobu nástrojů 20

3.5.3 Povlakování nástrojů 22

3.5.4 Podmínky při obrábění a trvanlivost nástrojů 23

3.6 Základy programování a obsluhy 26

3.6.1 Zavedení souřadnicového systému a nulových bodů 26

3.6.2 Druhy programování 27

3.6.3 Základní pojmy 28

3.6.4 Struktura programu 30
3.6.5 Podprogram 30
3.7 Rešerše malých komerčně dostupných routerů 31
3.7.1 CNC frézka MC30F2T 31
3.7.2 CNC frézka Kompas H – 1000 33
3.7.3 CNC frézka CNCB-2030 34
3.7.4 CNC router Numco SHG 0404 35
4 Materiál a metodika 36
4.1 Základní koncepce frézky 36
4.2 Konstrukční prvky 37
4.3 Řídicí elektronika a vřeteno 39
4.4 Průběh stavby stroje 45
4.5 Ovládací software 47
4.6 Cenová kalkulace 50
4.7 Výroba vzorků 51
4.8 Metodika měření 54
4.9 Výsledky měření 55
5 Diskuse 59
6 Závěr 61
7 Summary 62
8 Seznam použité literatury 63
9 Seznam obrázků 66
10 Seznam tabulek 68

Příloha 1 69

Příloha 2 72

Příloha 3 75

1 Úvod

Vývoj v oblasti průmyslu, dřevozpracujícího nevyjímaje, je čím dál více spjat s výpočetní technikou, která se stává hnacím motorem ve většině oborů. Počítače se uplatňují nejen při samotném návrhu a konstrukčních výpočtech obráběcích strojů, ale i při samotném provozu těchto strojů. Počítačem řízené stroje do značné míry nahrazují lidské zdroje práce. Děje se tak především proto, že stroje zajišťují vyšší přesnost výroby, zrychlují výrobu a hlavně umožňují opakovatelnost výroby. Při správném návrhu technických parametrů a kapacity stroje jsou při dané životnosti stroje i přes vysoké vstupní náklady levnější, než lidská práce.

Se zvyšujícím se podílem CNC strojů ve výrobě logicky klesá i počet konvenčních strojů. Konvenční stroje budou v brzké době téměř všechny nahrazeny (vyjma strojů k přípravným a opravárenským pracím). CNC stroje jsou dokonce v některých případech nenahraditelné, protože dosahují vysoké míry autonomie a jsou schopné přizpůsobovat a měnit provozní parametry při obrábění (například řezání laserem, elektroerozivní obrábění apod.)

V posledních letech dochází k velkému nárůstu výkonu výpočetní techniky, k jejímu zlevňování právě v důsledku automatizace a také osvojení technologie výroby. Toto se promítá i do klesajících cen CNC techniky, která je pak dostupnější i pro menší společnosti. V posledních osmi letech dochází k rozvoji v oblasti Hobby CNC (pro domácí využití). První stroje byly vyrobené technicky zdatnými nadšenci tohoto oboru a vznikaly výhradně pro vlastní využití. Dnes toto označení nesou i profesionální CNC stroje nejrůznějšího zaměření (od frézek přes soustruhy až po gravírovací lasery), které jsou komerčně dostupné, a jejich cena se pohybuje v přepočtu do 300 tis. Kč.

Oblast CNC technologií se bouřlivě rozvíjí, a proto poznatky dále uvedené nelze považovat za definitivní. Jedná se o obor, který je tak široký, že nelze celý obsáhnout. Je nutné neustále sledovat vývoj technologií a novinky postupně zavádět nejen do výrobního procesu, ale i do vzdělávání odborníků a obsluh CNC strojů.

2 Cíl práce

Hlavním cílem diplomové práce je konstrukční návrh a výroba jednoduchého CNC frézky pro obrábění dřeva nebo plastu, které bude cenově dostupné a zajistí požadovanou kvalitu (rozměrovou přesnost) výrobků. Splnění tohoto cíle vyžaduje seznámení se základní problematikou CNC obráběcích strojů z hlediska historického vývoje, z hlediska různých typů a možností využití. Dále analýzu obecné konstrukce CNC frézky a základů programování CNC strojů.

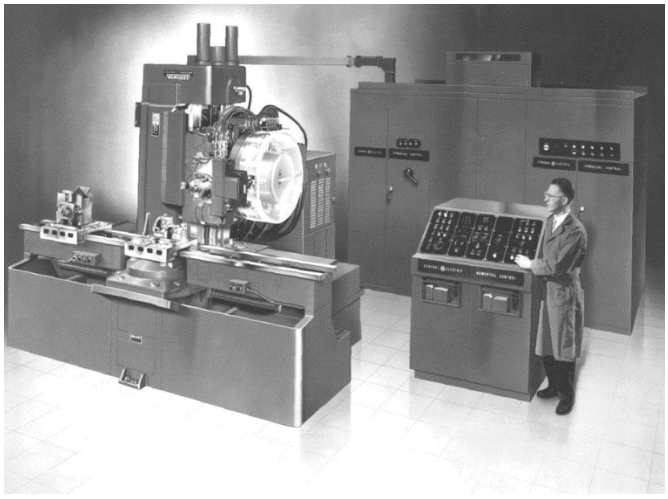
Ověření konstrukčního provedení frézky bude provedeno experimentem srovnávací metodou. Na vyrobeném CNC stroji budou vyrobeny vzorky z MDF desky, které budou sloužit k posouzení rozměrové přesnosti obrábění v osách X a Y. Pro porovnání přesnosti bude vyfrézována identická sada vzorků na profesionálním CNC stroji od italské společnosti Masterwood SpA. V závěru práce budou rozebrány výhody a nevýhody navrženého stroje, stanovení možného výrobního sortimentu, doporučení vhodných parametrů pro obrábění a návrhy pro modifikace a vylepšení frézky.

3 Literární přehled

Kapitola Literární přehled pojednává o číslicově řízených strojích, jejich historii, konstrukci, využití. Jsou zde také popsány základy programování CNC.

3.1 Historický vývoj CNC zařízení

Strojní průmysl se začal formovat ve 2. polovině 18. a v 19. století. Toto období je označováno jako „1. průmyslová revoluce“. Vše začalo vynálezem parního stroje, následně spalovacího vznětového motoru. Průkopníkem však byl až vědec a vynálezce Nikola Tesla, který v roce 1887 požádal o patent na asynchronní indukční elektromotor. K počítačem řízeným strojům vedla ještě dlouhá cesta. Až v průběhu 20. století začaly do procesů strojního obrábění výrazně vstupovat prvky řízení a automatizace. První polovinu století můžeme označit jako „2. průmyslovou revoluci“. První číslicově řízené neboli NC (z anglického *numerical control*) stroje vznikly v 50. letech 20. století. Vývoj zaznamenávaly nejen jednotlivé strojní součásti, ale i celé strojní celky a řídicí systémy. Řízení těchto strojů bylo obstaráno třemi postupně vyvinutými způsoby uchování informací a zadávání příkazů: děrné štítky, děrné pásky (5stopé nebo 8stopé), magnetické pásky. Pro odměřování při polohování se využívalo optických a rotačních odměřovacích systémů. V roce 1959 byl poprvé instalován zásobník nástrojů (Fehring, 1980).



Obr. 1. První NC stroj s revolverovým zásobníkem (Fehring, 1980)

V 60. letech vznikaly první tranzistorové systémy. Koncem dekády aplikovali američtí vědci integrované obvody. Tato skutečnost umožnila parabolické, kruhové

a splinové interpolace. NC systémy byly doplňovány pamětí a umožňovaly editaci programů, můžeme již hovořit o CNC (z anglického *computer numerical control*). S ohledem na rostoucí variabilitu výrobního programu vznikaly v 80. letech první flexibilní výrobní systémy FMS (*flexible manufacturing system*). Struktura řídicích systémů byla založena na bázi CNC a PLC (*programmable logical control*). V 90. letech byly aplikovány velkokapacitní zásobníky, dochází k automatizaci toku materiálu (obrobků). Dochází k rozvoji DNC (*direct numerical control*). Složité soustavy CNC strojů jsou řízeny dálkově pomocí sítě ethernet z jednoho centrálního místa (počítače). Toto dlouhé období je někdy označováno jako „3. průmyslová revoluce“. Na počátku 21. století vzniká nový trend ve vývoji CNC. Je poptávka především po multifunkčních obráběcích centrech. Začíná se také hovořit o sjednocení programovacího jazyka označovaného ISO-kód (nesprávně G-kód), který byl zaveden na konci 50. let minulého století. Za těch 40 až 50 let si každý výrobce tento jazyk přizpůsobil svým potřebám, přestože od roku 1982 existuje standard ISO 6983 Numerical control of machines. Masivní rozvoj CAD (*computer aided design*)/CAM (*computer aided manufacturing*) velmi zjednodušuje řízení CNC. Nyní stojíme na počátku 4. průmyslové revoluce, která je spojená s maximální digitalizací, autonomizací řízení výrobního procesu a zvýšením produktivity práce. Průkopníkem tohoto systému je Německo, které investuje do automatizace nemalé finanční prostředky. CNC se dnes uplatňují ve většině oblastí průmyslu.

Vývojové stupně CNC strojů:

Stroje 1. generace

Vychází z koncepce konvenčních strojů. Mechanická část zůstala zachována a byla doplněna řídicím systémem. Nositelem programu byla děrná páska, štítek nebo magnetická páska. Umožňovaly řízení v pravoúhlých cyklech a to vždy pouze v jedné ose. Vyznačovaly se nízkou spolehlivostí a přesností.

Stroje 2. generace

Stroje koncipované pro číslicové řízení. Pohon zajišťovaly servomotory. Jsou vybaveny zásobníky nástrojů.

Stroje 3. generace

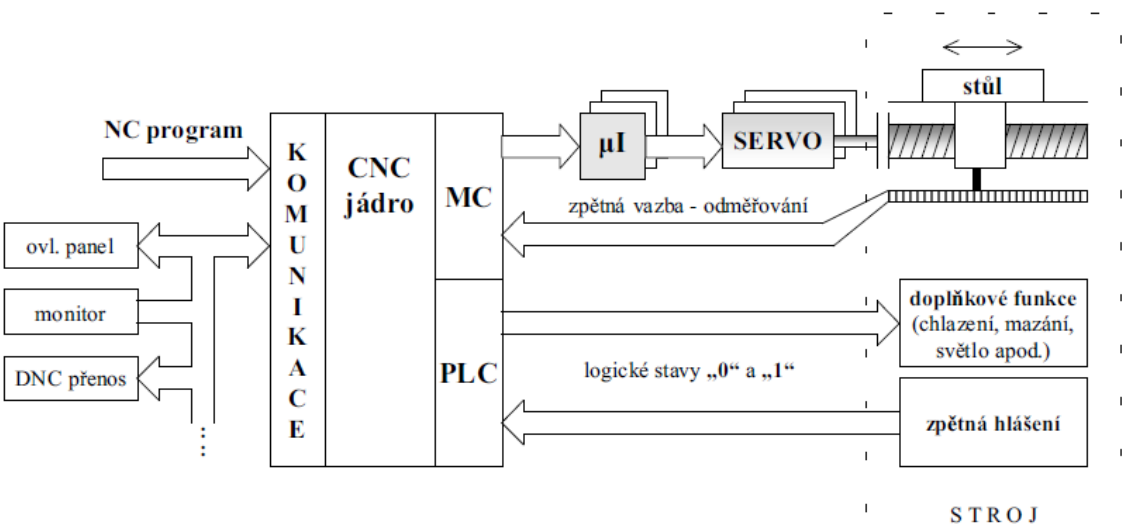
Konstrukčně řešeny pro zapojení do výrobních celků. Mají dále oproti 2. generaci vylepšenou mechanickou část (vedení z kalené oceli, užití vícematicových kuličkových šroubů). První stroje řízené počítačem.

Stroje 4. generace

Stroje vybavené systémem vyhodnocujícím výrobní proces (řezné síly, atp.) Systém je schopný optimalizace výrobního procesu. Další zdokonalování konstrukce s příchodem nových technologií (Němec, 2013).

3.2 CNC zařízení

Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o číslicově řízený stroj za pomoci počítače. Na následujícím obrázku je znázorněno obecné schéma, které vysvětluje, na jaké bázi CNC funguje. Principiálně jsou zde dva okruhy, co pracují společně, řízení pohybu a programovatelný logický automat. Ten obstarává chod vřetene a všechny doplňkové funkce. V obou případech je velmi důležitá zpětná vazba.



Obr. 2. Blokové schéma CNC systému (Keller, 2005)

Zařazení CNC strojů do výrobní technologie vždy vyžaduje pečlivé posouzení, zda bude dostatečným přínosem. Je také důležité zvolit správný typ stroje a snažit se využít co největší část z jeho potenciálu. To se nepovedlo např. ve společnosti M-Hort s.r.o., kde produktivní čas stroje je pouze přibližně 25 % z osmihodinové pracovní směny.

Výhody CNC

- zkrácení výrobních časů, snížení neproduktivních časů
- zvýšení přesnosti, snížení zmetkovitosti, opakovatelnost
- menší nároky na obsluhu

Nevýhody CNC

- vysoké vstupní náklady
- vyšší náklady na údržbu
- vyšší nároky na kvalifikaci zaměstnanců tvořících NC programy

3.3 Dělení CNC strojů

Existuje celá řada kritérií, podle kterých je možné rozčlenit CNC. Níže jsou uvedena základní rozdělení.

Dělení dle počtu pracovních os

- 1osé (CNC vrtačky)
- 2osé (CNC soustruhy)
- 3osé (CNC frézka)
- 4 a víceosé (CNC obráběcí centra)

Dělení dle technologie

- obráběcí stroje
- tvářecí stroje
- zařízení pro dělení materiálu (nářezová centra)
- svařovací stroje
- šicí stroje
- lakovací automaty
- manipulační technika (roboty, automatizované „smart“ sklady)

Dělení dle účelu použití

- jednoúčelové (vrtačky, frézky, soustruhy, brusky, ...)
- víceúčelové (CNC obráběcí centra), (Polášek, 2007)

3.4 Základní hardwarové prvky CNC stroje

Dále se práce věnuje dřevoobráběcím strojům, a tak bude popsána obecná konstrukce právě tohoto typu CNC (s pevným stolem a pohyblivým portálem). Zařízení je sestaveno ze stojanu, jehož součástí je lože s uložením pohonu a lineárním vedením, odměřovací zařízení a pracovní stůl různých konstrukcí. Dále je zde přítomen rám (portál) na němž jsou dvě posuvné osy stroje, na ose Z je pak upevněna obráběcí hlava (sestava nástrojů, elektrovřeteno). Součástí soustavy pak bývá odsávání kusového odpadu (třísek, pilin, jemného prachu), vývěva (zajišťuje uchycení obrobku vytvořením podtlaku), rozvodná skříň, řídicí počítač s periferiemi, řídicí panel (s možností zastavení stroje, manuálním řízením posuvu a jeho rychlosti, s manuální regulací otáček elektrovřetene), spousta čidel a jiných podpůrných prostředků. V poslední řadě u komerčně vyráběných produktů nesmí chybět ochranné prvky jako je nášlapný koberec, zakrytování vybavené dotykovými čidly, emergency STOP tlačítka (Král, 2008).

Obr. 3. CNC obráběcí centrum Masterwood (vlastní fotografie)

3.4.1 Nosná konstrukce stroje (lože a rám)

Lože a rámy jsou základní nosnou konstrukcí každého CNC stroje. Na materiály jsou kladeny velmi přísné nároky s ohledem na tuhost konstrukce, rozměrovou stabilitu, přesnost a trvanlivost. Nejčastěji jsou vyrobeny z šedé litiny nebo z konstrukční oceli Lože a rámy se vyrábějí z šedé litiny nebo z konstrukční oceli dle

ČSN EN 11523 Konstrukční ocel. Výhodou šedé litiny je vysoká schopnost tlumení vibrací. Rámy z konstrukční oceli bývají svařované nebo montované (Polášek, 2007).

3.4.2 Pohony

Mezi základní pohony patří pohony os a pohony vřetene. K rozpohybování os se jako první používaly stejnosměrné servomotory, které bylo vzhledem k jejich principu funkce nutné doplnit o odměřovací zařízení. Řízeny byly pomocí tyristorových měničů nebo pomocí proměnného budicího proudu. Tyto motory byly pro pohon vedení nevhodné. Dnes se používají v trakčních soustavách a v těžkém průmyslu. V menších a levnějších aplikacích je možné použít krokové motory. Nejvyužívanější jsou v posledních letech servomotory střídavé asynchronní i synchronní.

Nedílnou součástí pohonů os je, jak bylo zmíněno výše, odměřování polohy. Rozlišujeme odměřování absolutní a relativní (též inkrementální). Z hlediska způsobu získávání informací se odměřování dělí na přímé a nepřímé.

K pohonu vřeten slouží opět servomotor nebo asynchronní motor. Vřeteno může být poháněno přímo (pomocí spojek) či nepřímo (pomocí řemenů, ozubených kol nebo převodovek (Marek, 2010). Pro pohon vřeten frézek jsou však nejčastěji používány integrované asynchronní elektromotory, vřetena jsou pak označována jako „elektrovřetena.“

Požadavky na elektrovřetena

- minimální házivost, maximální tuhost
- dynamika (rychlý náběh do provozních otáček, rychlé zastavení)
- možnost řízení otáček, optimální momentová charakteristika
- senzory, chlazení (Kolář, 2008)

3.4.3 Vodicí plochy

Jsou nedílnou součástí každého lože. Kvalita vodicích ploch má vliv na parametry stroje. Hlavním problémem je tření ve vedení.

Základní požadavky na vedení

- nízké pasivní odpory
- nízký součinitel smykového tření (omezení trhavých pohybů)

- minimální vůle, vysoká tuhost a životnost (využití kalených legovaných ocelí)
- jednoduchá údržba

Nejběžnější typy vedení

- kluzná
  - styčná plocha průběžně mazána (mazací prostředek nenese zatížení)
  - velký součinitel smykového tření (klesá s rostoucí rychlostí posuvu, vznikají trhavé pohyby)
  - větší vůle, malá životnost, nízká cena a snadná údržba
- valivá
  - součinitel smykového tření nižší než u vedení kluzných, konstantní (zajištění plynulosti pohybů)
  - nižší vůle, vyšší životnost, snadná údržba
  - vyšší cena
  - vysoké nároky na zamezení vniknutí prachových částic
- hydrostatická
  - médiem mezi styčnými plochami je olej (přenáší zatížení)
  - nízký součinitel smykového tření je řádově nižší než u vedení kluzných
  - malé vůle, nižší opotřebení, vyšší přesnost a životnost
  - vysoké pořizovací náklady, nároky na těsnost a ochranu před prachovými částicemi, náročnější údržba (Polášek, 2007)

3.4.4 Systémy upínání nástrojů

Pro upnutí nástroje do vřetene se používají různé typy nástrojových držáků. Nejstarší a patrně nejznámější způsob upnutí je pomocí Morse kužele. Ten má stoupání cca 1:19 (mění se dle délky stopky). Výhodou je bezesporu to, že je samosvorný a nástroj je osově vycentrován. Lze jej použít především při ruční, ale i při automatické výměně nástrojů.

Dalším typem je kužel strmý, známější pod názvem ISO kužel. ISO kužel má vždy stoupání 7:24. Byl vyvinut v Americe. Normovány jsou tyto velikosti: ISO 30, ISO 40, ISO 50, ISO 60, ISO 70, ISO 80. Kužel není samosvorný a k jeho unášení tedy neslouží kuželovitá plocha, ale upínací čep na konci kužele. Čep zapadá do tzv. unášecích kamenů v dutině vřetene. Vhodný pro otáčky vřetene až 10 000 ot/min. V současné době je využíván po celém světě. Je možné jej využít při strojní i ruční výměně nástrojů.

HSK kužel (Hohl Schaft Kegel – dutá kuželovitá stopka) byl vyvinut v Německu na konci devadesátých let minulého století. Má stoupání 1:10. Vyznačuje se vysokou tuhostí a stabilitou, protože relativně pružná stěna dutého kužele se při vysokých otáčkách roztahuje a intenzita kontaktu s vřetenem se nezmenšuje. Oproti dvěma předchozím snese až pětkrát větší radiální zatížení. Umožňuje upnutí větších průměrů nástrojů a vysoké otáčky až 50 000 ot/min. Není samosvorný a je nutné jej upnout pomocí tažné tyče nebo upínacího excentru. Při upnutí dosedá příruba kužele na čelo vřetene. Při stejných upínacích silách má přibližně poloviční velikost a hmotnost. Je možné jej použít pro ruční i automatickou výměnu nástrojů. Za nevýhodu můžeme považovat pořizovací cenu upínače (Borovan, 2012).

Upnutí nástrojů do kuželů je možné pomocí kleštinových upínačů, polygonálních upínačů, hydraulických upínačů a nejmodernějších tepelných upínačů. Upínače jsou seřazeny dle ceny a dle jejich mezních otáček od nejnižších po nejvyšší.

3.4.5 Systémy výměny nástrojů

Výměna nástrojů je buď ruční, nebo automatická. *Systémy automatické výměny nástrojů mají za úkol u číslicově řízených strojů během automatického pracovního cyklu vyměnit, upnout a správně nastavit potřebný nástroj do výchozí polohy* (Němec, 2013, s. 17). Existují 3 automatické systémy výměny nástrojů: systémy s nosným zásobníkem, systémy se skladovacím zásobníkem a kombinované systémy.

Systémy s nosným zásobníkem

Vyznačují se tím, že přenášejí řezné síly od nástroje do rámu stroje. Standardně se označují jako zásobníky s revolverovou hlavou (odvozeno od vzhledu). Tyto zásobníky mohou byt situovány jak s vodorovnou, tak se svislou osou otáčení vřetene (je možné je uplatnit především v soustružnictví, ale také u CNC frézek). Revolverová hrana je tvořena vícebokým hranolem (dle počtu uložených nástrojů). Jsou relativně malé, obvykle mají méně nástrojových pozic.

Systémy se skladovacím zásobníkem

Tyto zásobníky nepřenáší řezné síly. Slouží pouze ke skladování nástrojů. Lze je v zásadě rozdělit do dvou skupin: maloobjemové zásobníky (do 40 nástrojů) a velkoobjemové zásobníky (v praxi až 250 nástrojů). Dále je lze rozčlenit podle typu výměny nástroje.

- přímá výměna – pick-up zásobníky
    - výměna probíhá přímo
    - není potřeba manipulátoru s nástroji, výhodou je také nízká cena
    - nejčastěji kotoučové nebo bubnové provedení zásobníku
- zásobník – výměník – vřeteno
    - nejčastěji řetězové zásobníky
    - výměnu nástroje provádí rameno, které má na jedné straně nový nástroj a na druhé straně má místo pro uchycení starého nástroje
    - výhodou je rychlost výměny nástroje (probíhá výměna „kus za kus“)
- zásobník – manipulátor – výměník – vřeteno
    - má stejné vlastnosti jako předchozí typ s tím rozdílem, že k manipulaci s nástrojem slouží automatická robotická ruka
- výměna celých vícevřetenových hlav

Kombinované systémy

Spojují výhody skladovacích a nosných zásobníků. Zpravidla mají jeden nebo více zásobníků se skladovací funkcí a jednu nebo více nástrojových či vřetenových hlav. Kombinované systémy můžeme pozorovat na moderních CNC obráběcích centrech (Janíčková, 2012).

3.4.6 Pracovní stoly

Existují čtyři základní typy stolů (trámcový stůl, mřížkový stůl, stůl obrácené T, různá pneumatická a hydraulická upínací zařízení). Dělí se podle možností využití, mají různou pořizovací cenu.

Trámcový stůl

Je základním stolem CNC frézek. Trámce jsou libovolně polohovatelné v ose X. Umožňují upevnění vakuových přísavek nejrůznějších velikostí a tvarů. Zajišťují dostatečnou fixaci obrobku. Je vybaven zvedacími podpěrami umožňujícími snazší přestavení obrobku. Výhodou je možnost obrobit dílec z bočních ploch, umožňuje, řezání, frézování a vrtání skrze obrobek. Nevýhodou je, že obsluha musí dávat pozor, kam přísavky umisťuje.

Mřížkový vakuový stůl

Někdy je též označován jako „nesting table“. Nesting je technologie obrábění, kdy jsou z deskového materiálu frézovány dílce s ohledem na minimalizaci odpadu. CNC může být vybaveno jen mřížkovým stolem nebo existuje verze, kterou lze připevnit na trámcový stůl. Výhodou je variabilita upnutí deskového materiálu díky přítomným mřížkám. Za pomoci pryžového těsnění libovolně ohraničíme plochu, kde bude působit podtlak. Za nevýhodu můžeme považovat možnost obrábět pouze plošné dílce, kterou lze u některých stolů částečně vyřešit dokoupením speciálních vakuových přísavek. Další nevýhodou je nutnost používat podkladové desky, aby nedošlo k poškození stolu.

Stůl obrácené T

Jedná se o asi nejlevnější ze všech řešení. Stůl bývá nejčastěji z litého hliníku v menších rozměrech i z oceli. Je vhodný pro upnutí nosiče obrobku. Upnutí probíhá mechanicky pomocí matic tvaru T, které jsou vloženy do T drážek, a pomocí tvarově různorodých upínek, které jsou našroubovány do matice. Vyznačuje se horší rozměrovou stabilitou. Obsluha musí opět pečlivě zvažovat, jak obrobek upevní.

Pneumatická a hydraulická upínací zařízení

Existují jako doplněk k trámcovým a nestingovým stolům. Umožňují uchycení profilovaných dílců tak, aby je bylo možné obrobit (například výroba obloukových dílců oken). Při nesprávném použití mohou zanechat na obrobku otlaky (nutnost volit správné pracovní tlaky).

3.5 Obráběcí nástroje na CNC

Na nástroje se strojním posuvem jsou kladeny vysoké nároky vycházející z normy ČSN EN 847-1:2014 Nástroje na strojní obrábění dřeva. Konstrukce nástrojů umožňuje vyšší provozní otáčky (běžně až 30 000 ot/min). Tím lze dosáhnout vyšších řezných rychlostí.

Základní požadavky:

- ideální vyvážení, minimální házivost nástrojů
- požadavky na snižování váhy
- nepoužívat nástroje s příliš velkou pracovní délkou břitů

3.5.1 Dělení nástrojů

Nástroje lze rozdělit podle mnoha kritérií. Jako první se nabízí dělení dle operace, kterou nástroj provádí. Rozlišujeme pilové kotouče do CNC strojů, vrtáky, sukovníky, falcovací frézy, srovnávací frézy, stopkové frézy (dlabací, drážkovací, profilové, spirálové) a další různé nástroje a agregáty.

Dále lze nástroje (frézy) rozdělit dle typu upnutí nástroje na obráběcí stroj. Existují frézy nástrčné, které jsou nejčastěji používány u spodních a vícestranných konvenčních fréz. Lze je však použít i u CNC strojů například na profilování eurooken a na obrobení dveří a dvířek. Druhým zástupcem jsou frézy stopkové. Ty jsou nejčastěji využívány u horních ručních frézek a CNC frézek. Stopkové frézy pro ruční obrábění obvykle mají průměr stopky nástroje od 6 do 12 mm. Frézy u CNC strojů mají průměr stopky standardně až 25 mm. Posledním a již téměř zapomenutým systémem upnutí je pevné spojení nástroje se strojem. Například staré srovnávací a tloušťkovací frézy.

Dalším kritériem jak rozdělit nástroje je celistvost nástroje. Existují nástroje celistvé. Nástroje jsou z jednoho kusu, nejsou rozebíratelné. Vyznačují se nižší cenou, která se odráží v nižší životnosti nástroje. Při broušení nástroje dochází k zmenšování jeho průměru a délky. Druhým typem jsou nástroje nerozebíratelně spojené. Řezný materiál je připájen, naletován, nalepen na těle nástroje z levnějšího materiálu. Při poškození některého z řezných břitů je lze, byť poměrně složitě, vyměnit. V poslední době jsou populární nástroje složené. Tělo nástroje je vybaveno uložením pro vlastní řezný materiál (břitové destičky). Uložení je dvojího typu: tvarové a silové.

3.5.2 Materiály pro výrobu nástrojů

V dnešní době se využívá pro výrobu obráběcích nástrojů velké množství různých materiálů. Mezi základní posuzované vlastnosti materiálů patří tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu atd. Tato kapitola popíše vybrané, nejčastěji používané materiály.

Nástrojové a rychlořezné oceli (SP, HL, HS, HSS)

Jsou zařazeny ve třídě 19 dle ČSN EN 10027-1 Systémy označování ocelí – Část 1: Stavba značek ocelí. Jedná o oceli legované. Oceli SP (legované) a oceli HL (vysoce legované) jsou základním materiálem pro výrobu nástrojů. Používají se nejčastěji na výrobu celistvých nástrojů (frézy, sukovníky, dlabací vrtáky) a nožů

(hoblovacích, profilovacích). Legujícím prvkem je chrom. Dosahují tvrdosti 57 až 59 HRC dle ČSN EN ISO 6508-1. SP a HL oceli jsou vhodné pro obrábění dřeva, zcela nevhodné jsou pak k obrábění aglomerovaných materiálů, kdy dochází k jejich rychlému otupení.

SP a HL oceli jsou čím dál častěji nahrazovány vysocelegovanými ocelemi HS a HSS. Používají se například na výrobu výměnných břitových destiček a na hoblovací nože. Rychlořezná ocel je zušlechťována zahříváním na teploty přes 1000 °C s následným kalením a popouštěním. Dosahuje tvrdosti 62-64 HRC. Hlavními legujícími prvky jsou chrom, vanad, wolfram, molybden. Výhodou je účinné odvádění tepla. Jsou brousitelné brusivem na bázi CBN ideálně společně s chlazením vodní mlhou. HSS oceli mohou být povlakovány.

Slinuté karbidy SK

Jedná se v současné době o nejvíce rozšířený materiál při obrábění dřeva zejména pak při obrábění aglomerovaných materiálů. V současné době nejvíce rozšířený nástrojový materiál na obrábění dřeva a zejména aglomerovaných materiálů. Jsou charakterizovány dobrým výkonem, jakostí, trvanlivostí ostří, tvrdostí a nízkým řezným odporem. Používají se jako pájené břity na řezné nástroje a také na výrobu VBD. Výhodou oproti ocelím třídy 19 je bezesporu jejich několikanásobně delší trvanlivost při relativně podobné ceně.

Vyrábí se pomocí práškové metalurgie (slinováním) z různých karbidů a kovového pojiva. Mezi nejpoužívanější karbidy patří karbid wolframu, karbid titanu, karbid tantalu a karbid niobu. Jako pojivo se používá kobalt. Slinuté karbidy jsou kompozitním materiálem. Karbid wolframu (WC) v podobě jemného prášku zrnitosti 10 až 0,2 μm je smíchán s práškovým kobaltem (pojivo). Následně je za vysokého tlaku a teploty směs slisována a „upečena". Kobalt vytvoří matrici, ve které jsou usazena karbidová zrna. Obsah pojiva je obvykle 2 až 15 %. Pro zlepšení vlastností se slinuté karbidy povlakují zejména těmito povrchy: nitrid titanu, karbonitrid titanu a karbid titanu. Broušení probíhá pomocí nástrojů na bázi diamantu při chlazení vodní mlhou.

Polykrystalické diamanty PKD

Jedná se o moderní materiál používaný na nástrojové břity nebo na VBD. Používají se na opracování vysoce abrazivních materiálů například laminované DTD a MDF desky. Vyznačují se vysokou životností a vysokou cenou.

Nejtvrdším známým materiálem je přírodní monokrystalický diamant, jehož tvrdosti syntetický polykrystalický diamant téměř dosahuje. Vyrábí se práškovou technologií kdy se na terčík z SK (tl. 0,5 až 1,5 mm) nanese vrstva diamantového prášku o zrnitosti 2 až 20 μm spolu s kobaltem (pojivo). Za působení vysokého tlaku a teploty se vytvoří homogenní izotropní vrstva PKD. Polykrystalické diamanty jsou elektricky vodivé. Tato vlastnost se s výhodou používá při ostření nástrojů elektroerozivní metodou. PKD jsou náchylné na vysoké teploty. V provozu nesmí přesahovat teplotu 700 °C.

3.5.3 Povlakování nástrojů

Jedná se o zušlechťování povrchu nástrojů (snížení řezného odporu, zlepšení tvrdosti, zvýšení trvanlivosti). Existují v zásadě dva typy povlakování: CVD a PVD.

CVD (chemical vapour deposition)

Do češtiny lze přeložit jako chemické napařování. Povlakovat lze především slinuté karbidy ale i nástrojové a rychlořezné oceli. Povlakování probíhá při teplotách 800 až 1000 °C a za sníženého tlaku. Na substrát (povlakovaný povrch), který je v prostředí methanu a povlakujících prvků v plynné fázi jsou vylučována zrnka syntetického diamantu, karbidu titanu, karbonitridu titanu nitridu titanu a dalších. Vyloučená vrstva dosahuje tloušťky cca 5 až 20 μm, přičemž jednotlivá zrna mají velikost cca 2 μm, u diamantového povrchu se velikost zrn směrem k substrátu zvětšuje. Ostření takto upravených nástrojů probíhá diamantovým brusivem při chlazení vodní mlhou (Černý, 2007).

PVD (physical vapour deposition)

Volně přeloženo fyzikální napařování. Na rozdíl od předchozí metody je materiál určený k pokrytí substrátu (nástroje) v pevném skupenství. Proces probíhá za sníženého tlaku při teplotách 300 až 500 °C. Právě nižší teplota je s výhodou používána pro povlakování nástrojových ocelí. Dochází k sublimaci povlakového materiálu. Vzniklé páry se šíří ze zdrojového terčíku a kondenzují na substrátu, který má nižší teplotu. Tuto metodu lze řídit pomocí změny podmínek v prostředí (teplota prostředí, teplota substrátu, tlak). Vrstva má obvykle přibližně 10 μ. Povlakování lze opakovat a dosáhnout tak silnějších vrstev. Nelze povlakovat slitinami kovů z důvodu různých teplot nutných pro dosažení sublimace. V průmyslové praxi se používají tři metody

ohřevu sublimovaného materiálu: průchod proudu odporovým členem, elektronový svazek a nízkonapěťový oblouk (Píška, 2014).

3.5.4 Podmínky při obrábění a trvanlivost nástrojů

Kvalitu obráběného povrchu přímo ovlivňují řezné podmínky (řezná rychlost, počet břitů nástroje, průměr a otáčky nástroje, rychlost posuvu, velikost ubírané třísky a v neposlední řadě druh obráběného materiálu). Trvanlivost a životnost nástroje je důležitou vlastností z ekonomického hlediska. Trvanlivost nástroje lze charakterizovat jako součet všech pracovních strojních časů nástroje, od začátku obrábění až po předem stanovenou mezní hodnotu opotřebení břitu. Životnost nástroje je pak součet všech trvanlivostí (od prvního uvedení do chodu, přes n broušení až po vyřazení nástroje).

Vzorec pro životnost přebrušovaného nástroje:

$$Z = \Sigma Ti = (n+1) \cdot T$$

Ti [min] - jednotlivé trvanlivosti
T [min] - aritmetický průměr hodnot Ti
n [-] - počet možných ostření nástroje

Vzorec pro životnost nástroje s VBD:

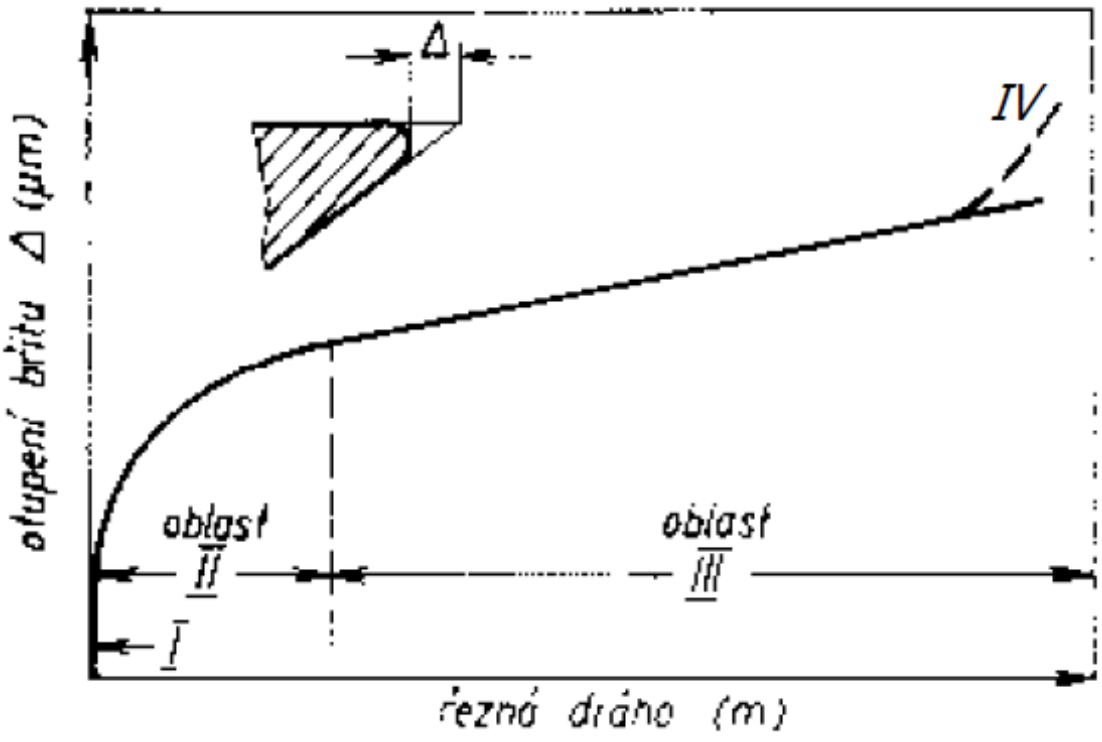
$$Z = \Sigma Ti = q \cdot T$$

Ti [min] - trvanlivosti jednotlivých ostří destičky
T [min] - aritmetický průměr hodnot Ti
q [-] – počet ostří destičky

V praxi je důležité včasné přeostřování nebo včasná výměna otupených břitů a právě dodržování respektive přiblížení se k optimálním řezným podmínkám. Ty mají přímý vliv na trvanlivost nástroje, kvalitu povrchu obrobku, odvod vznikajícího tepla. Tyto parametry významně ovlivňují tvorbu a odvod třísky. Obecně platí, že pro trvanlivost ostří je výhodnější větší úběr na zub a vyšší řezná rychlost. To je však v přímém rozporu s kvalitou povrchu obrobku. V případě CNC obráběcích center je těžší najít optimální provozní podmínky. Teplo odváděné břitem nástroje do těla nástroje se zvyšuje při použití konstantních provozních podmínek. Dochází tak k rychlejšímu otupení břitu (Humár, 2003).

Opotřebení břitu nástroje se charakterizuje jako postupná změna jeho mikrogeometrie během řezání. Nástroj je tupý právě tehdy, když dojde k nepřípustnému zhoršení kvality obráběného povrchu, zvýšení řezného odporu (síly), pálení, rozměrovým nepřesnostem a vyštípávání materiálu. Trvanlivost břitu je v praxi udávána výrobci v podobě řezné délky v běžných metrech, kdy je nástroj schopen pracovat za daných řezných parametrů. Průběh otupení břitu se dělí do čtyř fází:

- Fáze I – první záběr břitu, dochází k odlomení jehly a otřepů
- Fáze II – vzrůst otupení s degresivním průběhem
- Fáze III – oblast rovnoměrného otupování
- Fáze IV – nárůst otupení s regresivním průběhem (není experimentálně prokázáno)



Obr. 4. Proces otupování nástroje (Král, 2008)

V praxi velmi často dochází k tzv. vyhřátí nástroje. Teplota nástroje přesáhne kritickou mez a nástroj zkřehne (je vykalen). Dochází k odlomení břitu. Takový nástroj (nebo břit) již nelze přeostřit a musí být vyřazen z provozu.

Tab. 1. Maximální pracovní otáčky frézovacích nástrojů [ot.min-1] (Král, 2008)

Průměr nástroje D [mm]	**frézy pájené**	**frézy s VBD**	**hlavy nožové**
	otáčky [ot.min-1]		
40	18000	18000	-
60	18000	14000	-
80	15000	12000	7000
100	12000	10000	6000
120	10000	9000	5000
140	9000	8000	4500
160	8000	7000	4000
180	7000	6000	3500
200	6000	5500	3000
225	5500	4500	2800
250	5000	4000	-
280	4500	3500	-
300	4000	3000	-

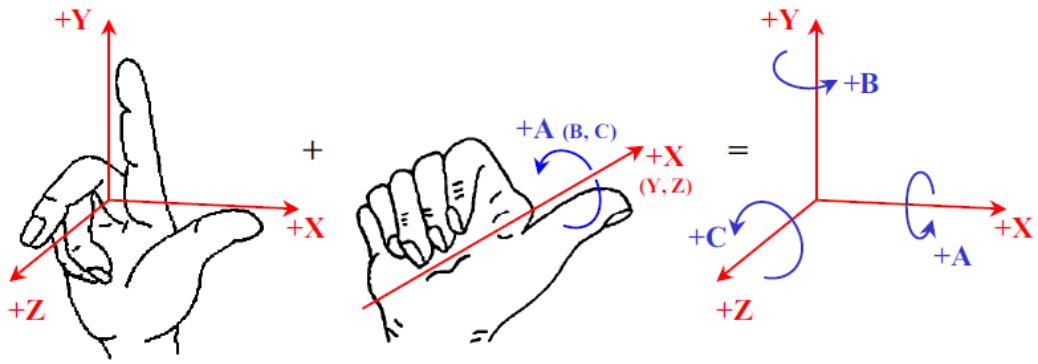
Obr. 5. Řezná rychlost při frézování (Král, 2008)

Otáčky [ot*min^{-1}]	**3000**	**4500**	**6000**	**7500**	**9000**	**12000**	**15000**	**18000**
Průměr nástroje [mm]	**Řezná rychlost [m*s^{-1}]**							
10	2	2	3	4	5	6	8	9
20	3	5	6	8	9	13	16	19
30	5	7	9	12	14	19	24	28
40	6	9	13	16	19	25	31	38
50	8	12	16	20	24	31	39	47
60	9	14	19	24	28	38	47	56
80	13	19	25	31	38	50	63	75
100	16	24	31	39	47	63	78	94
120	19	28	38	47	56	75	94	113
125	20	29	39	49	59	78	98	118
140	22	33	44	55	66	88	110	132
150	24	35	47	59	71	94	118	141
160	25	38	50	63	75	100	126	151
180	28	42	56	71	85	113	141	169
200	31	47	63	78	94	126	157	188
220	35	52	69	86	104	138	173	207
250	39	59	78	98	118	157	196	235
280	44	66	88	110	132	176	220	264
300	47	71	94	118	141	188	235	282
320	50	75	100	126	151	201	251	301
350	55	82	110	137	165	220	275	330
400	63	94	126	157	188	251	314	377
500	78	118	157	196	235	314	392	471

3.6 Základy programování a obsluhy

3.6.1 Zavedení souřadnicového systému a nulových bodů

U každého stroje je nutné zavést souřadnicový systém, ve kterém bude stroj pracovat. Toto má zpravidla na starosti již výrobce zařízení. K vytvoření souřadnicového stroje se využívá obecně známého pravidla pravé ruky (viz obr. 6). Zásadou je volit osu Z rovnoběžně s osou vřetene, osy X, Y leží v rovině stolu frézky a jsou na sebe navzájem kolmé. Osa X je rovnoběžná s podélným pohybem stolu a osa Z s příčným pohybem stolu. Kladný smysl osy Z je směrem od obrobku. K osám X, Y, Z existují ekvivalenty A, B, C, které kolem nich označují rotační pohyby.



Obr. 6. Pravidlo pravé ruky, souřadnicový systém stroje (Keller, 2005)

Další neméně důležitou věcí je definování nulových a referenčních bodů. Po uvedení CNC stroje do provozu. Nulový a referenční bod stroje je vždy definován výrobcem. Ostatní body volí vhodně CNC programátor.

M – nulový bod stroje

Je počátkem souřadnicového systému pracovního prostoru stroje. Je pevně určen konstrukcí. Jedná se o absolutní počátek souřadnic. Nelze jej měnit.

R – referenční bod stroje

Je to výrobcem zvolené místo na stroji. Obvykle se jedná o největší možnou vzdálenost od nulového bodu stroje. Je vymezen koncovými spínači na jednotlivých osách. Slouží ke kalibraci odměřovacího systému stroje. Vzdálenost bodů M a R je uložena v tabulce strojních konstant. Bez najetí stroje do referenčního bodu není stroj schopen pracovat v režimu absolutního zadávání souřadnic.

W – nulový bod obrobku

Je počátkem souřadného systému obrobku. Jeho polohu vhodně určuje programátor. Lze jej v jednotlivých částech programu měnit. Umisťuje se vhodně tak, aby co nejvíce zjednodušil programování. U CNC frézek je nejčastěji volen v levém horním rohu blíže k obsluze.

P – bod špičky nástroje

Jedná se o bod, který se teoreticky programuje. Je nutný pro stanovení délkové korekce a následně rádiusové korekce (poloměru zaoblení špičky nástroje).

F – Vztažný bod suportu nebo vřetene

U CNC frézky je to na vřeteni, ke kterému se vztahují délkové korekce. Tento bod vlastně řídí podle programu řídicí systém. V tomto bodě má nástroj nulovou délku.

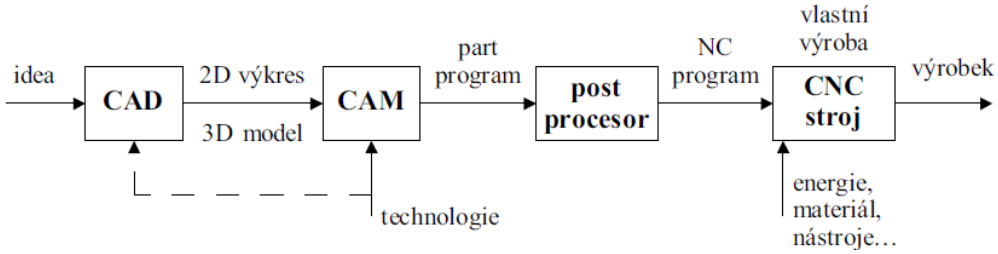
E – bod nastavení nástroje (nulový bod stroje)

Bod držáku nástroje, který při upnutí nástroje splyne s bodem F. Je využívám ke zjištění délkových korekcí mimo CNC stroj (Knoflíček, 2011).

3.6.2 Druhy programování

K tomu aby CNC stroj pracoval, potřebuje tzv. NC program. Tento předpis, který má svá předem daná pravidla, obsahuje veškeré pokyny ke zhotovení obrobku (zjednodušeně: údaje o nástrojích, údaje o rychlostech posuvu, o otáčkách nástroje a především jsou v něm nadefinovány dráhy nástroje). Prvním a také nejstarším způsobem tvorby programu je jeho tvorba pouze na základě výkresové dokumentace. Toto vyžaduje dokonalé znalosti programátora v programování NC kódu. Programátor musí také znát samotnou technologii obrábění. Tento způsob se v dnešní době již téměř nepoužívá a to především díky své časové náročnosti a složitosti modifikace programu. Častěji využívané je dílenské programování, kdy programátor programuje na počítači přímo u CNC stroje. Program je vytvářen na základě zadaných informací o polotovaru a konečného tvaru obrobku (Keller, 2005). Programování je rychlejší a flexibilnější než první typ, ale má i své nevýhody. Tou největší je, že při tvorbě programu je CNC stroj neproduktivní. Je vhodný především pro výrobu tvarově jednoduchých dílců. Posledním a nejčastěji využívaným způsobem je pomocí CAD/CAM systému. CAD (anglicky computer aided design) je počítačová podpora navrhování, jednoduše řečeno kreslicí program. CAM (anglicky computer aided manufacturing) je počítačová podpora

výroby. CAM software při znalosti (nadefinování) konkrétního CNC stroje je schopen navrhnout optimální dráhy nástroje. Součástí softwaru je možnost vizuální simulace navrhovaného obráběcího cyklu. Mezi hlavní výhody patří rychlost programování, flexibilita a nižší nároky na kvalifikaci obsluhy CNC stroje. Za nevýhody můžeme požadovat poměrně vysokou pořizovací cenu softwaru. Dále pak to, že každý výrobce CNC strojů spolupracuje s různými vývojáři CAD/CAM softwaru.



Obr. 7. Princip uplatnění CAD/CAM Pravidlo (Keller, 2005)

Z hlediska zadávání rozměrů a vzdáleností lze souřadnice zapisovat dvěma způsoby: absolutně (tzv. absolutní programování) nebo relativně (tzv. inkrementální programování (Kopr, 2013).

Absolutní programování

Popisuje cílový bod dráhy nástroje vztažený k předem zvolenému počátku souřadnic – k nulovému bodu obrobku W. Při zadávání souřadnic je ihned zřejmá poloha aktuálního bodu na součásti. Jednodušší kontrola, tím i nižší pravděpodobnost chyb.

Inkrementální programování

Dráha nástroje je zadávána ve formátu výchozí bod – koncový bod. Rozměr je tedy zaveden jako přírůstek k předchozí poloze nástroje. Při kontrole je nutné zkontrolovat celý program až po hledaný rozměr. Při návrhu součástí je vhodné využívat řetězových kót. U přírůstkového programování je vyšší pravděpodobnost chyb a chyby se sčítají (Mana, 2012).

3.6.3 Základní pojmy

Než programátor CNC začne psát program, musí se seznámit se základními funkcemi, ze kterých je program vytvořen. Jsou to přípravné funkce (G), pomocné

funkce (M), funkce posuvu (F), otáčkové funkce (S), funkce výměny nástroje (T) vycházející z normy ISO 6983-1.

Přípravné funkce G

G00	„rychloposuv“
G01	lineární interpolace
G02	kruhová interpolace CW (ve směru hodinových ručiček)
G03	kruhová interpolace CCW (proti směru hodinových ručiček)
G04	časová prodleva
G17	výběr základní pracovní roviny X-Y
G18	výběr základní pracovní roviny X-Z
G19	výběr základní pracovní roviny Y-Z
G20	programování v palcích
G21	programování v mm
G28	návrat na startovní pozici
G31	přeskočit funkci (používá se ke zkoušení a měření)
G33	konstantní rozteč (řezání závitů)
G34	proměnná rozteč (řezání závitů)
G40	vypnutí rádiusové korekce dráhy nástroje
G41	rádiusová korekce nástroje vlevo od obrysu obrobku
G42	rádiusová korekce nástroje vpravo od obrysu obrobku
G54 až G59	pracovní pozicový systém (přesuny nulového bodu)
G81	jednoduchý vrtací cyklus
G82	vrtací cyklus s časovou prodlevou
G83	letmý vrtací cyklus
G90	absolutní programování
G91	inkrementální (přírůstkové) programování
G92	programování z nulového bodu stroje
G96/G97	konstantní rychlost posuvu, konstantní otáčky

Pomocné M funkce

M00/M01	programový stop programu
M03	otáčky vřetene CW (ve směru hodinových ručiček)
M04	otáčky vřetene CCW (proti směru hodinových ručiček)
M05	vypnutí vřetene
M17	konec podprogramu
M02/M30	konec programu

3.6.4 Struktura programu

Program je sestaven z jednotlivých po sobě jdoucích bloků (vět). Tyto jsou označeny písmenem N a číslem věty například 005. Každá věta je posloupností slov. Program začíná znakem % a číselným označením například 001. Znak / před větou označuje větu vypustitelnou. Do kulatých závorek si může programátor zapisovat libovolné poznámky (jsou vyloučeny z programu). Existují dva formáty vět: formáty s konstantní délkou a formáty s proměnlivou délkou. U formátu s pevnou délkou bloku je nutné v každé větě programu použít syntakticky správně všechna slova. U formátu s proměnnou délkou není třeba vypisovat slova, která se vyskytují v předchozích větách, a jejich významová část se změnila.

3.6.5 Podprogram

Podprogramem rozumíme uzavřenou část programu, která je v rámci hlavního programu opakovatelná. Je uložen jako samostatný program a je možné jej vyvolat do libovolného hlavního programu. Vytváří jej programátor ve snaze zrychlit a zjednodušit si práci. Vyvolán je funkcí L s příslušným číslem podprogramu. Funkce P určuje počet opakování podprogramu. Je ukončen slovem M17 a po něm přebírá řízení stroje hlavní program.

3.7 Rešerše malých komerčně dostupných routerů

Segment malých (výukových, hobby, levných, atp.) frézek zaznamenává největší rozvoj v posledních několika letech. Na trhu existuje celá řada řešení. Standardně jsou dostupné tříosé souvisle řízené CNC, lze se však setkat i se čtyřosými. Výkon vřeten se pohybuje do 1000 W. Jedná se o zařízení malých rozměrů. Jejich velkou výhodou je mobilita.

3.7.1 CNC frézka MC30F2T

Výrobce této frézky je společnost Merkur Toys s.r.o. Tento stroj je vhodný k obrábění dílů z hliníku, plastu, dřeva. Řídící elektronika je uložena v kompaktním boxu vedle stroje, kromě připojení k PC a napájení nejsou potřeba žádné další kabely. Zařízení je dodáváno smontované, odzkoušené a zkalibrované. Osy Y a Z jsou uloženy na lineárním vedení s vozíky. Osa X je uložena na kluzném bezúdržbovém vedení *(MERKUR).*

Tab. 2. Technické parametry CNC frézky MC30F2T *(MERKUR)*

MC30F2T s vřetenem - T drážkový stůl	
Rozměry: (š,h,v)	400x470x500
Hmotnost:	23 Kg
Max.upínací pr. nástroje:	6 mm
Pracovní prostor:	330x300x110
Průchod pod osou Z:	110 mm
Upínací stůl:	330x300
Rozsah posuvu - osa X:	180 mm
Rozsah posuvu - osa Y:	210 mm
Rozsah posuvu - osa Z:	90 mm
Elektronické rozlišení:	0,001 m
Přesnost najetí:	0,05 mm
Pohon stroje:	KM
Max. rychlost posuvu	300 mm/min
Výkon vřetene	250 W
Otáčky vřetene - ot/min	900-6000
Uložení vřetene	ložiska 3 body
Ovládací software stroje	Demo MACH 3
Komunikace s PC	LPT převodník
Napájení	24 V / 5A DC
Max. příkon stroje (bez vřetene)	neuvedeno
Tlačítko centrál stop	Ano

Koncový a referenční spínač	Ano
Možnosti rozšíření:	
T-drážkový stůl	součástí
Odsávání pilin - adaptér	Ano
4-Osa	Ano
Pevný senzor osy Z	Ano
Měřicí senzor osy Z - Automatické měření nástroje	Ano
Osvětlení	Ano

Za výhodu můžeme označit kompaktní rozměry a pořizovací cenu 36.500, Kč vč. DPH (ke dni 28.2.2016). Nevýhodou je zcela určitě malý výkon vřetene, absence elektronické regulace otáček a pouze 6mm upínací kleština.

Obr. 8. 3D CNC Frézovací stroj MC30FT *(MERKUR)*

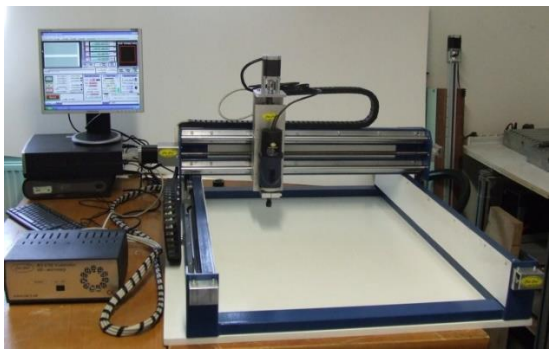
3.7.2 CNC frézka Kompas H – 1000

CNC frézka pochází od slovenského výrobce. Spadá opět do kategorie malých routerů. Výrobce doporučuje požívat k obrábění plastů, dřeva a materiálů na bázi dřeva. Osy jsou uloženy na podepřeném lineárním vedení. Rám je ocelový svařenec *(Hobby CNC).*

Tab. 3. Technické parametry CNC frézky Kompas H – 1000 *(Hobby CNC)*

Kompas H - 1000	
Rozsah posuvu - osa X	600 mm
Rozsah posuvu - osa Y	850 mm
Rozsah posuvu - osa Z	100 mm
Prostor pod osou Z	160 mm
Přesnost	0.05 mm
Max. rychlost posuvu	800 mm/min
Vřeteno	Cau Cau 850 W
Řízení	H5 ovladač
Rozměr spodního rámu	880x1110 mm
Celkové rozměry	1100x1300x600 mm
Hmotnost	85 kg
Možnosti rozšíření:	
Elektrovřeteno 800 W s frekvenčním měničem	

Mezi hlavní výhody frézky patří relativně vysoký výkon vřetene a dvojité matice s možností předepnutí a lepšího seřizování vůle vedení. Za nevýhodu lze považovat absenci upínacího stolu v dodávce CNC frézky. Cena je v přepočtu 53.790,- Kč vč. DPH (kurz ke dni 28.2.2016). K zařízení je možno dokoupit elektrovřeteno s frekvenčním měničem, který zajistí počítačovou regulaci otáček vřetene. Výše příplatku je 10.810,- Kč vč. DPH (kurz ke dni 28.2.2016).



Obr. 9. Kompas H – 1000 *(Hobby CNC, 2015)*

3.7.3 CNC frézka CNCB-2030

Tato CNC frézka je určena k obrábění nekovových materiálů především plastů a dřeva. Umožňuje souvislé řízení všech tří os. Díky svým kompaktním rozměrům může posloužit například jako výuková pomůcka na středních a vysokých školách technického zaměření nebo na obrábění velmi malých součástí *(CNC.ISHOP.CZ).*

Tab. 4. Technické parametry CNC frézky CNCB-2030 *(CNC.ISHOP.CZ)*

CNCB-2030	
Zdvih osy Z	65 mm
Vedení os X/Y	Nepodepřené tyče/ lineární ložiska / trapézové šrouby
Vedení osy Z	Nepodepřené tyče/ lineární ložiska / trapézové šrouby
Pracovní plocha	300 x 200 mm
Výkon vřetene	300 W
Max. otáčky	8000 ot/min
Chlazení materiálu	bez chlazení
Provedení stolu	T-drážka
Počet pracovních os	3 osy
Řízení stroje	LPT
Koncové spínače	Ne

Mezi hlavní výhody patří především kompaktní rozměry a možnost ovládání otáček vřetene. Při zvládnutí obsluhy stroje pak mohou být limitující parametry řízení os a výkon vřetene. Jako závažný nedostatek považuji absenci koncových spínačů, které jsou jedním ze základních bezpečnostních prvků stroje. Cena stroje je ke dni 29.2.2016 53.119,- Kč vč. DPH.

Obr. 10. CNCB-2030 *(CNC.ISHOP.CZ)*

3.7.4 CNC router Numco SHG 0404

CNC stroj od renomovaného českého výrobce První hanácká BOW s.r.o. divize NUMCO. Slouží především k obrábění neželezných kovů jako je hliník, měď, mosaz atd. Jedná se o profesionální stroj s vysokou přesností, který může být plně nasazen ve výrobním provozu *(CNC.BOW.CZ).*

Tab. 5. Technické parametry CNC Numco SHG 0404 *(CNC.BOW.CZ)*

Numco SHG 0404	
Příkon	1500 W
Hmotnost	80 kg
Konstrukce stroje	Hliníkový odlitek
Kleština	ER16
Pracovní posuv	4000 mm/min
Rozměry pracovního stolu	520 × 660 mm
Rozsah posuvu - osa Y	400 mm
Rozsah posuvu - osa Z	100 mm
Rychloposuv	6000 mm/min
Koncepce - osa X, Z	Kluzné tyče a kuličkové šrouby
Koncepce - osa Y	Lineární vedení a kuličkový šroub
Plocha pracovního stolu	T - drážky
Rozsah posuvu - osa X	400 mm
Rozměry	910 × 800 × 880 mm
Řídicí systém	ARMOTE
Elektrické připojení	230 V
Opakovatelná přesnost	0,02 mm
Otáčky	0 - 24000 ot/min

CNC stroj Numco má spoustu předností, například rozměrovou přesnost na dvě setiny milimetru, polohování os prostřednictvím kuličkového šroubu s dvojitou předepnutou maticí, dostatečný výkon a připojovací napětí 230 V. Jako nevýhoda se jeví poměrně vysoká pořizovací cena stroje, která ke dni 29.2.2016 činí 254.090,- Kč vč. DPH.

Obr. 11. CNC router Numco SHG 0404 *(CNC.BOW.CZ)*

4 Materiál a metodika

4.1 Základní koncepce frézky

Konstrukční materiál použitý na výrobu CNC frézky MDF (dřevovláknitá deska střední hustoty), PD (překližovaná deska) a slitina hliníku AlMgSi0,5. Pro posuvy jsem se rozhodl použít lineárního vedení ve formě podepřených broušených tyčí a k polohování os kuličkové šrouby. V úvahu připadaly dvě varianty konstrukce: posuvný portál a posuvný stůl. Po krátkých úvahách jsem se rozhodl pro první možnost, s ohledem na délku vedení v ose X, kdy je oproti druhé variantě přibližně poloviční a tím pádem výrazně levnější. Tato varianta má však jednu podstatnou nevýhodu a tou je celková nižší tuhost konstrukce portálu. Pohon os by měly zajišťovat stejnosměrné krokové motory s dostatečným krouticím momentem. U vřetene jsem se rozhodl pro variantu, která neumožňuje elektronické řízení otáček. Varianta je výrazně ekonomičtější, odpadá nutnost pořízení frekvenčního měniče. Jako vřeteno bude použita konvenční horní frézka. V následující tabulce jsou specifikovány požadované parametry CNC frézky. Fotografie z výroby CNC frézky jsou zobrazeny v příloze.

Tab. 6. Požadované technické parametry

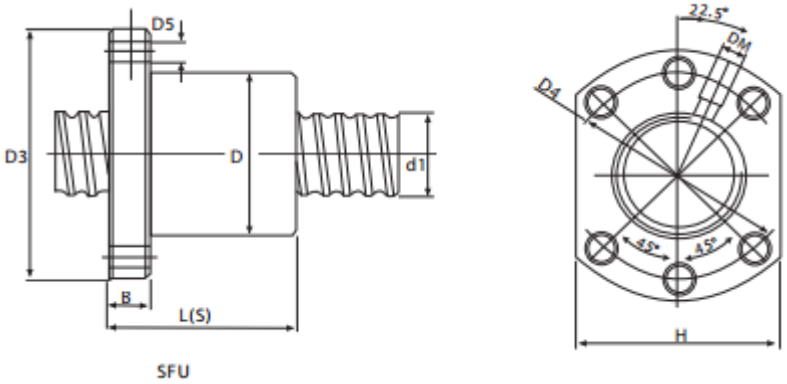
Příkon vřetene	0,5-1 kW
Otáčky vřetene	5 000-25000 ot/min
Upínací kleštiny	6-8-10 mm
Rozsah v ose X	350 mm
Rozsah v ose Y	200 mm
Rozsah v ose Z	60-80 mm
Plocha pracovního stolu	T drážky
Elektrické napájení	230 V-AC
Hmotnost	do 45 kg
Přesnost obrábění	0,1 mm

4.2 Konstrukční prvky

Kuličkový šroub a matice

Kuličkový šroub SFU 1204 má průměr 12 mm a atypické stoupání 4 mm/ot. Je použit v různých délkách pro posuv všech tří os stroje. Parametry kuličkové matice jsou uvedeny v následující tabulce.

- Osa X – 550 mm
- Osa Y – 480 mm
- Osa Z – 255 mm



Obr. 12. Kuličkový šroub SFU 1204 tříkanálový (Nordevx.com)

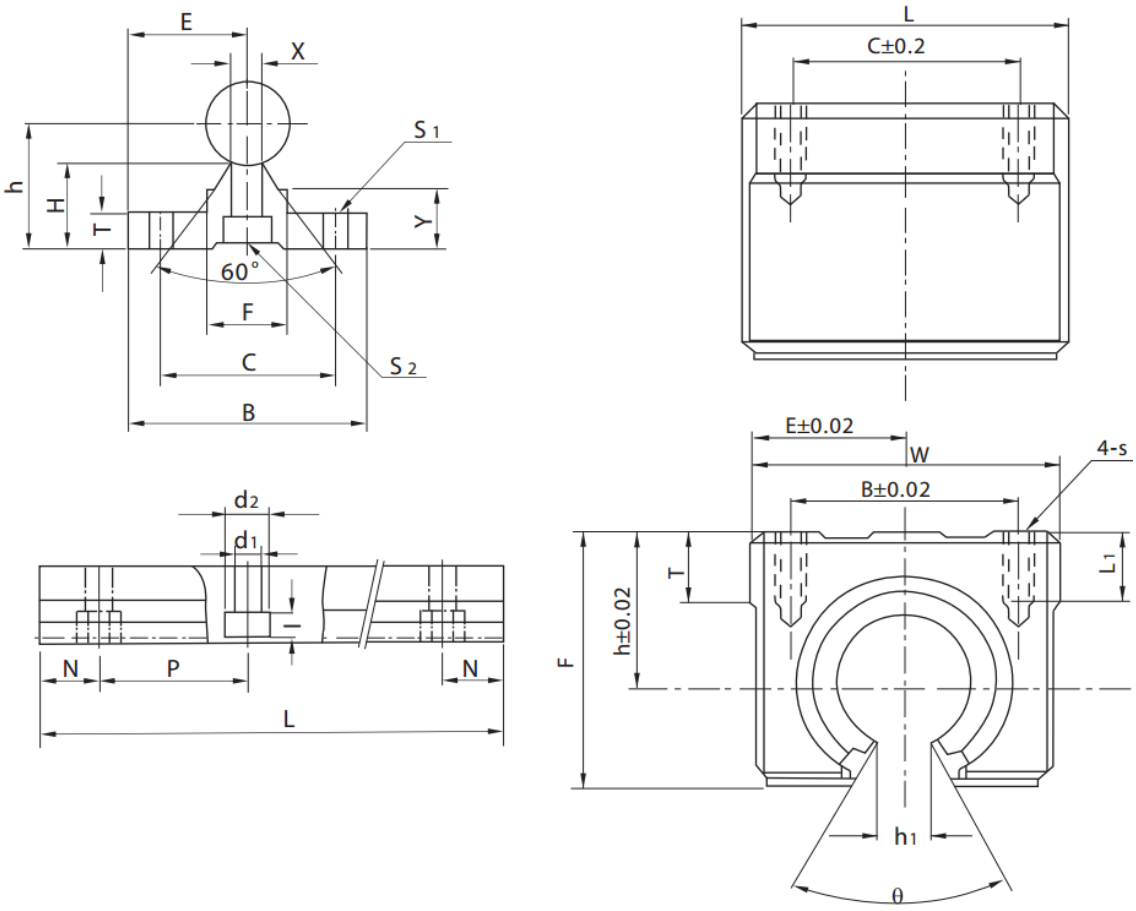
Tab. 7. Technické parametry šroubu SFU 1204 (Nordevx.com)

SFU 1204									
Průměr D1	Stoupání	Průměr kuličky	Počet kanálů	D	D3	D4	H	B	D5
12 mm	4 mm	2,381 mm	3	22 mm	42 mm	32 mm	34 mm	10 mm	4,5 mm

Lineární vedení podepřené broušené tyče

Pro vedení os jsem zvolil podepřené broušené tyče s průměrem 20 mm a lineárními otevřenými ložisky typu C. Tyče jsou dodávány v metráži. Výrobcem je stejně jako v předchozím případě od amerického výrobce NorDevX.V následujících tabulkách jsou uvedeny parametry vedení.

- Osa X – 460 mm
- Osa Y – 354 mm
- Osa Z – 210 mm



Obr. 13. Broušená podepřená tyč SBR 20 a lineární ložisko SBR 20 UU (Nordevx.com)

Tab. 8. Technické parametry lineárního vedení SBR 20 (Nordevx.com)

SBR 20										
E	h	B	H	T	F	X	Y	C	s1	váha kg/m
22,5 mm	27 mm	45 mm	17,7 mm	5 mm	19 mm	8 mm	10 mm	30 mm	5,5 mm	1,07

Tab. 9. Technické parametry lineárního ložiska SBR 20 UU (Nordevx.com)

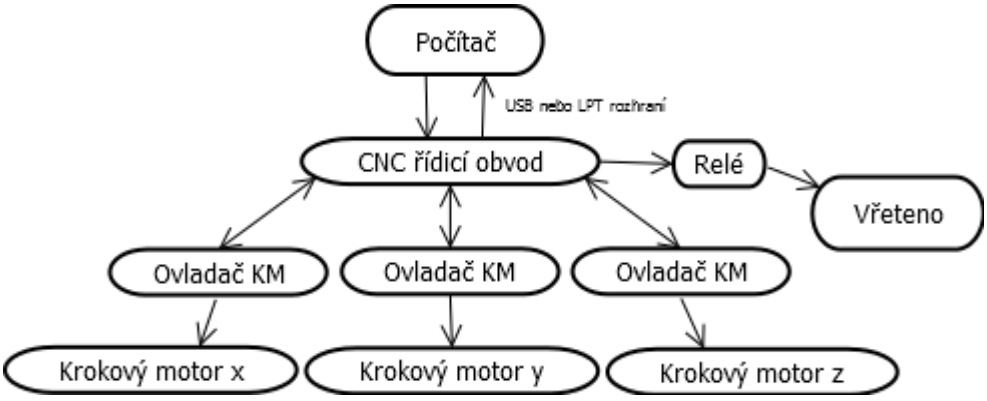
SBR 20 UU												
h	E	W	L	F	h1	q	B	C	S	L1	T	váha kg/m
23 mm	24 mm	48 mm	50 mm	39 mm	10 mm	60°	35 mm	35 mm	M6	12 mm	11 mm	200

Spojka motoru s osou

Pružné spojky byly zakoupeny jako díly z hliníku s vrtáním pro osu motoru 6,35 mm a pro osu kuličkového šroubu 8 mm.

4.3 Řídicí elektronika a vřeteno

Řídicí elektronika se zjednodušeně skládá ze čtyř částí: napájecí zdroj, řídicí obvod CNC stroje, oddělené ovladače krokových motorů, krokové motory. Schéma základního principu komunikace sestavy je zobrazeno na následujícím obrázku. Chybí zde HW interpolátor, který je nahrazen softwarově, kdy signály pro řízení krokových motorů STEP a DIR generuje PC.



Obr. 14. Schéma CNC sestavy

Napájecí zdroj

Pro napájení jsem zvolil cenově dostupný, avšak stále dostatečně kvalitní spínaný zdroj od společnosti Mean Well model RS-150-24. Zdroj je připojitelný na jednofázové střídavé napětí 230 V.

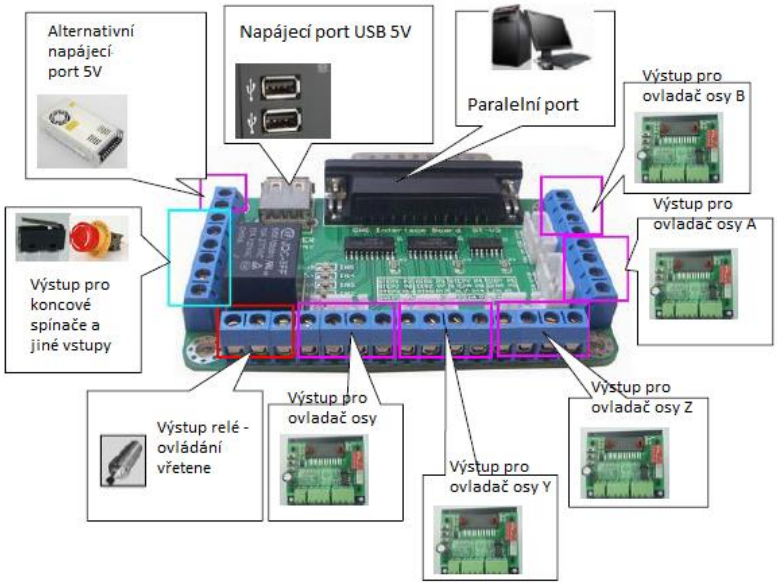
Tab. 10.Spínaný zdroj Mean Well RS-150-24 *(GM ELECTRONIC)*

RS-150-24	
Výkonová řada	150 W
Skutečný výstupní výkon	156 W
Výstupní napětí	24 V
Výstupní proud	6,5 A
Regulace výst. napětí	22,8..26,4 V
Vstupní napětí AC	88..132/176..264 V
Vstupní napětí DC	248..373 V
Odběr při 230V AC	2 A
Účinnost	86%
Studený start	40 A
Připojení	svorkovnice
Stupeň krytí	-
Typ chlazení	pasivní

Integrované ochrany	Přetížení, zkrat, přepětí
Pracovní teplota	-25..70 °C
Hmotnost	0,7 kg
Rozměry	199 x 98 x 38 mm
Výrobce	MEAN WELL

Řídicí CNC obvod (CNC Interface Board)

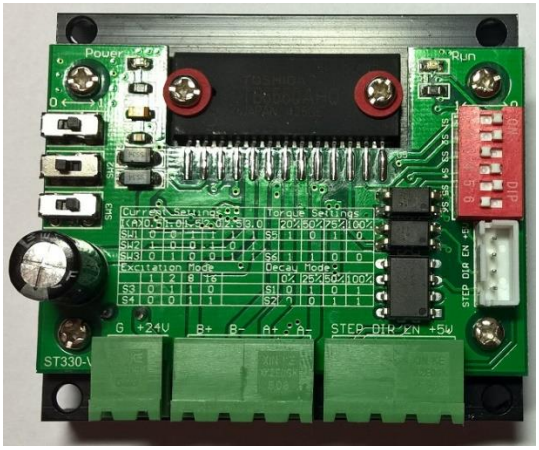
Je prostředkem komunikace mezi PC a ovladači motorů. Deska je určena pro jednoduché připojení vstupů a výstupů CNC zařízení k paralelnímu portu PC. Vstupní a výstupní signály do PC jsou připojeny přes polovodičové sběrnicové budiče HC244 poskytující výstupní napětí 5 V. Paralelní port se připojuje paralelním kabelem 1:1, na desce je instalován konektor DB25, vstupní a výstupní signály jsou vyvedeny pomocí šroubovacích svorkovnic ARK210. Vstupní signály jsou opticky oddělené optočleny. Součástí desky je relé umožňující spínání spotřebiče až do 2500 W při maximálním proudu 10 A a napětí 250 VAC.



Obr. 15. Popis zapojení CNC řídicího obvodu

Ovladače krokových motorů (Stepper Motor Drivers)

Pro stavbu CNC jsem zvolil ovladače ST330-V3. Driver je osazen čipem od renomovaného japonského výrobce Toshiba TB6560AHQ. Deska potřebuje stejnosměrné napájení o napětí 12 až 34 V (optimálně 24 V). Pracovní proud může dosahovat hodnoty 3,5 A a frekvence pulzů může být v rozsahu 0 až 100 kHZ. Deska umožňuje nastavení pracovního proudu, krouticího momentu a kroku. Ostatní parametry driveru a schémata nastavení viz příloha 1.



Obr. 16. Ovladač KM ST330-V3 (vlastní fotografie)

Vřeteno

Jako vřeteno je použito tělo z horní frézky Ferm FBF-850E. Technické parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 11.Technické parametry frézy Ferm FBF-850E *(Ferm)*

Ferm FBF-850E	
Napájecí napětí	230 V
Příkon	850 W
Rozsah otáček bez zatížení	11500-32000 ot/min
Maximální hloubka frézování	30 mm
Maximální průměr nástroje	30 mm
Průměr kleštiny	6-8 mm
Hmotnost celková	2,9 kg
Hmotnost těla	1,7 kg
Hladina akustického výkonu	104,1 dB
Hladina akustického tlaku	91,1, dB
Vibrace	3 m/s^2

Pro potřebu výpočtů a výroby vzorků jsem zvolil stopkovou drážkovací a dokončovací frézu od společnosti Vydona s.r.o. Jedná se o dvojbřitou frézu průměru 8 mm, která je určená pro frézování tvrdého dřeva, DTD, MDF a lamina. Je vhodná pro strojní posuv s v_{fmax} = 10 m/min a s n_{max} = 30000 ot/min.

Je potřeba vyjádřit přibližnou hodnotu řezné síly F_c pomocí předem nadefinovaných parametrů. Při výpočtech je čerpáno z knihy Teorie obrábění tváření a nástroje, dále z přednášek doc. Ing. Zdeňka Kopeckého, CSc. Autory uvedené knihy jsou Milan Forejt a Miroslav Píška.

Tab. 12.Vstupní parametry pro výpočty

Průměr frézy D	8 mm
Počet zubů z	2
Posuv na zub f_z	0,2 mm
Otáčky nástroje n	11500 ot/min
Šířka záběru ae	8 mm
Hloubka záběru ap	3 mm
Úhel čela ɣ	14°
Úhel nastavení řezu δ	60°
Měrný řezný odpor kc	89 MPa

Řezná rychlost v_c [m/s]

$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{60 \times 1000}$$

$$v_c = \frac{\pi \times 8 \times 11500}{60 \times 1000} = \mathbf{4,82\ m.s^{-1}}$$

Rychlost posuvu (minutový posuv) v_f [m/min]

$$v_f = \frac{f_z \times z \times n}{1000}$$

$$v_f = \frac{0{,}2 \times 2 \times 11500}{1000} = \mathbf{4,6\ m.min^{-1}}$$

Velikost řezné síly F_c [N]

$$F_c = k_c \times a_e \times a_p \times \frac{v_f}{60 \times v_c}$$

$$F_c = 89 \times 10^6 \times 0{,}008 \times 0{,}003 \times \frac{6{,}9}{60 \times 4{,}82} = \mathbf{34,0\ N}$$

Řezný výkon [W]

$$P_c = F_c \times v_c$$

$$P_c = 34 \times 4{,}82 = \mathbf{163,9\ W}$$

Příkon elektromotoru vřetene [W] při uvažované účinnosti η = 85 %

$$P_M = \frac{F_c \times v_c}{\eta}$$

$$P_M = \frac{34 \times 4{,}82}{0{,}85} = \mathbf{192{,}8\ W}$$

Na základě výpočtů lze konstatovat, že motor s příkonem 850 W je dostatečně nadimenzovaný pro modelovou situaci. Zvládl by jak vyšší otáčky, tak rychlost posuvu nebo nástroj s větším průměrem.

Krokové Motory

Motory pro pohon os jsem zvolil od výrobce Longs Motor model 42BYGH0425. Jedná se o bipolární motor se základním rozlišením 1,8°/krok tedy 200 kroků na 1 otáčku.

Tab. 13.Parametry kokového motoru 42BYGH0425 *(ITEAD STUDIO)*

Model 42BYGH0425	
Krok	1,8 °
Délka motoru	48 mm
Pracovní proud	2,5 A
Vnitřní odpor	1,25 Ω
Zádržný moment	4,8 kg/cm
Točivý moment	0,28 kg/cm
Počet vodičů	4
Hmotnost	0,34 kg

Bylo nutné ověřit, zda bude mít navržený motor dostatečný krouticí moment pro sestavované CNC. K orientačním výpočtům (na základě tabulkových hodnot účinností) byla použita literatura Konstrukce CNC obráběcích strojů od Jiřího Marka. Výpočty jsou provedeny na základě tabelovaných hodnot účinnosti jednotlivých komponent.

$$M_m = \frac{F_A \times s}{2\pi \times i \times \eta_c}$$

M_m – moment krokového motoru [Nm]

F_A – požadovaná axiální síla [N]

i – převodový poměr [-]

s – stoupání kuličkového šroubu [m]

η_c – celková účinnost posuvové soustavy [-]

$$\eta_c = \eta_s \times \eta_v \times \eta_L^j \times \eta_p$$

η_s – účinnost kuličkového šroubu – 0,92

η_v – účinnost vedení – 0,98

η_L – účinnost jednoho ložiska kuličkového – 0,99

j – počet ložisek

η_P – účinnost převodu – 1 (pevný převod 1:1)

Výpočet motoru pro osy X a Y

V tomto případě můžeme brát jako požadovanou axiální sílu F_A výsledek výpočtu řezné síly F_c, tedy 34 N. Stoupání kuličkového šroubu je 4 mm.

$$M_m = \frac{34 \times 0{,}004}{2\pi \times 1 \times 0{,}92 \times 0{,}98 \times 0{,}99^3 \times 1} = \mathbf{0{,}025\ Nm}$$

Vypočtená hodnota je 0,0025 Nm je nižší než krouticí moment udávaný výrobcem 0,028 Nm. Teoreticky by měly motory stačit. Bude záležet na přesnosti konstrukce a na použitých napájecích napětích a proudech.

Výpočet motoru pro osu Z

V tomto případě můžeme za požadovanou axiální sílu F_A uvažovat tíhovou sílu od vřetene, která působí v ose Z. Ta je vypočtena na základě známých hmotností vřetene, lineárních ložisek, spojovacího materiálu a podkladové desky osy Z. Hodnota tíhové síly F_g je přibližně 22,8 N. Stoupání kuličkového šroubu je 4 mm.

$$M_m = \frac{22{,}8 \times 0{,}004}{2\pi \times 1 \times 0{,}92 \times 0{,}98 \times 0{,}99^3 \times 1} = \mathbf{0{,}022\ Nm}$$

Vypočítaná hodnota 0,022 Nm je opět nižší než hodnota udávaná výrobcem a motory by měly mít dostatečný krouticí moment.

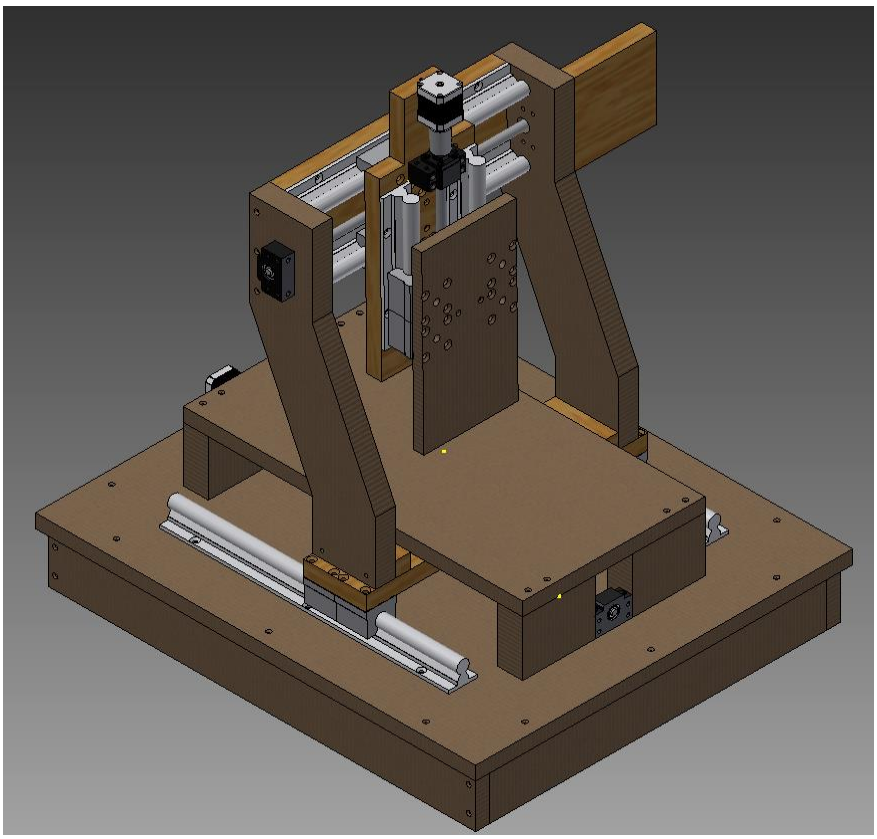
Koncové spínače

Osy X, Y i Z budou vybaveny koncovými spínači z důvodu ochrany stroje proti poškození a také jako bezpečnostní prvek obsluhy. Jedná se o pákový mikrospínač zakončený rolnou. Délka hmatníku 22 mm. Funkce ON-ON, maximální spínané napětí 250 VAC, 125 VDC, maximální spínaný proud 5 A. Výrobce udává elektrickou životnost až 10 tisíc cyklů. Teplotní rozsah je 0 až +65 °C.

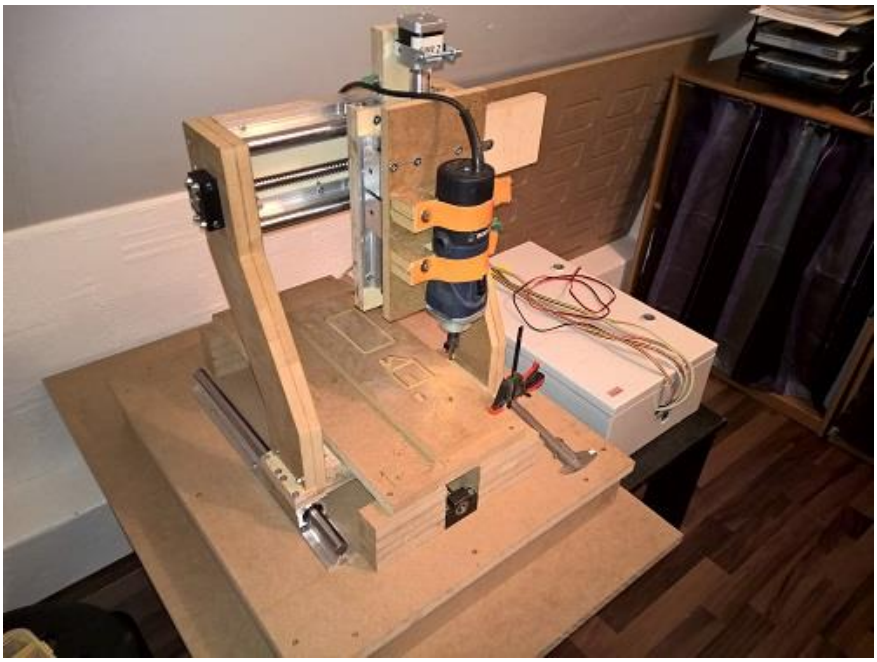
Obr. 17. Rolnový mikrospínač 250 VAC - 5 A (vlastní fotografie)

4.4 Průběh stavby stroje

Nejprve byly na formátovací pile nařezány dlouhé dílce o požadovaných šířkách, poté dílce větších rozměrů (deska podstavce stolu). Poté byly na pokosové pile vykráceny dílce na podstavec stolu. Byl sestaven podstavec stolu za pomoci konstrukčního PUR lepidla jištěného vruty do dřeva. Na podstavec bylo rozkresleno vedení osy X (podepřené, broušené tyče, tak uložení domků kuličkového šroubu. Do podstavce byly předvrtány všechny potřebné otvory. Bylo naistalováno vedení a domky kuličkového šroubu. Rovnoběžnost komponent byla zajištěny za pomoci přesně vykráceného dílce, který přesně vymezil rozměr mezi oběma tyčemi. Ze dvou slepených vrstev překližky byl vyroben základ portálu, s uložením pro kuličkovou matici osy X. Z hranolků slepených ze čtyř vrstev MDF byl vyroben podstavec pro pracovní stůl stroje. Ze dvou vrstev MDF byly vyrobeny stojiny portálu. Uložení vedení osy Y je na dvou slepených vrstvách překližky, kdy vymezení rovnoběžnosti vedení probíhalo stejným způsobem jako v případě osy X. Přímo na vedené osy Y je přimontována úložná deska pro osu Z. Celou dobu je nutné kontrolovat kolmost vůči pracovnímu stolu. Osazení vedení osy Z proběhlo stejně jako u předchozích os. Na vedení byla přimontována nosná deska vřetene. Byly vyrobeny upínky na vřeteno. V konstrukci nebylo domyšleno uchycení motorů os Y a Z, což je patrné z i následujícího obrázku. Trojrozměrný model byl vytvořen v CAD programu Autodesk Inventor. Výkresová dokumentace (celkem 16 výkresů) je uvedena v samostatné příloze.



Obr. 18. 3D model stroje (výstup z programu Autodesk Innventor)



Obr. 19. Celkový pohled na stroj

4.5 Ovládací software

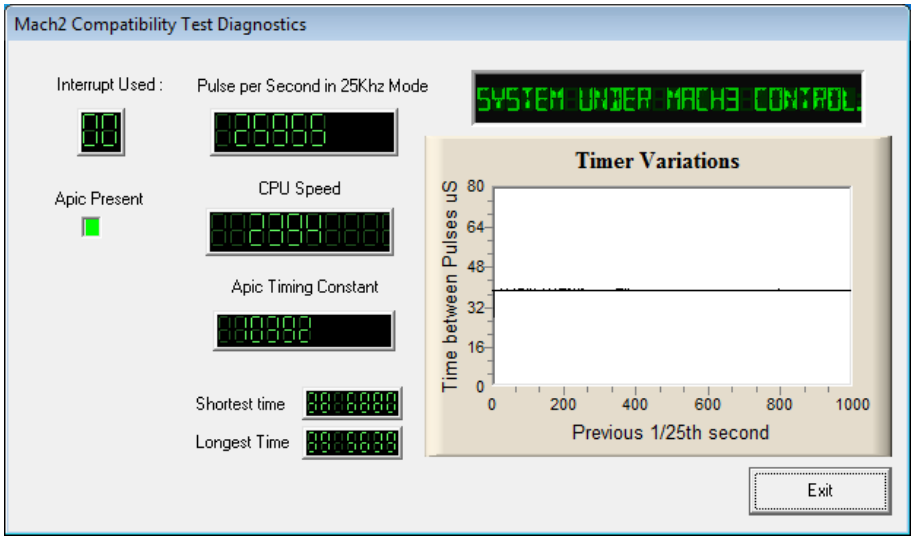
V úvahu připadaly dva různé softwary. LinuxCNC (dříve EMC) je open source projekt určený pro OS Linux s jádrem obohaceným o RT (real time) API. Mezi výhody softwaru patří jeho otevřený libovolně editovatelný zdrojový kód a poměrně vysoká spolehlivost generování pulzů, která je méně závislá na hardwaru počítače. Nevýhodou je pak nedostatečně zpracované uživatelské grafické rozhraní a pro mnohé pochopitelně samotný OS Linux.

Druhou možností je řídicí systém Mach3 vyvíjený společností ArtSoft. Program je určený pro PC s OS Windows. Program je určen jak pro amatérské (HOBBY) tak pro poloprofesionální využití. Software je schopen ovládat až 6 samostatných os. Frekvence generovaných pulzů je více závislá na použitém hardwaru (ne na každém počítači musí Mach3 fungovat správně. Toto lze vyřešit tzv. „Stepgeny“ (např.: SmoothStepper). Jedná se o přídavná opticky oddělená zařízení do USB portu, která přebírají funkci generování pulzů. Mezi výhody patří nadprůměrně zpracované grafické rozhraní uživatelského prostředí a možnost simulace NC programu. Program je volně dostupný jako demo (omezené na 500 řádků v programu), je tedy použitelný pouze na jednoduché součásti. V opačném případě je nutné zakoupení. I přes zmíněné nevýhody programu jsem se rozhodl právě pro Mach3.

Mach3

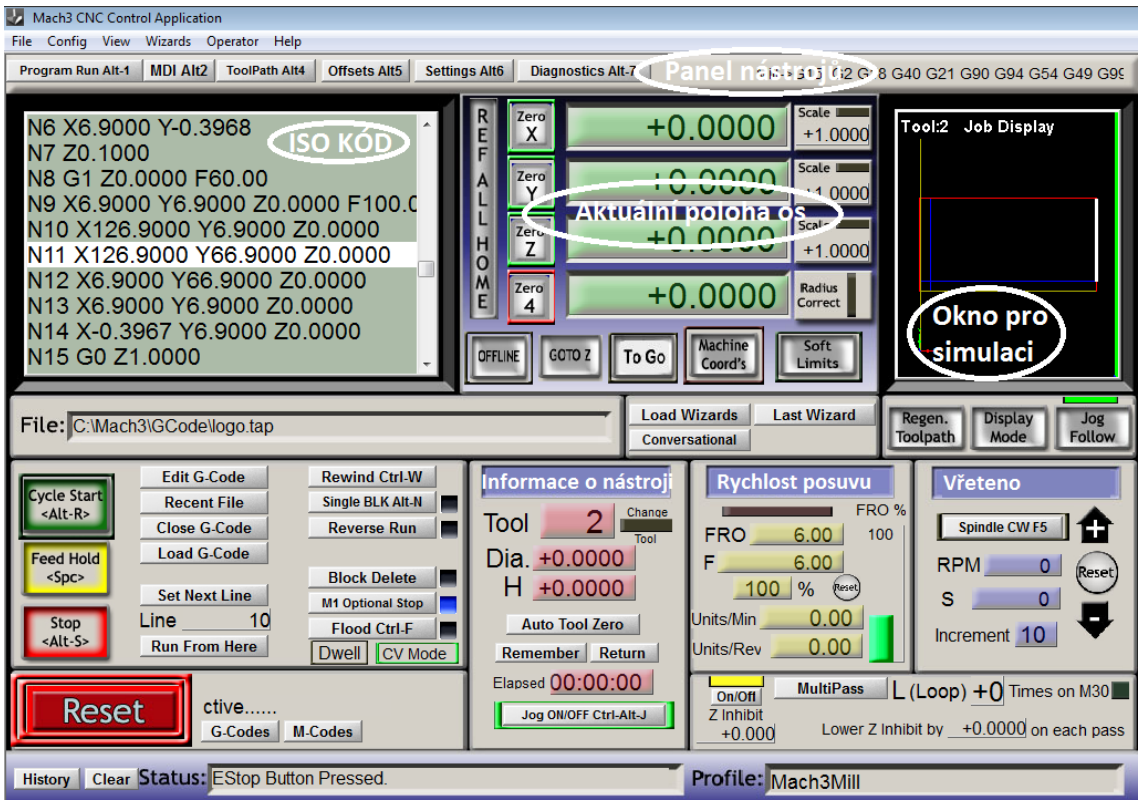
Program Mach3 vyžaduje pro svůj bezproblémový provoz minimální parametry počítače. Program funguje na operačních systémech Windows XP, Vista a 7 s 32 bitovou architekturou. Vyžaduje přítomnost alespoň jednoho paralelního portu. Minimální frekvence procesoru je 1 GHz, nejnižší hodnota operační paměti pro Windows XP je 512 MB a pro Windows Vista a 7 je 1024 MB. Počítač by měl být vyhrazen pouze na provoz CNC stroje a neměl by být připojen k počítačové síti. Pokud tomu tak není, nemusí být zajištěna správná funkce programu. Při instalaci se program skládá ze dvou částí. Programová část a část ovladačů, která vytvoří z paralelního portu virtuální zařízení. Po instalaci ovladače je nutné provést restart počítače, jinak opět nebude program fungovat správně.

Před používáním Mach3 musí být proveden ještě jeden úkon a tím je spuštění testovací součásti programu Mach3. Která vyhodnotí, jak jsou generovány pulzní signály. Změří jejich frekvenci a délku jednotlivých signálů. Pokud bude mít test kladný výsledek, je možné začít konfigurovat a posléze používat Mach3. Funkční konfigurace je uvedena v příloze 2.



Obr. 20. Test kompatibility počítače s programem Mach3 *(ArtSoft, 2013)*

V tomto případě bylo vše v pořádku. V grafu nebyly žádné výrazné „peaky“, které by předznamenávaly malfunkci celého zařízení v podobě náhodného vynechávání kroků motoru apod.



Obr. 21. Základní obrazovka programu Mach3Mill

4.6 Cenová kalkulace

V následující tabulce jsou zobrazeny vstupní materiálové náklady na výrobu CNC frézky. Ceny jednotlivých komponent se mohou lišit v místě a čase. Ceny uvedené v tabulce odpovídají skutečným cenám, za které byly materiály a komponenty nakupovány v období od listopadu 2014 do ledna 2016.

Tab. 14. Cenová kalkulace vyrobeného prototypu CNC frézky

Prvek	Jednotková cena	Jednotky [ks,bm, …]	Celková cena vč. DPH
Elektrická část			
Vřeteno	1 499,00 Kč	1	1 499,00 Kč
Krokové motory	450,00 Kč	3	1 350,00 Kč
Napájecí zdroj	705,00 Kč	1	705,00 Kč
Mikrospínač	13,90 Kč	6	83,40 Kč
Ovladač krokového motoru	424,00 Kč	3	1 272,00 Kč
CNC řídicí obvod	650,00 Kč	1	650,00 Kč
Elektroskříň (použitá)	200,00 Kč	1	200,00 Kč
Chladicí ventilátor	99,00 Kč	1	99,00 Kč
E-Stop tlačítko	189,00 Kč	1	189,00 Kč
Drobný elektroinstalační materiál	425,00 Kč	1	425,00 Kč
Počítačová sestava Dell OptiPlex 755 se 17" LCD monitorem	2 500,00 Kč	1	2 500,00 Kč
Celkem			**8 972,40 Kč**
Konstrukční část			
Kuličkový šroub	1 040,00 Kč	1,3	1 300,00 Kč
Broušené podepřené tyče	1 125,00 Kč	2,1	2 362,50 Kč
Lineární ložiska typu C	131,00 Kč	12	1 572,00 Kč
Ložisko 608-2RS	21,00 Kč	9	189,00 Kč
Matice kuličkového šroubu jednoduchá	688,00 Kč	3	2 064,00 Kč
Ložiskový domek pro jedno ložisko	128,00 Kč	3	384,00 Kč
Ložiskový domek pro dvě ložiska	199,00 Kč	3	597,00 Kč
Pružná spojka z hliníkového bloku	65,00 Kč	3	195,00 Kč
MDF 16 mm	174,00 Kč	0,7	121,80 Kč
MDF 22 mm	240,00 Kč	1	240,00 Kč
PD 12 mm	328,00 Kč	0,5	164,00 Kč
Lepidlo PUR D4	269,00 Kč	0,5	134,50 Kč
Spojovací materiál (šrouby, vruty, podložky, konstrukční podložky, matice, narážecí matice)	376,00 Kč	1	376,00 Kč
Celkem			**9 699,80 Kč**
Celková cena			**18 672 Kč**

V ceně 18 672,- Kč není započítána spotřeba energií a především osobní mzdové náklady, jelikož jsem frézku vyráběl pro vlastní použití bez nároku na odměnu. Čas strávený při hledání jednotlivých vhodných komponent, při konstrukci CNC frézky, při zapojování a později nastavování řídicí elektroniky a prvotní kalibraci stroje odhaduji na 250 hodin. Součástí řídicího CNC obvodu bylo instalační CD a licenční kód k základní dotované verzi programu Mach3. V opačném případě by bylo nutné licenci zakoupit.

4.7 Výroba vzorků

Na postaveném CNC byla jako materiál na výrobu vzorků použita MDF deska tloušťky 16 mm o rozměrech 350x190 mm, tak aby se vešla na pracovní stůl. Do desky byly vyfrézovány čtyři obdélníky o vnitřních rozměrech 60 mm v ose Y a 120 mm v ose X. V programu byla nastavena přesnost na 0,1 mm.

ISO kód vygenerovaný v softwaru LazyCam (dodávaný jako CAM součást programu Mach3Mill)

```
(Material Size) (X=350.000, Y=190.000, Z=16.000)
G90G80G21G49
(Tool Number:1) (8.000 mm diameter. rovné frézy)
G0Z5.0000
M3 S15000
G0 X32.1716 Y22.1716 Z5.0000
G1  Z-1.6000 F600
G2 X31.0000 Y25.0000 I2.8284 J2.8284 F1200
G1  Y85.0000
G2 X35.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X155.0000
G2 X159.0000 Y85.0000 I0.0000 J-4.0000
G1  Y25.0000
G2 X155.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X35.0000 Y21.0000
G2 X32.1716 Y22.1716 I0.0000 J4.0000
G1  Z-3.2000 F600
G2 X31.0000 Y25.0000 I2.8284 J2.8284 F1200
G1  Y85.0000
G2 X35.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X155.0000
G2 X159.0000 Y85.0000 I0.0000 J-4.0000
G1  Y25.0000
G2 X155.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X35.0000 Y21.0000
G2 X32.1716 Y22.1716 I0.0000 J4.0000
G1  Z-4.8000 F600
G2 X31.0000 Y25.0000 I2.8284 J2.8284 F1200
G1  Y85.0000
G2 X35.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X155.0000
G2 X159.0000 Y85.0000 I0.0000 J-4.0000
G1  Y25.0000
G2 X155.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X35.0000 Y21.0000
G2 X32.1716 Y22.1716 I0.0000 J4.0000
G1  Z-6.4000 F600
G2 X31.0000 Y25.0000 I2.8284 J2.8284 F1200
G1  Y85.0000
G2 X35.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X155.0000
G2 X159.0000 Y85.0000 I0.0000 J-4.0000
G1  Y25.0000
G2 X155.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X35.0000 Y21.0000
G2 X32.1716 Y22.1716 I0.0000 J4.0000
G1  Z-8.0000 F600
G2 X31.0000 Y25.0000 I2.8284 J2.8284 F1200
G1  Y85.0000
G2 X35.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X155.0000
G2 X159.0000 Y85.0000 I0.0000 J-4.0000
G1  Y25.0000
G2 X155.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X35.0000 Y21.0000
G2 X32.1716 Y22.1716 I0.0000 J4.0000
G0  Z5.0000
G0 X35.0000 Y111.0000
```

G1 Z-1.6000 F600
G2 X31.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X35.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X155.0000 Y179.0000
G2 X159.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X155.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X35.0000 Y111.0000
G1 Z-3.2000 F600
G2 X31.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X35.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X155.0000 Y179.0000
G2 X159.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X155.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X35.0000 Y111.0000
G1 Z-4.8000 F600
G2 X31.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X35.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X155.0000 Y179.0000
G2 X159.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X155.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X35.0000 Y111.0000
G1 Z-6.4000 F600
G2 X31.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X35.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X155.0000 Y179.0000
G2 X159.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X155.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X35.0000 Y111.0000
G1 Z-8.0000 F600
G2 X31.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X35.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X155.0000 Y179.0000
G2 X159.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X155.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X35.0000 Y111.0000
G0 Z5.0000
G0 X195.0000
G1 Z-1.6000 F600
G2 X191.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X195.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X315.0000 Y179.0000
G2 X319.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X315.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X195.0000 Y111.0000
G1 Z-3.2000 F600
G2 X191.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X195.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X315.0000 Y179.0000
G2 X319.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X315.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X195.0000 Y111.0000
G1 Z-4.8000 F600
G2 X191.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X195.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X315.0000 Y179.0000
G2 X319.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X315.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X195.0000 Y111.0000
G1 Z-6.4000 F600
G2 X191.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X195.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X315.0000 Y179.0000
G2 X319.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X315.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X195.0000 Y111.0000
G1 Z-8.0000 F600
G2 X191.0000 Y115.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y175.0000
G2 X195.0000 Y179.0000 I4.0000 J0.0000
G1 X315.0000 Y179.0000
G2 X319.0000 Y175.0000 I0.0000 J-4.0000
G1 Y115.0000
G2 X315.0000 Y111.0000 I-4.0000 J-0.0000
G1 X195.0000 Y111.0000
G0 Z5.0000
G0 Y21.0000
G1 Z-1.6000 F600
G2 X191.0000 Y25.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y85.0000
G2 X195.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X315.0000
G2 X319.0000 Y85.0000 I-0.0000 J-4.0000
G1 Y25.0000
G2 X315.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X195.0000 Y21.0000
G1 Z-3.2000 F600
G2 X191.0000 Y25.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1 Y85.0000
G2 X195.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X315.0000

```
G2 X319.0000 Y85.0000 I-0.0000 J-4.0000
G1  Y25.0000
G2 X315.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X195.0000 Y21.0000
G1   Z-4.8000 F600
G2 X191.0000 Y25.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1  Y85.0000
G2 X195.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X315.0000
G2 X319.0000 Y85.0000 I-0.0000 J-4.0000
G1  Y25.0000
G2 X315.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X195.0000 Y21.0000
G1   Z-6.4000 F600
G2 X191.0000 Y25.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1  Y85.0000
G2 X195.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X315.0000
G2 X319.0000 Y85.0000 I-0.0000 J-4.0000
G1  Y25.0000
G2 X315.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X195.0000 Y21.0000
G1   Z-8.0000 F600
G2 X191.0000 Y25.0000 I0.0000 J4.0000 F1200
G1  Y85.0000
G2 X195.0000 Y89.0000 I4.0000 J-0.0000
G1 X315.0000
G2 X319.0000 Y85.0000 I-0.0000 J-4.0000
G1  Y25.0000
G2 X315.0000 Y21.0000 I-4.0000 J0.0000
G1 X195.0000 Y21.0000
G0   Z5.0000
G0 X0.0000 Y0.0000
G0Z5.0000
G0X0.0000Y0.0000
M5
M30 (konec programu)
```

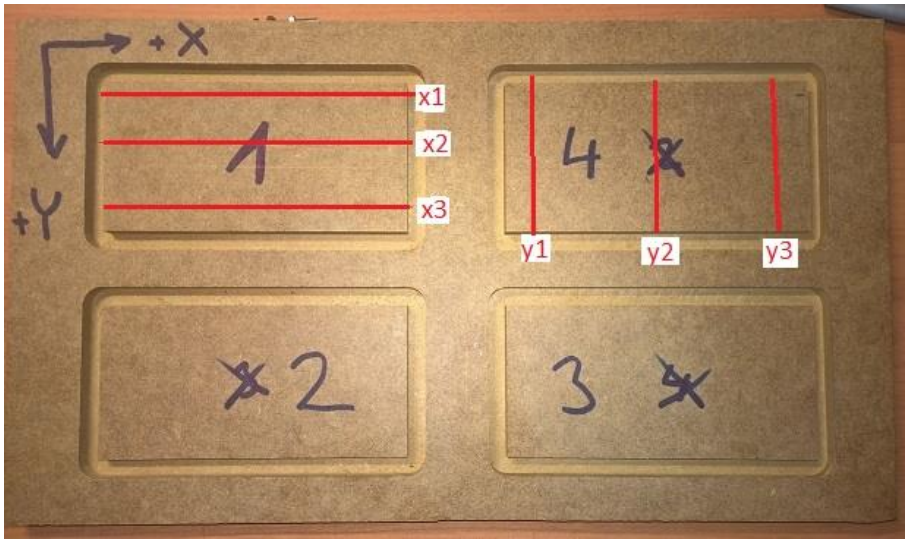
Druhá sada vzorků pro porovnání byla vyrobena na CNC obráběcím centru Masterwood viz obr. 3. Parametry stroje jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 15. Technické parametry obráběcího centra Masterwood Project 400 V3L

Masterwood Project 400 V3L	
Rok výroby	2010
Rozsah v ose X	5411 mm
Rozsah v ose Y	1380 mm
Rozsah v ose Z	110 mm
Počet frézovacích vřeten	1
Příkon hlavního motoru	9 kW
Zásobník nástrojů	Ano
Počet míst v zásobníku nástrojů	12
Osa otáčení	osa C (kolem osy Z)
Stůl stroje	trámcový
Software	Masterwork a MW310
Max. otáčky vřetene	22000 ot/min
Systém upínání	HSK63F kužel
Nášlapný koberec	Ano
Hmotnost	4075 kg
Možnost upínání úhlových agregátů	Ano
Pilový agregát	Ano
Vrtací horizontální agregát	Ano

4.8 Metodika měření

Na každém stroji bylo vyrobeno 20 vzorků (obdélníků). Pro měření rozměrů bylo použito zkalibrované posuvné měřítko s rozlišovací schopností 0,05 mm a s přesností ±0,025 mm. Na každém obdélníku bylo provedeno 6 měření. Tři měření v pomyslné ose X a tři měření v pomyslné ose Y viz následující obrázek. Měření proběhlo vždy přibližně 1 cm od kraje tvaru a uprostřed tvaru.



Obr. 22. Metodika měření vzorků

Teplota prostředí při výrobě vzorků činila 19,5°C a relativní vlhkost vzduchu 55%. Pro výrobu vzorků byly zvoleny podmínky v_f = 1200 mm/min pro osy X a Y. Pro osu Z byla nastavena poloviční rychlost posuvu v_f = 600 mm/min. Byla použita v textu výše zmíněná 8 mm dvoubřitá stopková spirálová fréza od společnosti Vydona s.r.o. Otáčky vřetene přibližně 11 500 ot/min.

4.9 Výsledky měření

Naměřené hodnoty byly zpracovány do následujících tabulek.

Tab. 16. Naměřené hodnoty rozměrů vzorků na vyrobeném CNC stroji.

	rozměr v ose X			rozměr v ose Y		
vzorek č.	**x1 [mm]**	**x2 [mm]**	**x3 [mm]**	**y1 [mm]**	**y2 [mm]**	**y3 [mm]**
1	120,70	120,75	120,70	60,30	60,35	60,30
2	120,75	120,75	120,75	60,35	60,30	60,40
3	120,75	120,70	120,70	60,35	60,40	60,40
4	120,65	120,65	120,65	60,35	60,40	60,40
5	120,65	120,70	120,65	60,40	60,35	60,30
6	120,65	120,60	120,60	60,30	60,30	60,35
7	120,65	120,65	120,60	60,35	60,35	60,35
8	120,70	120,65	120,65	60,35	60,30	60,40
9	120,65	120,60	120,65	60,40	60,30	60,30
10	120,75	120,65	120,60	60,30	60,30	60,35
11	120,65	120,70	120,60	60,30	60,25	60,30
12	120,65	120,70	120,60	60,30	60,30	60,30
13	120,55	120,60	120,60	60,30	60,20	60,25
14	120,70	120,80	120,60	60,25	60,20	60,30
15	120,60	120,50	120,55	60,30	60,25	60,25
16	120,60	120,50	120,55	60,20	60,20	60,25
17	120,60	120,50	120,55	60,30	60,25	60,30
18	120,60	120,65	120,55	60,25	60,25	60,30
19	120,55	120,55	120,65	60,30	60,20	60,30
20	120,60	120,70	120,70	60,30	60,30	60,35
Průměr	**120,65**	**120,65**	**120,63**	**60,31**	**60,29**	**60,32**

Průměr	120,64 mm	60,31 mm
Min	120,50 mm	60,20 mm
Max	120,80 mm	60,40 mm
Variační rozpětí	0,30 mm	0,20 mm
Směrodatná odchylka	0,0682 mm	0,0546 mm
Rozptyl	0,0047 mm^2	0,0030 mm^2

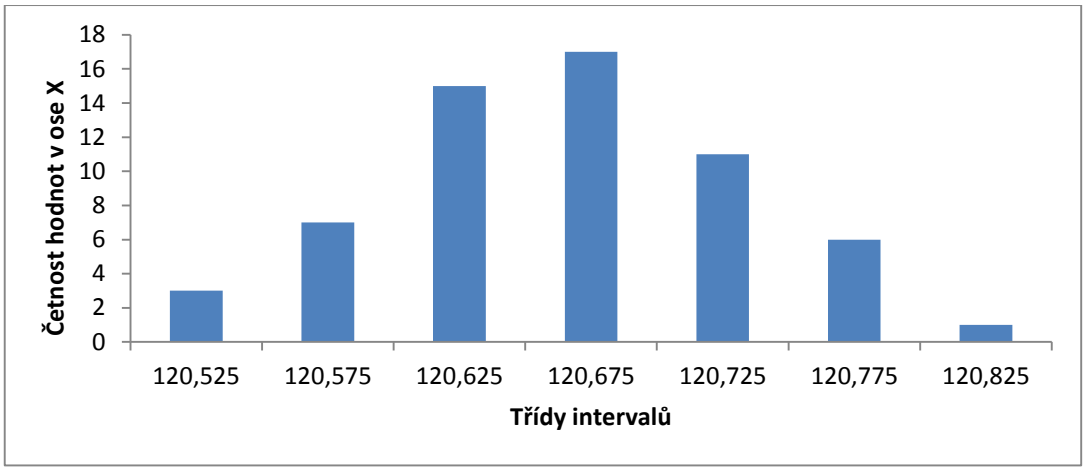
Tab. 17. Naměřené hodnoty rozměrů referenčních vzorků

	rozměr v ose X			rozměr v ose Y		
vzorek č.	**x1 [mm]**	**x2 [mm]**	**x3 [mm]**	**y1 [mm]**	**y2 [mm]**	**y3 [mm]**
1	120,20	120,25	120,20	60,30	60,35	60,30
2	120,25	120,25	120,25	60,30	60,25	60,25
3	120,30	120,30	120,25	60,25	60,25	60,30
4	120,30	120,30	120,30	60,25	60,25	60,30
5	120,25	120,25	120,25	60,30	60,25	60,25
6	120,25	120,30	120,25	60,20	60,25	60,25
7	120,25	120,25	120,25	60,25	60,30	60,25
8	120,25	120,30	120,25	60,30	60,35	60,30
9	120,25	120,25	120,20	60,25	60,30	60,25
10	120,25	120,25	120,25	60,25	60,25	60,30
11	120,25	120,30	120,25	60,25	60,30	60,25
12	120,30	120,30	120,25	60,25	60,30	60,25
13	120,30	120,25	120,25	60,30	60,30	60,30
14	120,25	120,25	120,30	60,25	60,30	60,30
15	120,30	120,25	120,25	60,25	60,25	60,20
16	120,30	120,35	120,30	60,25	60,30	60,25
17	120,25	120,25	120,25	60,30	60,30	60,30
18	120,20	120,30	120,30	60,30	60,25	60,30
19	120,25	120,30	120,30	60,30	60,30	60,30
20	120,30	120,30	120,30	60,30	60,25	60,25
Průměr	**120,26**	**120,28**	**120,26**	**60,27**	**60,28**	**60,27**

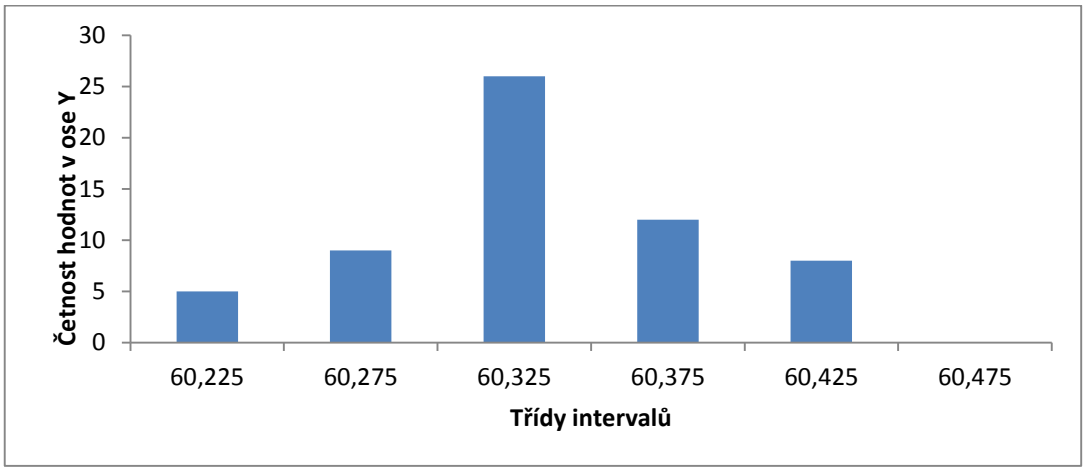
Průměr	120,27 mm	60,28 mm
Min	120,20 mm	60,20 mm
Max	120,35 mm	60,35 mm
Variační rozpětí	0,15 mm	0,15 mm
Směrodatná odchylka	0,0312 mm	0,0310 mm
Rozptyl	0,0010 mm^2	0,0010 mm^2

Na základě naměřených hodnot byly vhodně stanoveny třídy intervalů, na jejichž základě byly vytvořeny následující grafy (histogramy). Rozložení hodnot odpovídá Gaussovu rozdělení. Velikost intervalu byla stanovena na 0,05 mm.

Vyrobené CNC

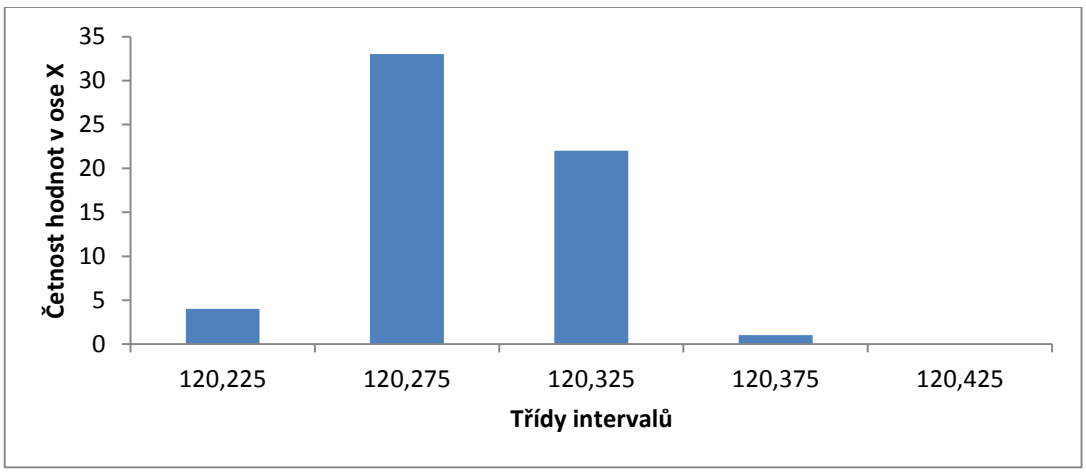


Obr. 23. Rozložení hodnot rozměru X

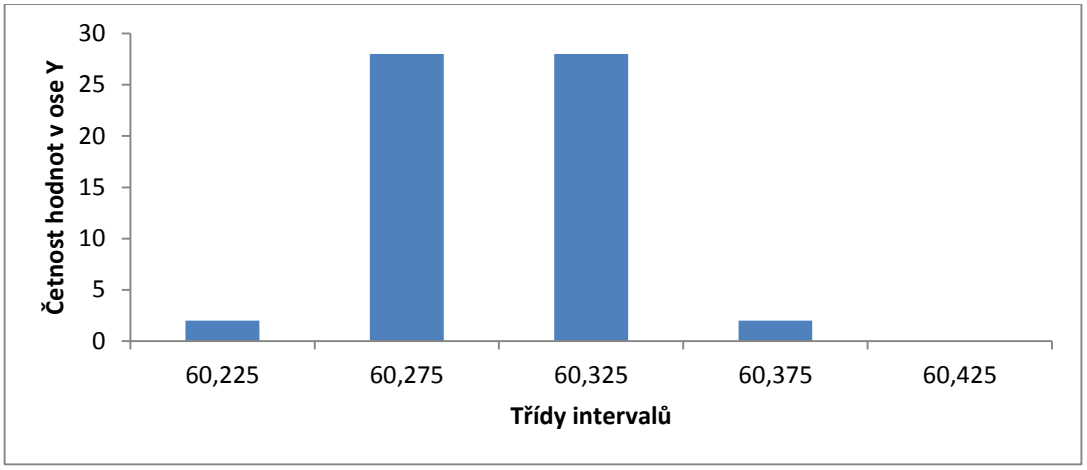


Obr. 24. Rozložení hodnot rozměru Y

CNC obráběcí centrum Masterwood project 400 V3L



Obr. 25. Rozložení hodnot rozměru X



Obr. 26. Rozložení hodnot rozměru Y

Určení celkové nejistoty měření

$$u_c = 2 \times \sqrt{u_n^2 + u_k^2}$$

u_n – směrodatná odchylka vypočtená z naměřených hodnot

u_k – směrodatná odchylka měřicího přístroje

Vyrobené CNC

osa X

$$u_c = 2 \times \sqrt{0{,}0682^2 + 0{,}025^2} = 0{,}15\ mm$$

osa Y

$$u_c = 2 \times \sqrt{0{,}0546^2 + 0{,}025^2} = 0{,}12\ mm$$

CNC obráběcí centrum Masterwood

osa X

$$u_c = 2 \times \sqrt{0{,}0312^2 + 0{,}025^2} = 0{,}08\ mm$$

osa Y

$$u_c = 2 \times \sqrt{0{,}0310^2 + 0{,}025^2} = 0{,}08\ mm$$

5 Diskuse

Na základě poznatků z teoretické části byla zkonstruována malá tříosá CNC frézka. Požadované technické parametry byly částečně dodrženy, přičemž oproti požadavkům se zvýšila hmotnost stroje na 51 kg, z ekonomických důvodů chybí T drážkový stůl, který je nahrazen stolem z MDF desky. Je zde také jedna pozitivní změna, a tou je navýšení pracovního rozsahu stroje v ose Z na 100 mm.

Při frézování vzorků na navrženém CNC byla stanovena požadovaná přesnost 0,1 mm. Lze si všimnout, že i přes zadání požadovaných rozměrů vzorku 120 x 60 mm byly vyrobeny vzorky v průměru o 0,64 mm v ose X a 0,31 mm větší v ose Y. Tato skutečnost je dle mého názoru ovlivněna několika faktory: nedostatečná kalibrace os X a Y, uložení vřetene a především celková tuhost konstrukce. MDF a překližka nejsou nejvhodnějším materiálem na konstrukci stroje (tento nedostatek je však vykompenzován cenou materiálu). Jako lepší z pevnostního hlediska a pro tuhost celé konstrukce se jeví konstrukční hliníkové slitiny. Toto jsou nepřesnosti, které vychází z nepřesností obsluhy a z podstaty konstrukce CNC frézky. Z naměřených dat však byla vyhodnocena rozměrová přesnost stroje, která v ose X činila po započtení vlivu chyb měřicího nástroje 0,15 mm a v ose Y 0,12 mm. Můžeme tedy říci, že celková opakovatelná přesnost stroje je v pracovní rovině XY **± 0,15 mm**.

Druhá sada vzorků byla vyrobena na CNC obráběcím centru Masterwood. Požadované rozměry byly taktéž 120 x 60 mm. Naměřené hodnoty se liší v průměru o 0,27 mm v ose X a o 0,28 mm v ose Y. Vzhledem k tomu že odchylka je v obou případech téměř stejná, lze si ji vysvětlit tím, že nebyla provedena korekce rozměrů nástroje a že vzorky byly vyrobeny po pracovní směně, kdy uběhly přibližně 4 hodiny strojního času bez automatické kalibrace stroje. Z naměřených hodnot byly vypočítány rozměrové nepřesnosti shodně v ose X a Y 0,08 mm. Celková opakovatelná přesnost stroje v pracovní rovině XY je **± 0,08 mm**.

Pro výrobu obou sad vzorků byla použita stejná stopková fréza, která byla nově přebroušená z čela nástroje). Vliv nástroje byl v obou případech stejný. Přesnost profesionálního obráběcího centra je tedy přibližně 2krát vyšší než u mnou vyrobené CNC frézky. CNC obráběcí centrum Masterwood slouží k obrábění polotovarů interiérových dveří a zárubní v truhlářství M-Hort s.r.o., kde je jeho opakovatelná přesnost naprosto dostačující. Požadavek na opakovatelnou přesnost byl stanoven na

0,1 mm, ten nebyl dodržen, avšak i opakovatelná přesnost 0,15 mm je pro domácí využití na rozměrově malé dílce vyhovující.

6 Závěr

Lze říci, že hlavní cíl práce byl splněn. Byl vyroben funkční prototyp tříosé CNC frézky. Na frézce pak byly vyrobeny vzorky, které posloužily k porovnání opakovatelné přesnosti stroje s mnohonásobně větším a mnohonásobně dražším strojem. V praxi se ověřilo, že pro konstrukci takto malého stroje mohou být použity materiály jako překližka a MDF. Nabízí se otázka, jaká je životnost takového stroje?

Pro provoz takto malé frézky jsou optimální posuvové rychlosti v rozmezí 1000 - 2500 mm/min. Pro prodloužení životnosti stroje by bylo na místě vyměnit relativně těžké a na tak malou frézku výkonné vřeteno za lehčí a menší. Jako vhodné se jeví přidání frekvenčního měniče, aby bylo možné elektronicky řídit otáčky vřetene. Jako velký nedostatek vnímám absenci jakéhokoli odsávání. Pro častější provoz frézky je nutné odsávání dodělat.

Frézka může být využita například pro gravírování obrazců a nápisů do dřevěných materiálů. Další možností je spolu s navrhovanou úpravou vřetene frézování cest tištěných spojů a vyvrtávání plošných desek pro následovné osazení elektrosoučástkami. Je zde však ještě jedna možnost a tou je přestavba na CNC gravírovací laser pro dřevěné materiály.

7 Summary

The thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part describes historical development of CNC machines, their construction. The thesis also describes different types of materials and tools used for woodworking. Furthermore, the elementary machine operating and the basics of programming are described. There is a research of small commercially available CNC milling machines in the end of this part.

The practical part is focused on own simple 3-axis CNC milling machine production which is the main objective of the thesis. CNC mill should operate with reproducibility about 0,1 mm to provide sufficient dimensional accuracy of woodworked pieces. Structural components like linear motion, ballscrew positioning, motor drivers, CNC interface board, spindle and stepper motors are described in detail. There are elementary calculations such as cutting velocity, feed velocity, cutting force and stepper motor torque requirements. There is described how to install and configure Mach3Mill software which is essential for proper function of whole CNC machine. Two sets of samples were produced as a part of the thesis. The first set was woodworked by the build CNC and the second was manufactured by the CNC woodworking center Masterwood Project 400 V3L. The sample evaluation was made to compare repeatable accuracy of „homemade“ machine and professional CNC. Repeatable accuracy $\pm$ 0,15 mm was calculate for build CNC. Accuracy of the professional CNC was approximately two times better.

This value is worse than required, but it is still sufficient for this small three axis CNC milling machine. Optimal feed velocity is in the range from 1000 to 2500 mm/min. CNC need some essential adjustments and improvements like suction connection. The spindle should by replaced by lighter one to extend the machine service time. There is an opportunity to modify machine to CNC engraving laser. It can be used for milling, especially for engraving wood based workpieces. The second utilization is in electric engineering for PCB (printed circuit board) production.

8 Seznam použité literatury

Literatura:

ČERNÝ, František, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Fyzika I*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03650-1.

ČSN EN ISO 6508-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella: Část 1: Zkušební metoda (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)*. Český normalizační institut, 2006.

ČSN EN 847-1. *Nástroje na strojní obrábění dřeva - Bezpečnostní požadavky - Část 1: Frézovací nástroje a pilové kotouče*. Český normalizační institut, 2014.

ČSN EN 10027-1. *Systémy označování ocelí: Část 1: Stavba značek ocelí*. Český normalizační institut, 2006.

FEHRING, Thomas. *Mechanical Engineering: A Century of Progress*. Milwaukee, 1980, 53 s.

FOREJT, Milan; PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. První vydání. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003.

ISO 6983-1. *Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definitions of address words: Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems*. Second edition. Geneva: International Organization for Standardization, 2009.

KELLER, Petr. *Programování a řízení CNC strojů: Prezentace přednášek: 2. část*. Liberec, 2005. Technická univerzita v Liberci.

KOLÁŘ, Petr. EMO Hannover počtvrté: Vřetena a vřetenová ložiska. MM Průmyslové spektrum. 2008, 1, s.84. ISSN :1212-2572.

KOPR, Pavel. *Programování CNC strojů*. 2013. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Votava, Ph.D.

KRÁL, Pavel a Jan ŠRAJER. *CNC obráběcí centra*. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2008. ISBN 978-80-7375-163-0.

MANA, Marek. *Řídicí systém CNC strojů a možnosti využití*. Liberec, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

MAREK, Jiří a Petr BLECHA. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.

NĚMEC, Václav a Stanislav DLOUHÝ. *Programování CNC obráběcích strojů*. Ledeč nad Sázavou, 2013, 68 s.

ŠTULPA. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-207-8.

Internetové zdroje:

ArtSoft: Mach3Mill [online]. 2013 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: http://www.machsupport.com/wp-content/uploads/2013/02/Mach3Mill_Install_Config.pdf

CNC.BOW.CZ: CNC router Numco SHG 0404 [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: http://cnc.bow.cz/produkt/ro100001-cnc-router-numco-shg-0404/

CNC.ISHOP.CZ: Základní stolní CNC frézka 200x300x65mm [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: https://cnc.inshop.cz/cnc-frezky-a-routery/zakladni-stolni-cnc-frezka-200x300x65mm

FERM: Ferm Router FBF-850E [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: http://doc.ferm.com/Servotool/documents/PRM4002%20Manual%20%200303-24.pdf

GM ELECTRONIC: Spínaný zdroj MEAN WELL RS-150-24 [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: http://www.gme.cz/spinany-zdroj-mean-well-rs-150-24-p332-278

HOBBY CNC: Kompas H - 1000 Komplet [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: http://www.cnc1.eu/sk/kompas_h_1000_komplet.htm

ITEAD STUDIO [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: ftp://imall.iteadstudio.com/Step_Motor/Specs_42BYGH0425.PDF

JANÍČKOVÁ, Petra. *Moderní konstrukční řešení CNC strojů* [online]. Uherské Hradiště, 2012 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: http://www.uh.cz/szesgsm/files/sblizovani/pdf/mod-konstr-cnc.pdf

KNOFLÍČEK, Radek. *Příručka CNC programování* [online]. Vitralab, 2011 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/upload/CNC%20prirucka_CZ.pdf

MERKUR: Tradiční česká značka hraček, vláčků a učebních pomůcek [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: http://www.merkurtoys.cz/vyrobky/3d-cnc-frezovaci-stroj-mc30ft

NorDevX: 12mm Ball Screw Nut [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: https://www.nordevx.com/content/12mm-ball-screw-nut

NorDevX: 20mm Supported Rail (1 meter) [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: https://www.nordevx.com/datasheets/open-linear-rail-block.pdf

PÍŠKA, Miroslav. Trendy v PVD a CVD povlakování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014 [cit. 2016-03-13]. ISSN 1212-5272. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-pvd-a-cvd-povlakovani.html

POLÁŠEK, Jaromír. *Číslicově řízené stroje: Elektronická učebnice* [online]. Kopřivnice, 2007, 82 s. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://docplayer.cz/3039410-Cislicove-rizene-stroje.html

9 Seznam obrázků

Obr. 1. První NC stroj s revolverovým zásobníkem (Fehring, 1980) 10

Obr. 2. Blokové schéma CNC systému (Keller, 2005) 12

Obr. 3. CNC obráběcí centrum Masterwood (vlastní fotografie) 14

Obr. 4. Proces otupování nástroje (Král, 2008) 24

Obr. 5. Řezná rychlost při frézování (Král, 2008) 25

Obr. 6. Pravidlo pravé ruky, souřadnicový systém stroje (Keller, 2005) 26

Obr. 7. Princip uplatnění CAD/CAM Pravidlo (Keller, 2005) 28

Obr. 8. 3D CNC Frézovací stroj MC30FT *(MERKUR)* 32

Obr. 9. Kompas H – 1000 *(Hobby CNC, 2015)* 33

Obr. 10. CNCB-2030 *(CNC.ISHOP.CZ)* 34

Obr. 11. CNC router Numco SHG 0404 *(CNC.BOW.CZ)* 35

Obr. 12. Kuličkový šroub SFU 1204 tříkanálový (Nordevx.com) 37

Obr. 13. Broušená podepřená tyč SBR 20 a lineární ložisko SBR 20 UU (Nordevx.com) 38

Obr. 14. Schéma CNC sestavy 39

Obr. 15. Popis zapojení CNC řídicího obvodu 40

Obr. 16. Ovladač KM ST330-V3 (vlastní fotografie) 41

Obr. 17. Rolnový mikrospínač 250 VAC - 5 A (vlastní fotografie) 45

Obr. 18. 3D model stroje (výstup z programu Autodesk Innventor) 46

Obr. 19. Celkový pohled na stroj 46

Obr. 20. Test kompatibility počítače s programem Mach3 *(ArtSoft, 2013)* 48

Obr. 21. Základní obrazovka programu Mach3Mill 49

Obr. 22. Metodika měření vzorků 54

Obr. 23. Rozložení hodnot rozměru X 57

Obr. 24. Rozložení hodnot rozměru Y 57

Obr. 25. Rozložení hodnot rozměru X 57

Obr. 26. Rozložení hodnot rozměru Y 58

10 Seznam tabulek

Tab. 1. Maximální pracovní otáčky frézovacích nástrojů [ot.min-1] (Král, 2008).. 25

Tab. 2. Technické parametry CNC frézky MC30F2T *(MERKUR)* 31

Tab. 3. Technické parametry CNC frézky Kompas H – 1000 *(Hobby CNC)* 33

Tab. 4. Technické parametry CNC frézky CNCB-2030 *(CNC.ISHOP.CZ)* 34

Tab. 5. Technické parametry CNC Numco SHG 0404 *(CNC.BOW.CZ)* 35

Tab. 6. Požadované technické parametry 36

Tab. 7. Technické parametry šroubu SFU 1204 (Nordevx.com) 37

Tab. 8. Technické parametry lineárního vedení SBR 20 (Nordevx.com) 38

Tab. 9. Technické parametry lineárního ložiska SBR 20 UU (Nordevx.com)..... 38

Tab. 10. Spínaný zdroj Mean Well RS-150-24 *(GM ELECTRONIC)* 39

Tab. 11. Technické parametry frézy Ferm FBF-850E *(Ferm)* 41

Tab. 12. Vstupní parametry pro výpočty 42

Tab. 13. Parametry kokového motoru 42BYGH0425 *(ITEAD STUDIO)*..... 43

Tab. 14. Cenová kalkulace vyrobeného prototypu CNC frézky..... 50

Tab. 15. Technické parametry obráběcího centra Masterwood Project 400 V3L 53

Tab. 16. Naměřené hodnoty rozměrů vzorků na vyrobeném CNC stroji. 55

Tab. 17. Naměřené hodnoty rozměrů referenčních vzorků 56

Příloha 1

ST330-V3 Stepper Motor Driver (příručka od výrobce)

Port Description

1. Control signal interface

Signal Name	Function
STEP	Pulse control signal: rising edge and effective; STEP HIGH 4 ~ 5V, low 0 ~ 0.5V.For reliable response to the pulse signal, pulse width should be greater than 5μs. If a +12 V or +24 V series resistance is required.
DIR	Direction signal: high / low signal in order to ensure reliable commutation motor, the direction of the signal pulse should be at least 5μs established. The initial direction of the motor to run the wiring for the motor, swap any one phase winding (such as A +, A-exchange) can change the motor direction of the initial run, DIR high 4 ~ 5V, 0 ~ 0.5V low.
EN	Enable signal: This input signal is used to enable or disable. EN low-level (or internal coupler conduction), the drive will cut off the electrical current of each phase of the motor in a free state, then pulse is not responding. When not required for this function, the enable signal terminal can be left vacant.。
+5V	As STEP, DIR, EN common anode port

2. Strong signal interfaces（Ban hot plug）

Signal Name	Function
G	GND
24V	Supply voltages:12-30DC
A+、A-	A phases
B+、B-	B phases

3. Status Indication

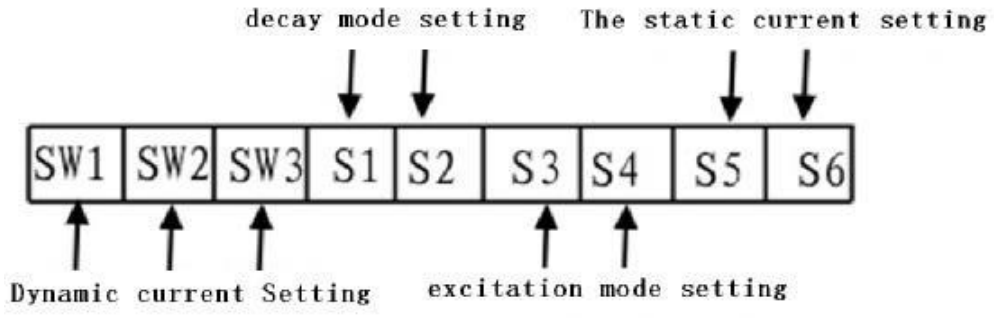
Red LED indicator for power, when the drive is switched on, the LED lit; when the driver cut off the power, the LED turns off.

Green LED indicator for drive operation, when the drive receives an external pulse signal, the

LED is lit; external pulse signal when the interrupt latency 200ms change the LED is off.

DIP switch (current, segments, decay)

ST330-V3 drive using six DIP switch segments accuracy, decay mode, semi-static flow, dynamic current three toggle settings::



Current Setting:

1)Work (Dynamic) Current setting

Output Current	SW1	SW2	SW3
Default	0	0	0
1.0A	0	0	1
0.5A	0	1	0
1.5A	0	1	1
1.5A	1	0	0
2.5A	1	0	1
2.0A	1	1	0
3.0A	1	1	1

2)Static current setting

S5 S6 set Static current, the DIP switch on the left there is a status indicator 0 -> 1 through S5 S6 to set the static current and operating current. To S5: S6 = 0:1, for example, pulse train stopped about 0.4 seconds automatically reduced to about half of the current (actual value 60%), heat reduced to 36% in theory.

Static current	S5	S6	Note
20%	1	1	When the S5, S6 is 1,1, the static current is 20% of current value. Generally, the Static current is set to minimum to reduce motor and drive heat.
50%	0	1	
75%	1	0	
100%	0	0	

Segments Settings:

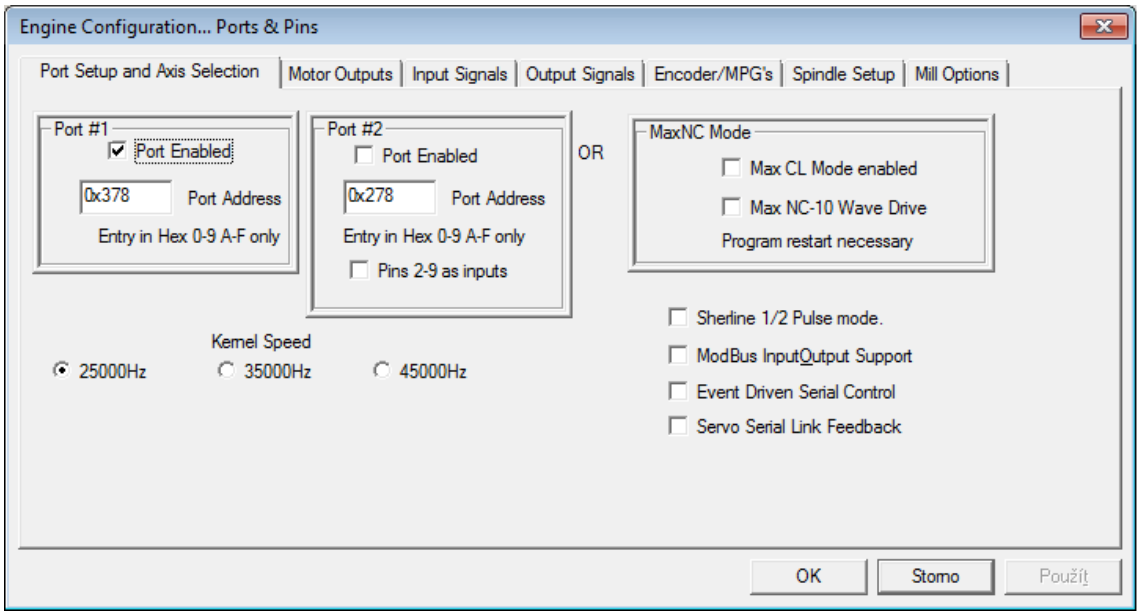
Segments	S3	S4	Note
1	0	0	S3 = 0, S4 = 0, drive segments number is 1,1.8 ° step angle motor turning circle, the whole step = 200 steps / rev. S3 = 0, S4 = 1,1.8 ° step angle motor turning circle, the whole step = 3200 steps / rev.
2	1	0	
8	1	1	
16	0	1	

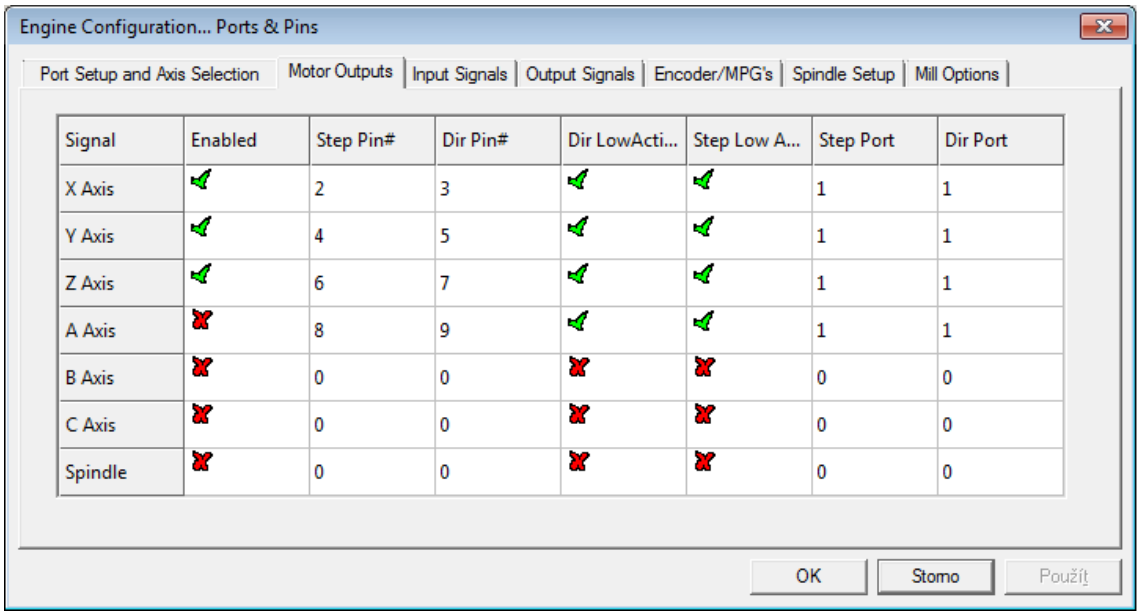
Decay Mode

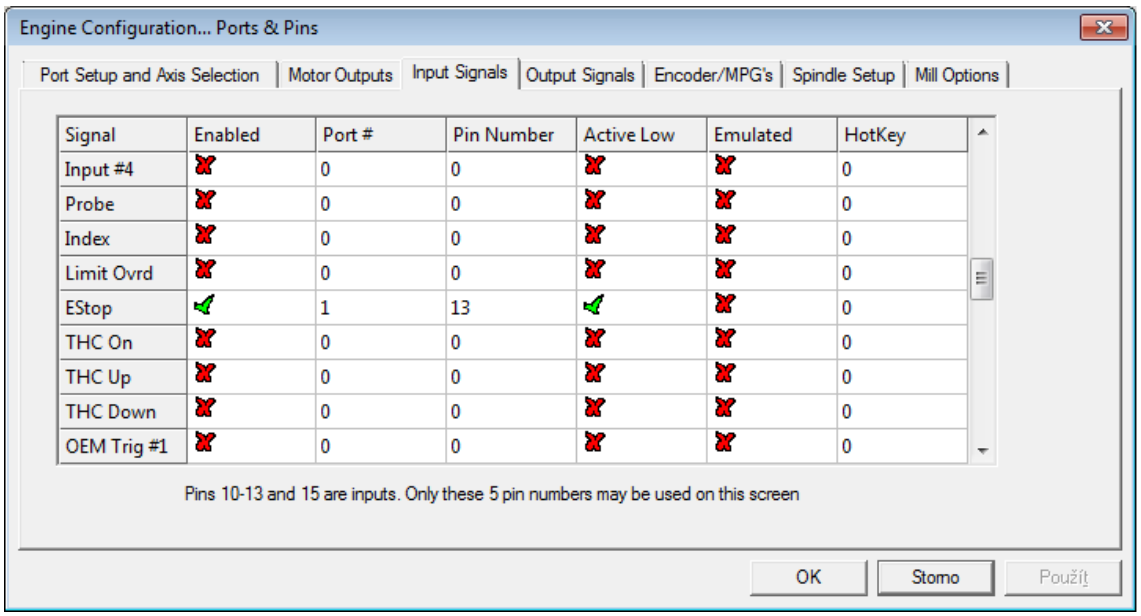
Decay Mode	S1	S2	Note
0%	0	0	Different electrical impedance matching of different decay modes, to eliminate the noise when the stepper motor lock, motor movement in the shake.
25%	1	0	
50%	0	1	
100%	1	1	

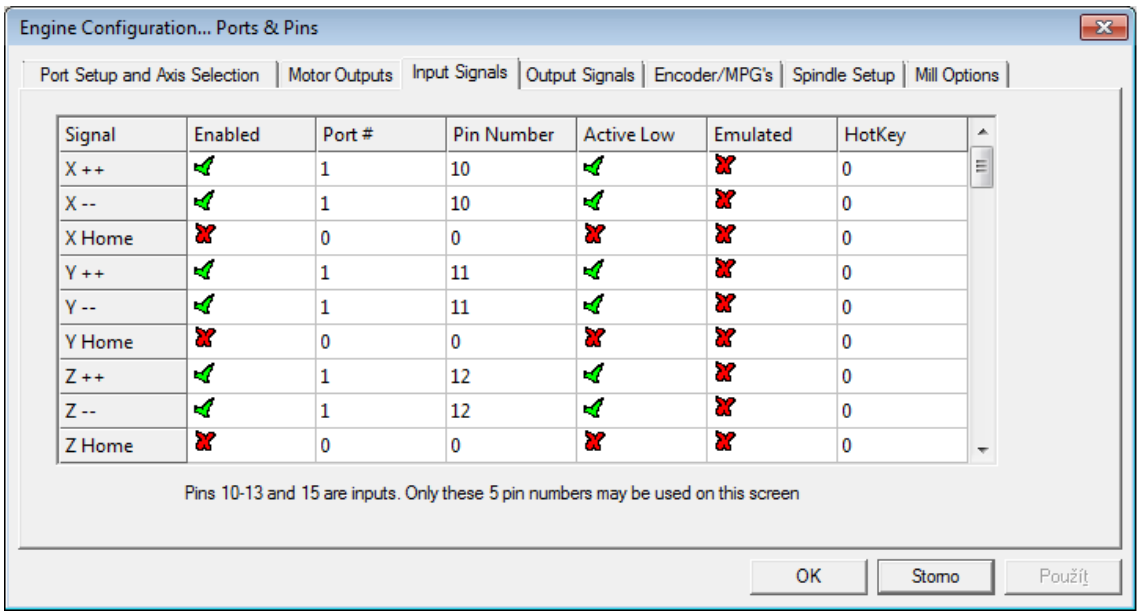
Příloha 2

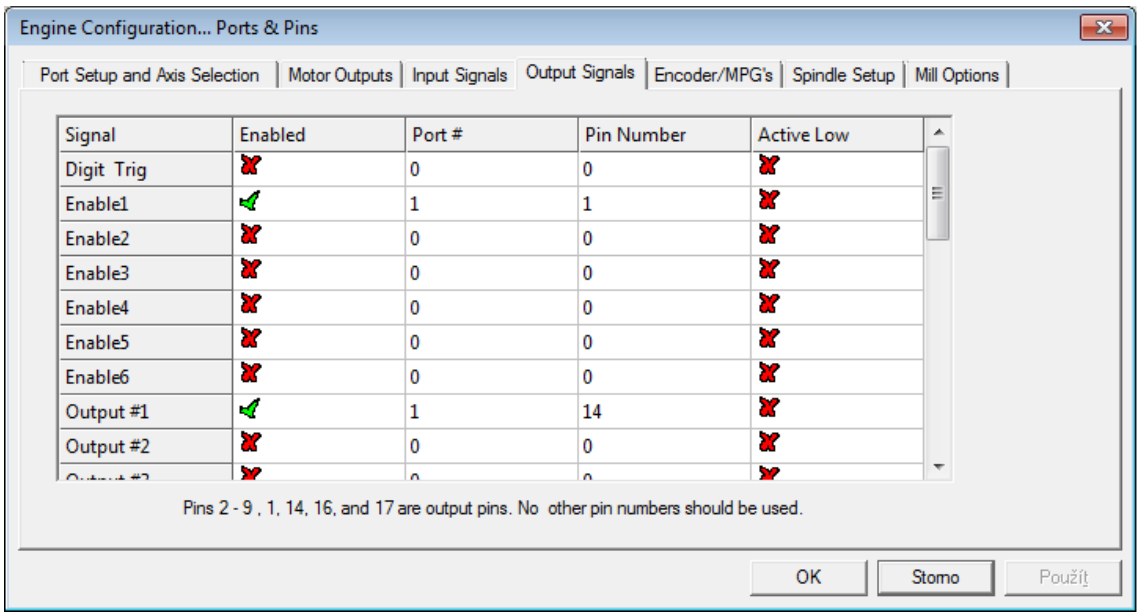
Nastavení programu Mach3Mill pro použitou CNC Interface Board (otestované a funkční nastavení)






Engine Configuration... Ports & Pins
Port Setup and Axis Selection
Motor Outputs
Input Signals
Output Signals
Encoder/MPG's
Spindle Setup
Mill Options
Signal | Enabled | Port # | Pin Number | Active Low | Emulated | HotKey
Input #4 | 0 | 0 | 0 | 0
Probe | 0 | 0 | 0 | 0
Index | 0 | 0 | 0 | 0
Limit Ovrd | 0 | 0 | 0 | 0
EStop | 1 | 13 | 0
THC On | 0 | 0 | 0 | 0
THC Up | 0 | 0 | 0 | 0
THC Down | 0 | 0 | 0 | 0
OEM Trig #1 | 0 | 0 | 0 | 0
Pins 10-13 and 15 are inputs. Only these 5 pin numbers may be used on this screen
OK
Stomo
Použít


Engine Configuration... Ports & Pins
Port Setup and Axis Selection
Motor Outputs
Input Signals
Output Signals
Encoder/MPG's
Spindle Setup
Mill Options
Signal | Enabled | Port # | Pin Number | Active Low | Emulated | HotKey
X ++ | 1 | 10 | 0
X -- | 1 | 10 | 0
X Home | 0 | 0 | 0 | 0
Y ++ | 1 | 11 | 0
Y -- | 1 | 11 | 0
Y Home | 0 | 0 | 0 | 0
Z ++ | 1 | 12 | 0
Z -- | 1 | 12 | 0
Z Home | 0 | 0 | 0 | 0
Pins 10-13 and 15 are inputs. Only these 5 pin numbers may be used on this screen
OK
Stomo
Použít


Engine Configuration... Ports & Pins
Port Setup and Axis Selection
Motor Outputs
Input Signals
Output Signals
Encoder/MPG's
Spindle Setup
Mill Options
Signal
Enabled
Port #
Pin Number
Active Low
Digit Trig
0
0
Enable1
1
1
Enable2
0
0
Enable3
0
0
Enable4
0
0
Enable5
0
0
Enable6
0
0
Output #1
1
14
Output #2
0
0
Pins 2 - 9 , 1, 14, 16, and 17 are output pins. No other pin numbers should be used.
OK
Stomo
Použít

Příloha 3

Fotografie pořízené během stavby stroje