

Laboratorní zařízení pro obrábění plastů s automatickou regulací otáček

Bc. Tomáš Petružela

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Tomáš PETRUŽELA
Osobní číslo: T09699
Studijní program: N 3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

**Téma práce: Laboratorní zařízení pro obrábění plastů
s automatickou regulací otáček**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte rešerši na dané téma.**
- 2. Navrhněte zařízení pro snímání otáček vřetena bezkontaktním způsobem.**
- 3. Zvoleného snímače využijte pro automatické řízení otáček vřetena.**
- 4. Ověřte funkčnost navrženého zařízení na zvoleném počtu zkušebních vzorků.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. David Sámek, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

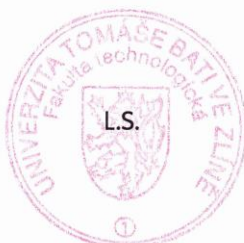
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 6.5.2011.....


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce navazuje na bakalářskou práci s názvem Vývoj laboratorního zařízení na obrábění plastů. V této práci byla navržena a zkonstruována hobby CNC frézka. Vývoj směřoval k vytvoření automatického řízení otáček vřetena. Rovněž došlo ke konstrukčním úpravám stroje pro zvýšení přesnosti posuvu. Také byla zlepšena estetická stránka frézky a bylo namontováno několik doplňků usnadňující práci na zařízení.

Klíčová slova:

CNC Frézka, řídicí elektronika, senzor, vřeteno, ověření funkčnosti

ABSTRACT

This Master thesis builds on Bachelor thesis named Development of laboratory equipment for plastics processing. A hobby CNC milling cutter was designed and constructed in this work. The development aimed at creating the automatic control of spindle speed. There were also some structural adjustments of machine to increase an accuracy of displacement too. Furthermore, the aesthetic aspect of the milling cutter was improved and numbers of enhancements were mounted to the device.

Key words:

CNC Milling machine, control electronics, sensor, spindle, verification of functionality

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své diplomové panu Ing. Davidu Sámkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v průběhu vypracování diplomové.

Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za pomoc při měření přesnosti polohování posuvů, za přístup k měřicím zařízením a rady v oblasti zpracování naměřených dat. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Šálkovi za poskytnutí zázemí a prostředků v laboratoři. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Davidu Příbylovi za poskytnutí rad v oblasti elektronických zařízení.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 OBRÁBĚNÍ PLASTŮ	13
1.1 PLASTY JAKO MATERIÁL.....	13
1.2 NÁSTROJE.....	15
1.2.1 Nástroje na obrábění reaktoplastů	15
1.2.2 Nástroje na obrábění termoplastů.....	17
1.2.3 Nástroje na obrábění vyztužených a vrstvených plastů.....	18
1.3 ŘEZNÉ PODMÍNKY	20
• Řezné podmínky pro obrábění reaktoplastů	20
• Řezné podmínky pro obrábění termoplastů.....	21
• Řezné podmínky pro obrábění vyztužených a vrstvených plastů.....	21
1.4 ZÁSADY BEZPEČNOSTI PRÁCE PŘI OBRÁBĚNÍ PLASTŮ.....	22
2 FRÉZOVÁNÍ	23
2.1 PODSTATA METODY.....	23
Nesousledné frézování.....	25
Sousledné frézování	26
2.2 NÁSTROJE.....	26
2.3 MATERIÁLY FRÉZ	29
2.3.1 Nástrojové oceli slitinové (legované).....	30
2.3.2 Slinuté karbidy (SK).....	30
2.3.3 Keramické řezné materiály.....	30
2.3.4 Syntetické diamanty	31
2.3.5 Kubický nitrid boru (KNB).....	31
3 INDUKČNÍ SENZORY	32
3.1 PRINCIP ČINNOSTI.....	33
3.2 REDUKČNÍ FAKTOR.....	34
3.3 PROBLEMATIKA UMÍSTĚNÍ SENZORU.....	35
3.4 ELEKTRONICKÉ ZAPOJENÍ	35
3.5 DRUHY PROVEDENÍ	36
3.6 ROZHRANÍ INDUKČNÍCH SENZORŮ.....	38
4 METODY ZKOUŠENÍ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	40
4.1 VŠEOBECNÉ POZNÁMKY	40
4.2 PŘEDMĚT NORMY ČSN ISO 230 - 2.....	41
4.2.1 Zkoušený stroj	41
4.2.2 Ohřátí stroje.....	41
4.2.3 Program zkoušky	41

4.3	ZKOUŠENÍ OBRÁBĚNÍM	43
4.4	GEOMETRICKÉ ZKOUŠKY	44
	Metody měření přímosti	44
II	PRAKTICKÁ ČÁST	46
5	NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO SNÍMÁNÍ OTÁČEK VŘETENA BEZKONTAKTNÍM ZPŮSOBEM.....	47
5.1	NÁVRH ELEKTRONICKÉHO SCHÉMATU OTÁČKOMĚRU	47
5.1.1	Otáčkoměr	47
5.1.2	Třímístný čítač.....	49
5.1.3	Návrh elektronického schématu	50
5.2	SNÍMAČ OTÁČEK VŘETENA	52
5.2.1	Výběr vhodného typu snímače	52
5.2.2	Konstrukční řešení snímače otáček vřetena	53
6	AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ OTÁČEK VŘETENA.....	55
6.1	REGULÁTOR OTÁČEK ELEKTROMOTORU PRO POHON VŘETENA	55
6.1.1	Popis funkce regulátoru.....	57
6.1.2	Montáž do přístrojové krabice.....	58
6.2	NÁVRH MODULU PRO ELEKTRONICKÉ ŘÍZENÍ REGULÁTORU OTÁČEK VŘETENA.....	58
6.2.1	Úprava regulátoru K2636.....	59
6.2.2	Návrh převodníku.....	62
6.2.3	Vytvoření zpětné vazby.....	65
6.2.4	Nastavení Machu3.....	66
7	KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA OSY Z	71
8	VIZUALIZACE STAVU KROKOVÝCH MOTORŮ.....	73
9	KRYTOVÁNÍ MECHANIZMŮ CNC FRÉZKY	75
9.1	KRYTOVÁNÍ VŘETENA	75
9.2	KRYTOVÁNÍ OSY Y	76
10	CHRÁNIČ VODIČŮ.....	78
11	MĚŘENÍ PŘESNOSTI POLOHOVÁNÍ OBRÁBĚCÍHO STROJE.....	79
11.1	Osa X	80
11.2	Osa Y	86
11.3	Osa Z.....	91
11.4	VYUŽITÍ NAMĚŘENÝCH PARAMETRŮ POSUVŮ	95
12	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ	96
12.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY	99
12.2	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	103
13	PARAMETRY NAVRŽENÉHO/ZKONSTRUOVANÉHO ZAŘÍZENÍ.....	107
	ZÁVĚR	109

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	115
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	118
SEZNAM OBRÁZKŮ	122
SEZNAM TABULEK.....	125
SEZNAM PŘÍLOH.....	126

ÚVOD

Diplomová práce navazuje na mou bakalářskou práci, ve které jsem navrhl a zkonstruoval CNC (*Computer Numerical Control*) frézku včetně řídicí elektroniky krokových motorů. Jelikož při konstrukci byl kladen velký důraz na pořizovací náklady stroje, ke konstrukci byly použity i díly z jiných vyřazených strojů. To samozřejmě vneslo do celkové konstrukce frézky neduhy jako nižší tuhost celého zařízení a nižší přesnosti jednotlivých os oproti stavu, kdyby byly v konstrukci použity díly nové, nevykazující opotřebení funkčních ploch.

Cílem diplomové práce je pokračovat ve vývoji zařízení tak, aby bylo dosaženo lepších výsledků v oblasti přesnosti stroje spolu se zdokonalením elektronických řídicích systému frézky. Pro zvětšení přesnosti stroje budou nahrazeny některé díly novými a přesnějšími prvky, jako je například lichoběžníkový šroub s bezvúlovou maticí. Instalace těchto prvků si vyžádá i konstrukční zásahy do zařízení. Vývoj elektronického vybavení frézky je směřován k automatickému řízení otáček vřetena. To otevírá následnou problematiku, jakou je například zvolení vhodného snímače otáček vřetena, jeho montáž do sestavy, návrh elektronického systému pro zpracování a předávání dat řídicímu PC (*Personal Computer*) a následné propojení s příslušným softwarem.

Vývoj by měl rovněž směřovat ke zlepšení bezpečnostních prvků celého zařízení a eliminovat tak možnost vzniku úrazu. V dnešní době nejsou brány v úvahu pouze mechanické vlastnosti výrobních zařízení, ale je také kladen důraz na estetickou stránku stroje, proto by mělo nastat jisté zlepšení i v této oblasti, například konstrukcí krytování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBRÁBĚNÍ PLASTŮ

U řady výrobků připravených běžnými zpracovatelskými technologiemi (např. lisováním, vstřikováním) je nutné dodatečné opracování, jako je odstranění přetoků v místech dělicích rovin formy nebo vtokových kanálů, udělení přesného rozměru či změna vnějšího vzhledu. Toto dodatečné opracování se zajišťuje mechanickým obráběním, které může sloužit i k výrobě dílů při malém počtu kusů a mají-li díly složitý tvar. Ušetří se tím náklady na výrobu forem, postup je však méně efektivní s větším podílem odpadního materiálu.

Mechanickým obráběním se rozumí pochod, při kterém se vytváří požadovaný tvar obrobku o předepsaných rozměrech a o požadované jakosti obrobených ploch. Při obrábění se břitěm nástroje odebírá část materiálu ve formě třísky.

Síly při obrábění plastů jsou řádově menší než při obrábění kovů. Obráběný materiál je ve srovnání s kovy pružnější, což zhoršuje přesnost obrábění. Pro dosažení dobré kvality povrchu se musí používat jen ostré nástroje. V souladu s menšími silami vzniká při obrábění plastů relativně málo tepla. Tepelná vodivost polymerů je však na rozdíl od kovů velmi malá, proto i teplo vznikající v místě řezu je odebíráno polymerní třískou podstatně méně. Následkem toho může teplota povrchových vrstev polymeru v zóně řezu dosáhnout až hodnoty 600 °C. Proto se musí oblast řezu chladit.

Při obrábění plastů se používají především operace frézování, řezání, soustružení, vrtání, řezání závitů a broušení. Postupy jsou analogické jako při obrábění kovů. Obráběcí nástroje se často odlišují jak provedením, tak geometrií řezné hrany. Při obrábění se uvolňují drobné částice polymeru a následkem zvýšených teplot i plynné rozkladné produkty (formaldehyd, amoniak, fenol, chlorovodík apod.), což vyžaduje výkonné odsávací zařízení. [1]

1.1 Plasty jako materiál

Zde jsou uvedeny speciální vlastnosti plastů s ohledem na operace obrábění.

Oproti obrábění kovů se jedná o tyto odlišnosti:

- větší tepelná roztažnost plastů způsobuje změnu rozměrů obráběné součásti při obrábění;
- malá tepelná vodivost způsobuje větší tepelné zatížení břitě nástroje, a tím i jeho intenzivnější opotřebení (možnost vzniku lavinovitého opotřebení)

- některé plasty mají velkou adhezi (přilnavost) k materiálu břitu nástroje, proto při optimálních řezných podmínkách dochází k opotřebení břitu nástroje především adhezním otěrem;
- při obrábění vyztužených plastů dochází k opotřebení břitu nástroje především abrazivním otěrem;
- menší hodnoty měrných řezných odporů plastů umožňují volit větší úhel čela a větší úhel hřbetu;
- u vyztužených plastů je měrný řezný odpor shodný s hodnotami udávanými u ocelí střední pevnosti ($R_m = 600$ až 700 MPa);
- tvoření třísky je ovlivněno strukturou materiálu;
- u nevyztužených plastů se třísky tvoří principem plastické deformace, tedy obdobným způsobem jako u ocelí,
- u vyztužených plastů dochází k tvoření třísky křehkým lomem nebo štěpením, tj. obdobně jako u litiny;
- tvoření třísky ovlivňuje volbu optimálních řezných podmínek, geometrie břitu a pracovního prostředí (chlazení);
- anizotropní plasty jsou v některých směrech špatně obrobitelné a dochází k vyštipování materiálu, zejména na hranách obrobku;
- různé druhy plastů se při vyšších teplotách chovají různě: termoplasty měknou, reaktoplasty uhehnají;
- ve styku s chladicími kapalinami může u některých druhů plastů dojít k bobtnání nebo k chemickému narušení povrchu součásti;
- pro zajištění vysoké řezivosti musí být všechny řezné nástroje dokonale naostřeny, příp. je nutné čelo a hřbet břitu nástroje lapovat. [2] [3]

1.2 Nástroje

1.2.1 Nástroje na obrábění reaktoplastů

Pro hospodárné obrábění je nutné používat především dokonale ostré nástroje s břity ze slinutých karbidů nebo z polykrystalického diamantu. V kusové výrobě je možné použít také nástroje s břity z rychlořezných ocelí. Dokonalé naostření břitu nástroje je nutné proto, aby břit třísku odřezával, neboť opotřeбенý břit třísku v místě řezu pouze drtí a vytrhává částičky z povrchu obrobku a obrobený povrch má velmi špatnou kvalitu.

Soustružnické nože pro obrábění reaktoplastů mají stejnou konstrukci jako nože pro obrábění kovů. Pro představu uvedme geometrické parametry břitu ze slinutého karbidu K20: reaktoplasty s buničitým a textilním pojivem:

$$\text{úhel čela } \gamma_o = 16^\circ,$$

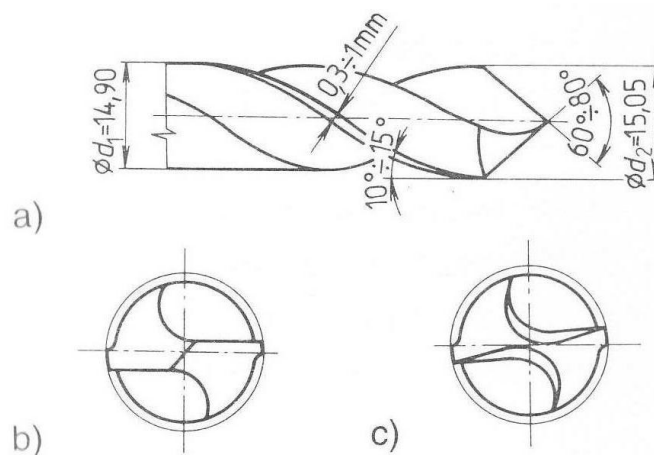
$$\text{úhel hřbetu } \alpha_o = 10^\circ,$$

reaktoplasty s azbestovým plnivem nebo dřevěnou moučkou:

$$\gamma_o = 10^\circ,$$

$$\alpha_o = 10^\circ.$$

Frézovací nástroje – používají se hrubozrnné nástroje se stejnou geometrií břitu, jaká se používá pro obrábění ocelí a litiny. Materiálem břitu frézy může být rychlořezná ocel nebo slinutý karbid K20.



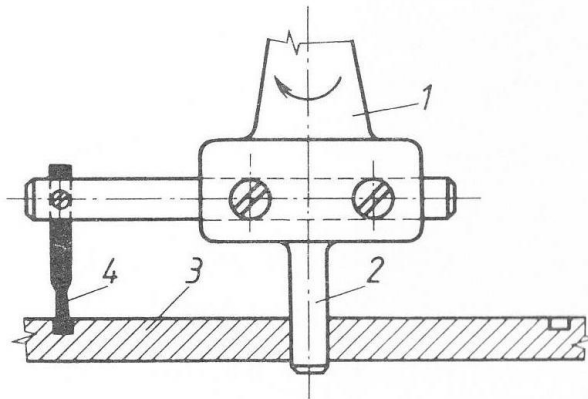
Obr. 1. Vrták na vrtání reaktoplastů [2]

- a) geometrie vrtáku, b) špička vrtáku pro vrtání kovů, c) špička vrtáku pro vrtání reaktoplastů

Vrtáky – používají se především šroubovitě vrtáky z rychlořezných ocelí nebo vrtáky s břity ze slinutých karbidů. Příklad provedení vrtáku o průměru 15 mm z rychlořezné oceli (Obr. 1). Vrtáky s břity ze slinutých karbidů mají tuto geometrii břitu:

úhel špičky $\varepsilon_r = 60$ až 70° , úhel hřbetu $\alpha_o = 12^\circ$, úhel sklonu šroubovice $\lambda = 12^\circ$.

Pro vrtání děr větších průměrů lze použít pilový děrovač nebo stavitelný vykružovací nástroj (Obr. 2).



Obr. 2. Stavitelný vykružovací nástroj [2]

- 1 – upínací stopka, 2 – vodící čep,
3 – obrobek, 4 – vypichovací nůž

Pro řezání závitů lze použít závitníky s přímými drážkami obdobné konstrukce, jako se používají pro řezání do kovových materiálů. Při výrobě součástí z reaktoplastů se řezání závitů používá výjimečně, neboť závit řezaný závitníkem má podstatně menší pevnost než závit zhotovený přímo při výrobě součásti lisováním nebo stříkáním. Je-li nutné spojit dvě různé součásti vyrobené z plastů, je vhodné použít závitořezné šrouby.

Pro řezání reaktoplastů se používají pásové nebo kotoučové pily stejné jako pro řezání kovových materiálů. Použití pil na řezání dřeva není vhodné.

Broušení reaktoplastů se provádí brousicími kotouči o velké zrnitosti. Je nutné použít vydatné chlazení. Chladičí kapalina brání rozšiřování vznikajícího prachu do okolí a zajišťuje jeho opláchnutí z obrobku. [2] [3]

1.2.2 Nástroje na obrábění termoplastů

Obrábění termoplastů je možné provádět všemi nástroji, je však nutné dbát na dobrý odvod tepla z místa řezu (zejména při obrábění PVC (*Polyvinylchlorid*)). Nástroje musí mít ostré a hladké břity, aby nedocházelo k nalepování materiálu obrobku na břit nástroje.

Pro soustružení termoplastů se používají soustružnické nože stejné konstrukce jako pro soustružení kovů. Nože mohou mít břit zhotoven z rychlořezné oceli, ze slinutého karbidu nebo ze syntetického diamantu. Geometrie břitu soustružnického nože s břitem ze slinutého karbidu K20 pro obrábění

polyvinylchloridu (PVC): úhel čela $\gamma_o = 25^\circ$, úhel hřbetu $\alpha_o = 10^\circ$,

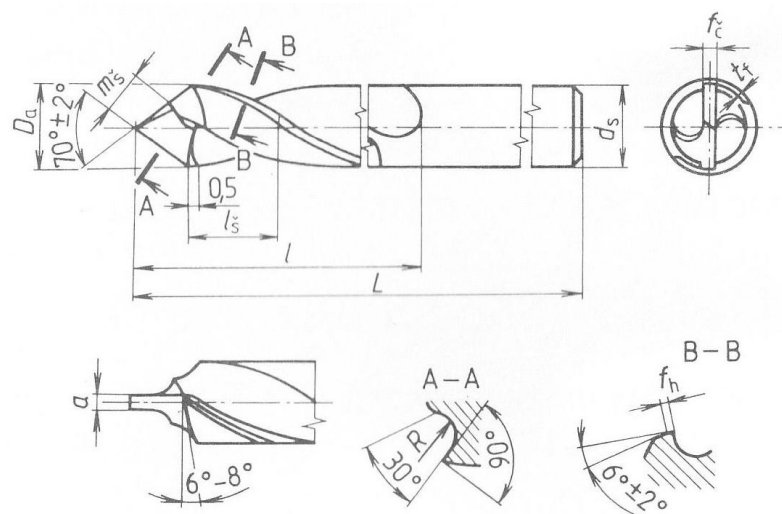
polymethylmetakrylátu: $\gamma_o = 0$ až 10° , $\alpha_o = 6^\circ$,

polyamidu: $\gamma_o = 0$ až 5° , $\alpha_o = 10^\circ$.

Pro frézování se používají frézy s velkou roztečí zubů (tzv. hrubozubé) s břity z rychlořezné oceli, slinutého karbidu nebo ze syntetického diamantu. Geometrie břitu frézy s břity ze slinutého karbidu K20:

úhel čela $\gamma_o = 10$ až 20° , úhel hřbetu $\alpha_o = 20^\circ$, úhel sklonu šroubovice zubů $\lambda = 45^\circ$.

Pro vrtání termoplastů se používají především vrtáky z rychlořezné oceli a vrtáky s břity ze slinutých karbidů. Příklad vrtáku z rychlořezné oceli je na obrázku (Obr. 3). Vrtáky s břity ze slinutého karbidu K20 mají tuto geometrii břitu:



Obr. 3. Vrták na vrtání termoplastů [2]

Úhel špičky

Úhel hřbetu

Úhel sklonu šroubovice

Vrtání polyvinylchloridu a polyamidu:

$$\varepsilon_r = 90^\circ,$$

$$\alpha_o = 15^\circ,$$

$$\lambda = 25^\circ,$$

Vrtání polymethylmetakrylátu:

$$\varepsilon_r = 118 \text{ až } 135^\circ,$$

$$\alpha_o = 15^\circ,$$

$$\lambda = 25^\circ.$$

Pro vrtání děr větších průměrů lze použít pilový děrovač nebo stavitelný vykrūžovací nástroj (Obr. 2).

Pro řezání závitů do neprūchozích děr se používají strojní závitníky s drážkou ve šroubovici. Pro řezání závitů do průchozích děr se používají strojní závitníky s neprūběžnou drážkou. Závitníky mají stejnou konstrukci jako závitníky pro řezání závitů do kovových materiálů.

Pro řezání termoplastů se používají kotoučové pily s malou roztečí zubů (tzv. jemnozubé).

Pro vyřezávání (ale i pro řezání) se používají pilové pásy rovněž s malou roztečí zubů.

Broušení termoplastů se provádí brousicími kotouči o velké zrnitosti na bruskách určených pro broušení dřeva nebo na bruskách určených pro broušení kovů. [2] [3]

1.2.3 Nástroje na obrábění vyztužených a vrstvených plastů

Pro obrábění vyztužených nebo vrstvených plastů (laminátů) jsou nejvhodnější nástroje s břity ze slinutých karbidů nebo ze syntetického diamantu. Lze použít i nástroje s břity z rychlořezných ocelí, které však musí být dokonale naostřeny.

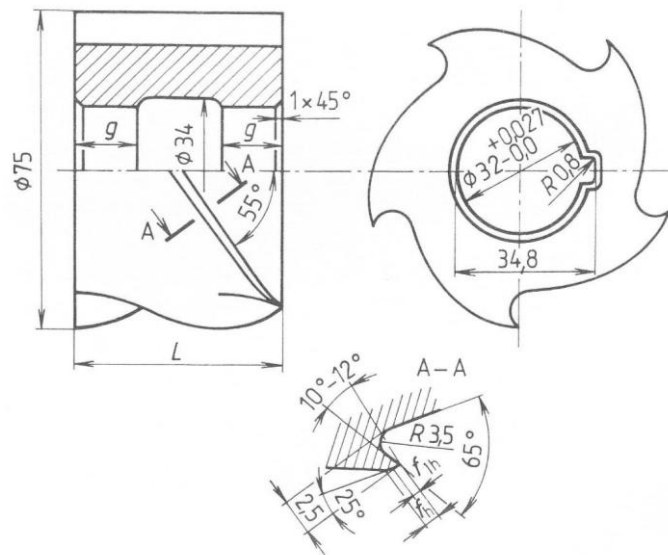
Velikost přípustného opotřebení břitu nástroje se zde volí podstatně menší než u nástrojů pro obrábění kovů, neboť opotřebený břit vyvolává značné navýšení teploty v místě obrábění, což vede k přehřátí a zhnědnutí obrobeného povrchu.

Řezné síly nesmí působit ve směru kolmém na jednotlivé vrstvy, ze kterých je materiál složen. Pokud je např. nutné vrtat díru kolmo na vrstvy, je nutné podstatně snížit posuv.

Pro soustružení vyztužených nebo vrstvených plastů se používají soustružnické nože, které mají stejnou konstrukci jako nože pro soustružení kovových materiálů. Geometrie břitu soustružnického nože s břity ze slinutého karbidu K20:

úhel čela $\gamma_0 = 10^\circ$, úhel hřbetu $\alpha_0 = 8^\circ$, úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 60^\circ$, úhel sklonu ostří $\lambda = -4^\circ$.

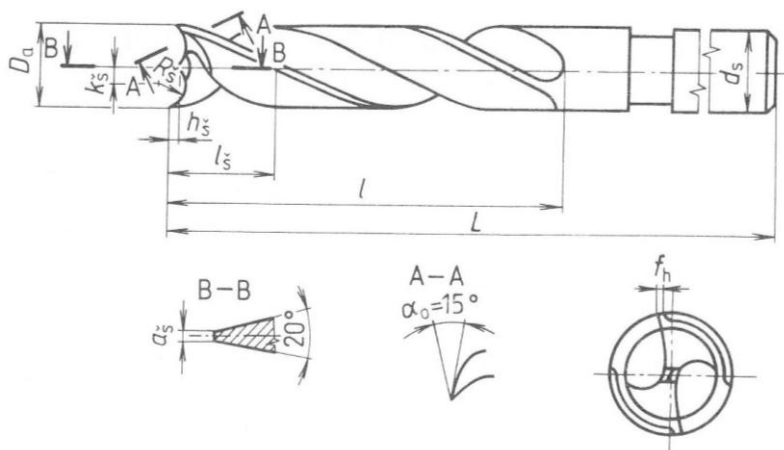
Pro frézování vyztužených nebo vrstvených plastů se používají frézy s velkou roztečí zubů, které mají stejnou geometrii břitu jako frézy určené pro frézování ocelí nebo litin. Příklad válcové frézy vyrobené z rychlořezné oceli je na obrázku (Obr. 4).



Obr. 4. Válcová fréza pro frézování vyztužených a vrstvených plastů [2]

Pro vrtání se používají šroubovitě vrtáky z rychlořezné oceli, vrtáky s břity ze slinutých karbidů nebo ze syntetického diamantu. Příklad vrtáku z rychlořezné oceli je na obrázku (Obr. 5). Geometrie špičky vrtáku s břity ze slinutého karbidu K20:

úhel špičky $\epsilon_r = 90$ až 130° , úhel hřbetu $\alpha_0 = 12^\circ$, úhel sklonu šroubovice $\lambda = 12^\circ$.



Obr. 5. Vrták na vrtání vyztužených a vrstvených plastů [2]

Pro řezání se používají pilové kotouče, pro vyřezávání (příp. řezání) se používají pilové pásy. Oba druhy nástrojů mají mít zuby o malé rozteči (tzv. jemnozubé).

Broušení vyztužených a vrstvených plastů se provádí pomocí broušicích kotoučů nebo pásů o velké zrnitosti. [2] [3]

1.3 Řezné podmínky

- **Řezné podmínky pro obrábění reaktoplastů**

Tab. 1. Řezné podmínky pro obrábění reaktoplastů [2] [3]

Operace	Nástroj	Řezná rychlost	Posuv
Soustružení	RO	100 až 120 m.min ⁻¹	max. 0,6 mm na ot.
Soustružení	SK	160 až 200 m.min ⁻¹	max. 0,3 mm na ot.
Frézování	RO	50 až 160 m.min ⁻¹	0,2 až 0,5 mm na zub
Frézování	SK	200 až 800 m.min ⁻¹	0,04 až 0,6 mm na zub
Vrtání	RO	40 až 60 m.min ⁻¹	max. 0,5 mm na ot.
Vrtání	SK	80 až 140 m.min ⁻¹	max. 0,5 mm na ot.
Řezání	Kotoučová pila	250 až 350 m.min ⁻¹	
Řezání	Pásová pila	150 až 180 m.min ⁻¹	
Broušení	Bez chlazení	10 až 18 m.s ⁻¹	
Broušení	S chlazením	14 až 22 m.s ⁻¹	

RO – nástroj s břity z rychlořezné oceli

SK – nástroj s břity ze slinitých karbidů

Při obrábění reaktoplastů se používá chlazení tlakovým vzduchem, výjimečně emulzí. Při obrábění aminoplastů je chlazení nezbytně nutné, aby teplem vznikajícím při obrábění nenastal rozklad pryskyřice.

Pro operace soustružení, frézování a vrtání se používá jako chladicí kapalina mýdlový roztok, vzduch, terpentýn, strojní olej nebo líh.

Pro získání přesných rozměrů s úzkými tolerancemi je vhodné nejprve opracovat obrobek s malým přídavkem, vložit ho na 24 až 48 hodin do vody o teplotě 20°C, stejnou dobu ho sušit při teplotě cca 70°C a pak teprve obrábět načisto.

Při řezání závitů do termoplastů se používá stejná řezná rychlost jako při řezání závitů do kovových materiálů.

- **Řezné podmínky pro obrábění termoplastů**

Tab. 2. Řezné podmínky pro obrábění termoplastů [2] [3]

Operace	Nástroj	Řezná rychlost	Posuv
Soustružení	RO	max. 300 m.min ⁻¹	max. 0,3 mm na ot.
Soustružení	SK	max. 800 m.min ⁻¹	max. 0,3 mm na ot.
Frézování	RO	120 až 200 m.min ⁻¹	0,3 až 1 mm na ot.
Frézování	SK	160 až 270 m.min ⁻¹	0,2 až 0,8 mm na ot.
Vrtání	RO	15 m.min ⁻¹	0,3 mm na ot.
Vrtání	SK	220 m.min ⁻¹	0,3 mm na ot.

RO – nástroj s břity z rychlořezné oceli

SK – nástroj s břity ze slinutých karbidů

Při broušení na pásové brusce je řezná rychlost 200 m.min⁻¹.

Při broušení broušicími kotouči je řezná rychlost 20 až 30 m.s⁻¹, posuv 0,2 až 0,4 mm na otáčku.

Broušení probíhá bez chlazení, ale je nutné zajistit dokonalé odsávání vzniklých prachových částic.

- **Řezné podmínky pro obrábění vyztužených a vrstvených plastů**

Tab. 3. Řezné podmínky pro obrábění vyztužených a vrstvených plastů [2] [3]

Operace	Nástroj	Řezná rychlost	Posuv
Soustružení	RO	450 m.min ⁻¹	0,1 až 1 mm na ot.
Soustružení	SK	700 m.min ⁻¹	0,2 až 0,7 mm na ot.
Frézování ¹⁾	RO	max. 200 m.min ⁻¹	max .0,03 mm na zub
Frézování ²⁾	RO	300 až 350 m.min ⁻¹	0,1 až 0,2 mm na ot.
Frézování ¹⁾	SK	250 až 300 m.min ⁻¹	0,2 až 0,5 mm na ot.
Frézování ²⁾	SK	400 až 450 m.min ⁻¹	0,1 až 0,2 mm na ot.
Vrtání	RO	20 až 60 m.min ⁻¹	0,07 až 0,2 mm na ot.
Vrtání	SK	100 až 140 m.min ⁻¹	0,2 až 0,3 mm na ot.
Řezání	Pásová pila	25 až 28 m.min ⁻¹	
Řezání	Kotoučová pila	10 až 12 m.min ⁻¹	0,2 až 1 mm na ot.
Broušení ³⁾	Broušicí kotouče	26 až 30 m.s ⁻¹	0,4 až 0,6 mm na ot.
Broušení	Broušicí pás	200 až 300 m.min ⁻¹	

¹⁾ souhlasně s vrstvami,

²⁾ kolmo na vrstvy,

³⁾ bez chlazení, hloubka řezu 0,1 až 0,15 mm.

Při obrábění vyztužených nebo vrstvených plastů se pro chlazení používá tlakový vzduch. Je vhodné ještě vzniklé třísky z místa řezu odsávat. [2] [3]

1.4 Zásady bezpečnosti práce při obrábění plastů

Z hlediska bezpečnosti práce jsou důležité tyto zásady:

- při obrábění fluoroplastů (např. teflonu, teflexu) nesmí třísky ani obráběný polotovar přijít do styku s teplotou vyšší než 400°C, třísky se nesmí směšovat s ocelovým odpadem;
- při obrábění musí být třísky nebo vzniklý prach odsávány nebo odstraňovány chladícím médiem, aby se zabránilo vzniku požáru; na pracovišti, kde se obrábí plasty, je zakázáno kouřit;
- při broušení materiálů obsahujících sklo je nutné, aby obsluha používala ochrannou masku s filtrem, který zachytí i nejjemnější částičky prachu. Obsluha si musí chránit pokožku mastí určenou pro použití v prašném prostředí. [2] [3]

2 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je obrábění rovinných nebo tvarových ploch, vnitřních nebo vnějších, vícebřítým nástrojem.

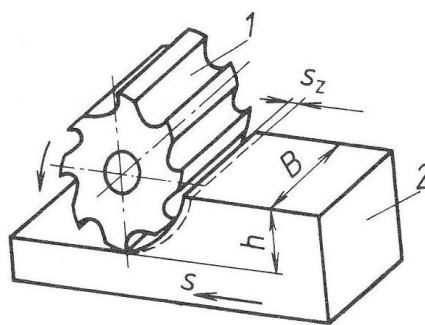
Frézování je mladší způsob obrábění než soustružení. První použitelné stroje na frézování – frézky – byly zkonstruovány začátkem 18. století a dnešní podobu dostaly teprve koncem 19. století. Jsou to velmi výkonné stroje a po soustruzích jsou v průmyslu nejrozšířenější. Frézují se obvykle rovinné plochy nebo tvarové přímkové popřípadě zborcené plochy. Kopírovací a NC frézy umožňují frézovat obecné tvarové plochy. [2] [3]

2.1 Podstata metody

Nástroj – fréza – je obvykle vícebřítý. Z hlediska chvění je výhodné, je-li v záběru s obrobkem více břitů současně. Při frézování koná nástroj hlavní řezný pohyb (otáčivý) a obrobek koná pohyb posuvný obvykle přímočarý, někdy otáčivý, nebo obecný pohyb po prostorové křivce.

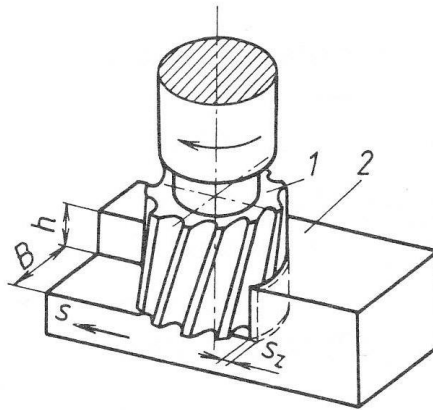
Řezný proces je přerušovaný, jednotlivé zuby nástroje postupně vcházejí a vycházejí z materiálu a odebírají třísku proměnného průřezu.

Rozeznáváme dva základní způsoby frézování: frézování obvodem válcové frézy (Obr. 6) a čelem čelní frézy (Obr. 7).



Obr. 6. Frézování obvodem válcové frézy [2]

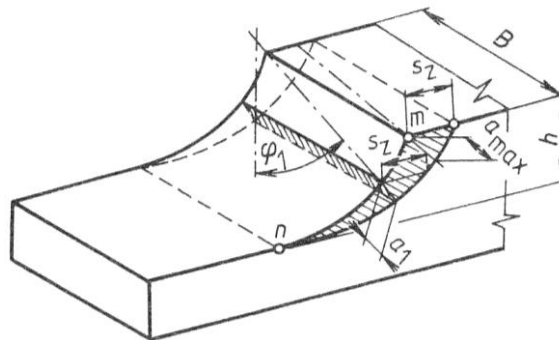
1 – fréza, 2 – obrobek, B – šířka obrobku, h – hloubka řezu, s – posuv, s_z – posuv na zub



Obr. 7. Frézování čelem čelní frézy
[2]

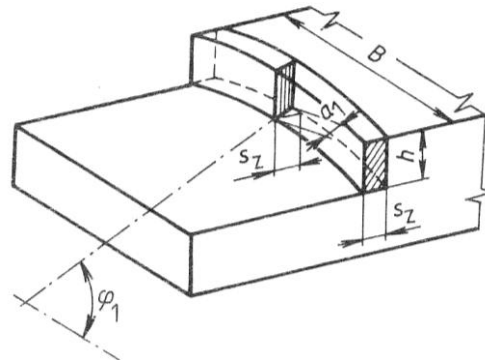
1 – fréza, 2 – obrobek, B – šířka obrobku, h – hloubka řezu, s – posuv, s_z – posuv na zub

Při frézování válcovou frézou řeže fréza zuby na obvodě, při čelním frézování řeže současně zuby na obvodě a na čele. Průřez třísky odebíraný jedním zubem frézy je znázorněn na následujících obrázcích (Obr. 8) a (Obr. 9).



Obr. 8. Frézování obvodem válcové frézy
[2]

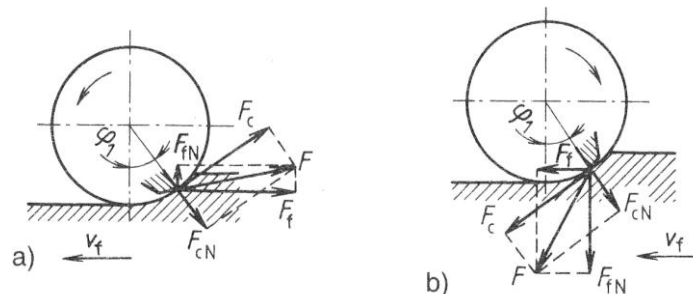
B – šířka obrobku, h – hloubka řezu,
 s_z – posuv na zub, a_1 – tloušťka třísky pro
úhel φ_1 , a_{max} – maximální tloušťka třísky



Obr. 9. Frézování čelem čelní frézy
[2]

B – šířka obrobku, h – hloubka řezu,
 s_z – posuv na zub, a_1 – tloušťka třísky
pro úhel φ_1

Podle směru otáčení frézy vůči směru posuvu dělíme frézování na nesousledné (protisměrné) (Obr. 10a) a sousledné (Obr. 10b). [2] [3]



Obr. 10. Frézování a) nesousledné, b) sousledné [2]

F – řezná síla, F_c , F_{cN} , F_f , F_{fN} – složky řezné síly, v_f – rychlost posuvu, φ_1 – úhel okamžité polohy zubu

Nesousledné frézování

Fréza se otáčí proti směru posuvu, průřez třísky se postupně zvětšuje od 0 do maximální hodnoty. Výsledná řezná síla směřuje ven z obrobku, což zvyšuje nároky na upnutí součástí. Při záběru třísky od nulové hodnoty se břit nástroje "sklouzne" po obráběné ploše, takže drsnost obrobku je horší.

Sousledné frézování

Fréza se otáčí ve směru posuvu, průřez třísky se mění od maximální hodnoty do 0. Při tomto způsobu záběru třísky dosáhneme lepší drsnosti obrobené plochy. Výsledná řezná síla směřuje do obrobku \Rightarrow menší nároky na upnutí. Výkon při sousledném frézování je o 30 až 50 % vyšší než při nesousledném frézování při stejné trvanlivosti nástroje. Nevýhodou sousledného frézování jsou rázy, které vznikají při záběru každého zubu do materiálu. Tyto rázy můžeme odstranit použitím fréz s šikmými zuby. Frézky pro sousledné frézování musí mít zařízení pro vymezení vůlí mezi posuvovým šroubem stolu a jeho maticí nebo mají pohon řešen pomocí kuličkových šroubů (bezvůlové uložení). [4] [3]

Řezný pohyb

Řezný pohyb je složen ze dvou pohybů: otáčivého pohybu frézy a přímočarého pohybu obrobku. Výsledný relativní pohyb ostří vůči obrobku je zkrácená cykloida. Vzhledem k malé rychlosti posuvu proti obvodové rychlosti frézy se tato cykloida blíží kružnici. Délka dráhy, kterou urazí obrobek během pootočení frézy o jednu zubovou rozteč, nazýváme posuvem na zub s_z . Vzdálenost mezi dráhami po sobě následujících břitů, měřena v radiálním směru, je tloušťka třísky a . Nejvyšší možná hodnota (a_{max}) je rovna posuvu na zub. [2] [3]

2.2 Nástroje

Frézy je možné dělit z různých hledisek – zejména podle umístění břitů, tvaru zubů, průběhu ostří, upínání a konstrukce.

- Podle toho, zda jsou umístěny břity fréz na válcovém, rovinné, kuželové, kulové nebo tvarové ploše (Obr. 11), se dělí frézy na:

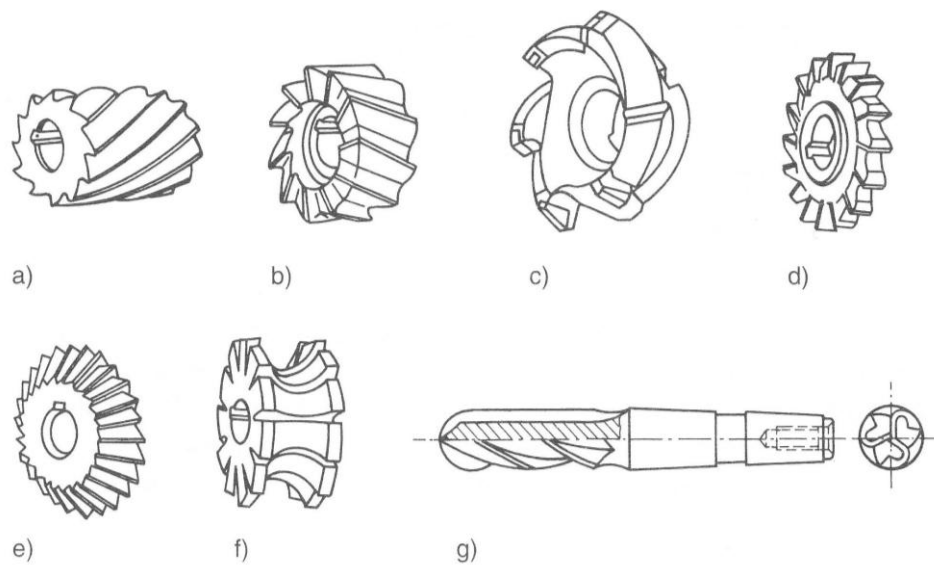
válcové – s břity na válcové ploše,

čelní – s břity na válcové a čelní ploše,

kotoučové – s břity na válcové a obou čelních plochách,

kuželové – s břity na jedné nebo dvou kuželových plochách,

tvarové – s břity na tvarových plochách, např.: zaoblovací frézy, frézy na závity, frézy na ozubení (odvalovací a modulové) apod.



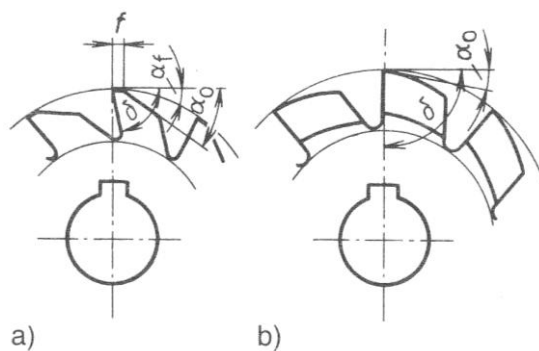
Obr. 11. Některé druhy fréz [2]

a) válcová, b) čelní, c) frézovací hlava, d) kotoučová, e) kuželová, f) tvarová, g) stopková s kulovým čelem

- Podle tvaru zubů (Obr. 12) jsou frézy

s **frézovanými zuby** – zubové mezery se frézují kuželovými frézami,

s **podsoustruženými zuby** – hřbety zubů těchto fréz se obrábějí na tzv. podtáčecích soustruzích a mají tvar Archimédovy spirály; používají se zejména u tvarových fréz.



Obr. 12. Zuby fréz [2]

a) frézovaný zub, b) podsoustružený zub

α_0 – úhel hřbetu, α_f – úhel hřbetu na fazetce, δ – úhel řezu, f – šířka fazetky

- Podle průběhu ostří zubů frézy

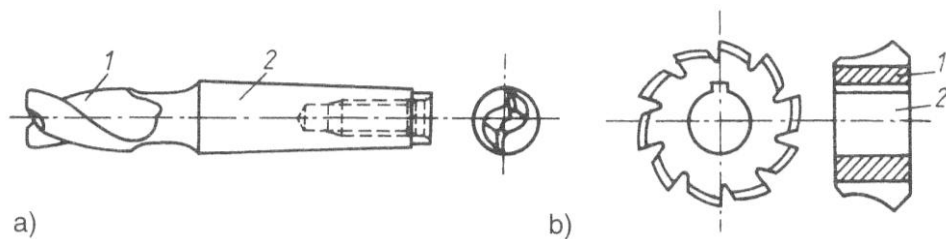
s *přímými zuby* – mají zuby rovnoběžné s osou (Obr. 6),

s *zuby do šroubovice* (Obr. 7) – pravotočivé nebo levotočivé.

- Podle upínání dělíme frézy na (Obr. 13)

stopkové – s kuželovou stopkou (kužel Morse nebo ISO (*International Organization for Standardization*)) nebo s válcovou stopkou,

nástrčné.



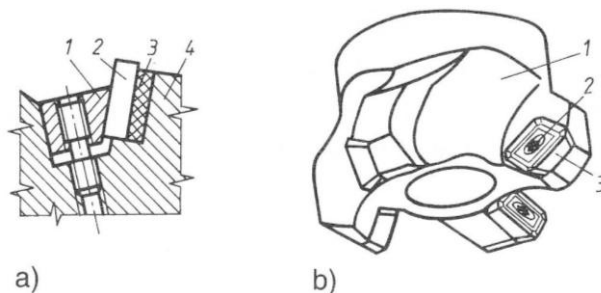
Obr. 13. Fréza [2]

- a) s kuželovou stopkou (kužel Morse): 1 – řezná část, 2 – stopka,
b) nástrčná: 1 – těleso, 2 – upínací otvor

- Podle konstrukce rozeznáváme frézy

celistvé (monolitní),

s *vyměnitelnými břitovými destičkami* se zuby z rychlořezných ocelí, slinutých karbidů, příp. i z řezné keramiky nebo polykrystalického nitridu boru (Obr. 14);

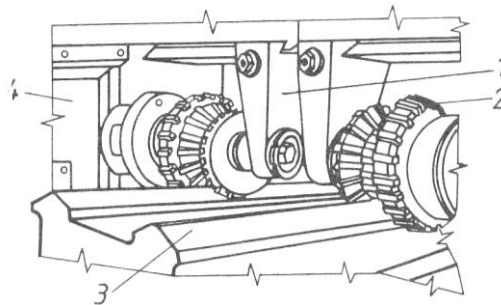


Obr. 14. Příklady mechanického upnutí břitových destiček na fréze [2]

- a) klínem: 1 – upínací klín se šroubem, 2 – vyměnitelná břitová destička, 3 – podložka, 4 – těleso frézy

- b) šroubem: 1 – těleso frézy, 2 – upínací šroub, 3 – vyměnitelná břitová destička

skládané z více samostatných fréz – slouží pro frézování složitých tvarů (Obr. 15). [1]



Obr. 15. Frézování složitých tvarů skládanou frézou [2]

1 – opěrné ložisko, 2 – skládaná fréza,
3 – obrobek, 4 – vřeteník

2.3 Materiály fréz

Během obráběcího procesu je frézovací nástroj značně namáhán mechanicky ale i tepelně. K zajištění správné funkce nástroje je velice důležité zvolit vhodný materiál, ze kterého bude vyroben.

Základními vlastnostmi nástrojových materiálů jsou:

- tvrdost, která musí být podstatně větší než tvrdost obráběného materiálu;
- dostatečnou pevnost v tlaku a ohybu;
- dobrá tepelná odolnost a tepelná vodivost.

Nejdůležitější částí nástroje je řezný břit, proto je nutné z hlediska použití materiálu této části věnovat značnou pozornost. Břit značně ovlivňuje průběh obrábění, produktivitu a hospodárnost obrábění. Souhrnným pojmem pro vlastnosti řezných materiálů jako tvrdost, pevnost, houževnatost, odolnost proti otěru a tepelná odolnost je pojem řezivost.

Žádný z řezných materiálů není tak univerzální, aby byl vhodný k obrábění všech materiálů. Existuje celá řada řezných materiálů lišících se svými vlastnostmi, a tím i vhodností použití pro obrábění konkrétního materiálu.

2.3.1 Nástrojové oceli slitinové (legované)

Pro třískové obrábění jsou z nich nejužívanější rychlořezné oceli (RO). Podle obsahu a množství legujících prvků (Cr, V, Mn, Mo, W,...) se dělí na RO:

- pro běžné výkony;
- výkonné
- vysoce výkonné. [5]

2.3.2 Slinuté karbidy (SK)

Jsou nekovové řezné materiály vyráběné práškovou metalurgií z karbidů těžkých kovů: karbidu wolframu, karbidu titanu, karbidu tantalu, pojivem je kobalt. Zvyšováním obsahu kobaltu u slinutých karbidů roste jejich pevnost a houževnatost, ale současně klesá jejich tvrdost. Po konečném slinování lze slinuté karbidy tvarově a rozměrově upravovat jen broušením, elektroerozivním obráběním a lapováním. Tepelná odolnost SK je 800° – 1000° C.

Pro třískové obrábění se slinuté karbidy zhotovují ve formě řezných destiček různého tvaru a velikosti v souvislosti se způsobem obrábění. Destičky je možné k tělesům fréz připevnit pájením, většinou však mechanickým způsobem - pomocí příložek, šroubů apod. To umožňuje několikanásobné otočení destičky při otupení konkrétní řezné hrany. Tyto řezné komponenty se nazývají vyměnitelné břitové destičky.

Pro zvýšení otěruvzdornosti jsou břitové destičky ze slinutých karbidů opatřeny jedním nebo vícevrstevným povlakem karbidu titanu, nitridu titanu nebo oxidu hlinitého. [5]

2.3.3 Keramické řezné materiály

Keramické řezné materiály si zachovávají tvrdost i při teplotách 1 000° až 1 200° C. Pro jejich výrobu je výchozí surovinou oxid hlinitý (Al_2O_3). Vyrábějí se práškovou metalurgií, slinováním lisovaných prášků do tvaru řezných destiček.

Keramické řezné materiály se vyznačují malou pevností v ohybu a velkou křehkostí. Nejsou proto vhodné k obrábění přerušovaným řezem a k obrábění s většími průřezy třísek. Jsou konstrukčně řešeny stejně jako destičky z SK tak, že je můžeme v nástrojových držácích několikrát otočit a po otupení všech řezných hran se vyřazují a nahrazují novými. [5]

2.3.4 Syntetické diamanty

Chemické složení syntetických diamantů odpovídá čistému uhlíku. Je nejtvrdějším řezným materiálem vůbec. Jako řezný materiál se používá k dokončovacím úběrům při malých posuvech a hloubkách řezu, bez přerušovaného obráběcího procesu. Nepoužívá se k obrábění materiálu s malou tepelnou vodivostí, protože by velmi rychle zoxidoval. [5]

2.3.5 Kubický nitrid boru (KNB)

Vlastnosti kubického nitridu boru, zejména tvrdost, se podobají vlastnostem a tvrdosti diamantu. Kubický nitrid boru však snese podstatně vyšší dovolené teploty (až 1 500° C). Lze ho použít na dokončovací operace u obrobků z těžkoobrobitelných materiálů, např. obrobků z kalených ocelí a slitin. [5]

3 INDUKČNÍ SENZORY

Senzor je funkční prvek, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Pojem „senzor“ je ekvivalentní pojmu „snímač“ nebo i „detektor“. Vlastní citlivá část senzoru (snímací místo) je označováno jako čidlo.

Senzor je primární zdroj informace, který snímá fyzikální, nebo i biologické hodnoty, které nejčastěji převádí na elektrické signály, jako jsou napětí, proud, kapacita atd. (Obr. 16). Čísla odpovídají fyzikálním principům z Tab. 4.

FYZIKA						
MONTÁŽNÍ TECHNOLOGIE				PROCESNÍ TECHNOLOGIE		
vzdálenost	dráha	rychlost v	vlastnosti světla W	hladina	tlak	teplota
s	l	otáčky n		h	p	T
1, 4, 5, 6	3	2	6	5	9	7, 8
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Q, C, W, L	Δt	Δt	i	Δt	ΔR	$\Delta R, \Delta u$

Obr. 16. Příklady fyzikálních veličin snímaných senzory [6]

Převod může být buď analogový (např. každé vzdálenosti odpovídá určitá hodnota proudu) nebo binární – dvoustavový (např. překročení určité vzdálenosti vyvolá napěťový výstupní signál).

Tab. 4. Ukázka převodu některých fyzikálních veličin na elektrické signály [6]

	Výraz	Konstanta	Vysvětlení
1	$s \leftrightarrow 1/R_v \leftrightarrow Q$		indukce vířivých proudů R_v - výsledný odpor cívky Q - činitel jakosti cívky
2	$n = \text{impulzy}/\text{čas}$		impulzy dodá senzor
3	$\Delta l = \Delta t \cdot v$	$v_0 = 331,6 \text{ m/s}$ při 0°C	vyhodnocuje se Δt , princip ultrazvukových senzorů
4	$s \leftrightarrow C = \epsilon \cdot S/s$	$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$	změna kapacity vlivem ϵ , s , S
5	$s \leftrightarrow B \leftrightarrow \mu \leftrightarrow L$	$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$	přesycení jádra cívky, princip magnetických senzorů
6	$s \leftrightarrow W = f \cdot h$ barva $\leftrightarrow W$	$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$ $W = 1,92 \text{ eV}$ pro GaAsP	fotoelektrický jev, princip optických senzorů
7	$\Delta T \rightarrow \Delta R$	$\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$	platinový odpor, např. PT100
8	$\Delta T \rightarrow \Delta u$	$\alpha = 53 \mu\text{V/K}$	termočlánky, zde typ J
9	$p \rightarrow \Delta R/R = k \cdot \epsilon$	$k = 200$ pro Si	tenzometry

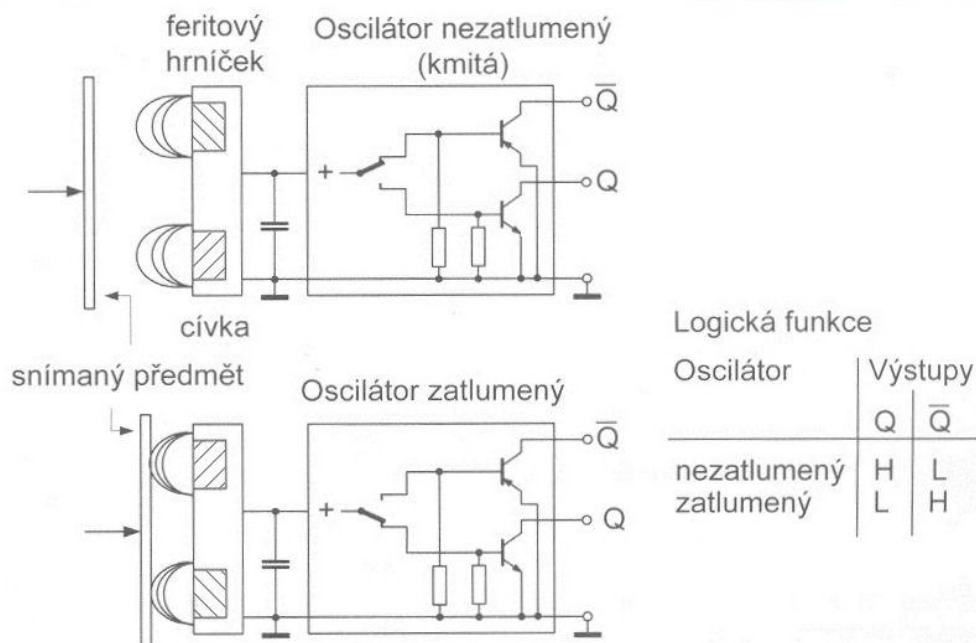
Indukční senzory, zvláště v provedení senzorů přiblížení (iniciátorů), mají široké použití v automatizaci průmyslu. Pracují bezdotykově, bez zpětného působení a jsou díky uzavřenému pouzdru odolné vůči vlivům provozního prostředí a tím se vyznačují vysokou spolehlivostí. Indukční senzor je zcela polovodičový prvek, pracuje s vysokou spínací frekvencí, a pokud nedojde k jeho mechanickému poškození, má téměř neomezenou životnost.

Typickými příklady použití jsou:

- náhrada mechanických koncových spínačů;
- zpětné hlášení polohy akčního členu (ventilu, pohonu);
- inspekční úloha – přítomnost, správná poloha a zjišťování chybějících částí;
- počítání kusů;
- regulační úlohy (poloha, rychlost). [6]

3.1 Princip činnosti

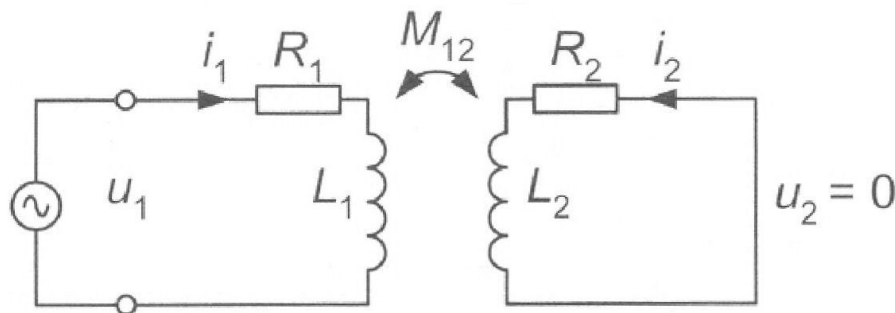
Aktivním prvkem indukčního senzoru je cívka umístěna na jádru poloviny feritového hrníčku (Obr. 17). Vysokofrekvenční střídavý proud generovaný oscilátorem protéká cívkou a vytváří magnetické pole, které vystupuje z otevřené strany hrníčku. To je také aktivní plocha senzoru. [6]



Obr. 17. Princip indukčního senzoru [6]

Jestliže se nachází v blízkosti této aktivní plochy nějaký předmět z elektricky vodivého materiálu, dojde k deformaci magnetického pole.

V předmětu se indukují¹ vířivé proudy. Uvažujme, že snímaný předmět je z konstrukční oceli, tedy elektricky vodivý a feromagnetický. V terminologii indukčních senzorů se mu říká tlumicí clona. Změna magnetického pole vlivem vířivých proudů působí zpátky na cívku tak, že změní její elektrickou impedanci, přičemž tato změna impedance je vyhodnocena elektronikou senzoru a po následném zesílení převedena na výstupní signál. Zjednodušeně je možno považovat clonku za závit nakrátko a celé uspořádání za transformátor. Cívka senzoru přitom představuje primární okruh a kovová clonka sekundární okruh zapojený nakrátko (Obr. 18). [6]



Obr. 18. Transformátorové náhradní schéma indukčního senzoru s tlumicí clonkou [6]

3.2 Redukční faktor

Spínací vzdálenost s různých materiálů se porovnávají se spínací vzdáleností s_n dosaženou s konstrukční ocelí ČSN 11 373 (EN ISO S235JRG1). Tento poměr se nazývá redukční faktor, obecně také korekční faktor $= s / s_n$. Popisuje, na kterou hodnotu spínací vzdálenosti pro různé materiály poklesne. Hodnoty nejčastěji používaných materiálů jsou v tabulce Tab. 5. [6]

¹ To je také důvod pro pojmenování indukční. Indukce vířivých proudů je chápána jako příčina prvotní. Název induktivní senzor, který se také používá, je odvozen od induktivní vazby transformátoru a je rovněž možný.

Tab. 5. Hodnoty redukčního faktoru vybraných materiálů [6]

Materiál	Konstrukční ocel	Nerezová ocel	Olovo	Mosaz	Hliník	Měď
Redukční faktor	1	0,7	0,6	0,45	0,4	0,3

3.3 Problematika umístění senzoru

Okolí cívkového systému senzoru, ať již se jedná o kovové pouzdro či o umístění v kovovém držáku, představuje problém. Vždycky dojde ke zvýšení ztrátového odporu cívky.

Jak se to projeví na spínací vzdálenosti a na stabilitě spínacího bodu je vysvětleno v následujících dvou případech.

Pouzdro senzoru:

U feritového hrníčku je nutno vždy počítat se stranovým rozptylovým polem, které je mimo aktivní plochu. To zasahuje do pouzdra, které může být např. z nerezové oceli. V něm se pak indukují nezanedbatelné vířivé proudy, které zvyšují ztrátový odpor cívky. Tím se snižuje hodnota maximálního spínacího rozsahu. Tento efekt se dá zredukovat vložením měděného kroužku dovnitř pouzdra. Magnetické pole vnikne nejprve do měděné vložky, která má 40krát nižší odpor než ocel. Ke zvětšení ztrátového odporu rovněž dojde, ovšem tento odpor je 40krát menší. Zatlumení již není tak veliké a spínací vzdálenost je větší.

Pokud prostředí dovoluje použití mosazného pouzdra (chromované), měděná vložka se v takovýchto případech nepoužívá.

Pokud je možno použít tzv. nevstavné provedení senzoru, kdy je snímací cívka nad kovovou úrovní, a kdy je cívkový systém umístěn v plastovém pouzdru, problém zatlumení odpadá. [6]

3.4 Elektronické zapojení

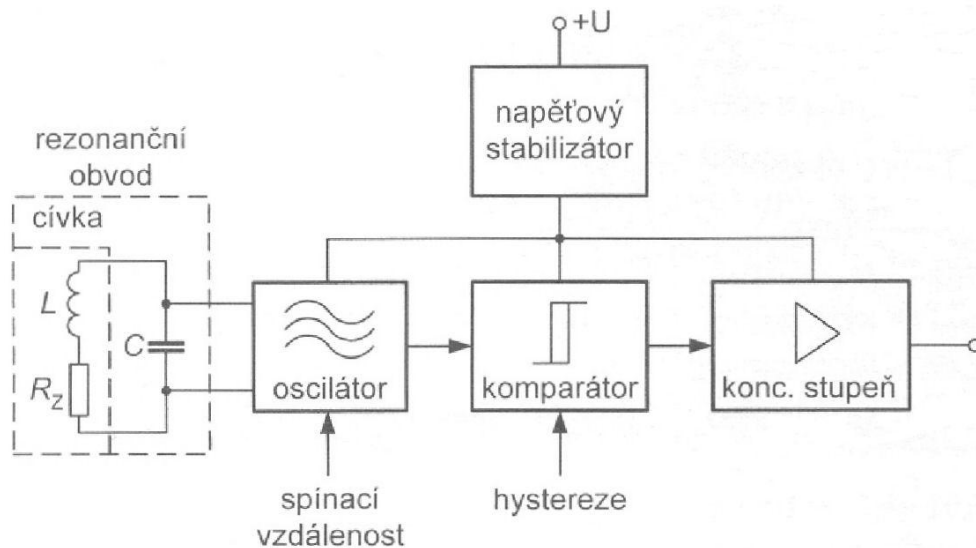
Cívkový systém senzoru přiblížení vytváří společně s kondenzátorem paralelní kmitavý obvod. Ve zjednodušeném náhradním schéma zapojení představuje L indukčnost cívky a $R_Z = R_e$ (Z) je ztrátový odpor cívky, který je funkcí vzdálenosti tlumicí clonky. Paralelní

kondenzátor je uvažován jako bezeztrátový. Ztrátový odpor R_Z ovlivňuje jako jediná proměnná činitel jakosti cívky Q , a v tomto případě i celého rezonančního obvodu.

Blokové schéma indukčního senzoru je znázorněno na Obr. 19. Rezonanční obvod je součástí oscilátoru a činitel jakosti

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R_Z} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R_Z} \quad (1)$$

určuje amplitudu vzniklých vf kmitů. S přibližující se clonkou klesá činitel jakosti vlivem zvyšujícího se ztrátového odporu R_Z a tím klesá amplituda kmitů. Když podkročí určitou nastavenou hodnotu, překlopí následující komparátor, čímž dojde k sepnutí nebo rozepnutí koncového stupně, dle provedení senzoru.



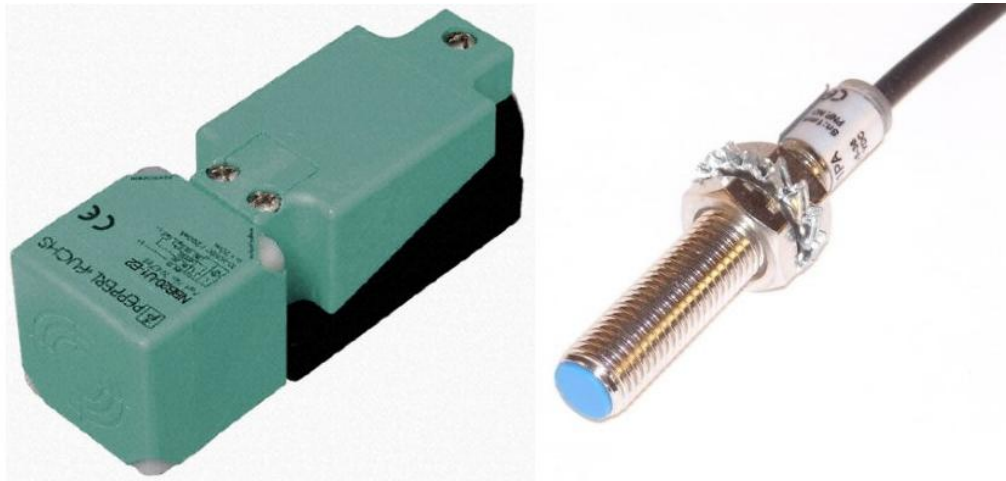
Obr. 19. Blokové schéma indukčního senzoru [6]

3.5 Druhy provedení

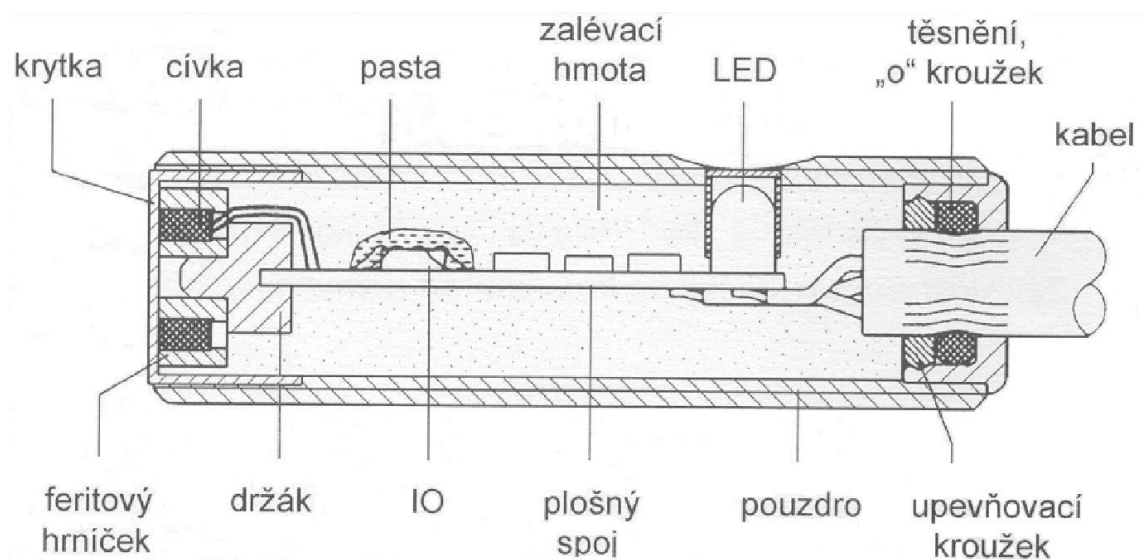
Základní konstrukční provedení senzoru přibližně představuje válcový tvar. Jedna čelní plocha válce je zároveň aktivní plochou snímače. Stejný plošný spoj s elektronikou se umísťuje i do kvádrového pouzdra (Obr. 20).

Válcové snímače mají pouzdro z plastu anebo z kovu. Kovová pouzdra jsou buď z chromované mosazi popřípadě z nerezoceli. Dále se rozlišuje provedení hladké a provedení se závitem. Na aktivní čelní ploše se nachází cívkový systém, chráněný plastovou krytkou. Dále následuje elektronický obvod umístěný na plošném spoji. Na konec plošného

spoje se umísťuje LED pro indikaci stavu sepnutí. Vzadu je pouzdro uzavřeno krytkou, již prochází přípojovací kabel. Celý vnitřní prostor je vyplněn zalévací hmotou (Obr. 21).



Obr. 20. Obvyklé tvary kvádrového a válcového senzoru [7] [8]



Obr. 21. Vnitřní uspořádání válcového senzoru [6]

Druhou dnes nejrozšířenější variantou je válcový tvar s konektorem. A třetí variantou, která se používá u kvádrového tvaru, je provedení se šroubovací svorkovnicí. Kabel prochází ucpávkovou vývodkou. Krychlovou hlavu senzoru je možno nastavit čelně nebo stranově. Při stranovém nastavení je k dispozici 8 poloh po 45°. Mimo jmenované tvary existuje ještě několik druhů pouzder. [6]

3.6 Rozhraní indukčních senzorů

Základní rozdělení binárních indukčních senzorů přiblížení z hlediska napájení je na stejnosměrné a na univerzální. Snímače mají dvou-, tří- nebo čtyřdrátové připojení. Výstup může být spínací, rozpínací nebo přepínací. Na straně senzoru realizuje rozhraní koncový stupeň. Ten je vazebním článkem mezi senzorem a zákaznickým rozhráním (relé, vstupní modul PLC (*Programmable Logic Controller*) apod.) a musí splňovat rozličné požadavky:

- napájení senzoru;
- vyhodnocení snímaného signálu;
- převod signálové úrovně a zesílení;
- potlačení rušení (filtr);
- optická indikace (LED (*Light Emitting Diode*));
- ochranu proti chybnému připojení;
- spínání různých zátěží včetně připojovacích kabelů.

Elektrická provedení:

Stejnosemné typy mají napájecí napětí 10 až 30 V, popřípadě 10 až 60 V. Typy univerzální pracují buď ve střídavém rozsahu 20 až 250 V nebo stejnosměrném rozsahu 10 až 300 V.

Poslední rozhraní, které dnes již nelze opomenout, je komunikační rozhraní Asi (*Actuator Sensor Interface*), které je pro přímé připojení binárních snímačů, co se týče komunikace, nejvhodnější. Sensory s tímto rozhráním také již na trhu existují.

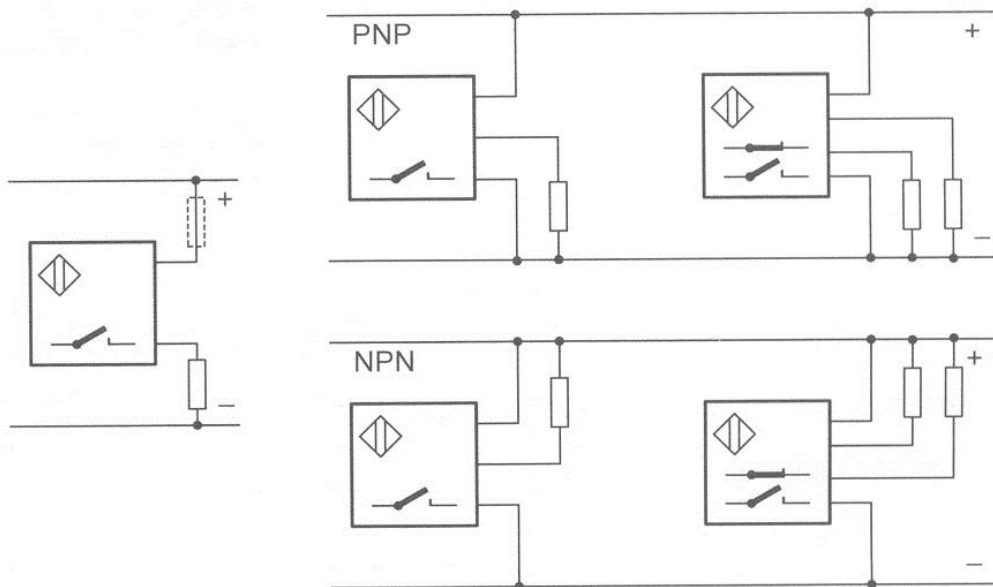
Stejnosemné senzory:

Stejnosemné senzory jsou k dispozici ve dvou-, tří-, nebo čtyřdrátovém provedení (Obr. 22).

Dvoudrátové senzory se samozřejmě připojují k zátěži sériově. Nejběžnější typové provedení nemá definovanou polaritu vodičů a chová se tudíž podobně jako mechanický kontakt. Aby snímač sám byl zásobován elektrickou energií, musí jim v rozepnutém stavu téci zbytkový proud. Podobně v otevřeném stavu není ideálně rozpojený a ponechává na sobě zbytkové napětí. S těmito hodnotami se musí počítat při výběru nebo kontrole vhodného zatě-

žovacího odporu, aby byly splněny hodnoty napěťových úrovní pro log („0“ a log „1“.

U typu s vyznačenou polaritou, který však má montážní omezení, jsou zbytkové hodnoty asi o 20 % nižší. [6]



Obr. 22. Připojení dvou-, tří- a čtyřdrátových senzorů [6]

4 METODY ZKOUŠENÍ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Cílem práce je rovněž zjištění přesnosti jednotlivých os navržené a zkonstruované CNC frézky. Aby naměřená přesnost stroje měla nějakou vypovídající hodnotu a byla srovnatelná s ostatními stroji, jsou metody zkoušení přesnosti obráběcích strojů normalizovány, a to normou ČSN ISO 230. Norma je určena pro stroje, které pracují buď bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění pomocí geometrických zkoušek nebo zkoušek obráběním.

ISO 230 se týká strojů se strojním pohonem, v ruce při práci nepřenosných, které mohou být použity pro obrábění kovů, dřeva atd. odběrem třísek nebo plastickou deformací.

Norma se vztahuje pouze na zkoušky přesnosti. Nezabývá se ani funkčními zkouškami stroje (vibrace, trhavé pohyby částí atd.), ani zjišťováním charakteristických parametrů (otáčky, posuvy), neboť tyto zkoušky mají být obvykle provedeny před zkouškami přesnosti.

Jestliže měřící metoda, která není v této normě popsána, může poskytnout stejné nebo lepší možnosti při měření vlastností, které mají být posuzovány, může být takováto metoda použita. [9]

4.1 Všeobecné poznámky

Definice týkající se geometrických zkoušek

Mají se rozlišit definice geometrické a definice použité v této části ISO 230, které jsou definicemi metrologickými.

Geometrické definice jsou abstraktní a vztahují se pouze na pomyslné čáry a plochy. Z toho vyplývá, že geometrické definice někdy nemohou být v praxi použity. Neberou ohled na skutečnosti výroby nebo na použitelnost geometrického ověření.

Metrologické definice jsou reálné, neboť berou ohled na skutečné čáry a plochy, přístupné pro měření. Zahrnují do jediného výsledku všechny mikro- i makrogeometrické úchyly. Dovolují dosáhnout výsledku, zahrnujícího všechny zdroje úchylek, bez jejich vzájemného rozlišení. Toto rozlišení by mělo být ponecháno na výrobcí.

Přesto však v některých případech byly geometrické definice (např. definice obvodového házení, periodického axiálního pohybu atd.) v této části ISO 230 ponechány, a to proto, aby

byly odstraněny nejasnosti a vysvětlena použitá terminologie. Při popisu zkušebních metod, měřících přístrojů a tolerancí však byly za základ vzaty definice metrologické. [9]

4.2 Předmět normy ČSN ISO 230 - 2

Stanovením přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách se zabývá druhá část normy ISO 230. Přesně ČSN ISO 230 – 2, kde jsou specifikovány metody zkoušek a vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v osách číslicově řízených strojů přímým měřením v jednotlivých osách. Metody je možno použít jak na lineární osy, tak na otočné osy. V této práci byla použita verze vydaná v srpnu 2010.

4.2.1 Zkoušený stroj

Stroj musí být kompletně smontován a plně funkční. Před začátkem měření přesnosti a opakovatelnosti musí být uspokojivě dokončeno nutné vyrovnaní stroje na základě a geometrické zkoušky.

Všechna měření musí být provedena na nezatíženém stroji, tj. bez obrobku.

Polohy saní nebo pohyblivých součástí v osách, ve kterých se neměří, musí být uvedeny ve zkušebním protokolu. [10]

4.2.2 Ohřátí stroje

Aby byl stroj měřen za normálních pracovních podmínek, musí měření předcházet vhodný ohřívací postup, specifikovaný dodavatelem/výrobcem stroje nebo dohodnutý mezi dodavatelem/výrobcem a uživatelem.

Pokud nejsou podmínky specifikovány, ohřívací postup smí mít omezené „přípravné pohyby“ pouze na takové, které jsou nutné pro seřízení měřícího zařízení. Ohřívací postup musí být uveden ve zkušebním protokolu.

Nestabilní teplotní podmínky se projeví jako řízený nárůst úchylek mezi následnými najetími do určité zadané polohy. Tyto trendy by měly být ohřevem stroje minimalizovány. [10]

4.2.3 Program zkoušky

Stroj musí být naprogramován tak, aby se nastavovaná část pohybovala podél nebo okolo osy do řady zadaných poloh, ve kterých vždy zůstane v klidu dostatečně dlouho, aby mohla

být skutečná polohy dosažena, změřena a zaznamenána. Stroj musí být programován tak, aby se pohyb mezi zadanými polohami vykonával dohodnutou rychlostí.

V případech, kdy souřadnice každé zadané polohy může být zvolena zcela libovolně, musí se použít všeobecný vzorec

$$P_i = (i - 1)p + r \quad (2)$$

kde

i je číslo uvažované zadané polohy;

p jmenovitý interval, zajišťující rovnoměrné rozložení zadaných poloh v měřeném rozsahu;

r náhodné číslo v \pm amplitudě možné periodické chyby (jako jsou například chyby způsobené stoupáním kuličkového šroubu nebo roztečí rysek lineárních nebo kruhových měřidel) což umožňuje, aby periodické chyby byly dostačujícím způsobem indikovány a kde, jestliže žádná informace o možné periodické chybě není dostupná, pak r bude v rozmezí $\pm 30\%$ hodnoty p .

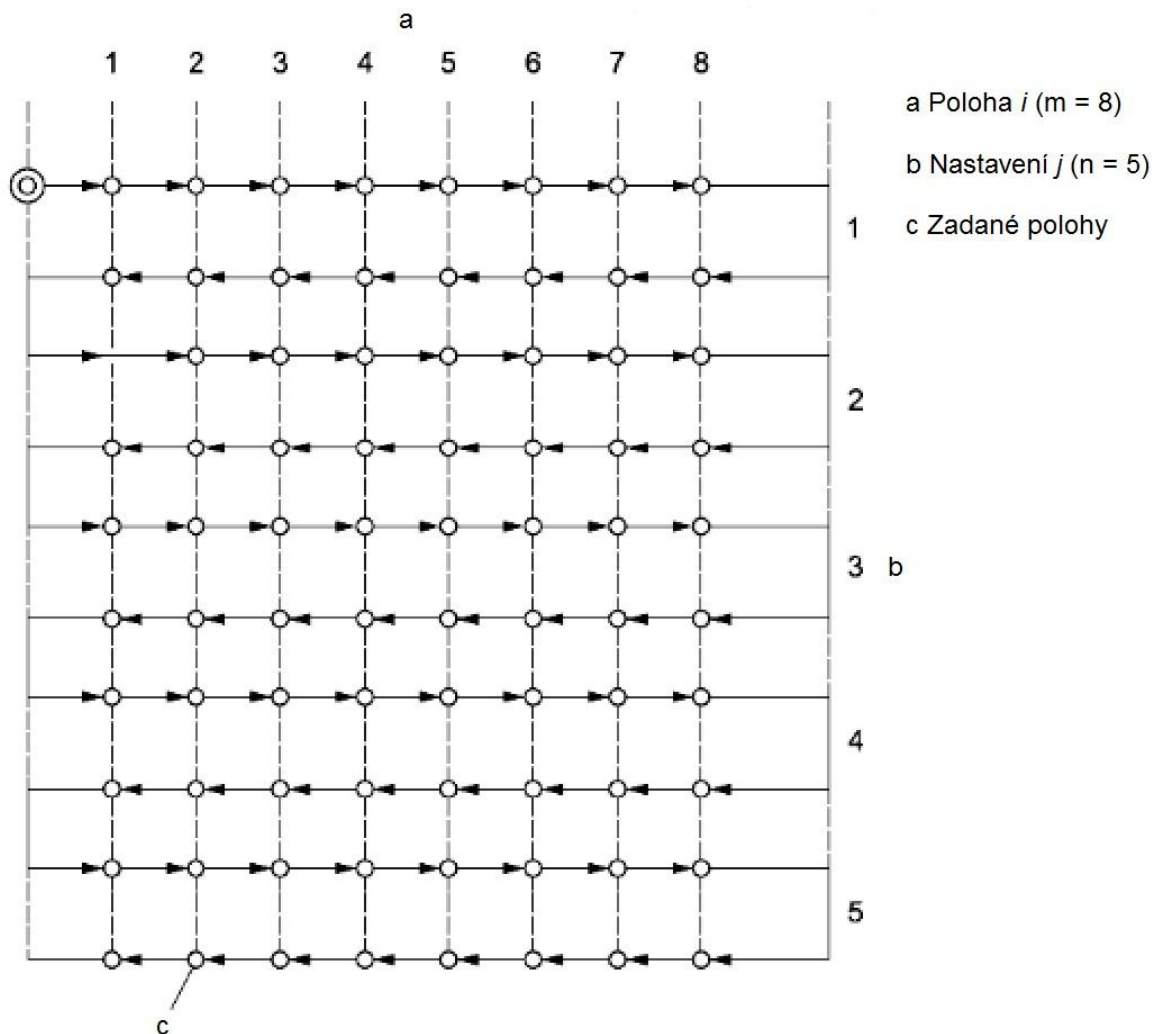
Uspořádání měření musí být navrženo tak, aby byla měřena změna relativní polohy mezi částí nesoucí nástroj a částí nesoucí obrobek ve směru pohybu v měřené ose. Poloha měřicího zařízení musí být uvedena ve zkušebním protokolu. [10]

Zkoušky v lineárních osách do 2 000 mm

V osách stroje s rozsahem dráhy do 2 000 mm musí být zvoleno minimálně pět poloh na metr a minimálně pět poloh celkově v souladu s problematikou volby zadané polohy.

Měření musí být provedeno ve všech zadaných polohách při použití běžného zkušebního cyklu (Obr. 23). Do každé zadané polohy musí být v obou směrech pohybu najeto pětkrát.

Poloha pro změnu směru pohybu by měla být zvolena tak, aby bylo možné normální chování stroje (aby bylo dosaženo dohodnuté rychlosti posuvu). [10]



Obr. 23. Běžný zkušební cyklus [10]

4.3 Zkoušení obráběním

Zkoušky obráběním musí být prováděny na normalizovaných zkušebních obrobcích nebo na obrobcích dodaných uživatelem. Provedení těchto zkoušek obráběním nesmí vyžadovat jiné operace než ty, pro které byl stroj vyroben. Zkoušky obráběním musí zahrnovat dokončovací operace, pro které byl stroj konstruován.

Počet zkušebních obrobků nebo případně počet řezů (třísek), provedených na určitém zkušebním obrobku, musí být takový, aby bylo možno zjistit jmenovitou přesnost. Je-li nutno, má být uvažováno opotřebení použitého nástroje.

Pokud ještě neexistuje specifikace ISO, musí být vlastnosti zkušebních obrobků, jejich materiál, rozměry a přesnost, které má být dosaženo a řezné podmínky určeny dohodou mezi výrobcem a uživatelem.

Kontrola zkušebních obrobků při zkouškách obráběním musí být provedena měřidly, vybranými pro daný způsob měření a požadovanou přesnost. [9]

4.4 Geometrické zkoušky

Pro každou geometrickou zkoušku tvaru, polohy nebo změny polohy čar nebo ploch stroje, jako je:

- přímost,
- rovinnost,
- rovnoběžnost, shodnost vzdáleností a shodnost os,
- kolmost,
- otáčení,

je uvedena definice, metody měření a způsob určení tolerance.

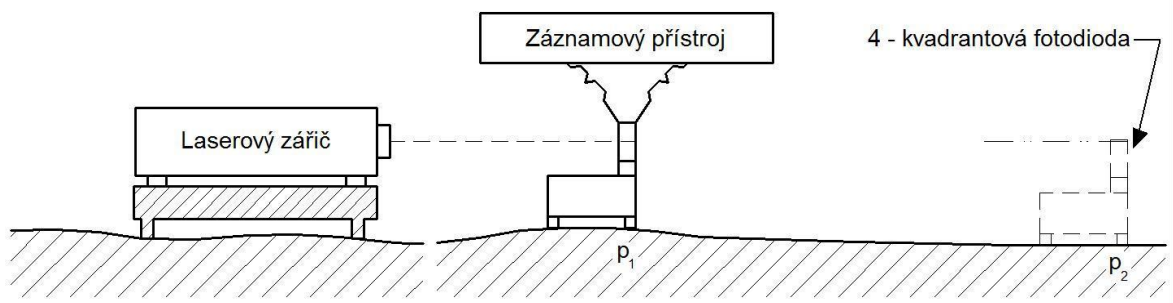
Pro každou zkoušku je vedena nejméně jedna metoda měření, a to pouze její základní pravidla a použitá měřidla. Jsou-li použity jiné metody měření, pak jejich přesnost musí být přinejmenším shodná s přesností metody podle části ISO 230.

Ačkoliv pro zachování jednoduchosti byly metody měření vybírány systematicky z těch, které používají pouze základní měřidla, jako pravítka, úhelníky, trny, měřicí válce, vodorovky a úchylkoměry, je nutno podotknout, že ve skutečnosti jsou při montáži a kontrole obráběcích strojů všeobecně používány i jiné metody, zejména metody, využívající optické přístroje. Měření částí obráběcích strojů velkých rozměrů často vyžaduje, pro usnadnění a zrychlení měření, použití speciálních zařízení. [9]

Metody měření přímosti

Metoda měření zaměřovacím laserem

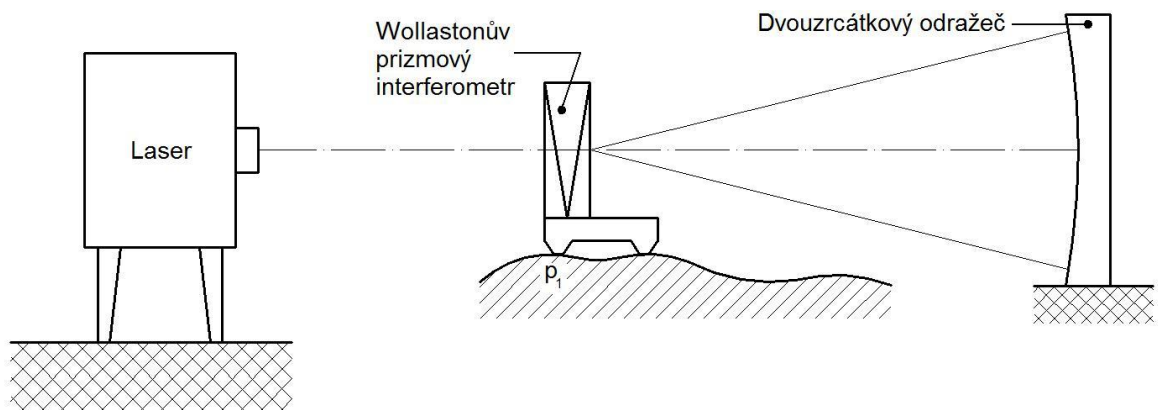
Jako základna měření je použit laserový paprsek. Paprsek je směřován na čtyř-kvadrantový fotodiodový detektor, kterým se pohybuje ve směru osy laserového paprsku. Jsou snímány a k záznamovému přístroji vedeny vodorovné a svislé úchylky středu detektoru vůči paprsku. Mají být vzaty v úvahu pokyny výrobce měřícího zařízení. [9]



Obr. 24. Metoda měření zaměřovacím laserem [9]

Laserinterferometrická metoda

Základnu měření určuje dvouzrcátkový odražeč.



Obr. 25. Laserinterferometrická metoda [9]

Laserinterferometr, spolu se speciální optickou výbavou, se používá pro zjištění změn polohy ohniska vůči ose symetrie dvouzrcátkového odražeče. Optická výbava a správné měřicí metody jsou různé a proto mají být vzaty v úvahu pokyny výrobce přístroje. [9]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO SNÍMÁNÍ OTÁČEK VŘETENA BEZKONTAKTNÍM ZPŮSOBEM

Při pokračujícím vývoji CNC frézky vyplynulo, že by bylo velice prospěšné mít přehled o aktuálních otáčkách vřetena během obráběcího procesu, tak aby mohly být dodržovány optimální rezné podmínky pro obráběné materiály. Při řešení otázky návrhu zařízení pro snímání otáček vřetena bezkontaktním způsobem byl problém rozdělen na několik základních částí, jež byly třeba vyřešit. A to navrhnout elektronickou konstrukci otáčkoměru, který by rovněž obsahoval zobrazovací jednotku pro snadné odečtení aktuálních otáček vřetena a následně zvolit vhodný snímač otáček, jenž by byl spolehlivý a umožňoval snímat otáčky vřetena v plném rozsahu. Vzhledem k relativně vysokým otáčkám vřetena, které mohou být až 35 000 ot/min, bylo předem rozhodnuto o použití bezkontaktního způsobu snímání otáček. Kontaktní způsob snímání otáček vřetena byl vyloučen z důvodu obavy o nízké životnosti takovýchto snímačů. Navíc zde byl předpoklad obtížnější implementace snímače do sestavy vřetena.

5.1 Návrh elektronického schématu otáčkoměru

Sestavu elektronického snímání otáček vřetena lze rozdělit na dvě části. První částí je otáčkoměr, jenž zpracovává signál přicházející ze snímače otáček vřetena. Druhou částí je třímístný čítač pracující s informacemi získanými otáčkoměrem, který rovněž slouží jako zobrazovací jednotka naměřených údajů.

Při návrhu elektronického schématu snímače a zobrazovače otáček bylo vycházeno z ověřených elektronických modulů vyráběných firmou Jaromír Buček [11]. Elektronická schémata těchto modulů byla upravená tak, aby co nejvíce vyhovovala při použití měření otáček vřetena na dané CNC frézce. [12]

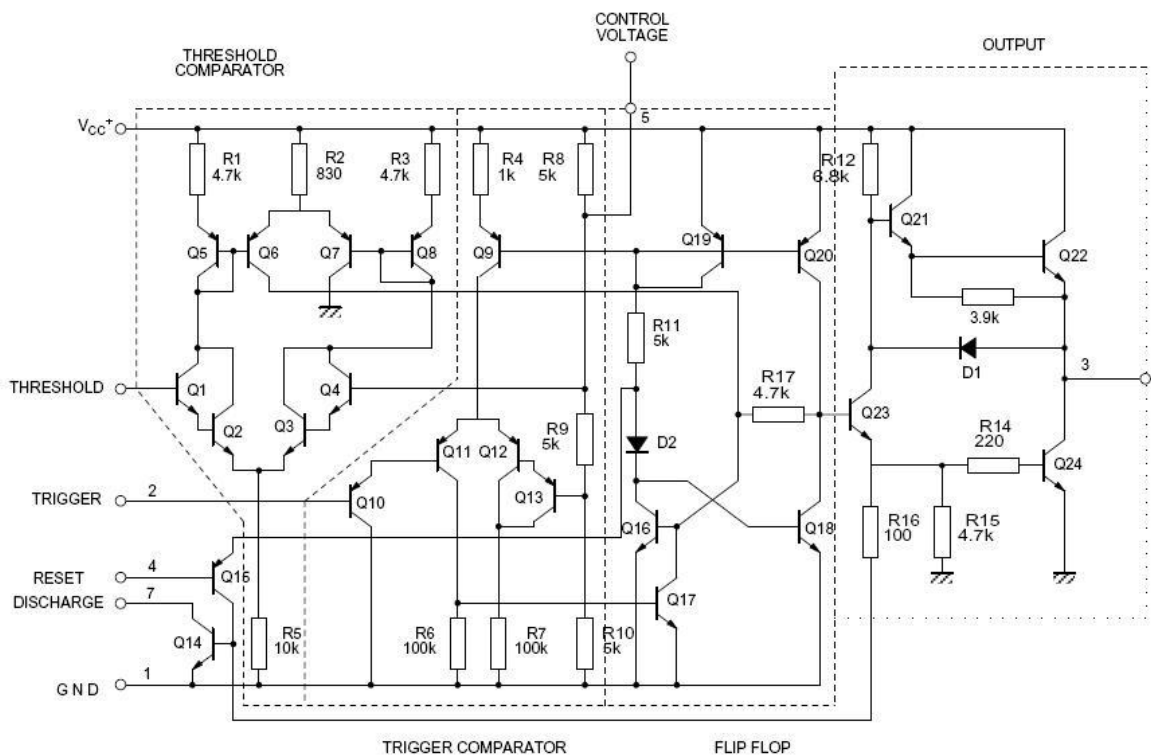
5.1.1 Otáčkoměr

Otáčkoměr zpracovává signál ze snímače a po jeho zpracování jej dále posílá do třímístného čítače. Elektronického zapojení dle firmy Jaromír Buček bylo využito z důvodů možnosti snímání otáček v rozsahu 0 – 99900 ot/min, kde rozsah otáček vřetena CNC frézky je 15000 – 35000 ot/min. Dalším důvodem použití toho zapojení, byla možnost použít široké spektrum snímačů otáček. To bylo velice důležité, jelikož nebylo dopředu známo, jaký

snímač bude vhodný pro snímání těchto relativně vysokých otáček. Vyhovující bylo i potřebné napájecí napětí, které činí min. 4,5 a max. 5,5 V. K dispozici bylo napájecí napětí až 12 V.

Otáčkoměr je postaven na integrovaném obvodu NE556. Ten obsahuje dva monolitické časovací obvody, které zaručují vysoce přesné časování, zpoždění nebo oscilaci. V provozním módu časového zpoždění je čas řízen jedním externím odporem a kondenzátorem. Elektrické impulzy ze snímače zpracovává jeden z časovačů, přesněji IO1B (*integrovaný obvod 1B*), který vytváří impulzy pravoúhlého průběhu, jež jsou následně zpracovávány v druhé části obvodu třímístného čítače. Druhý časovač IO1A vytváří vlastní časovou základnu pro obvod. Aktivní délka hradlovacího impulsu na výstupu, vývod č. 5, časovače IO1A je 0,6 s. Tato délka hradlovacího impulsu je dána kapacitou kondenzátoru C4, odporu rezistorů R5, R6 a odporového trimru R4.

Do třímístného čítače jsou posílány čtyři signály. CP0, což je sestupná hrana impulsu a CP1 je náběžná hrana impulsu. Dále EL, který po přepnutí na úroveň Log1 uchová okamžitý stav čítače zablokováním střadače a signál RES, který při přepnutí na úroveň Log1 vynuluje čítač a dojde k blokaci oscilátoru multiplexeru, čímž se rovněž deaktivuje display. [12]

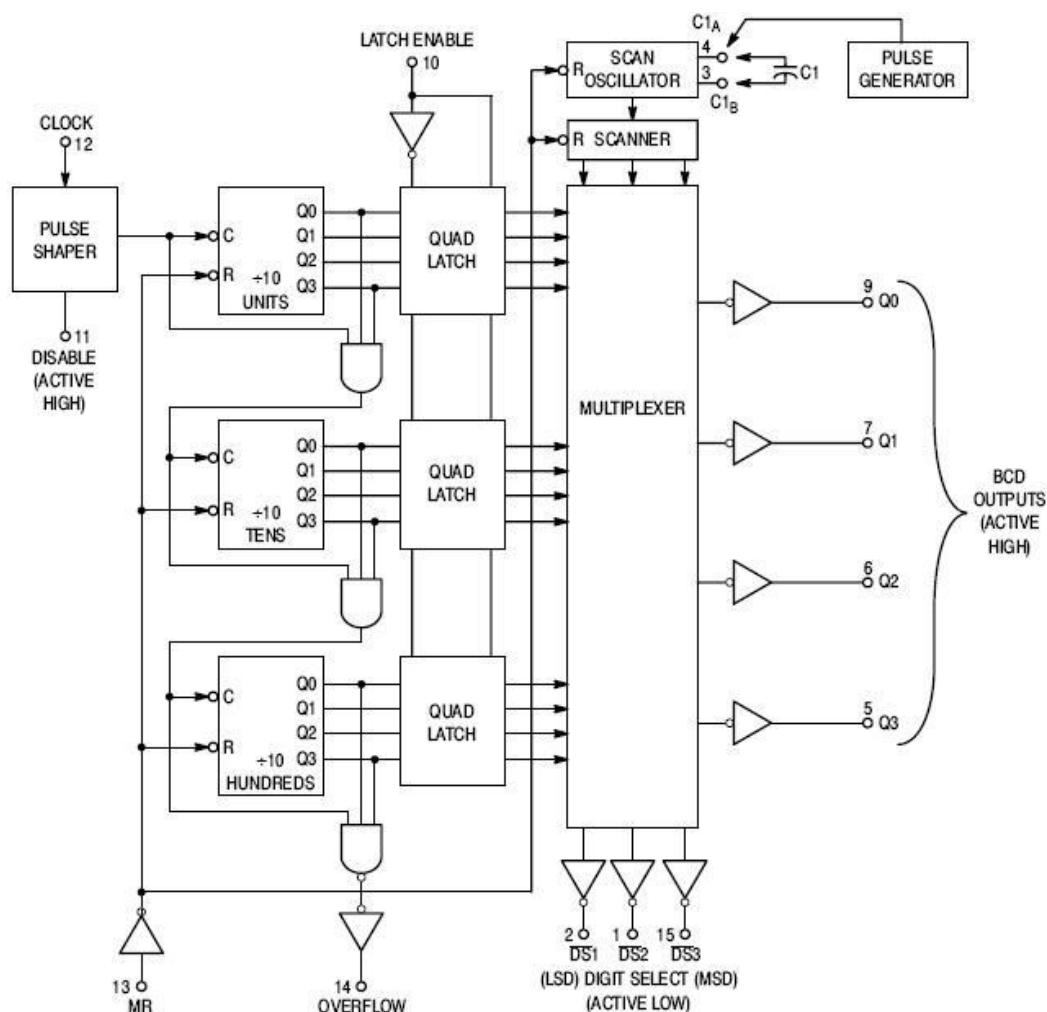


Obr. 26. Elektronické schéma integrovaného obvodu NE556 [13]

5.1.2 Třímístný čítač

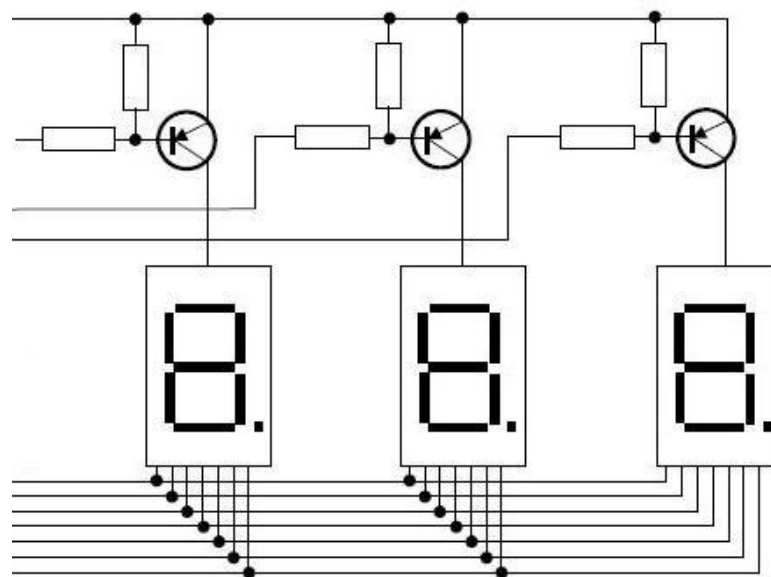
Třímístný čítač pracuje se signály z otáčkoměru, které následně zobrazuje na zobrazovací jednotce. Elektronického zapojení dle firmy Jaromír Buček bylo využito z důvodů kompatibility se systémem otáčkoměru. Rovněž vyhovovalo napájecí napětí obvodu, které je stejné jako u otáčkoměru 5V.

Srdcem třímístného čítače je integrovaný obvod IO1 - 4553, který obsahuje tři synchronní čítače BCD (*Binary Coded Decimal*), tři čtyřbitové střadače, multiplexer s vlastním oscilátorem a výstupní obvody. Na vstupy obvodu jsou přivedeny signály z otáčkoměru. CP0, CP1, EL a RES. Výstup přenosu TC je v úrovni Log1 při stavu čítače 999, jinak je v Log0, lze jej tedy použít ke kaskádovému řazení dalších obvodů, popřípadě k vizualizaci přetečení. Kmitočet vnitřního oscilátoru multiplexeru je nastaven kapacitou externího kondenzátoru C2. [12]



Obr. 27. Elektronické schéma integrovaného obvodu 4553 [14]

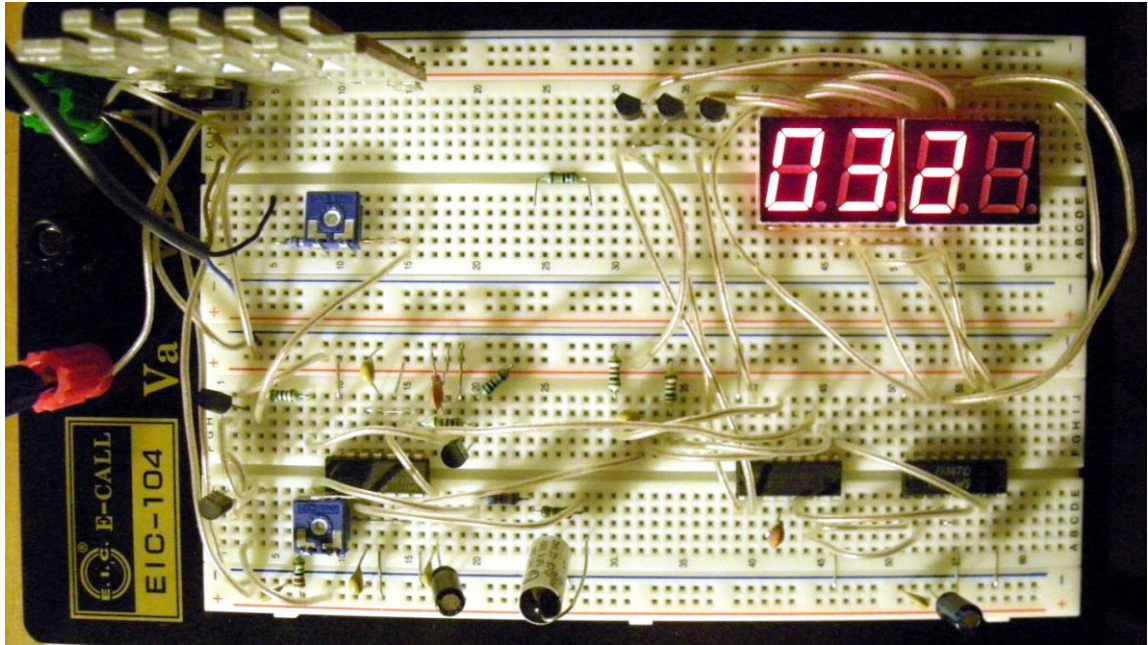
Integrovaný obvod IO2 – D347 se stará o vizualizaci naměřených dat. Je to dekodér a proudový budič sedmissegmentového displeje. Displeje pracují v multiplexním režimu, kde jejich společné anody jsou spínány tranzistory T1, T2, T3. Multiplexní provoz je založen na nedokonalosti lidského oka. Displej vlastně nesvítí, ale velice rychle bliká. Integrovaný obvod IO2 – D347 nejprve rozsvítí potřebné segmenty na displeji prvním, následně na druhém a nakonec na třetím, přičemž se celý cyklus opakuje mnohokrát za sekundu tak, aby se člověku zdálo, že číslice kontinuálně svítí. Tento systém je velice výhodný z pohledu úspory vývodů integrovaných obvodů. [12]



Obr. 28. Multiplexní režim zobrazovací jednotky [12]

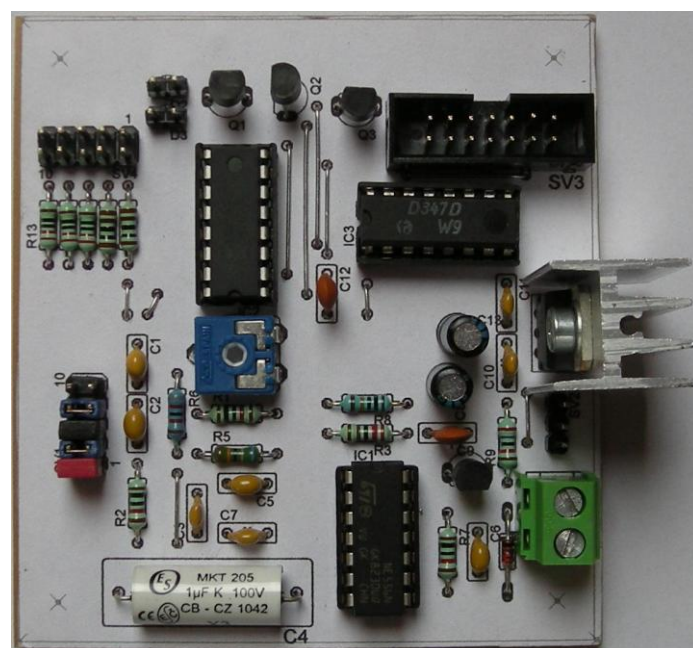
5.1.3 Návrh elektronického schématu

K návrhu elektronického schématu byl využit software EAGLE 5.6 v demo verzi. Tato verze je omezená maximální velikostí desky plošného spoje, která je ovšem pro tento návrh dostačující. V EAGLEu bylo vytvořeno jak elektronické schéma, tak návrh desky plošného spoje. Po dokončení návrhu elektronického schématu byl obvod postaven na nepájitelném kontaktním poli a odzkoušen. Základní návrh otáčkoměru byl postaven na napájecí napětí 5V, ovšem při testování vyplynula potřeba obvod napájet 12V, které vyžadoval snímač otáček. Elektronické schéma tedy bylo upraveno pro napájení 12V. Po odzkoušení upraveného schématu již vše bylo v pořádku. [12]



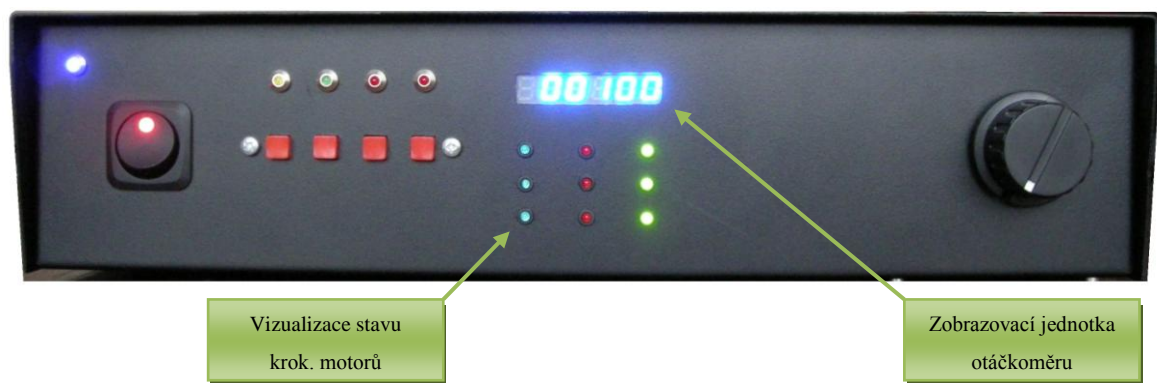
Obr. 29. Sestavený obvod na nepájivém kontaktním poli [12]

Následujícím krokem byl návrh plošného spoje. Při návrhu byl kladen důraz na velikost DPS (*Deska plošného spoje*) s možností připojení všech vnějších vodičů bez nutnosti pájení. Výsledkem byla jednostranná DPS o rozměrech 80x74 mm. Pro možnost testování, popřípadě připojení dalších obvodů, jsou signály CP0, CP1, EL a RES přerušitelné vyjmutím propojovacího jumperů na konektoru SV1. Signál TC je rovněž vyveden, lze jím například kaskádově zapojit další integrovaný obvod 4553N a rozšířit tak rozsah měřených otáček.



Obr. 30. DPS otáčkoměru [12]

Konektor SV2 je určen k připojení senzoru měřícího otáčky vřetene CNC frézky. Konektorem SV3 se propojuje zobrazovací jednotka otáčkoměru. K zobrazení naměřených hodnot byl zvolen modrý sedmissegmentový LED displej se společnou anodou. Pro dobrou čitelnost i v přímém svitu slunce na displej byl použit vysoce svítivý typ. Na konektoru SV4 jsou vyvedeny desetinné tečky z displeje a také dvě LED pro možnou indikaci rozsahu měřených otáček nebo přetečení integrovaného obvodu 4553N. Tyto funkce zatím nebylo třeba aktivovat. [12]



Obr. 31. Přední panel přístrojové krabice

5.2 Snímač otáček vřetena

Po sestavení elektronické části otáčkoměru, bylo potřeba vybrat vhodný snímač otáček vřetena. Snímač musel splňovat následující podmínky. Měl být schopen snímat otáčky v plném rozsahu vřetena, čili do 35 000 ot/min a byla požadována snadná montáž do sestavy vřetena CNC frézky. Implementace do sestavy vřetena také neměla bránit možnému budoucímu zakrytování vřetena.

5.2.1 Výběr vhodného typu snímače

Jako první byl testován fotoelektrický snímač skládající se z IR (*Infrared Emitting*) diody, která vysílala infračervený paprsek, jež se odrazil od kotoučku na spojce vřetene. Odražený infračervený paprsek snímal fototranzistor. Měřící impuls se získal vytvořením černého pruhu na kotoučku. Od nezačerněné plochy kotoučku se paprsek odrazil do fototranzistoru, byl tedy v Log1, ovšem na černé plošce se paprsek neodrazil a fototranzistor se přepnul na Log0, což elektronika otáčkoměru vyhodnotila jako impuls. Velkou výhodou tohoto řešení byla pořizovací cena, která se pohybuje v desítkách korun. Byla zde ovšem i velká nevýhoda, kvůli které nebylo tohoto systému snímání otáček využito. Při obrábění docházelo

k usedání třísek na IR diodu, fototranzistor i na snímací kotouček, což vedlo ke značnému snížení schopnosti správně odečítat otáčky vřetena.

Druhá varianta spočívala v použití indukčního senzoru. Oproti fotoelektrickému snímači je tato varianta mnohonásobně dražší, ovšem na kvalitu snímání nemají vliv usazené třísky a díky tvaru pouzdra senzoru byla montáž velice jednoduchá, protože pouzdro je opatřeno metrickým závitem. Montáž spočívala v protažení senzoru kotvícím profilem a zajištěním jej maticemi. Lze tak rovněž snadno regulovat vzdálenost senzoru od měřícího kotoučku. [12]

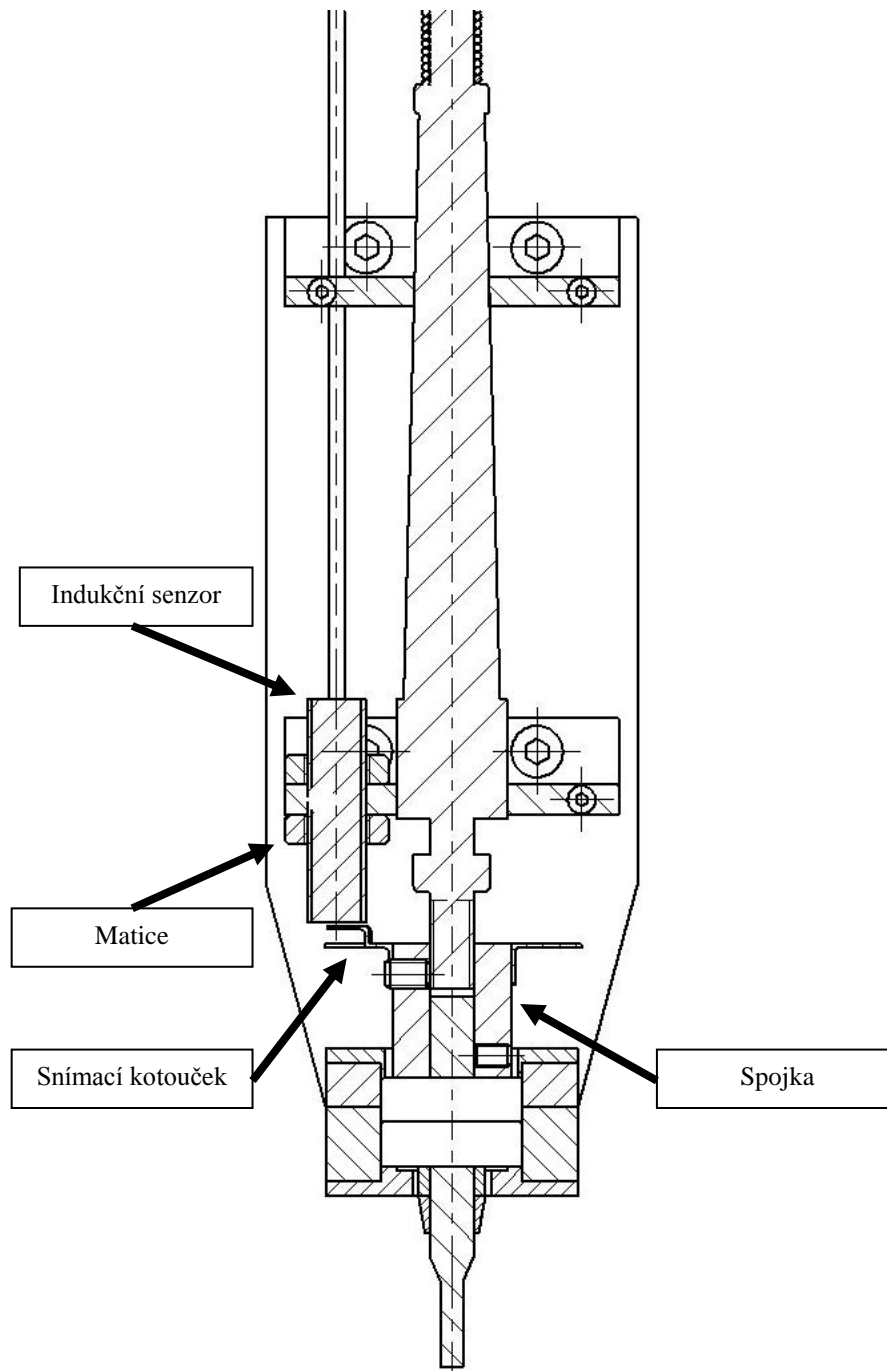


Obr. 32. Indukční senzor [17]

Induktivní senzor se skládá z LC rezonančního obvodu, vyhodnocení signálu a zesilovače. Cívka LC rezonančního obvodu vytváří vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Toto pole vychází z aktivní plochy senzoru. Přiblíží-li se kovový objekt k aktivní ploše, dojde k zatlumení LC obvodu, které zesilovač vyhodnotí jako změnu a jeho koncový stupeň přepne stav výstupu. [18]

5.2.2 Konstrukční řešení snímače otáček vřetena

Otáčky vřetena jsou snímány na snímacím kotoučku indukčním senzorem. Kotouček je připevněn ke spojce obráběcího nástroje s pohonem. Na kotoučku je vytvarován zub, kterým jsou vytvářeny impulzy v indukčním senzoru. Jelikož je zde jeden zub, jedné otáčky odpovídá jeden impuls. Snímací kotouček je vyroben z ocelového plechu, protože má nejmenší korekční faktor vzdálenosti snímaného předmětu od senzoru. Korekční faktor udává nutné snížení vzdálenosti pro snímání předmět, který není vyroben z Fe. Samotný indukční senzor je protažen otvorem vytvořeným ve spodním kotvícím profilu. Vzdálenost spínacího zubu na snímacím kotoučku od snímacího čela indukčního senzoru byla nastavena cca na 1 mm, tak aby bylo zaručeno spolehlivé snímání i při vysokých otáčkách vřetena. Tato vzdálenost byla zafixována zajištěním matic z každé strany kotvícího profilu.



Obr. 33. Montáž indukčního senzoru

6 AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ OTÁČEK VŘETENA

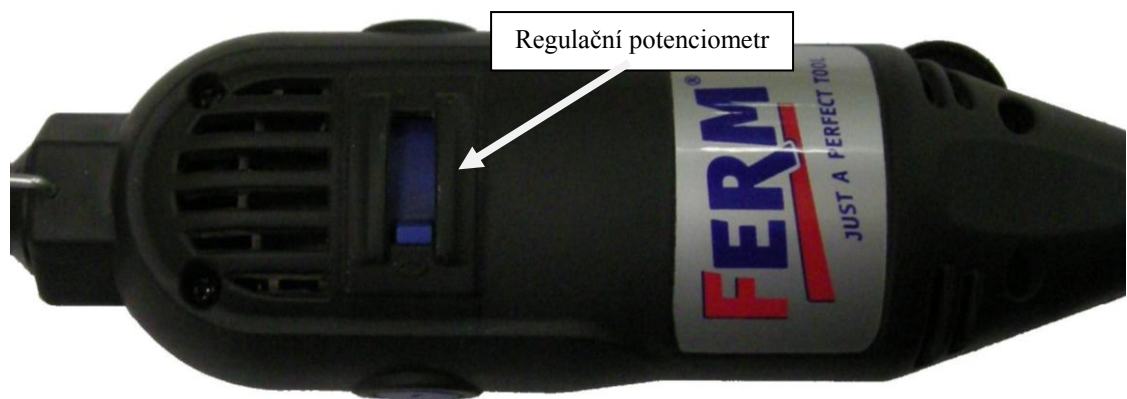
Ve fázi, kdy byla konstrukce otáčkoměru hotová a byla ověřena jeho funkčnost, mohlo se přistoupit k další části vývoje směřujícího k plně automatickému řízení otáček vřetena. Pod pojmem plně automatické řízení otáček vřetena bylo myšleno, že řídicí software Mach3 plně převezme kontrolu nad funkcemi vřetena. To znamenalo, že dle daného CNC programu by se mělo vřeteno automaticky aktivovat a deaktivovat podle příkazů v CNC programu a rovněž by se měly automaticky nastavovat a udržovat dané otáčky opět dle příkazů v CNC programu.

Tento úkol byl rozdělen na několik základních částí, které musely být postupně plněny tak, aby celý řetězec jednotlivých prvků nakonec vytvořil funkční celek s požadovanými vlastnostmi. Tyto základní části byly stanoveny na vyřešení otázky regulace otáček vřetena z pohledu návrhu elektroniky, jenž by byla schopna regulovat otáčky použitého elektromotoru pohánějícího vřeteno. V další části bylo třeba navrhnout elektronický obvod s funkcí nahrazující dosavadní manuální otočný potenciometr regulátoru otáček vřetena. Po tomto obvodu byla zároveň vyžadována schopnost propojení s řídicím PC, který by výstupním signálem z LPT (*Line Print Terminal*) portu reguloval otáčky elektromotoru pohonu vřetena. K plně automatickému řízení otáček vřetena musí mít řídicí PC k dispozici zpětnou vazbu o aktuálních otáčkách vřetena. Řídicí PC, respektive software Mach3, by následně porovnával hodnotu požadovaných otáček vřetena s reálnými aktuálními otáčkami a dle rozdílů těchto hodnot by prováděl samotné řízení. Z důvodu nenavýšování nákladů na zařízení induktivního snímače určeného pouze pro zpětnou vazbu, měl být využit již zabudovaný senzor určen pro otáčkoměr frézky. Po dokončení těchto technických prvků bude potřeba doladit automatické řízení otáček vřetena i po softwarové stránce.

6.1 Regulátor otáček elektromotoru pro pohon vřetena

Výběru vhodného regulátoru otáček pohonu vřetena předcházelo prostudování principu, jakým dochází k samotné regulaci otáček elektromotoru. Existuje několik typů systému regulace otáček elektromotorů, ovšem bylo potřeba zvolit vhodný systém regulace pro daný elektromotor vřetena. Nabízelo se několik možností řešení tohoto problému. Například využití vestavěného regulátoru otáček přímo v pohonu vřetena.

Regulace zde probíhá pomocí triaku, jenž vytváří fázový posuv mezi napětím a proudem. Samotné otáčky se nastavují lineárním potenciometrem, kde v příslušné koncové poloze je zároveň integrovaná funkce odpojení přívodu elektrické energie. Návrh zněl, že by pomocí pohybového šroubu poháněného krokovým motorem docházelo k přestavování potenciometru, čímž by se nastavovaly otáčky elektromotoru. Závitem v táhlu potenciometru by byla vytvořena matice pohybového šroubu. Z tohoto návrhu nakonec bylo upuštěno, jelikož montáž takového mechanismu by byla velice obtížná z důvodu tvarové složitosti krytu elektromotoru. Rovněž zde panovaly obavy z nízké životnosti odporové dráhy potenciometru. Vlivem tření dochází k opotřebení této dráhy, čímž se stává potenciometr nespolehlivý.



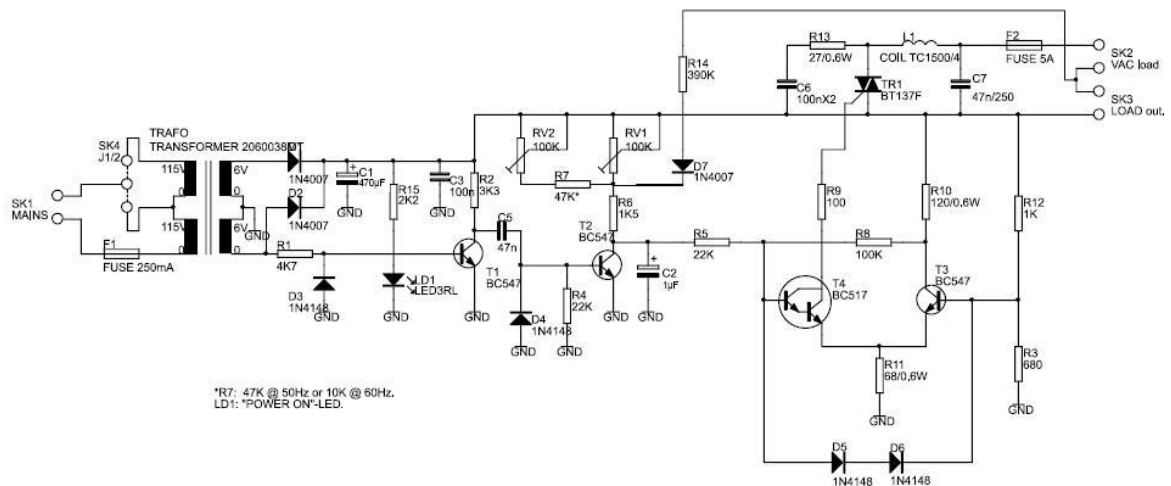
Obr. 34. Vestavěný regulátor otáček pohonu vřetena

Nový návrh se zabýval zkonstruováním jednoduchého regulátoru otáček určeného pro daný typ elektromotoru. Elektronické schéma tohoto obvodu pocházelo z webu [24]. Tento obvod pracoval na obdobném principu jako vestavěný regulátor v pohonu vřetena. Regulace otáček probíhala pomocí otočného potenciometru, v němž tkvěla výhodná možnost budoucího upnutí krokového motoru ke hřídeli potenciometru. Řízení krokového motoru by zajišťoval totožný obvod, jenž byl použit pro řízení os frézky. Po sestavení a odzkoušení tohoto obvodu se ale ukázalo, že při nižších otáčkách pohon vřetena značně ztrácí krouticí moment a dochází k "cukání" motoru, což bylo nepřijatelné. I tento návrh tedy nevyhověl požadavkům na jeho vlastnosti.

Tyto neúspěchy vedly k zakoupení již hotového modulu speciálně navrženého pro dané účely. Takovýto specializovaný modul vykazoval daleko lepší vlastnosti než zkonstruovaný jednoduchý typ. Ovšem díky těmto vlastnostem byly i pořizovací náklady tohoto modulu daleko vyšší než u předchozí konstrukce. Z několika možných variant se pro regulaci otáček vřetena CNC frézky jevil jako nejlepší Univerzální regulátor pro sériové elektromotory

K2636 vyráběný firmou VELLEMAN. Regulátor byl zvolen na základě jeho vlastností. Je navržen tak, aby při nízkých otáčkách nedocházelo ke ztrátě krouticího momentu. Ve srovnání s jinými moduly má tento rozsah řízení 5% - 95%. Modul rovněž obsahuje odrušení, triak je chráněn proti špičkám z indukční zátěže, řídicí obvod je napájen z napájení zátěže nebo z napětí odvozeného ze stejné fáze a výkonová část obvodu je oddělena od řídicí. Modul vyhovoval i po stránce výkonové, kde maximální proudová zátěž činí 5,5 A, což při napájecím napětí 230V znamená 1200W. Příkon elektromotoru včetně frézky činí 160W.

Nastavení žádané hodnoty otáček včetně CNC frézky je manuální a provádí se otočným potenciometrem vyvedeným na čelní panel přístrojové krabíčky. [12]



Obr. 35. Elektronické schéma regulátoru K2636 [15]

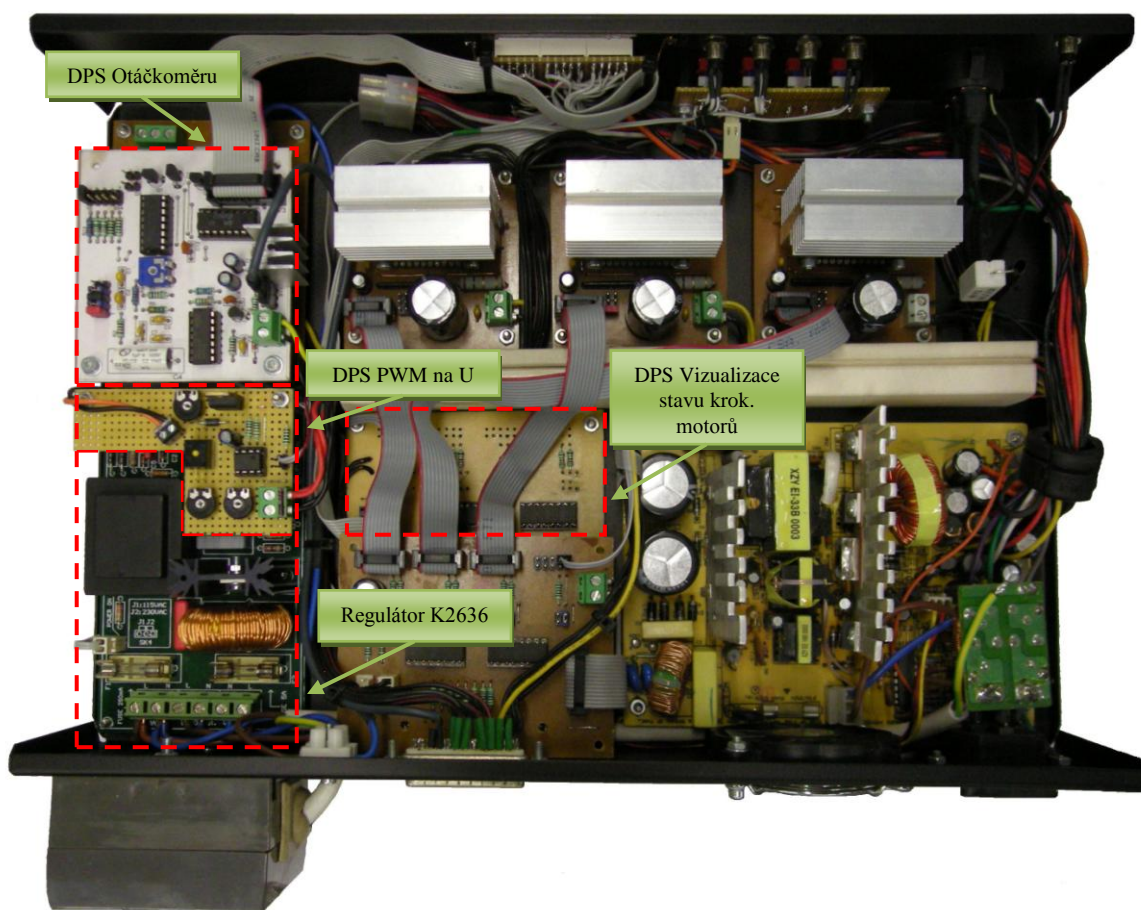
6.1.1 Popis funkce regulátoru

Oproti obyčejnému stmívači má tento obvod výhodu v zachování točivého momentu i při malých otáčkách. Toho je dosaženo zvláštním navržáním řídicích obvodů. Obyčejný stmívač reguluje jen v jedné půlperiodě pomocí fázového posuvu. Tak dostaneme pulzující 50Hz průběh, který značně zmenšuje točivý moment při nízkých otáčkách. Navrženým obvodem dostáváme v principu stejnosměrný motor, který má značný točivý moment. Řídicí obvod je napájen z transformátoru s vyvedeným středem vinutí. To umožňuje v tranzistoru T1 generovat obdélníkový signál ve fázi s napájením. Tento signál je přiveden na bázi T2 přes derivační RC člen. To znamená, že při každé náběžné hraně vede T2 dokud se nevybijí C2. To se opakuje každou periodu 50Hz signálu. C2 se nabíjí přes RV1, RV2, R6 a R7. Tyto odpory určují okamžik sepnutí. T3 a T4 jsou zapojeny jako Schmittův klopný

obvod, který spíná triak při napětí 3,5V na bázi T4. T4 pak vede až do konce periody. L1 a C1 slouží k potlačení rušení vznikajícího při sepnutí triaku. R13 a C6 slouží k ochraně triaku před špičkami z indukční zátěže. Pojistka F2 chrání triak před přetížením. [16]

6.1.2 Montáž do přístrojové krabice

Modul byl zamontován do přístrojové krabice a propojen s modulem DPS spínání motoru vřetene. Napájecí napětí regulace otáček je přerušeno přes relé na DPS spínání motoru vřetene, lze tak spínat pohon vřetena pomocí PC přímo v softwaru Mach3. Výstupní napájecí napětí z modulu regulace otáček je vyvedeno na přístrojovou zásuvku, čímž je umožněno jednoduché odpojení hnacího motoru vřetena pro snadnou manipulaci.



Obr. 36. Modul K2636 a modul otáčkoměru v sestavě řídicí elektroniky

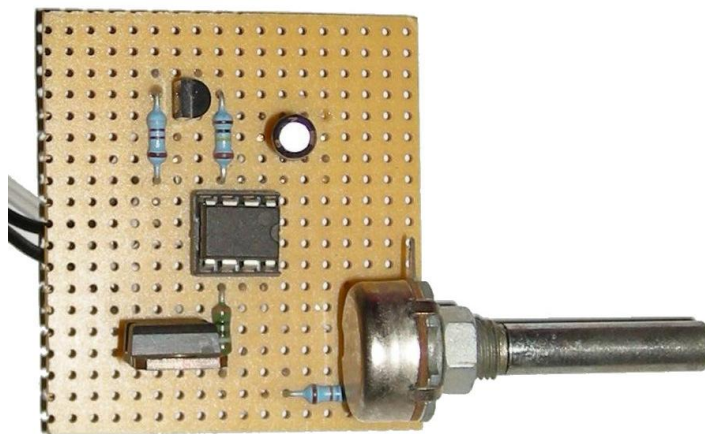
6.2 Návrh modulu pro elektronické řízení regulátoru otáček vřetena

Použitý Univerzální regulátor pro sériové elektromotory K2636 pracoval velice dobře a splnil všechny požadované vlastnosti na něj kladené. Nyní tedy bylo potřeba vyřešit otázku

propojení tohoto modulu s řídicím PC. To přineslo úkoly jako nahradit dosavadní manuální regulaci otáček vřetena prováděnou potenciometrem, jenž byl součástí regulátoru K2636, buď pomoci elektrického napětí, nebo proudu. Dále následoval úkol ve formě převedení výstupního signálu z LPT portu řídicího PC právě na napětí nebo proud, jelikož software Mach3 na výstupech generuje signál v podobě pulzně šířkové modulace PWM (*Pulse Width Modulation*) nebo pulzy Step/Dir. Po vyřešení těchto dílčích úkolů měl být navržen modul, spojující obě funkce, s možností zabudování jej do stávající přístrojové krabice s elektronikou.

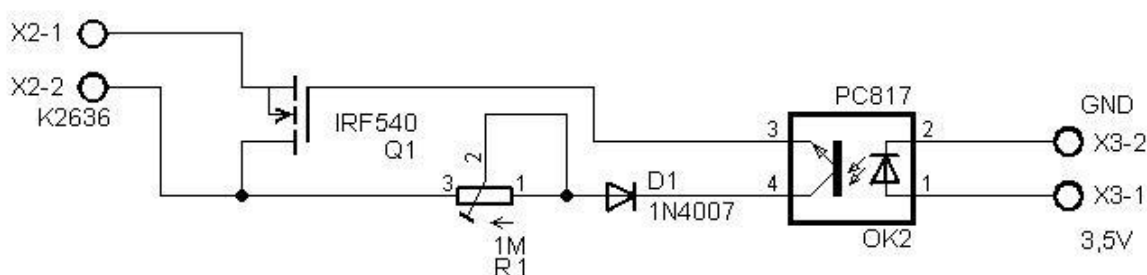
6.2.1 Úprava regulátoru K2636

Prvním krokem bylo prostudování elektronického schématu Univerzálního regulátoru pro sériové elektromotory K2636 a nalézt možná řešení úpravy modulu dle požadavků. Jako možné východisko nahrazení manuálního řízení otáček pomocí otočného potenciometru se ukázalo posílání impulzů na bázi NPN darlingtonova tranzistoru BC517. V elektronickém schématu k nalezení pod označením T4. Tento tranzistor má na starosti spínání regulačního triaku. Proběhla úprava modulu, kde na bázi BC517 byly pomocí zkonstruovaného generátoru pulzů (Obr. 37) posílány pulzy spínající triak. Čím více bylo generováno pulzů do tranzistoru BC517, tím rychleji se elektromotor otáčel. Ovšem motor již od 30 000 ot/min a nižších začal "cukat", což z funkčního hlediska nebylo přijatelné. Tento návrh tedy nevyhovoval. Problém nejspíš spočíval ve faktu, že tranzistor T4 a T3 pracují společně jako Schmittův klopný obvod, tudíž ke správnému fungování regulátoru K2636 by musely být řízeny oba tranzistory. Použitým způsobem podléhal řízení pouze tranzistor T4, čímž se ale ovládala jen jedna půlperioda napájecího napětí elektromotoru pohonu vřetena.



Obr. 37. Generátor pulzů

Následovalo hledání nové možnosti úpravy regulátoru otáček K2636. Tentokrát se možné úpravy ubíraly směrem na samotný regulační potenciometr. Měřením bylo zjištěno, že úbytek napětí na potenciometru činí 5 V, tedy že samotná regulace modulu K2636 je prováděna napětím v rozsahu 0 - 5 V, což bylo velice příznivé zjištění. Řešení problému se nyní ubíralo směrem nahrazení odporu regulačního potenciometru, 100 k Ω , elektronickým prvkem, s možností řídit jeho rezistivitu elektronickou cestou. Jako nejjednodušší řešení se naskýtal využít tranzistor, u kterého by se odpor mezi kolektorem a emitorem reguloval otevíráním a přivíráním tranzistoru bází. Prvně byl k tomuto účelu testován unipolární tranzistor IRF540N s N – kanálem založen na technologii MOSFET. Unipolární tranzistor byl zvolen proto, jelikož řízení jeho otevírání a zavírání se děje přes tzv. gate, který ovšem na rozdíl od bipolárních tranzistorů s bází, není nijak propojen s výkonovou částí obvodu. Naskýtaly se zde obavy o průniku síťového napětí na řídicí část tranzistoru, protože původní potenciometr tvořil tzv. napětěvou hráz a byl přímo v kontaktu s fází síťového napětí. Zapojení tranzistoru IRF540N proběhlo dle elektronického schématu (Obr. 38). Z bezpečnostních důvodů byl propojen s optočlenem. Ten tvoří fyzické oddělení elektronických obvodů, takže pokud by došlo k průniku síťového napětí na gate, přes optočlen by se nedostalo dál a nedošlo tak k možnému úrazu elektrickým proudem, popřípadě zničení obvodů nacházejících se za optočlenem. V elektronickém obvodu je navíc zařazena ochranná usměrňovací dioda 1N4007 před kolektorem tranzistoru optočlenu. Opět z obavy výskytu střídavého síťového napětí v obvodu.

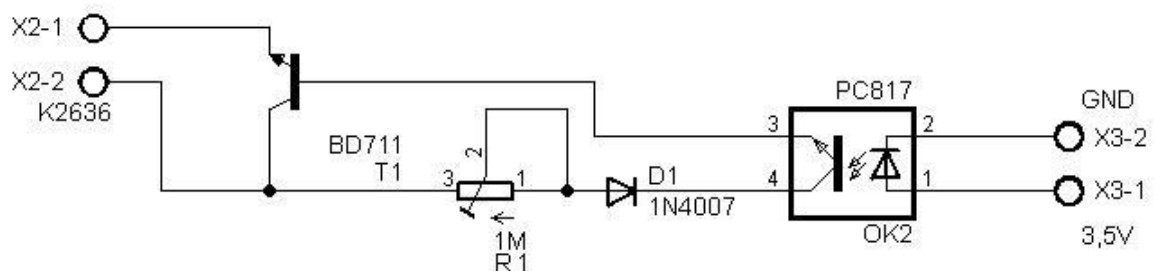


Obr. 38. Regulace pomocí IRF540N

Použití oddělovacího optočlenu bylo výhodné nejen kvůli bezpečnosti, ale rovněž umožňoval poměrně snadné řízení tranzistoru IRF540N, jelikož v optočlenu se nachází LED, kde její intenzitu svitu lze řídit napětím. Maximální napájecí napětí pro LED optočlenu se liší dle výrobce. Obecně lze říci, že se toto napětí pohybuje kolem 3,5 V. Funkce optočlenu spočívá v dopadu světla generovaného LEDkou na fototranzistor, jenž se tak otevře a dojde k sepnutí obvodu. Díky možnosti řídit intenzitu svitu LED, lze tak regulovat i velikost ote-

vření tranzistoru. Čím je intenzita svitu LED vyšší, tím více světla dopadá na fototranzistor a tím více se otevře. Stačilo tak na LED optočlenu připojit regulovatelný zdroj napětí s omezením napětí na 3,5 V. Funkce obvodu spočívala v řízení optočlenu, který díky regulaci intenzity svitu LED uzavíral fototranzistor, čímž reguloval napětí, které následně otevíralo přes gate tranzistor IRF540N. Ten byl implementován do modulu K2636 kde nahradil regulační otočný potenciometr. Pro umožnění doladění napětí otevírajícího tranzistor IRF540N, respektive citlivosti otevírání tranzistoru, byl před ochrannou diodu 1N4007 zařazen navíc trimr o odporu 1M Ω . Po sestavení obvodu následovalo jeho testování. Při napětí 1,5 V došlo k sepnutí regulátoru, kdy otáčky vřetena byly na maximálně možných. Při snižování napětí došlo jen k neparnému snížení otáček vřetena a následně k jeho úplnému zastavení. Tento jev byl přisuzován použitému regulačnímu tranzistoru IRF540N, který díky tomu že je postaven na technologii MOSFET, má velice malé okno umožňující řízení otevření tranzistoru. Takového malého napěťového rozlišení nebylo možno při dostupném vybavení dosáhnout.

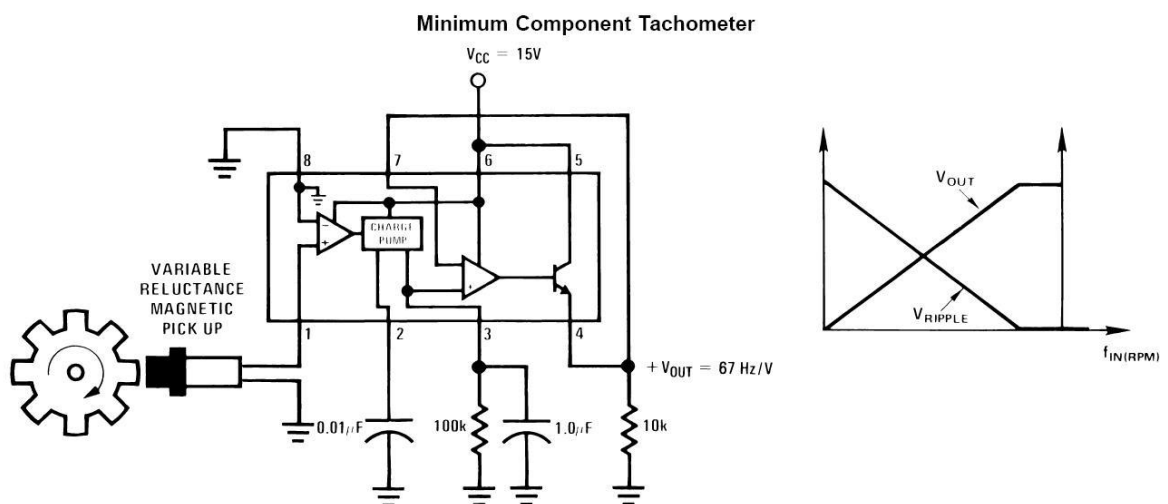
Široké regulační okno otevření tranzistoru nabízejí bipolární typy tranzistorů. Stávající unipolární tranzistor byl tedy nahrazen bipolárním výkonovým NPN tranzistorem BD711 dle elektronického schématu (Obr. 39). Po výměně tranzistoru následovalo ověření funkčnosti obvodu. Optočlen napájen z regulovatelného zdroje, kdy se napětí postupně zvyšovalo od nulové hodnoty, při napětí 1,5 V spustil elektromotor vřetena. Ovšem jeho chod vykazoval nestabilitu ve formě kolísání otáček. Ty byly ovšem v tomto momentě nižší než konstrukčně dovolené, čili 15 000 ot/min. Zvětšením napětí přivedeného na optočlen se otáčky dostaly nad hodnotu 15 000 ot/min, čímž nestabilita chodu elektromotoru vřetena ustala. Dalším nárůstem napětí na optočlenu se otáčky vřetena dostaly až na své maximum, 35 000 ot/min. V tomto bodě napájecí napětí optočlenu činilo 3,5 V. Po celou dobu elektromotor vřetena nevykazoval žádné nežádoucí jevy. Navržený obvod vyhověl a mohlo se navázat na jeho konstrukci.



Obr. 39. Regulace pomocí BD711

6.2.2 Návrh převodníku

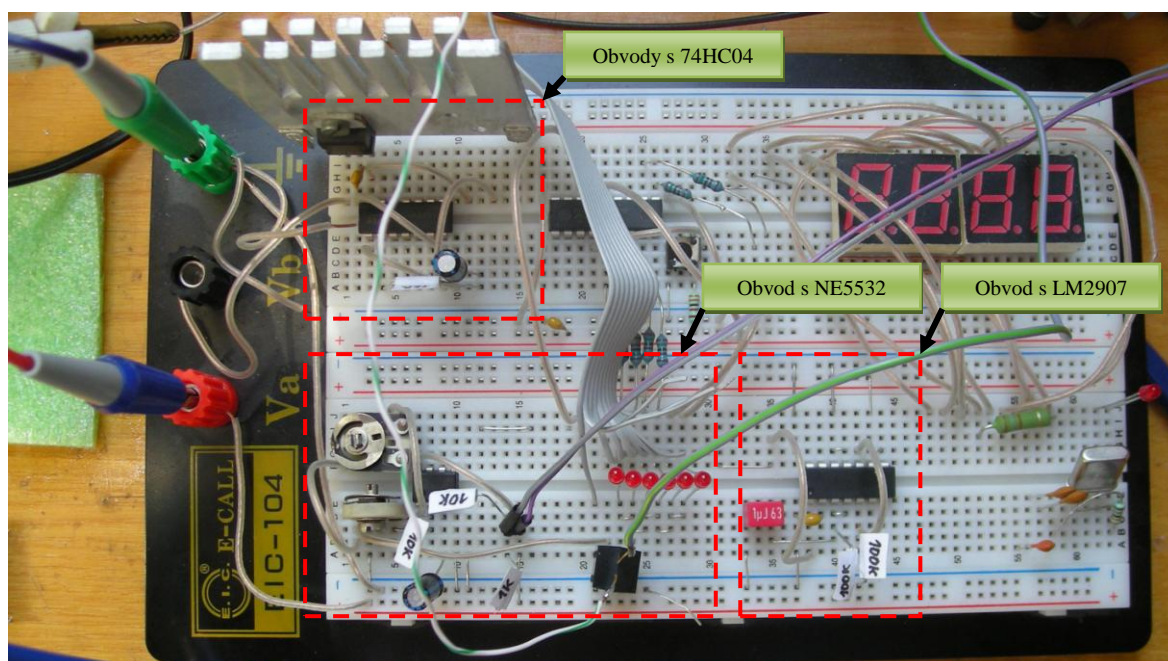
Nyní bylo potřeba navrhnout obvod zpracovávající pulzy z výstupu LPT portu řídicího PC a ty převést na spojitý napěťový signál pro optočlen. Zprvu bylo rozhodnuto o použití výstupního signálu z PC typu STEP/DIR, jelikož tento typ signálu byl použit i pro drivery krokových motorů os. Signál představuje pulzy, kde čím vyšší jsou zadány požadované otáčky, tím více pulzů za jednotku času je počítačem generováno. Pulzy mají konstantní napětí dané LPT portem, tedy 5 V. K převodu pulzů, což je frekvence, na konstantní napětí byl využit integrovaný obvod navržený přímo pro tyto účely LM2907. V datasheetu tohoto integrovaného obvodu bylo uvedené elektronické schéma zapojení pro tachometr s minimálním počtem komponent. Schéma bylo zajímavé z pohledu uvedeného grafu, kde obvod vykazuje lineární závislost mezi vstupní frekvencí a výstupním napětím, což je pro dané účely vyhovující vlastnost.



Obr. 40. Doporučené schéma zapojení LM2907 [20]

Pro rychlé sestavení obvodu bylo využito nepájivé kontaktní pole (Obr. 41). Výstupní pin číslo 4 IO LM2907 byl přes doladovací trimr o hodnotě odporu 1M Ω připojen k anodě optočlenu. Katoda optočlenu byla přivedena na společnou zem IO LM2907. Původní napájecí napětí IO 15 V uvedené v použitém elektronickém schématu bylo změněno na 5V. Tím se docílilo možnosti napájet obvod přímo z PC a propojit jej s pinem LPT portu generujícího pulzy. Díky tomuto nízkému napětí také hrozilo malé riziko poškození optočlenu přepětím. Následovalo odzkoušení zkonstruovaného obvodu s konfigurací softwaru Mach3 na systém řízení vřetena signálem STEP/DIR. Aktivaci motoru vřetena se rovněž spustilo generování pulzů na výstupu LPT. Asi po 5 sekundách nastal problém s kolísáním otáček

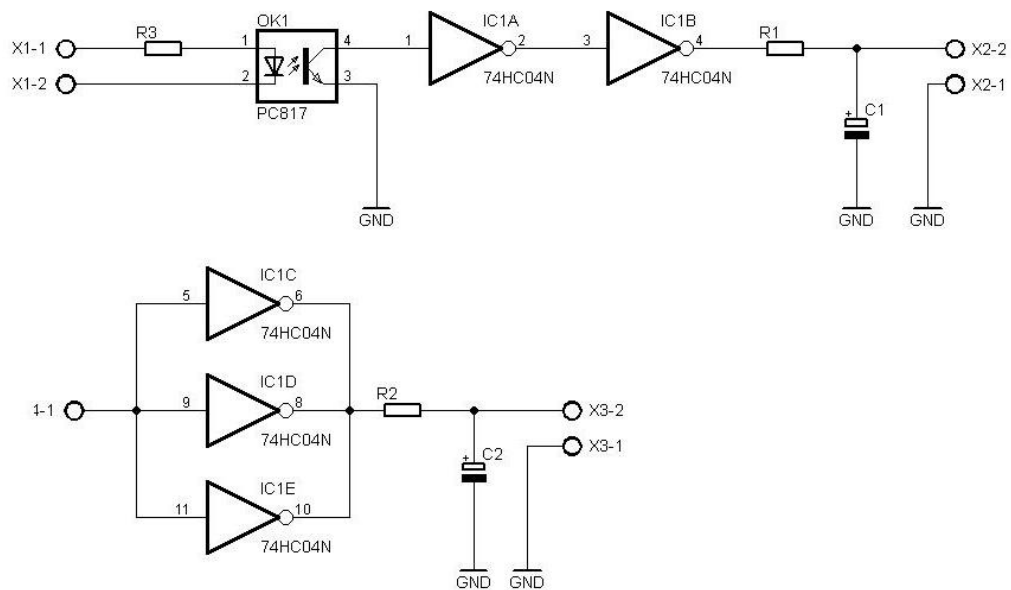
elektromotoru pohonu vřetena. O pár sekund později se otáčky ustálily, nicméně problém s jejich kolísáním se znovu a znovu opakoval v různých intervalech. Pátráním po příčinách tohoto kolísání otáček bylo pomocí čítače frekvence zjištěno, že problém je způsoben řídicím softwarem, který nedokáže pulzy o vysoké frekvenci spolehlivě generovat. Naskýtalo se kolísání eliminovat elektronickým obvodem, jenž by extrémní výchylinky frekvence vyskytující se v krátkém časovém horizontu odfiltroval. Ovšem návrh takového obvodu není jednoduchý, proto nejdříve bylo vyzkoušeno využití druhého typu řídicího signálu PWM.



Obr. 41. Sestavené testovací obvody na nepájivém kontaktním poli

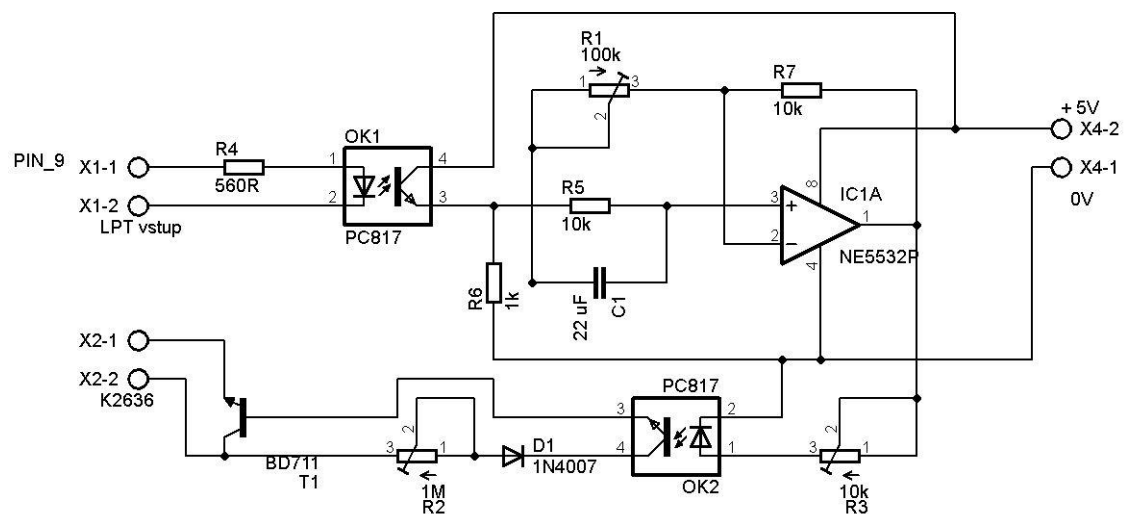
Signál PWM je ve své podstatě digitální signál, obdélníkového tvaru, kde procento doby, kdy je signál na úrovni H_i (*High – logická jednička*), představuje procentuálně požadovanou rychlost vzhledem k maximální rychlosti motoru. Pro optočlen ale bylo nutné opět vytvořit spojitý napěťový signál, tudíž musel být navrhnut převodník PWM signálu na spojitý napěťový signál.

Pro rychlou konstrukci byly nejprve vyzkoušeny dva typy převodníků, založené na invertorech (Obr. 42). K těmto konstrukcím posloužil integrovaný obvod 7404 s šesticí oddělených invertorů. Měření ale poukázalo na nestabilitu výstupního signálu, tudíž na nepoužitelnost tohoto systému.



Obr. 42. Elektronická schémata převodníků PWM na U pomocí invertorů

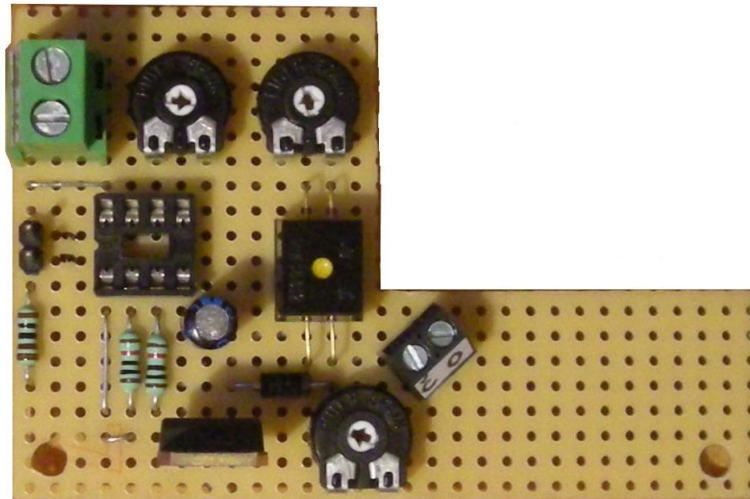
Následně se podařilo nalézt na internetovém fóru [19] elektronické schéma převodníku PWM na spojitý napěťový signál pomocí duálního operačního zesilovače LM358N. Schéma ale plně nevyhovovalo konstrukčně daným požadavkům. Proběhly úpravy v napěťové části obvodu, kdy původní napájecí napětí 12 V bylo změněno na 5 V. Dále byl výstup měniče opatřen trimrem s hodnotou odporu 10 k Ω pro možnost doladit parametry obvodu. Výstup trimru byl přiveden na anodu řídicího optočlenu a jeho katoda propojena se společnou zemí měniče. Rovněž integrovaný obvod LM358N navržen v původní konstrukci byl nahrazen integrovaným obvodem NE5532P z důvodu jeho okamžité dispozice. Jde také o duální operační zesilovač s obdobnými vlastnostmi.



Obr. 43. Elektronické schéma převodníku PWM na U pomocí NE5532P

K otestování obvodu opět posloužilo kontaktní nepájivé pole (Obr. 41), s možností rychlého provedení potřebných změn v konstrukci převaděče bez nutnosti pájení. Po nastavení základních parametrů v softwaru Mach3, tak aby výstupní signál byl generován ve formě PWM, sestavení obvodu, přivedení napájecího napětí 5 V, propojení obvodu s LPT portem PC a optočlenem regulátoru otáček vřetena K2636, byla testováním ověřena správná funkce převodníku.

Obvod byl pro svou jednoduchost sestaven na univerzální desce plošných spojů, kde pro snadnou montáž do sestavy elektroniky se všechny vodiče připojují pomocí svorek. DPS je přimontována distančními sloupky nad modul K2636.

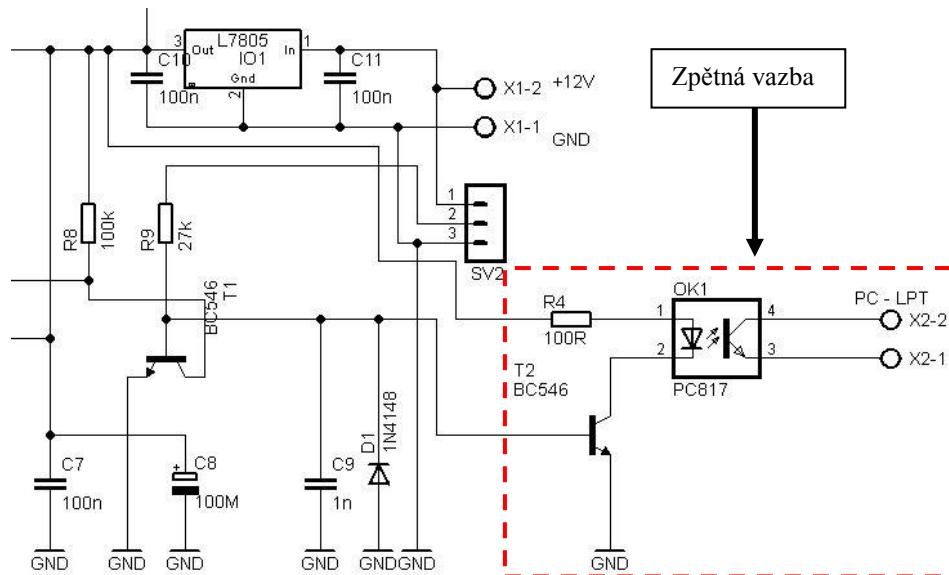


Obr. 44. DPS převodníku PWM na U

6.2.3 Vytvoření zpětné vazby

Nyní následoval posední úkol ve formě vytvoření zpětné vazby reálných otáček vřetena pro řídicí PC, tak aby mohl převzít plnou kontrolu nad procesem řízení vřetena. Z důvodu ušetření finančních výdajů bylo rozhodnuto využít snímače otáček vřetena, který je součástí otáčkoměru řídicí elektroniky. Bylo potřeba nalézt řešení jak přivést na LPT port řídicího PC pulzy z indukčního senzoru vřetena, když tyto pulzy mají napětí 12 V. V takovém to případě by přímé propojení s LPT portem vedlo k jeho zničení. Jako nejjednodušší řešení se naskýtal použít optočlen, který jednak zařízení mechanicky oddělí, takže při případné poruše jednoho z nich, by nedošlo k poškození toho druhého a také by se vyřešil problém s napěťovým rozdílem, jelikož by tyto dvě části nebyly na sobě napěťově závislé. Výhoda rovněž tkvěla ve faktu, že výstup optočlenu je tvořen tranzistorem, tudíž stačilo na jeho

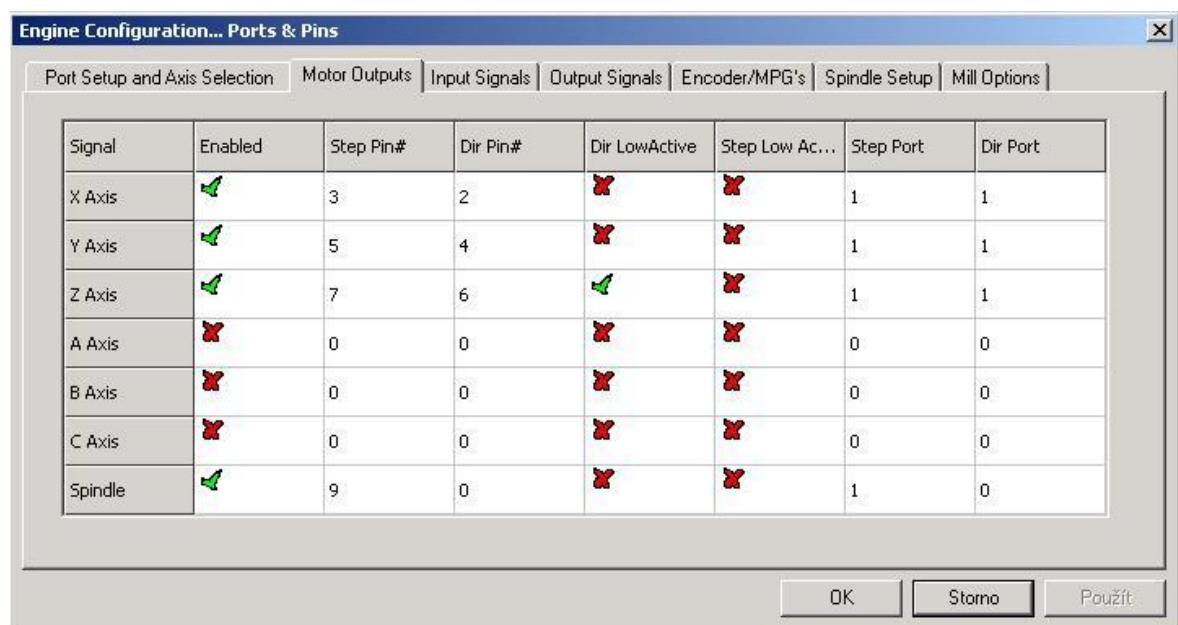
emitor přivést zem LPT portu a na jeho kolektor přivést čtecí pin LPT portu. Prozkoumáním elektronického schématu otáčkoměru bylo rozhodnuto o umístění zpětnovazebního optočlenu (Obr. 45) tak, aby byly pulzy spolehlivě odečítány z indukčního senzoru otáček vřetena, a zároveň aby nedocházelo k ovlivnění výstupních pulzů obvodem otáčkoměru.



Obr. 45. Elektronické schéma zpětné vazby otáček vřetena

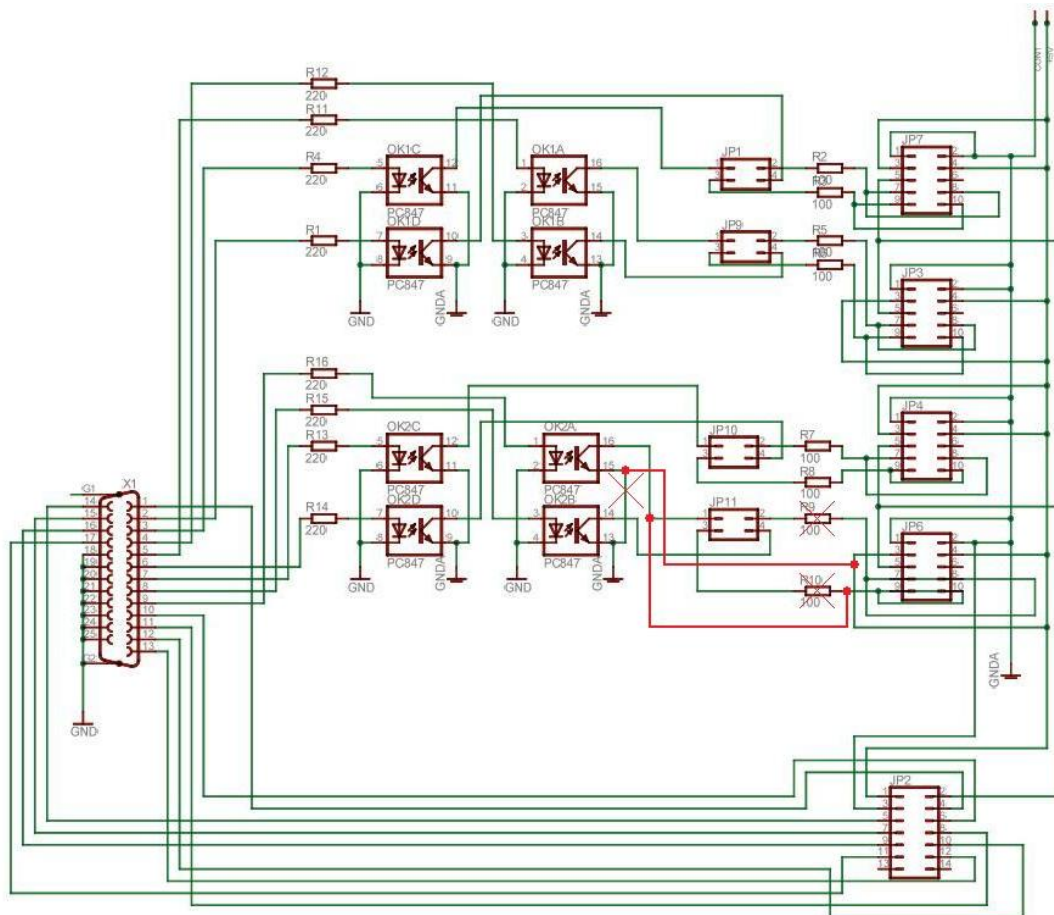
6.2.4 Nastavení Machu3

Neméně důležitým krokem pro správné fungování automatického řízení otáček vřetena dle CNC programu je správné nastavení řídicího softwaru Mach3. Mach3 disponuje softwarovým PID regulátorem, jenž byl pro vytvoření uzavřené smyčky řízení vřetena využit.



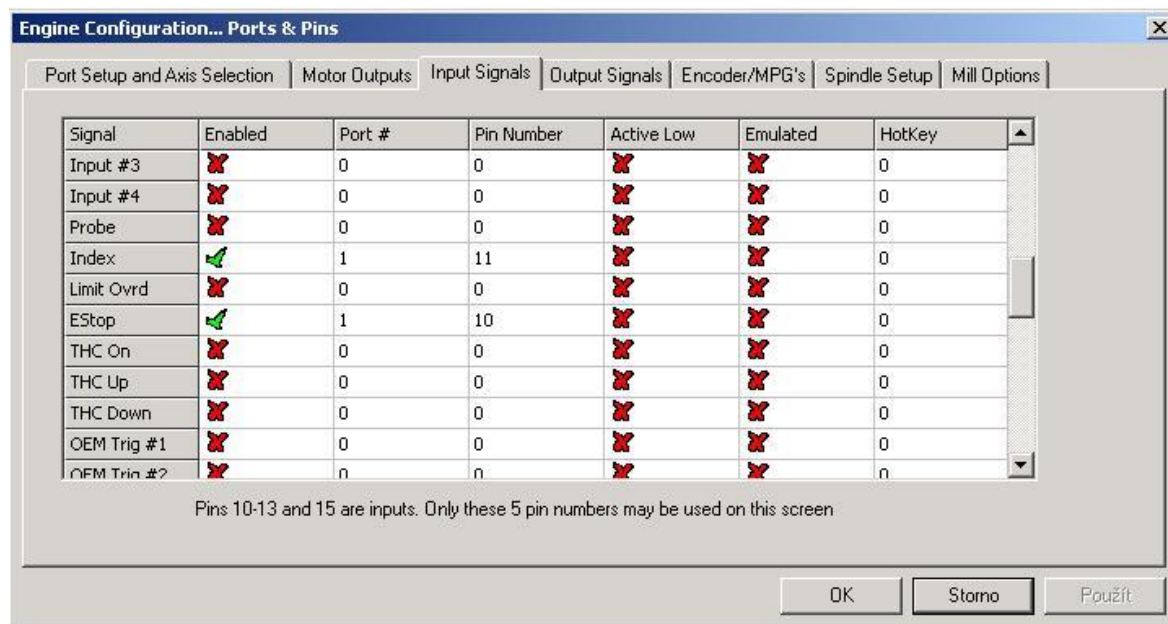
Obr. 46. Nastavení řídicích signálů pohonu os a vřetena

V záložce *Config – Ports and Pins* se nachází karta *Motor Outputs*, kde se nastavují porty a piny dle připojení driverů os a vřetena. Řízení motoru vřetena se povolí aktivací příkazu *Enabled*. Při řízení vřetena pomocí PWM je potřeba nastavit příslušný výstupní signál *Step*. Jelikož na vstupní desce z PC s optickým oddělením portu LPT byl volný slot řízen piny 8 a 9, optočlen řízen pinem 9 byl využit jako výstupní signál vřetena. To ovšem znamenalo provést malé změny v elektronickém zapojení oddělovací desky (Obr. 47) tak, aby tranzistor optočlenu nebyl nijak propojen s napájením oddělovací desky.



Obr. 47. Úpravy na oddělovací desce LPT portu - červeně

Dále bylo třeba nakonfigurovat vstupní signály v kartě *Input signals*. Pro zpětnou vazbu otáček vřetena jsou zde dva vstupy. *Index* a *Timing*. V případě že snímač otáček na vřetenu generuje pouze jeden pulz na otáčku, aktivuje se vstup *Index*. V případě že snímač generuje více pulzů na otáčku, aktivuje se vstup *Timing*. Snímací kotouček otáček vřetena má pouze jeden aktivační prvek senzoru na otáčku, tudíž byl nastaven vstupní signál typu *Index*. Tento signál je přes desku spínání pohonu vřetene přiveden na pin číslo 11 portu 1.



Obr. 48. Nastavení vstupních signálů

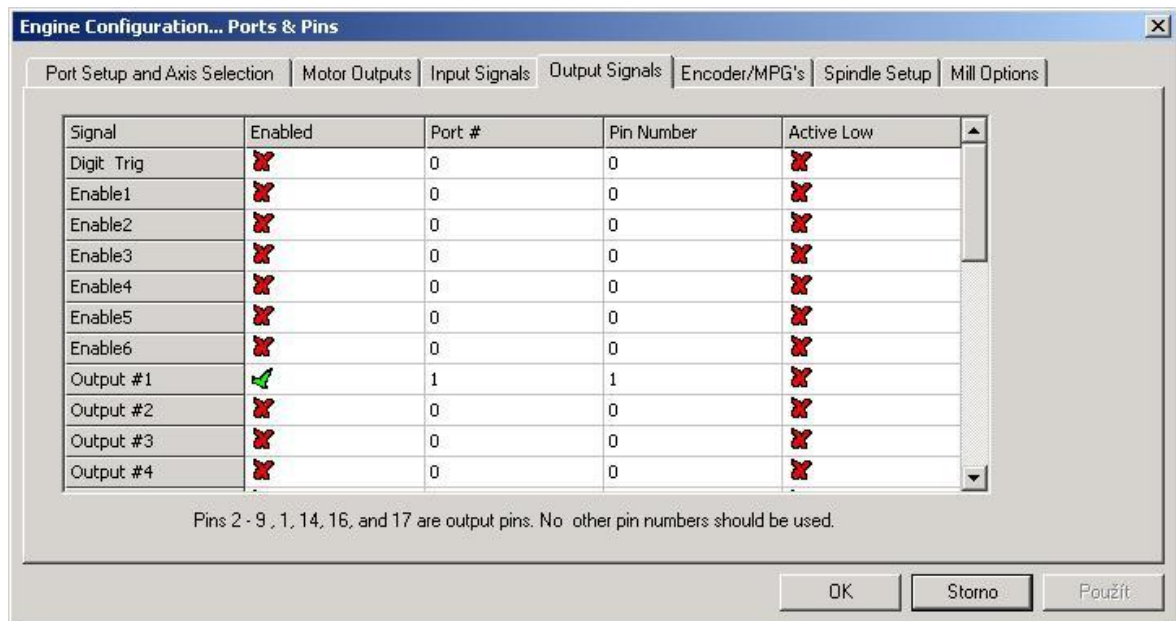
V této kartě je také nastaven velmi důležitý vstup *EStop*, čili bezpečnostní okruh napojen na všechny bezpečnosti prvky, kdy při jejich aktivaci dojde k ukončení činnosti frézky.

Karta *Output signals* skrývá konfiguraci výstupních signálů. Zde je nakonfigurován pouze jeden signál, a to spínání motoru vřetena pinem číslo 1 signálem *Output #1*. Při aktivaci tohoto signálu se sepne relé na desce spínání pohonu vřetene, čímž je modul K2636 uveden do chodu.

Karta *Spindle Setup*, čili konfigurace vřetena, slouží ke kompletnímu definování, jakým způsobem bude vřeteno stroje spolu s chlazením ovládáno. V první řadě je potřeba povolit spínání vřetena pomocí relé. To se děje v rámečku *Relay Control*. V kartě *Output signals* bylo spínací relé motoru vřetena přiřazeno signálu *Output #1*, do rámečku *Relay Control* přijde tedy zadat *Output# 1* pro příkaz M3 i M4, jelikož na frézce nelze měnit směr otáčení vřetena.

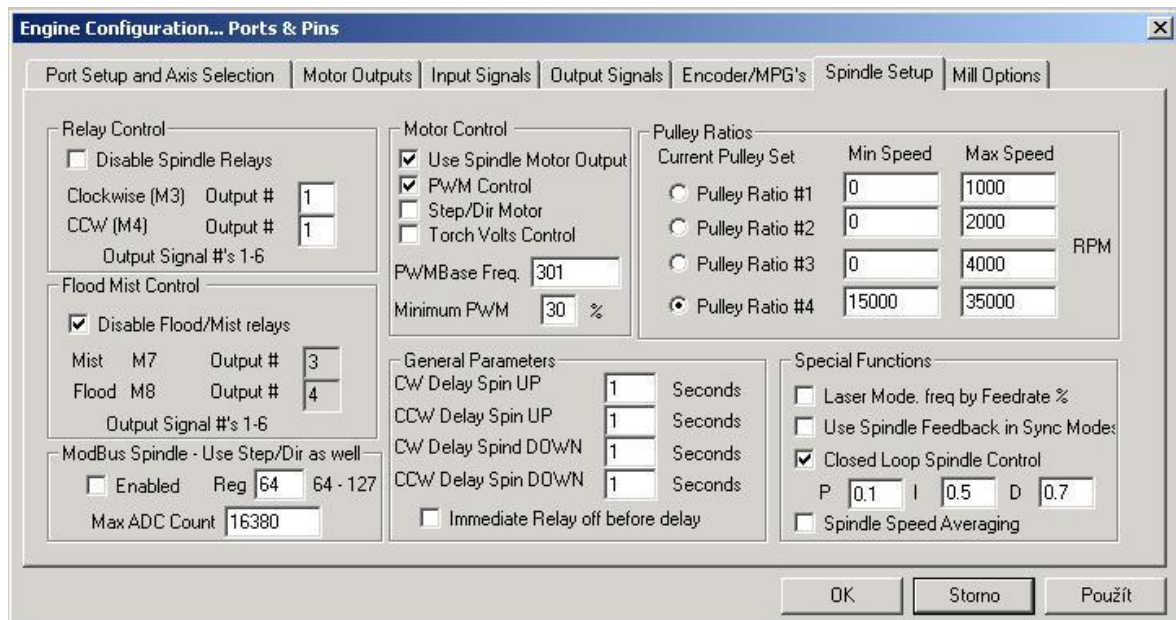
Aby software Mach3 plně převzal řízení motoru vřetena, je třeba zatrhnout tlačítko *Use Spindle Motor Output* a tlačítko *PWM Control*, čímž se definuje výstupní signál ve formátu PWM. Do políčka *PWMBase Freq.* se zadává frekvence PWM signálu. Testováním byla zjištěna ideální frekvence 300 Hz. Při nižších frekvencích nebyly otáčky motoru vřetena plně konstantní. Bylo možno vyzorovat jisté přerušované spínání motoru, což způsoboval optočlen převaděče, kdy svit LEDky nebyl dostatečně konstantní. Při frekvenci 300 Hz

tento jev vymizel. Ještě vyšší frekvence nebyla použita z důvodu zbytečného zatěžování procesoru PC.



Obr. 49. Nastavení výstupních signálů

V políčku *Pulley Ratio* se konfiguruje minimální a maximální otáčky motoru vřetena. Ty jsou dle výrobce použitého elektromotoru pro pohon vřetena v rozsahu 15 000 – 35 000 ot/min. Tyto údaje se zadávají do políčka *Pulley Ratio #4*.



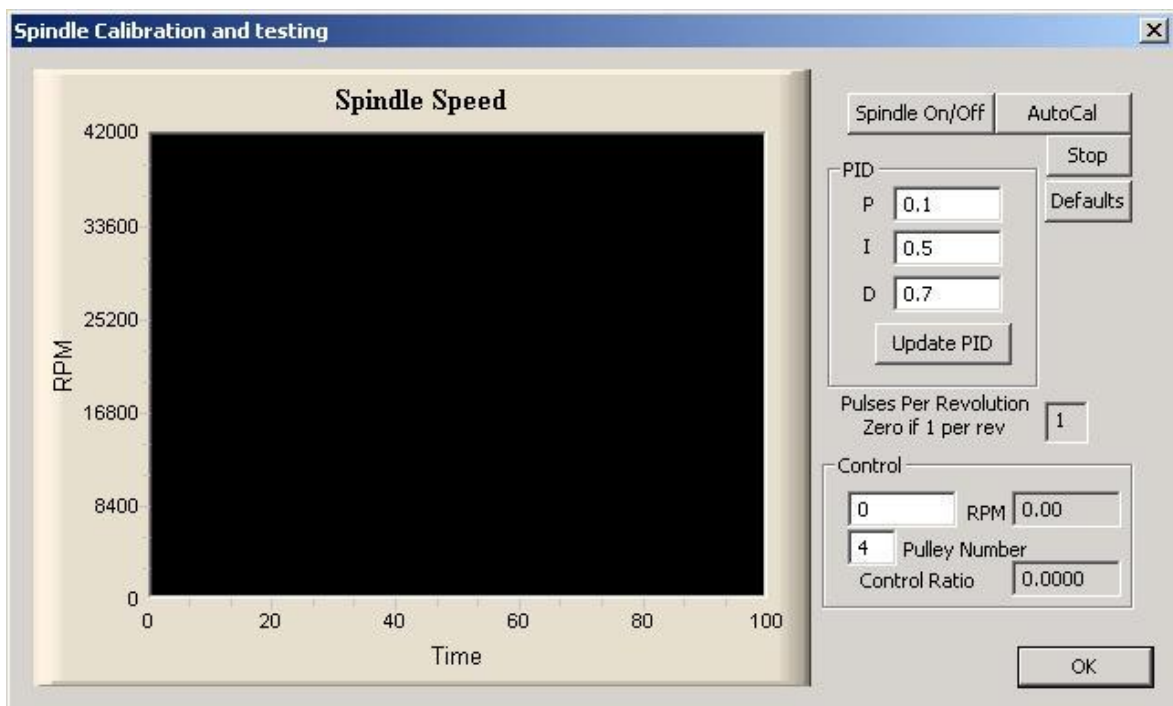
Obr. 50. Konfigurace ovládání vřetena a chlazení

Rámeček *Special Function* (Speciální funkce) slouží k nastavení uzavřené smyčky řízení vřetena. Zatřetí políčka *Closed Loop Spindle Control* se implementuje do řízení softwa-

rová „servo“ smyčka. Tím se Mach3 snaží řídit otáčky vřetena tak, aby odpovídaly požadovaným dle příkazu S v CNC kódu, a to na základě vyhodnocování signálu *Index* (1 pulz na otáčku). Aktivací této uzavřené smyčky je nutné nastavit konstanty *P*, *I* a *D* regulátoru v rozsahu 0 až 1. Hodnota *P* je proporcionální složka regulace, která určuje regulační zesílení na základě aktuální odchylky od požadované. Výsledkem samotného *P* řízení je oscilace rychlosti kolem požadované hodnoty. Hodnota *D*, čili derivační složka, stabilizuje oscilace *P* složky na základě derivace odchylky řízení. Parametr *I* je integrační složka zohledňující dlouhodobý průběh odchylek řízení (rozdíl mezi požadovanou a skutečnou rychlostí) a tím zvyšuje účinnost regulace po stránce stabilizace systému.

K naladění těchto veličin na optimální hodnoty byla využita asistence Machu. V menu *Functions Cfg* se nachází záložka *Calibrate Spindle* určená ke kalibraci vřetena. Ladění probíhalo formou zadávání požadovaných otáček, kde dle generovaného grafu průběhu nastavení otáček na motoru vřetena se dolad'ovaly konstanty *P*, *I* a *D*.

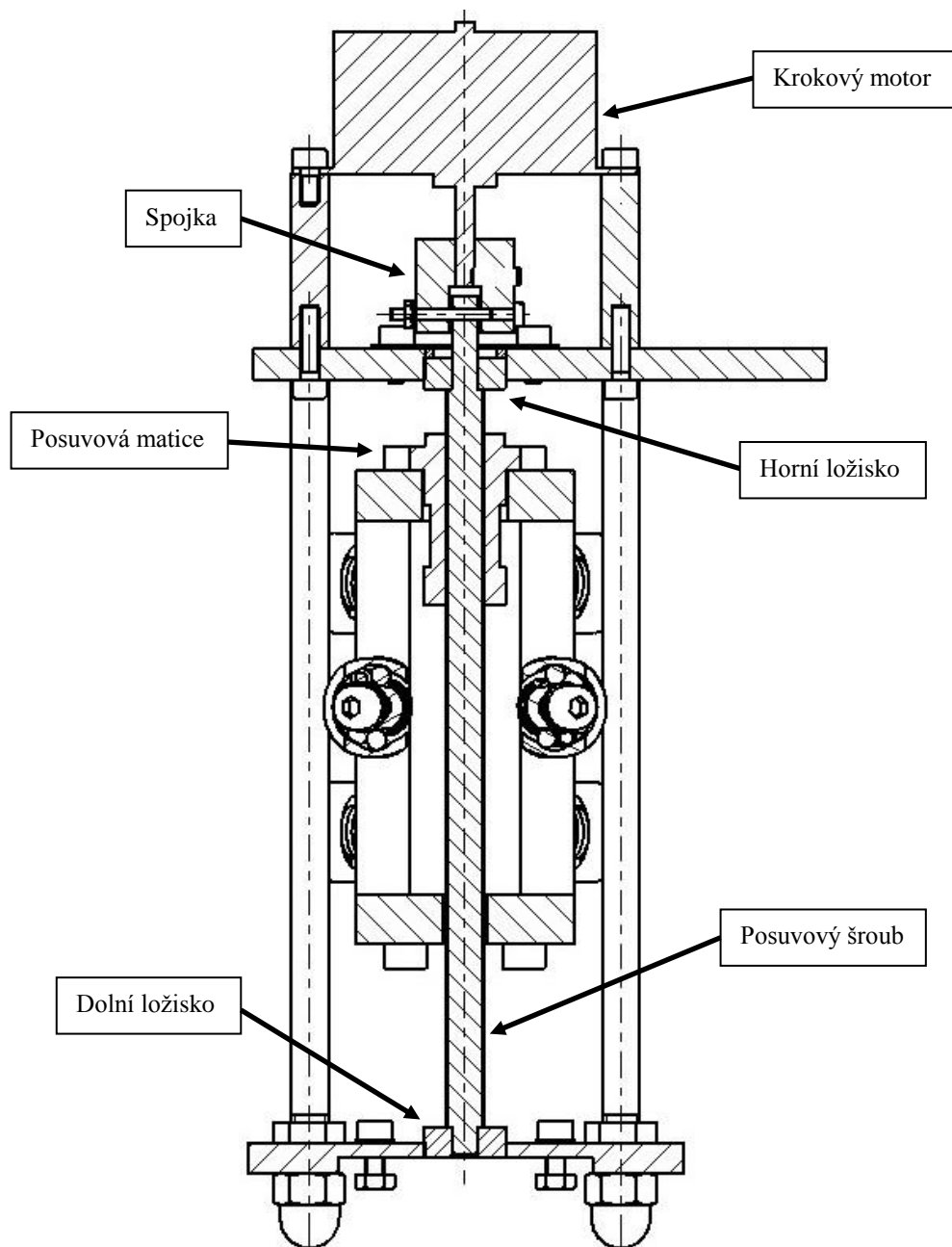
Laděním byly získány následující hodnoty konstant. $P = 0,1$, $I = 0,5$ a $D = 0,7$. Při těchto hodnotách PID regulátoru celý systém pracoval spolehlivě a dle požadavků. Průměrná prodleva ustálení otáček motoru vřetena při změně hodnoty otáček činí cca 5 s.



Obr. 51. Kalibrace vřetena

7 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA OSY Z

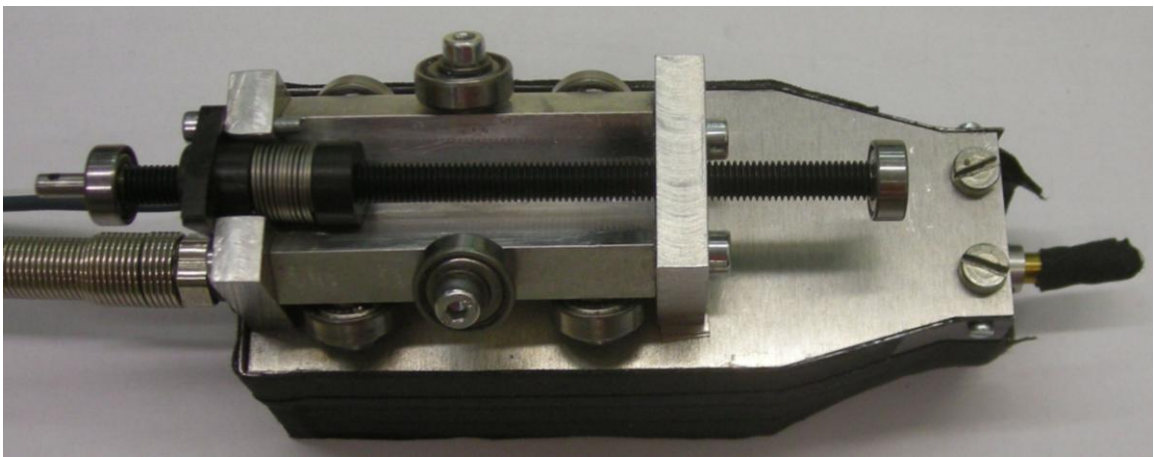
Původní posuvový mechanismus osy Z poměrně rychle podléhal opotřebení. Výskyt tohoto problému již byl předpokládán při samotné konstrukci posuvu, jelikož použité prvky nebyly příliš vhodné pro takovou to aplikaci. Posuvový mechanismus osy tvořil šroub s metrickým závitem, duralovou a mosaznou maticí. Duralová matice byla součástí ložiskového vozíku. Mosazná matice byla ukotvena k cuprexitové destičce a sloužila k vymezení vůle v závitech. Vymezení se provádělo natáčením matice do polohy s minimální vůlí, kde následně v této pozici byla zafixována ke cuprexitové destičce.



Obr. 52. Nová konstrukce posuvového mechanismu osy Z

Vzhledem k opotřebení posuvového mechanismu a s tím spjaté zhoršení přesnosti osy, bylo rozhodnuto o výměně tohoto mechanismu. Na nový mechanismus byly kladeny nároky ve formě spolehlivého chodu, možnosti montáže do stávající konstrukce osy Z a nepříliš vysoké pořizovací náklady. Těmto požadavkům vyhověl posuvový šroub KERK NTB F 4M01T s bezvúlovou maticí. Šroub je pro minimalizování tření mezi závity opatřen teflonovou vrstvou. Dělená matice s možností nastavení předpětí je vyrobena z plastu. Matice se montuje pomocí příruby třemi šrouby.

V dolní části posuvu je posuvový šroub usazen v kuličkovém kosoúhlém ložisku, tak aby byly zachycovány axiální síly. Správně by zde mělo být axiální ložisko, ovšem z ekonomických důvodů bylo použito ložisko s kosoúhlým stykem. V horní části je jednořadé kuličkové ložisko. To prochází kotevní deskou vodících tyčí. Shora na vnější kroužek ložiska je nasazena distanční podložka, která jakmile je pomocí krytky zafixována proti pohybu, zabrání i volnému pohybu celého posuvu.

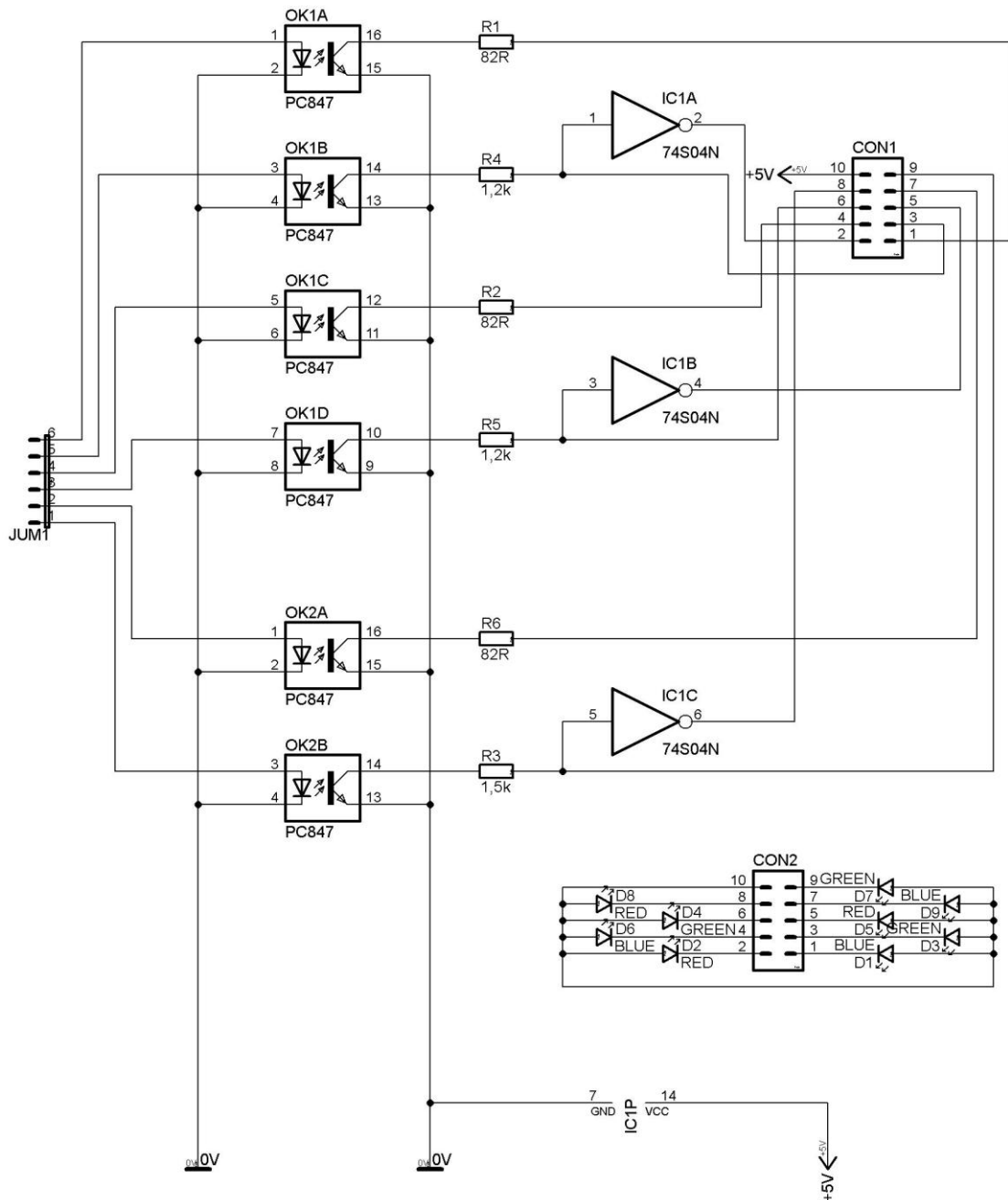


Obr. 53. Montáž posuvového šroubu na osu Z

Po sestavení posuvu osy následovala kalibrace krokového motoru v softwaru Mach3, jelikož nový šroub má jiné stoupání závitu než původní. Prvotní hrubé nastavení bylo provedeno pomocí úchylkoměru. Přesné parametry osy Z byly získány při měření přesnosti polohování na laserovém interferometru.

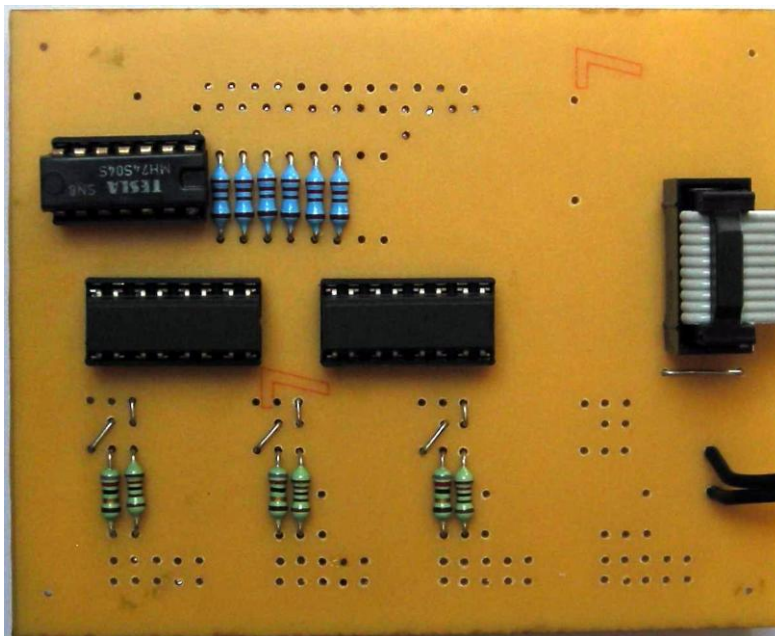
8 VIZUALIZACE STAVU KROKOVÝCH MOTORŮ

Elektronické vybavení CNC frézky bylo navíc rozšířeno o vizualizaci stavu krokových motorů (Obr. 36). Vizualizace stavu krokových motorů je provedena pomocí LED na předním panelu přístrojové krabice. Každý motor posuvů os má tři stavové LED. První (modrá) indikuje, zda je motor aktivní, druhá a třetí (zelená a červená) zobrazuje směr otáčení motoru. Modul vizualizace stavu krokových motorů obsahuje vstupní optočleny, které přes ochranný odpor spínají příslušné LED.



Obr. 54. Elektronické schéma vizualizace stavu krokových motorů

Modul obsahuje i integrovaný obvod s funkcí invertoru, který je určen pro zobrazování směru otáček motoru. Směr otáčení motoru se mění přivedením Log1 na signál DIR do obvodu řízení krokových motorů TA8435H. Signálem Log1 je zaktivována zelená LED dioda, při přepnutí do Log0 je signál zinvertován a aktivována červená LED.



Obr. 55. DPS vizualizace stavu krokových motorů

Význam vizualizace krokových motorů spočívá v přehledu o dění na posuvech stroje. Největší uplatnění má při manuálním ovládní frézky, které je umožněno díky integrovanému generátoru pulzů na desce spínání pohonu vřetene. Vizualizace se osvědčila například při najíždění na nulový bod nebo při kontrole správnosti souřadného systému CNC programu vůči upnutému polotovaru na frézce. Rovněž lze z modulu vysledovat problémy jako výpadek napájecího napětí krokových motorů, výpadek pulzů z LPT portu PC nebo problémy s během softwaru Mach3.

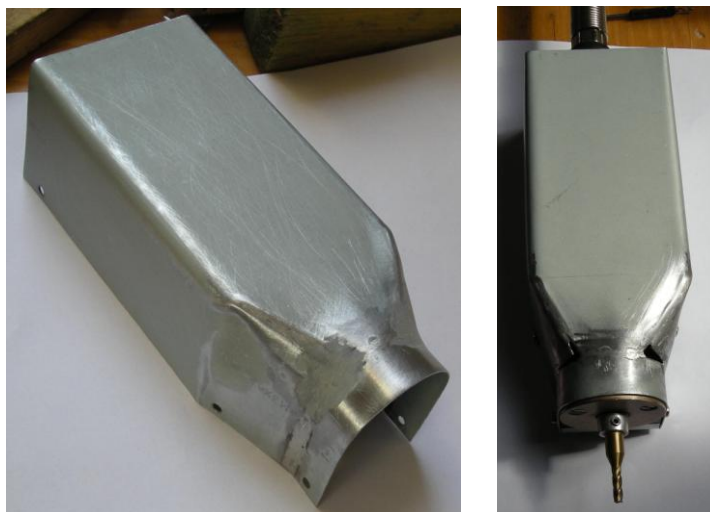
9 KRYTOVÁNÍ MECHANIZMŮ CNC FRÉZKY

Krytování stroje plní několik úkolů. Nejdůležitější z nich je zabránění vnikání nečistot do pohyblivých mechanismů stroje, čímž se značně zvýší životnost těchto prvků. Dalším neméně důležitým úkolem je zabránění přístupu do míst s pohyblivými částmi stroje, tak aby nemohlo dojít k úrazu obsluhy stroje. Krytování lze také využít ke zlepšení estetické stránky stroje, která je v dnešní době rovněž důležitá.

9.1 Krytování vřetena

Z důvodu zamezení padání třísek a nečistot do mechaniky vřetena bylo vyrobeno jeho krytování. To se sestává ze čtyř dílů vyrobených z tenkého ocelového plechu. Tyto čtyři díly byly vytvarovány do požadovaného tvaru a dva z nich spájeny. Vzniklé otvory byly vytmeleny a následně vybroušeny, tak aby byl vytvořen celistvý povrch. Kryt byl nastříkán černou krycí barvou spolu s průhledným ochranným lakem. Ukotvení na vřeteno je provedeno pomocí šroubů a to ke kotevní desce vřetena. Komplet krytu je tvořen horním víčkem sestávajícím se ze dvou dílů tak, aby mohl ohebný hřídel pohonu vřetena procházet skrz kryt.

Při testovacích pokusech docházelo díky vibracím vřetena ke vzniku nepříjemnému hluku krytu. Problém se podařilo vyřešit měkkou izolační vrstvou, bránící v přenášení vibrací na kryt přes stykové plochy. Pozitivním důsledkem zkonstruovaného krytu vřetena nebylo jen zabránění vnikání nečistot do pohyblivých mechanických částí, ale také zabránění možného poranění o rotující prvky jako je kotouček pro snímání otáček nebo spojka obráběcího nástroje s pohonem vřetena.

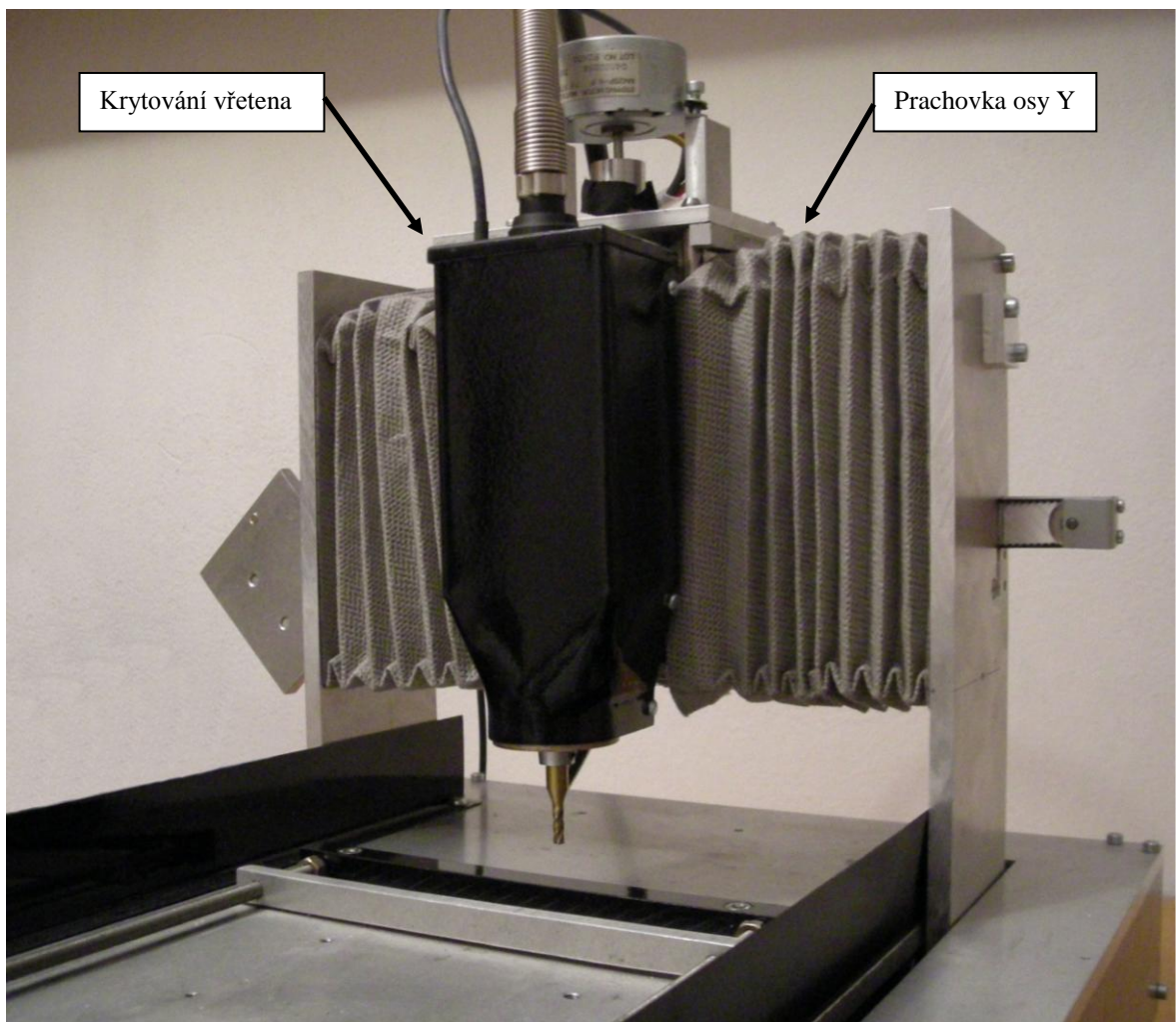


Obr. 56. Stavba krytu vřetena

9.2 Krytování osy Y

Při obrábění prашných materiálů jako je například NECURON 651, se velice rychle zanášelo vedení osy Y. Třísky z těchto materiálů na sebe vázaly mazivo, čímž, pokud nedošlo k opětovnému promazání, docházelo k trhavému pohybu osy Y. K vyřešení tohoto problému bylo přistoupeno k výrobě krytování vedení této osy.

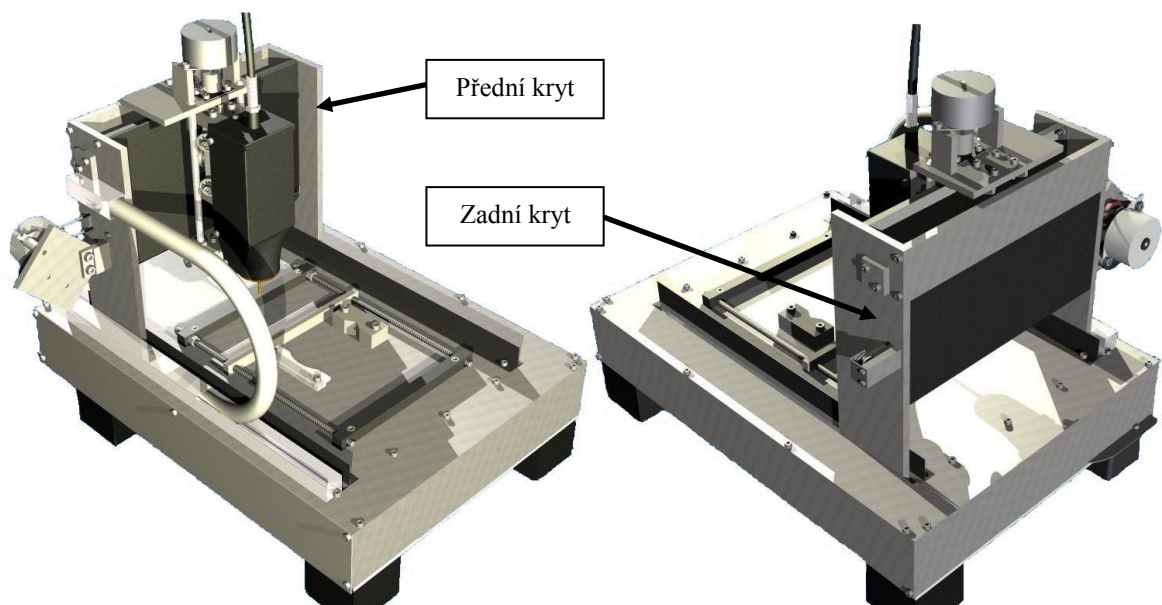
První návrh spočíval v použití skládané prachovky, vyrobené z fólie sloužící jako podkladová vrstva střešních krytin. Tento materiál byl zvolen, jelikož disponoval podobnými vlastnostmi jako materiál, jenž se používá v průmyslových verzích takových to prachovek. Hrany, díky kterým se prachovky skládaly a rozkládaly při jejich pohybu, byly vyrobeny nažehlováním. Tak si prachovky uchovaly potřebný tvar. Výhoda těchto prachovek tkvěla v jejich velikosti, kdy se podařilo zároveň ochránit i osu Z.



Obr. 57. Kryt vřetena, prachovky osy Y

Po nějakém čase se ale objevily jisté nevýhody tohoto řešení. Jednou z nich bylo zmenšení rozsahu posuvu osy Y. Ten byl způsoben nízkou stlačitelností prachovek v koncových polohách. Dále se prachovky nedeformovaly po celé délce stejně. Největší deformace nastávaly na straně vřetena, zatímco na straně kotevních desek osy Y se prachovky deformovaly minimálně. Tento jev způsobilo zadržování prachovek na vodících tyčích. Díky tvarové složitosti a hrubému povrchu použitého materiálu bylo také obtížné prachovky udržovat v čistotě. I po estetické stránce tento návrh nebyl příliš vyhovující.

Proto bylo zkonstruováno nové krytování, tentokrát nepohyblivého charakteru. Krytování sestává ze dvou částí a je vyrobeno z ocelového plechu o tloušťce 0,5 mm. Přední část krytu chrání kompletní vedení osy Y a je zakončeno 0,5 mm nad spodní kotevní deskou osy Z. Tím vzniká jen malý prostor pro přístup nečistot. Zadní kryt uzavírá prostor pod kotevní deskou osy Z a celou zadní stranu osy Y. Montáž přední části krytu je provedena šrouby a maticemi. Zadní část krytu pouze šrouby, jelikož se tento kryt montuje jako poslední, a není zde možný přístup pro montáž matic. Závit je tedy vytvořen přímo v krytu. Oba díly byly opatřeny černou krycí barvou.



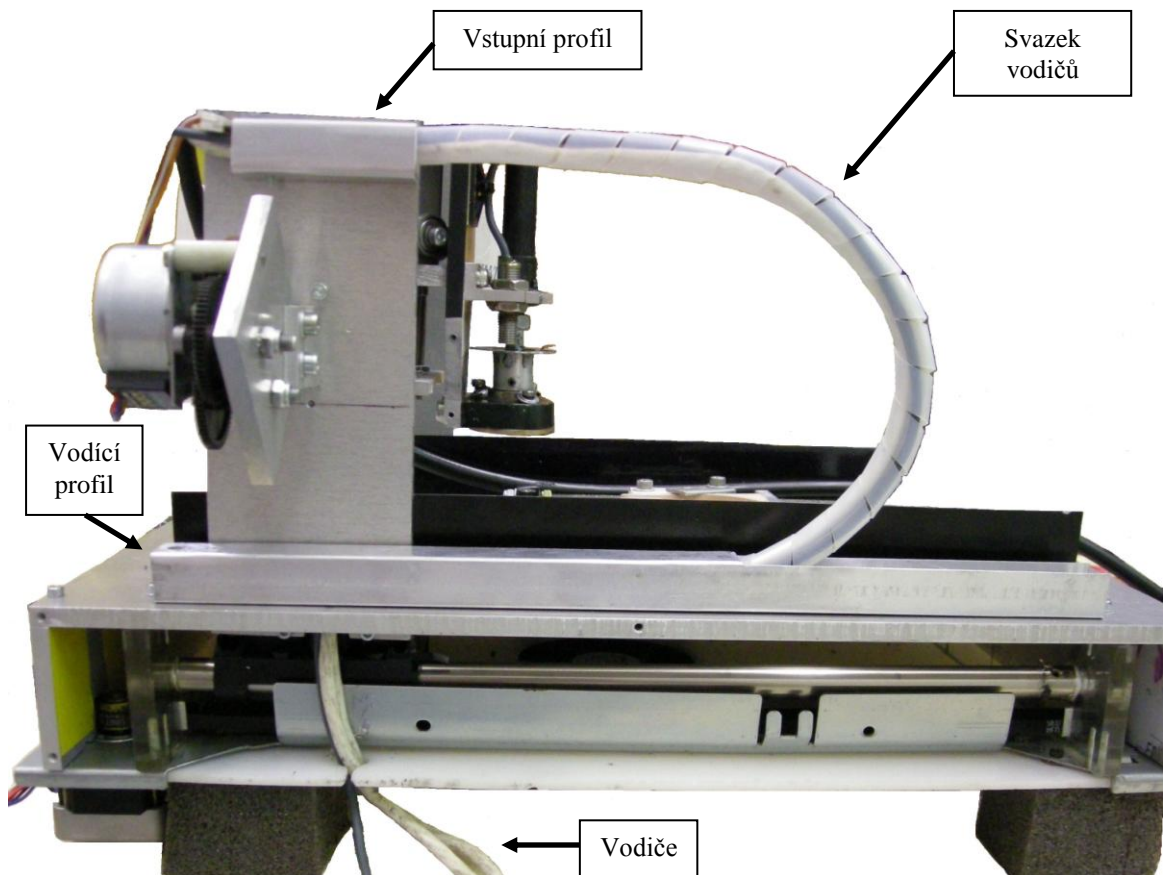
Obr. 58. Krytování osy Y

Nové krytování se při testování velice osvědčilo. Není zde žádné ovlivnění rozsahu posuvu osy Y a vodící systém je dostatečně chráněn. Údržba je díky rovné ploše a hladkému povrchu velice jednoduchá a rychlá. Ve srovnání s původními prachovkami došlo i k výraznému zlepšení estetické stránky stroje.

10 CHRÁNIČ VODIČŮ

Z důvodu ochrany vodičů krokových motorů a vodiče indukčního senzoru otáček vřetena, byl zkonstruován chránič vodičů na způsob energetického řetězu. Chránič se sestává ze tří částí. První část je tvořena hliníkovým profilem, ručně modelovaná čtvercová trubka, jenž je přimontován ke kotevní desce osy Y. Do tohoto profilu vstupují vodiče. Uvnitř je ukotvena druhá část energetického řetězu, a to chránič kabeláže. Ten udržuje vodiče pohromadě v požadovaném tvaru, ale rovněž se dokáže deformovat při pohybu posuvu a přizpůsobit se aktuální pozici posuvu. Chránič dále ústí do vodícího profilu. Ten zabraňuje případnému odklonu kabeláže do dráhy posuvu osy Y. Profil je ukotven k pracovnímu stolu frézky. Vodiče procházejí otvorem ve vodícím profilu skrz desku pracovního stolu stroje a vystupují základní deskou frézky ven.

Chránič vodičů se během práce zařízení velice osvědčil. Také po estetické stránce nastalo jisté zlepšení ve srovnání s předešlou situací, kdy vodiče byly nechráněně vedeny po mechanizmech stroje.



Obr. 59. Energetický řetěz

11 MĚŘENÍ PŘESNOSTI POLOHOVÁNÍ OBRÁBĚCÍHO STROJE

Kvalita a přesnost obrobených ploch je primárně dána přesností os obráběcího stroje. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k proměření přesnosti polohování os, tak jak to udává norma ČSN ISO 230. K měření přesnosti os byl použit laserový interferometr XL - 80 od firmy RENISHAW (Obr. 60). Toto zařízení je velice přesné, dokáže měřit s přesností 1 nm při maximální rychlosti 4 m/s v lineárním pohybu. K měření v nanometrech je ale navíc zapotřebí kompenzační jednotky, která snímá teplotu s vlhkostí vzduchu a tak koriguje naměřené hodnoty, které jsou těmito faktory značně ovlivňovány. Tato kompenzační jednotka ale nebyla k dispozici, proto bylo měření provedeno v mikrometrech, kdy není tato jednotka vyžadována. Vzhledem ke konstrukci stroje, která je v kategorii hobby, je měření přesnosti os v mikrometrech dostačující.



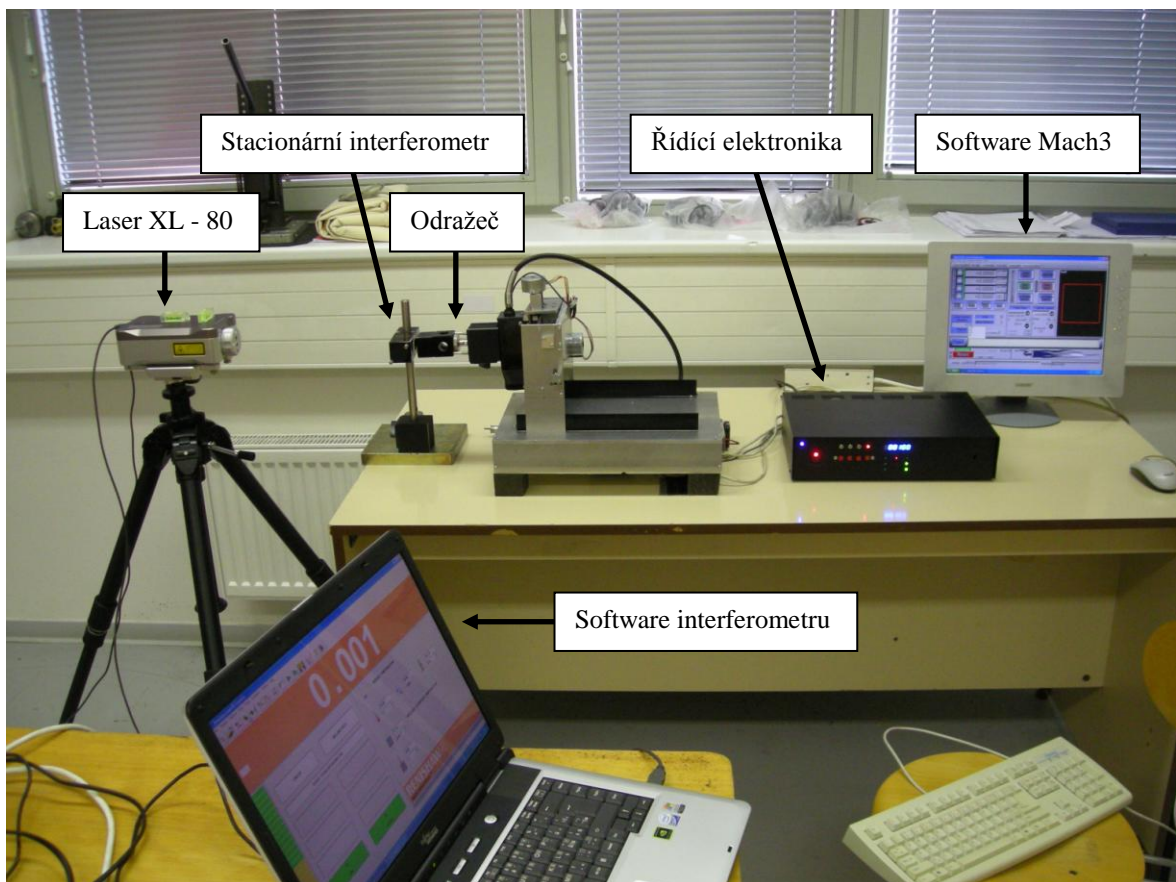
Obr. 60. XL - 80 [21]

Jelikož jde o velice přesné a citlivé zařízení, měření proběhlo v laboratoři UVI určené k těmto účelům. Teplota vzduchu v laboratoři činila $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, tlak vzduchu měl hodnotu $p = 1000 \text{ hPa}$ a vlhkost vzduchu činila $h = 66 \%$. Frézka nejprve musela být řádně očištěna, aby jednak nečistoty neovlivňovaly samotné měření a také aby nepoškodily citlivé optické prvky laserového interferometru. Frézka po ustavení na pevný stůl byla dle pracovní plochy stroje vyrovnána pomocí dvou vzájemně na sebe kolmých libel do roviny. Následovalo propojení CNC frézky s řídicí elektronikou a počítačem.

Software laserového interferometru pracoval v lineárním režimu s vyhodnocováním vzdálenosti v milimetrech. Naměřená data byla průměrována.

11.1 Osa X

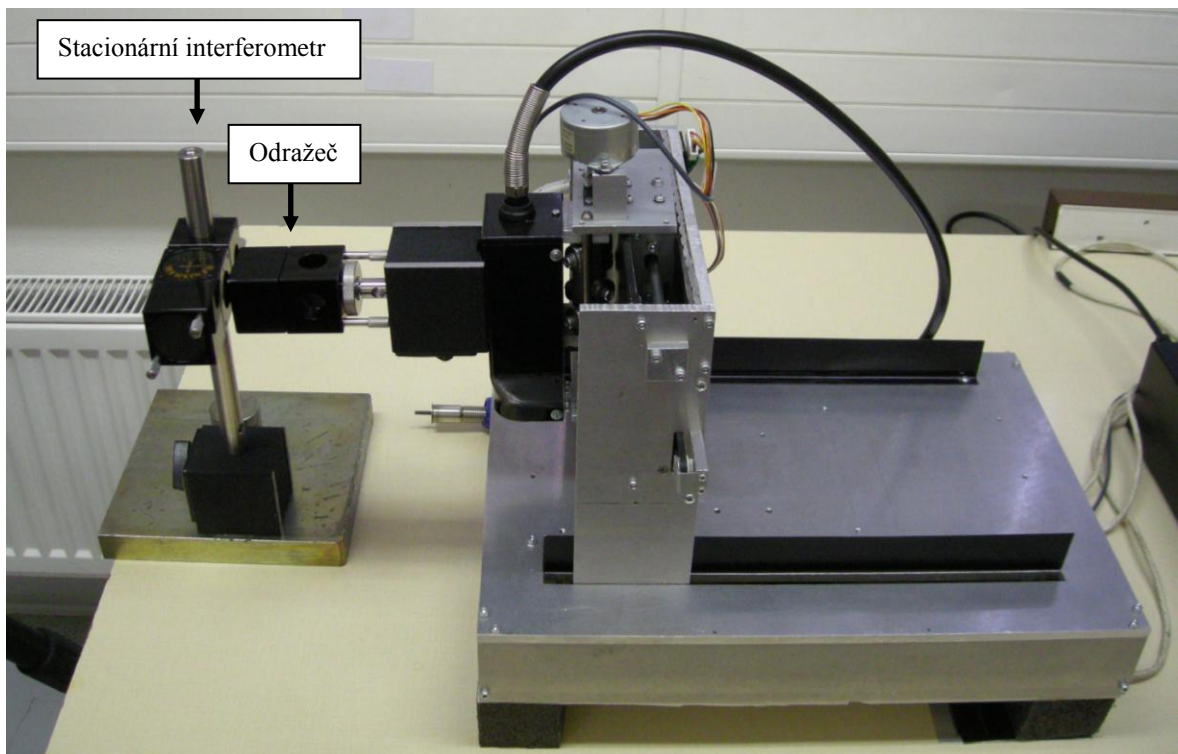
Po oživení řídicí elektroniky a počítače bylo přistoupeno k rozestavení prvků potřebných pro měření přesnosti na ose X. Nejprve byl na stativ umístěn a do roviny ustaven laser XL - 80. Dále byla sestavena optická jednotka stacionárního interferometru dle principu interferometrie a prostorových dispozic. Sestavená stacionární interferometrická jednotka byla připevněna na stojan, jenž byl ustaven na měřicím stole. Splněním poslední části nutné k zahájení měření, ustavení odražeče na vřeteno, se mohlo začít s kalibrací. Po připojení laserové jednotky k počítači následovalo seřízení laserového parsku tak, aby po celé délce posuvu osy X měl odražený laserový paprsek co možná největší intenzitu. Intenzita odraženého laserového parsku je zobrazována v softwaru dodávaném k použitému interferometru. Vyhodnocovací pole je rozděleno na tři části, kde každá je rozlišena odlišnou barvou. Velice nízká intenzita parsku je zobrazována červenou barvou, nízká intenzita parsku je zobrazována žlutou barvou a dostatečná síla parsku je zobrazována zelenou barvou. Pro kvalitní výsledky měření je nutné, aby intenzita parsku vždy byla v zelených polích.



Obr. 61. Měřicí sestava pro osu X

Toho se nepodařilo při použití odražeči dosáhnout. Signál v nulové poloze osy X se pohyboval v plné intenzitě, ale při přejetí osy do maximálního rozsahu, klesla intenzita na nulu. Tento malý odražeč byl tedy nahrazen rozměrnějším typem, s větším měřicím rozsahem. Nevýhodou tohoto většího odražeče ale bylo, že k jeho upevnění na vřeteno CNC frézky se musela použít upínací magnetická kostka s příslušenstvím, což značně zatížilo všechna vedení stroje. Seřizováním optických prvků s tímto odražečem se nicméně podařilo dosáhnout maximální intenzity laserového parsku ve všech polohách posuvu osy X. Při sestavování měřicí soustavy musel být brán ohled na dodržení podmínky o odstupu mezi stacionární interferometrickou jednotkou a odražečem. Ten je stanoven na maximální vzdálenost 5 mm v nulové poloze osy.

Následujícím krokem bylo nastavení nulové pozice osy X v softwaru Mach3. Měření probíhalo tak, že se posuv z nulové pozice přemísťoval o stanovenou délku kroku až do maximální koncové polohy a následně se po stejných krocích vracel zpět do nulové pozice. Jelikož maximální rozsah osy X je 205 mm, bylo stanoveno, že měření budou probíhat na délce 200 mm tak, aby posuv ještě mohl najet do pozice $X = -1$ mm a do pozice $X = 201$ mm. Tímto přejetím se eliminují chyby vzniklé např. vůlemi mezi ozubeným řemenem a ozubenými koly, vůli vzniklou v ukotvení ozubeného řemene k systému vedení, atd.



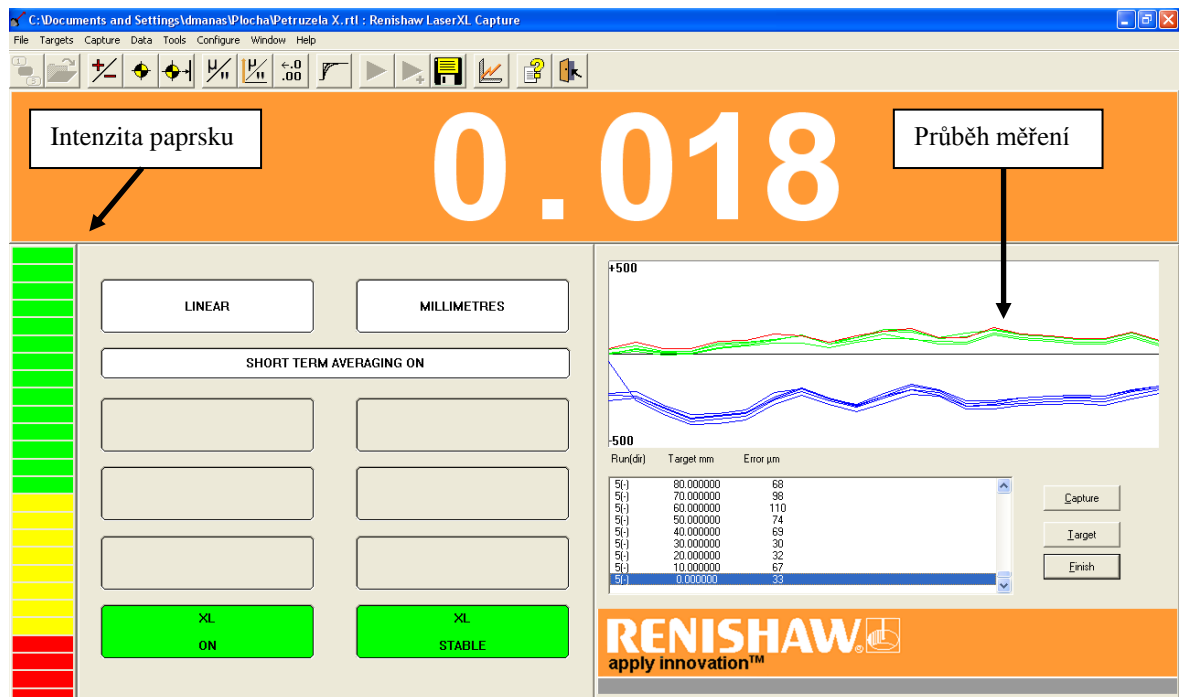
Obr. 62. Sestava stacionárního interferometru, odražeč, osa X

Při kontrole správného sestavení a ověřování funkčnosti měřícího aparátu bylo zjištěno, že osa X není přesně kalibrována, jelikož při zadání posuvu z nulové pozice do pozice $X = 200$ mm, posuv dle laserového interferometru přešel o necelé dva milimetry tuto koncovou polohu. Předchozí kalibrace krokových motorů nebyla prováděna pomocí tak přesných měřících zařízení. Kalibrace posuvu se provádí v softwaru Mach3, kde k tomuto účelu slouží funkce *Axis Calibration*. Zde se zadá, o kolik má být vykonán posuv a po jeho vykonání je zadána hodnota skutečně vykonaného posuvu. Software Mach3 z porovnání těchto hodnot automaticky vypočítá hodnotu nastavení krokového motoru *Steps per*, která udává kolik impulzů pro krokový motor je potřeba odeslat do řídicí elektroniky CNC frézky, aby posuv patřičné osy vykonal pohyb o 1 mm. Kalibrace byla provedena na délce 200 mm a následně ještě i provedena kontrola správnosti nového nastavení krokového motoru osy X.

Vzdálenost kroků, na kterých probíhalo měření, byl stanoven na 10 mm s přejetím v koncových polohách o 1 mm. Počet "runů" byl stanoven na 5. Jeden "run" znamená, že posuv je přemístěn z nulové pozice do maximální pozice a vrácen zpět do nulové pozice. Po každém kroku následovala krátká prodleva pro ustálení posuvu, jenž byl rozkmitán setrvačnou silou způsobenou zastavením posuvu, a pro potvrzení dané polohy posuvu v softwaru laserového interferometru. Rychlost posuvů byla stanovena identická pro všechny osy, a to $f = 250$ mm/min. Souřadnice jednotlivých kroků se zadávaly ručně na počítači v příkazovém řádku softwaru Mach3.

Zjištěné výsledky:

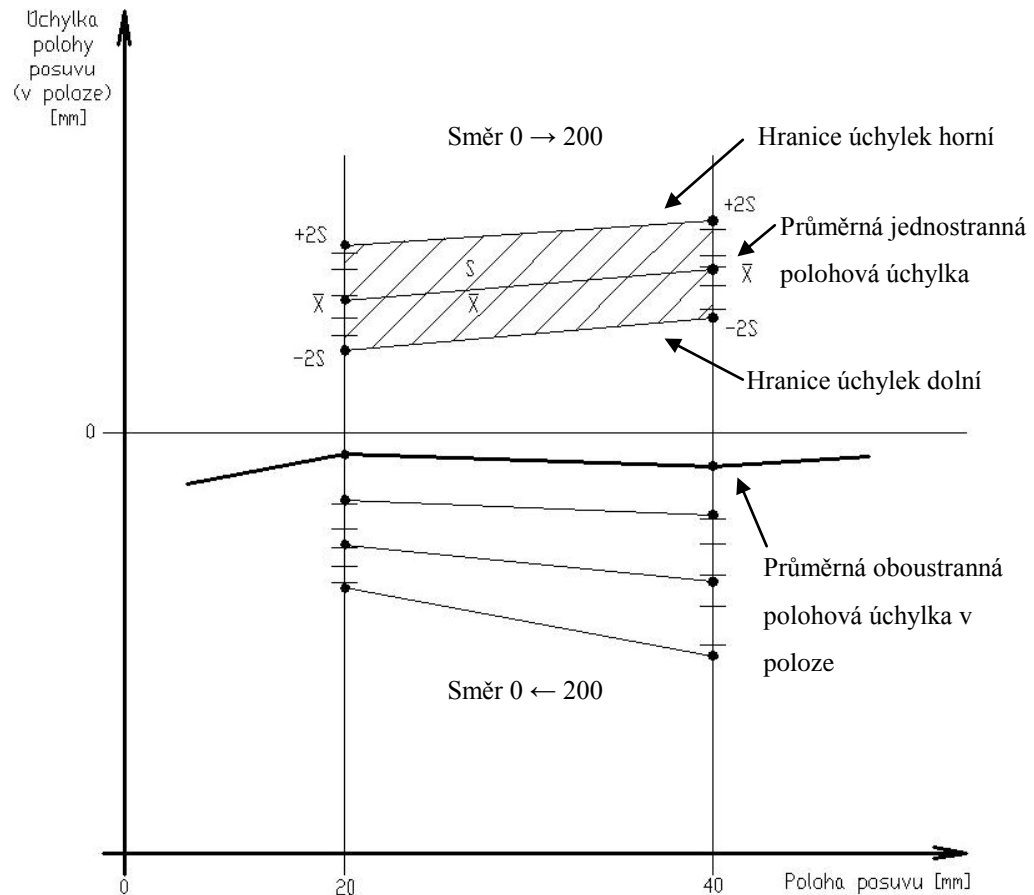
Software laserového interferometru je schopen i vyhodnotit naměřená data, pouze je potřeba specifikovat dle jaké normy mají být výsledky zpracovány. V tomto případě bylo měření přesnosti polohování os prováděno dle normy ČSN EN ISO 230 - 2, tudíž vyhodnocení dat proběhlo dle této normy, kdy software pracoval v lineárním režimu, v milimetrových jednotkách a výsledky vyhodnocovaných dat byly průměrovány.



Obr. 63. Software laserového interferometru - měření osy X

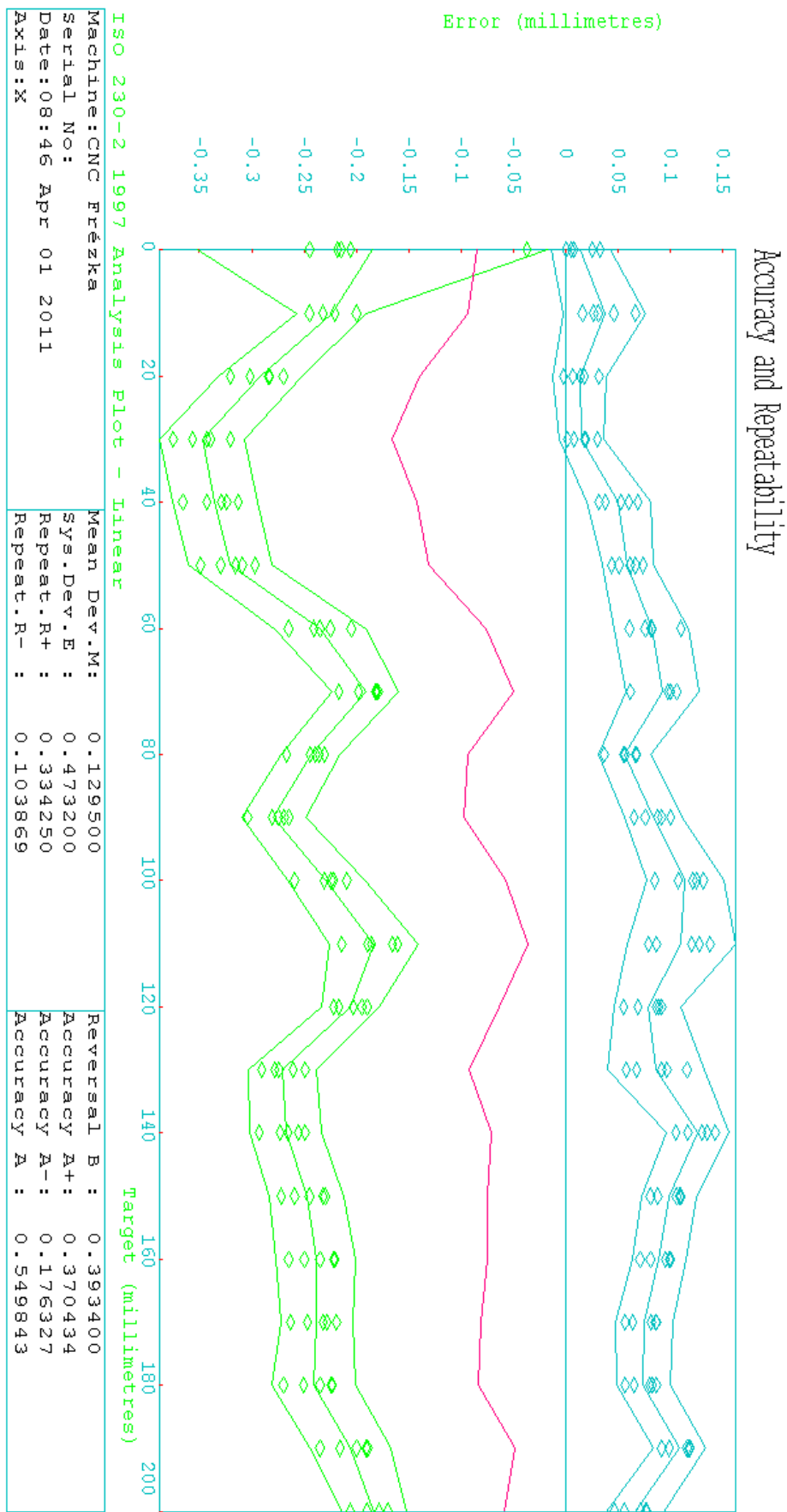
Výstup ze softwaru po zpracování dat dle příslušné normy je graf spolu s důležitými informativními hodnotami. X osa grafu vyjadřuje polohu posuvu v mm. Y osa vyjadřuje úchylku polohy posuvu (v poloze) také v milimetrech. Graf se sestává ze sedmi čar. Pro popis bude nejvýše položená čára brána jako první a nejnižší položená čára jako sedmá.

- **První čára** - hranice úchylek x_i horní ve směru pohybu posuvu 0 až 200 mm ($x_i + 2s_i$).
- **Druhá čára** - průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze.
- **Třetí čára** - hranice úchylek x_i dolní ve směru pohybu posuvu 0 až 200 mm ($x_i - 2s_i$).
- **Čtvrtá čára** - Průměrná oboustranná polohová úchylka v poloze.
- **Pátá čára** - hranice úchylek x_i horní ve směru pohybu posuvu 200 až 0 mm ($x_i + 2s_i$).
- **Šestá čára** - průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze.
- **Sedmá čára** - hranice úchylek x_i dolní ve směru pohybu posuvu 200 až 0 mm ($x_i - 2s_i$).



Obr. 64. Přesnost polohování

Graf lze rozdělit na dvě části, kde dělicí čára je tvořena nulovou úchylkou polohy posuvu. Nad dělicí čarou je vyobrazena průměrná polohová úchylka ohraničená horní a dolní úchylkou. Tyto polohové úchylky vznikají při pohybu posuvu z nulového bodu do maximálního bodu posuvu. Pod dělicí čarou je rovněž průměrná polohová úchylka ohraničená horní a dolní úchylkou s tím rozdílem, že tato úchylka vzniká při pohybu posuvu z maximální vzdálenosti do nulového bodu. Horní a dolní úchylky jsou v rozsahu $2s$, což znamená, že s pravděpodobností 95% budou hodnoty úchylek polohy posuvu ležet v těchto hranicích. Zprůměrováním průměrných jednostranných polohových úchylek získáme průměrnou oboustrannou polohovou úchylku v poloze, což je velice užitečný údaj. Křivka udává, jaká bude úchylka polohy posuvu v dané poloze vůči požadované poloze posuvu. Tuto křivku, podporuje-li to řídicí software, lze využít pro dodatečné zpřesnění polohování posuvu stroje. Křivka se v inverzní podobě nahraje do řídicího softwaru a ten pak dle ní upravuje polohu posuvu. Ví-li se například, že posuv 150 mm od nulového bodu je ve skutečnosti v pozici 149 mm, software automaticky o tento rozdíl provede korekci polohy posuvu.



Obr. 65. Výsledky měření přesnosti polohování osy X

Pod grafem jsou vyhodnoceny nejdůležitější parametry přesnosti polohování příslušné osy. Jsou to:

- **M** - průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose,
- **E** - dvoustranná systematická polohová úchylka v ose - s 95% pravděpodobností vykoná posuv chybu o této hodnotě,
- **R** - opakovatelnost nastavení polohy v ose - (R+) - ve směru $0 \rightarrow \text{MAX}$.
- (R-) - ve směru $0 \leftarrow \text{MAX}$.
- **B** - necitlivost v ose - určuje kdy dojde k pohybu posuvu v okamžiku, pohybuje-li se posuv jedním směrem, zastaví a začne se pohybovat opačným směrem,
- **A** - dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose - (A+) - ve směru $0 \rightarrow \text{MAX}$.
- (A-) - ve směru $0 \leftarrow \text{MAX}$.

Hodnota parametru A, čili dvoustranné přesnosti nastavení polohy v ose, je nejdůležitější údaj z celého měření. Udává, že s 95% pravděpodobností, bude požadovaná hodnota polohy posuvu rozdílná vůči reálné hodnotě posuvu o hodnotu parametru A. Čili parametr A je přesnost polohování.

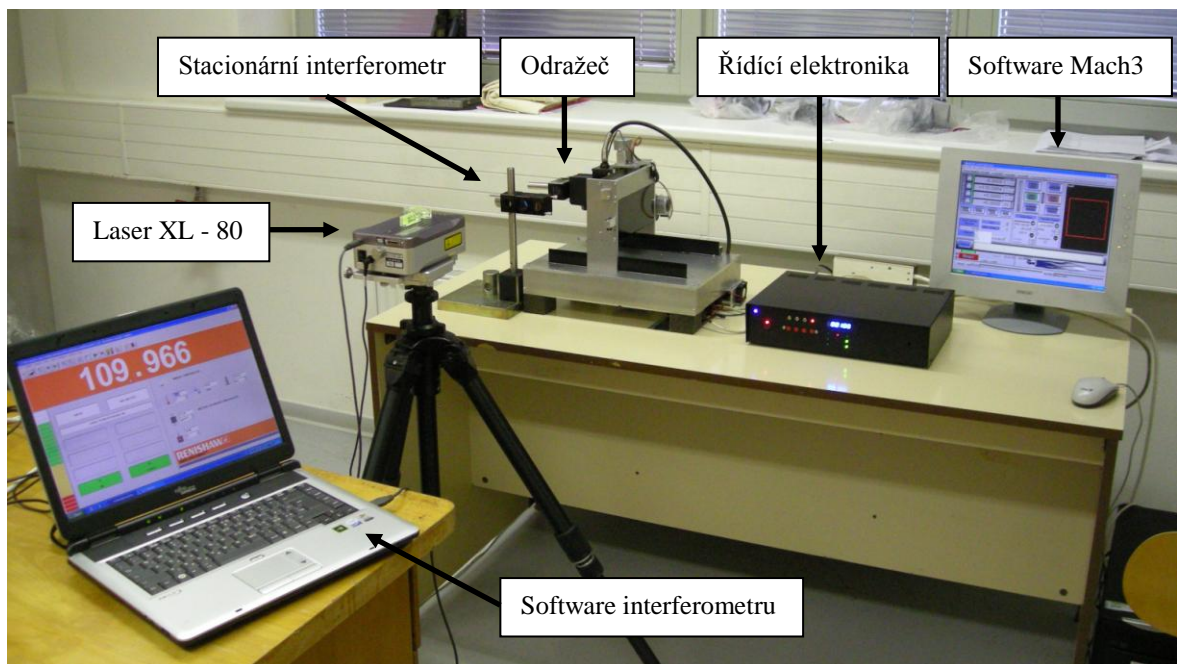
Dvoustranná přesnost polohování u osy X je 0,55 mm. Z grafu lze vyčíst, že přesnost polohování ve směru od nulové pozice do maximální pozice (200 mm) činí 0,18 mm. V opačném směru je tato přesnost 0,37 mm. Rozdíl přesností v jednotlivých směrech je přičítán protahování ozubeného řemene, kdy při polohování z nulové do maximální pozice je upnutí řemene blíže ke krokovému motoru, tudíž je i pracovní délka řemene menší a s tím spjaté i menší protažení. Čím je ozubený řemen delší, tím je protažení větší. Přesnost polohování osy X by tedy bylo možno zlepšit tužším ozubeným řemenem, který by tolik nepodléhal protažení při zatížení.

11.2 Osa Y

Po proměření přesnosti osy X následovalo proměření osy Y. Princip měření této osy je totožný s principem měření osy X. Malý rozdíl spočíval v jiném rozestavení optické soustavy, kdy laser XL - 80 byl přesunut do dráhy osy Y a stacionární interferometr s odražečem

pootočen o 90° ve směru laserového paprsku. Sestava stacionárního interferometru zůstala totožná jako u osy X.

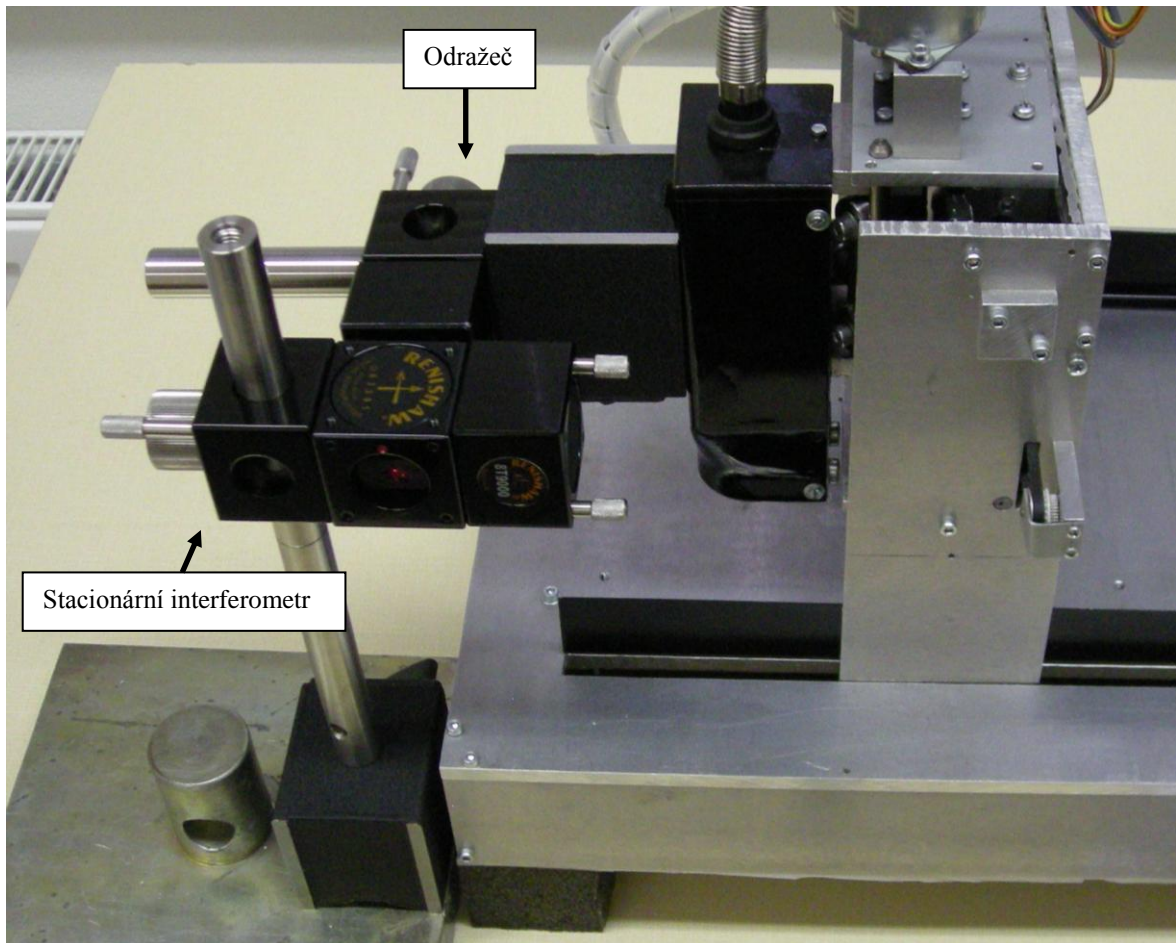
Po rozestavení měřících prvků bylo potřeba opět seřídít paprsek laseru tak, aby odražený paprsek měl co možná nejvyšší intenzitu. Zprvu byla za pomoci libel zkontrolována vyváženost CNC frézky. Pak bylo potřeba opětovně vyvážit laser XL - 80, z důvodu jeho přesunu do směru pohybu osy Y. Po dokončení vyvážení bylo na řadě seřízení měřících prvků, kdy se opět díky použití většího odražeče podařilo dosáhnout vysoké intenzity odraženého laserového paprsku. Nastala zde ovšem situace nekonstantní intenzity laserového paprsku po délce posuvu osy. V koncových polohách se vyskytovala vysoká intenzita, zatímco ve středu posuvu se intenzita pohybovala o něco níže, nicméně stále ve vyhovujícím zeleném poli. Tento jev je vysvětlován skutečností, že díky velkému zatížení vedení, které bylo navýšeno hmotností magnetické upínací kostky s příslušenstvím a samotnou hmotností odražeče, docházelo k jeho prohýbání, přičemž právě střed vedení je na tyto deformace nejnáchylnější.



Obr. 66. Měřicí sestava pro osu Y

Po zkušenosti s nekorektní kalibrací posuvu osy X, byla využita vysoká přesnost použitého měřícího zařízení a provedena kalibrace i této ose. Zde byl dokonce větší předpoklad vzniku nepřesné kalibrace posuvu, jelikož došlo ke konstrukčním úpravám na převodovém systému posuvu. Ke kalibraci nastavení krokového motoru osy Y byla také využita funkce

softwaru *Mach3 Axis Calibration*. Kalibrace proběhla na maximální délce posuvu, která činí 115 mm. Po urazení této vzdálenosti se potvrdily domněnky o nepřesné kalibraci osy. Rozdíl mezi požadovanou a skutečně vykonanou hodnotou posuvu činil necelé 3 mm. Zadááním skutečně urazené dráhy posuvu do funkce *Axis Calibration* proběhlo přepočítání parametrů nastavení krokového motoru. Ověření správnost kalibrace osy se uskutečnilo totožným postupem.



Obr. 67. Sestava stacionárního interferometru, odražeč, osa Y

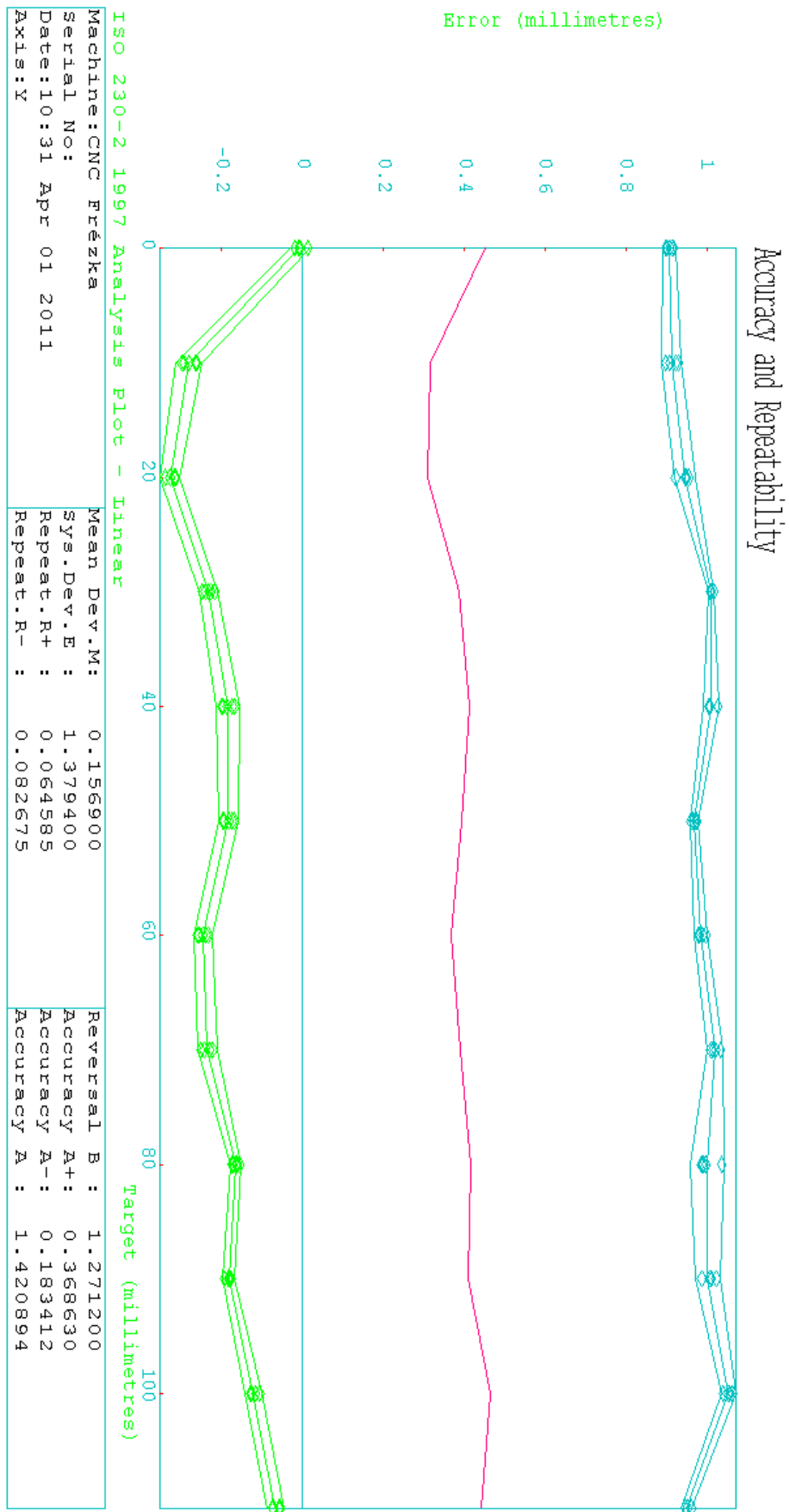
Kalibraci posuvu bylo vše připraveno pro samotné měření přesnosti polohování osy Y. Maximální délka posuvu této osy činí 115 mm. Pro eliminaci chyb vzniklých např. vůlemi mezi ozubeným řemenem a ozubenými koly, vůlemi vzniklými v ukotvení ozubeného řemene k systému vedení, vůlemi v převodovém systému osy Y, atd., se rozhodlo přejet o 2 mm v koncových polohách posuvu. Ve srovnání s osou X, kde přejetí činilo pouze 1 mm, zde byly navrženy 2 mm z důvodu předpokladu větších vůlí v převodovém systému posuvu. Vyhodnocování přesnosti polohování osy Y se tak uskutečnilo na délce 110 mm.

Pro již zmíněnou eliminaci chyb v mechanických částech bylo v koncových polohách pozicováno do souřadnic $Y = -2$ mm a $Y = 112$ mm.

Délka kroku byla s ohledem na velikost dráhy posuvu stanovena na 5mm. Je to dostačující krokování k získání vyhovujícího množství naměřených dat vypovídajících o přesnosti polohování osy Y. Počet "runů" byl rovněž stanoven na 5, jako u osy X. Po každém kroku následovala krátká časová prodleva, při níž došlo k ustálení posuvu, jenž byl rozkmitán setrvačnou silou vznikající zastavením posuvu. V prodlevě rovněž docházelo k potvrzení umístění posuvu v požadované poloze do softwaru laserového interferometru. Rychlost posuvů byla stanovena identická pro všechny osy, a to $f = 250$ mm/min. Souřadnice jednotlivých kroků se zadávaly ručně na počítači v příkazovém řádku softwaru Mach3.

Zjištěné Výsledky:

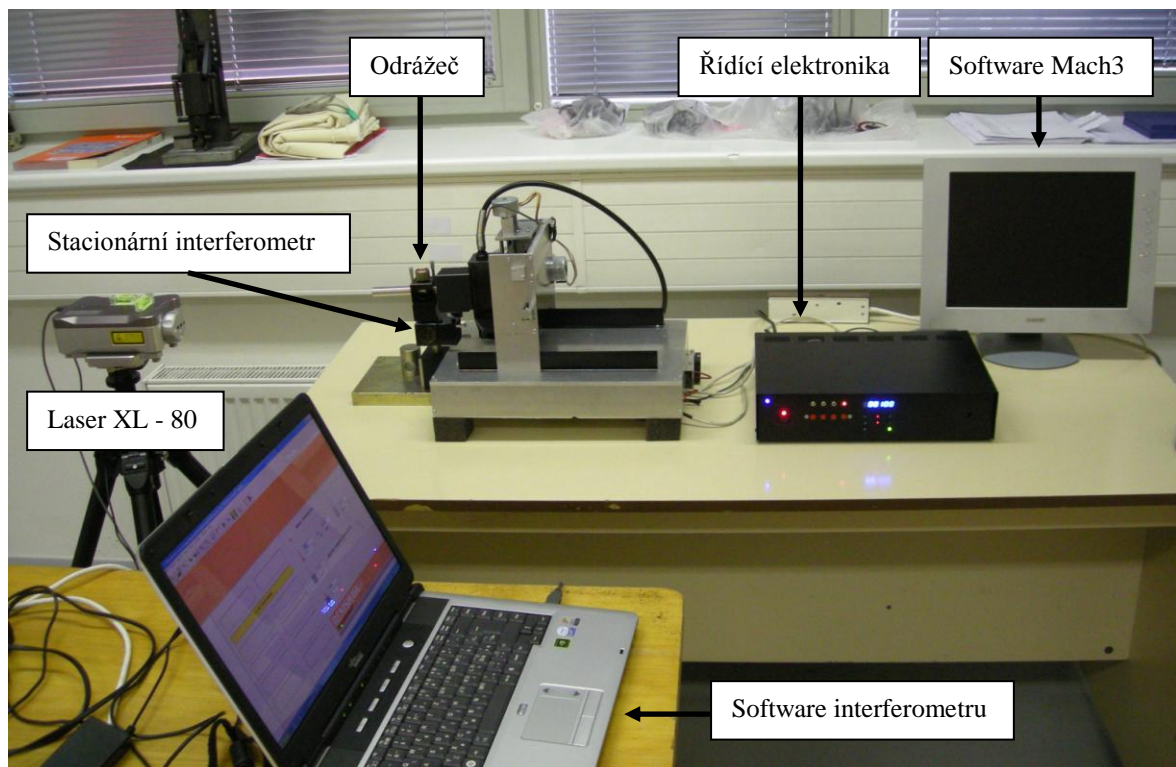
Výsledná dvoustranná přesnost polohování této osy je 1,42 mm. Tato chyba je již značná, ale jak lze vidět na výsledném grafu, vzniká velký rozdíl mezi směry posuvu. Nízká přesnost této osy je přičítána protahování ozubeného řemene, jenž má ještě menší průřez než ozubený řemen osy X. Největší nepřesnost do této osy ovšem vnáší ozubený převodový systém. Tuto skutečnost potvrzuje i parametr necitlivosti v ose B, který činí 1,27 mm. Přesnost polohování osy by bylo možno zvýšit použitím tužšího ozubeného řemene tak, aby nedocházelo k jeho protahování, a odstraněním vůlí v převodovém systému ozubenými koly. Jako nejlepší řešení se naskýtá tuto převodovou část z konstrukce úplně vypustit a stávající krokový motor nahradit výkonnějším, jenž by ozubený řemen poháněl přímo bez použití převodových systémů. Tím by se možnost vzniku nepřesnosti vůči stávajícímu řešení značně snížila.



Obr. 68. Výsledky měření přesnost polohování osy Y

11.3 Osa Z

Poslední osou, u níž bylo možno provést měření přesnosti polohování, je osa Z. Proměření této osy bylo bráno spíše jako doplňující, jelikož díky malým rozměrům CNC frézky nebylo jisté, zda bude proměření vůbec realizovatelné z důvodu malých prostorových dispozic pro umístění optických prvků. Panovaly zde rovněž obavy, zda bude mít krokový motor osy Z dostačující krouticí moment, aby dokázal pohybovat těžkým břemenem jaké upínací magnetická kostka s příslušenstvím a odražečem představovalo. Stacionární interferometr se přestavěl tak, aby se laserový paprsek vysílaný v rovině XY zlomil o 90° do roviny YZ dle souřadného systému CNC frézky. Laser XL - 80 byl přesunut do směru posuvu osy X, tak jako tomu bylo při měření přesnosti polohování osy X.



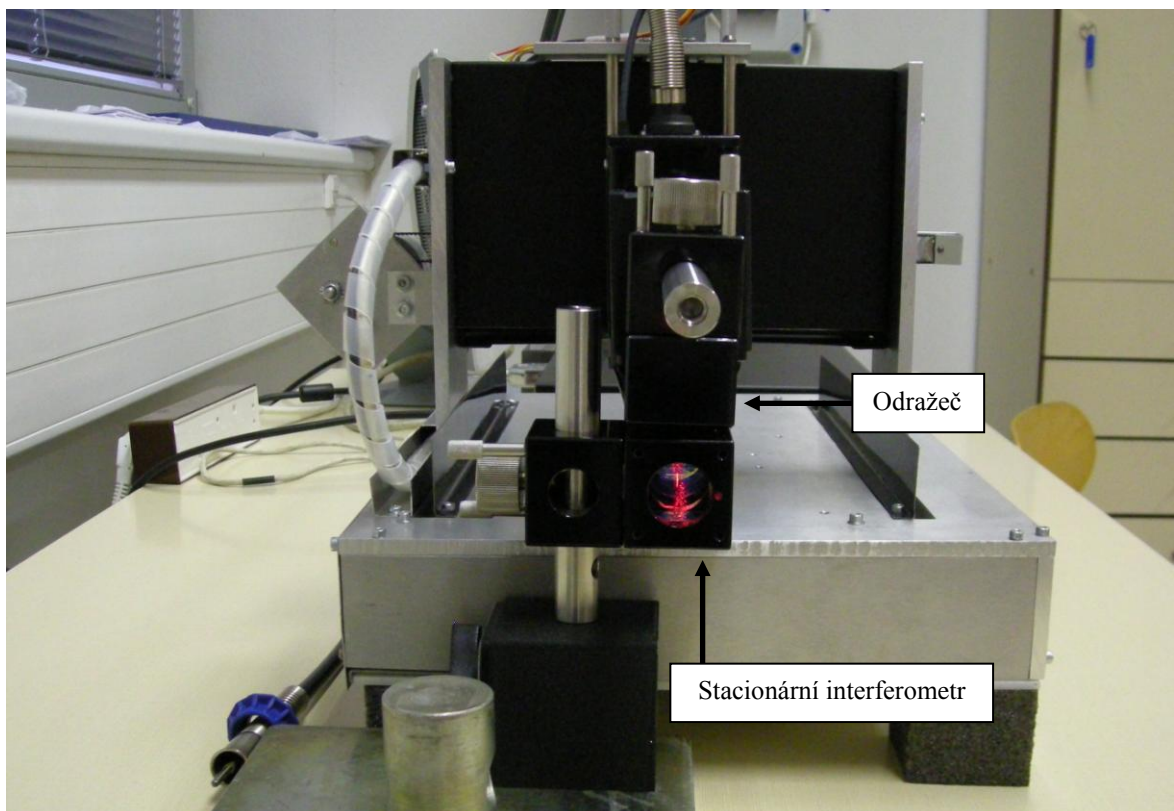
Obr. 69. Měřicí sestava pro osu Z

S laserem XL – 80 bylo manipulováno, tudíž se provedlo jeho opětovné vyvážení pomocí libel ve dvou rovinách. Rovněž byla zkontrolována i vyváženost CNC frézky. Následovalo seřízení měřících prvků tak, aby se podařilo dosáhnout co největší intenzity odraženého laserového parsku. Zároveň s touto operací bylo zjištěno, že krouticí moment krokového motoru osy Z se zdá dostatečný na to, aby měření přesnosti posuvu mohlo proběhnout. Seřízení měřících prvků s intenzitou laserového parsku v zelených, vyhovujících polích se ukázalo jako velice obtížné. Tento problém způsobila sestava stacionárního interferometru,

kde díky vychýlení laserového paprsku byla celá sestava mnohem citlivější na přesnou manipulaci. I přes tyto ztěžující okolnosti se nakonec podařilo dosáhnout vyhovující intenzity paprsku po celé délce posuvu. Nevýhoda tkvěla ve faktu, že když už bylo velice obtížné dosáhnout vyhovující intenzity odraženého paprsku s pomocí většího odražeče, bylo takřka vyloučené použití menšího odražeče, jenž vyžaduje mnohem přesnější seřízení měřících prvků. Značná výhoda menšího odražeče spočívá v daleko nižším zatížení vedení osy Z, čímž by se zaručil dostatečný výkon krokového motoru této osy.

Provedení kalibrace této osy bylo nutné, jelikož došlo ke konstrukčním úpravám ve formě kompletní výměny posuvového šroubu s maticí za mnohem přesnější typ. Ke kalibraci posuvu byla opět využita funkce softwaru *Mach3 Axis Calibration*. Ta byla provedena na maximální délce posuvu osy, tedy na 28 mm. Ověření správnosti kalibrace posuvu bylo provedeno kontrolou o stejném postupu práce.

Po úspěšné kalibraci posuvu nic nebránilo k přistoupení měření přesnosti polohování. Na této ose bylo rozhodnuto přejet v koncových polohách o 1 mm, rovněž pro eliminaci chyb vzniklých v mechanických převodech. Tudíž samotná přesnost polohování se vyhodnocovala na délce 25 mm s pozicováním do koncových poloh $Z = -1$ a $Z = 26$ mm.

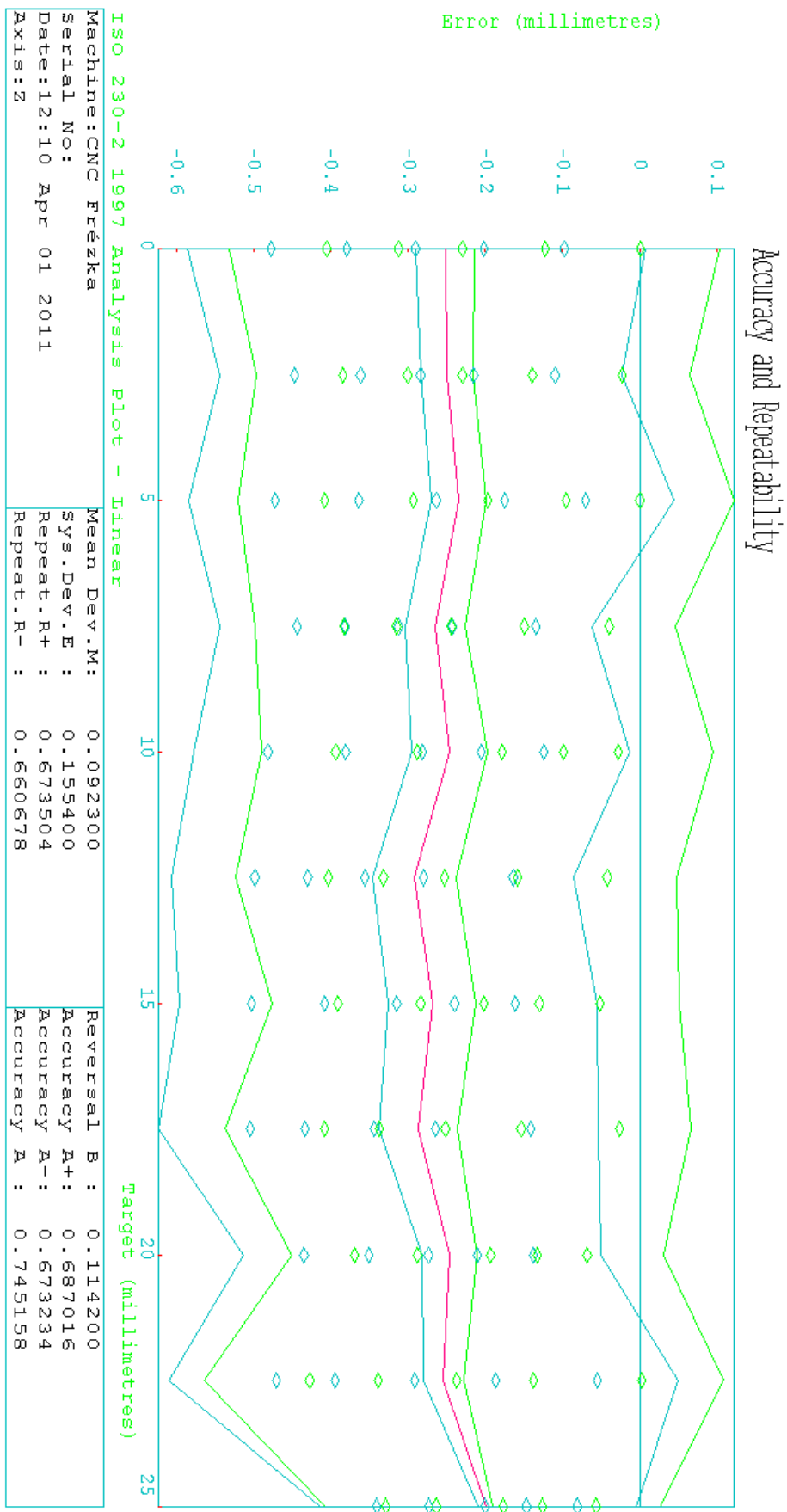


Obr. 70. Sestava stacionárního interferometru, odražeč, osa Z

Vyhodnocována délka 25 mm byla rozdělena kroky po 2,5 mm tak, aby počet získaných dat byl dostatečně vypovídající o přesnosti polohování osy Z. Počet "runů" tak jako tomu bylo u osy X a Y byl rovněž stanoven na 5. I zde po každém kroku následovala krátká prodleva pro ustálení posuvu rozkmitaného setrvačnou silou při zastavení, a pro potvrzení polohy posuvu v softwaru laserového interferometru. Rychlost posuvů byla stanovena identická pro všechny osy, a to $f = 250$ mm/min. Souřadnice jednotlivých kroků se zadávaly ručně na počítači v příkazovém řádku softwaru Mach3.

Zjištěné Výsledky:

Z grafu přesnosti polohy osy Z je patrné, že s každým „runem“ se o stejnou hodnotu zmenšila přesnost polohování. Tento jev s největší pravděpodobností nastal díky vysoké zátěži upnuté optické soustavy interferometru na ose. Při pohybu posuvu z dolní polohy do horní, krokový motor nejspíše postrádal dostatečný krouticí moment. Než došlo k rozpohybování posuvu, motor nevykonal plné krokování, či dokonce některé kroky nevykonal vůbec. Měřením vplynula hodnota velikosti nepřesnosti nastavení polohy 0,75 mm. Vzhledem ale k novému posuvu s bezvúlovou maticí je tato vysoká hodnota nepřesnosti málo pravděpodobná. Jako jediné vysvětlení takovéto nepřesnosti dává verze s nedostatečným krouticím momentem motoru. Vzhledem k tomuto ovlivnění měření, nelze brát zjištěné výsledky jako pravdivé. V tomto případě by muselo být provedeno nové měření, za použití menšího odražeče s daleko menší hmotností. Bohužel se při pokusech použití tohoto odražeče nepodařilo dosáhnout vyhovující intenzity laserového paprsku, tudíž měření nemohlo být provedeno.



Obr. 71. Výsledky měření přesnost polohování osy Z

11.4 Využití naměřených parametrů posuvů

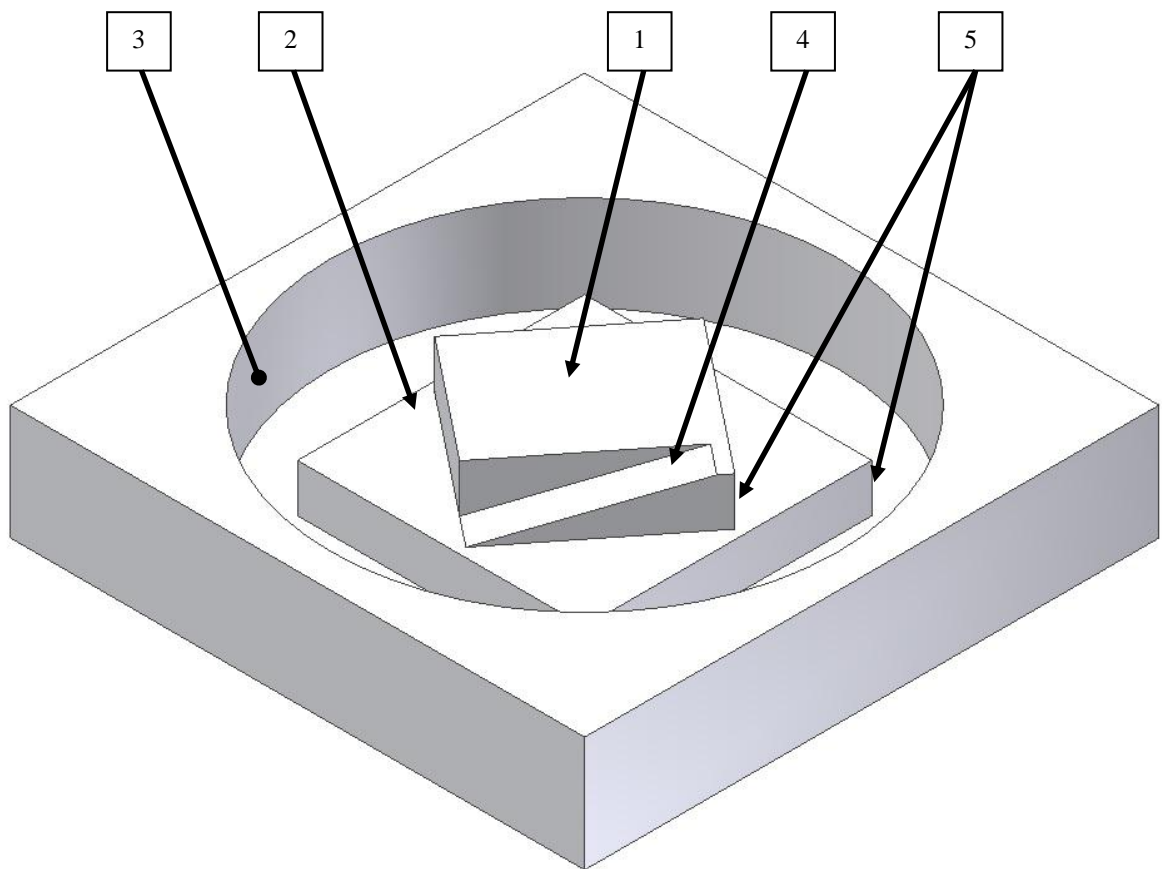
Získané hodnoty přesnosti polohování jednotlivých os neslouží pouze k vyobrazení dané skutečnosti, ale lze je využít k samotnému zpřesnění polohování. Jedna z možností je využití křivky průměrné oboustranné polohové úchytky v poloze. Dle velikosti úchylek od nulové čáry můžeme stanovit, do kterých míst je vhodné upínat polotovary. Pokud bude na obrobku místo se zvýšenou přesností rozměru, jednoduše jej upneme do míst, kde je průměrná oboustranná polohová úchytky v poloze nejbližší nule.

Jak již bylo řečeno, tuto křivku lze, podporuje-li to řídicí software, využít mnohem efektivněji. Průběh křivky se v inverzní podobě nahraje do řídicího softwaru, a ten pak dle ní koriguje polohu posuvu, jelikož zná velikosti úchylek daných poloh vůči požadované poloze. V software Mach3 se tato funkce nazývá *Screw Mapping Corrections*. V této fázi vývoje CNC frézky nejsou doposud instalovány snímače nulových bodů os, které jsou pro aktivaci této funkce potřebné.

Dále lze také využít údaje o necitlivosti v ose. Parametr *B*. V softwaru Mach3 se nachází funkce *Backlash*, kde lze nakonfigurovat velikost vůli v pohybových mechanismech jednotlivých os.

12 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ

K ověření funkčnosti zkonstruované CNC frézky bylo vyrobeno celkem deset zkušebních vzorků. Ty jsou navrženy tak, aby bylo možno srovnat činnost frézky v jednotlivých osách (Obr. 72), přičemž vyhodnocení probíhá formou porovnání naprogramovaných rozměrů se skutečnými rozměry vyrobených vzorků. Zkušební vzorek lze z hlediska spolupráce jednotlivých os rozdělit na pět částí. V první a třetí části spolupracují osy X-Y, v druhé části pracují osy X a Y samostatně. Čtvrtá část prověřuje všechny tři osy současně. Funkčnost osy Z je sledována v páté části na hloubce profilu.



Obr. 72. Zkušební vzorek

Zkušební vzorky jsou vyrobeny z materiálu Necuron 651. Jde o strojově lehce a rychle opracovatelný materiál určen pro všeobecné modelářství.

Vlastnosti Necuronu 651 [22]:

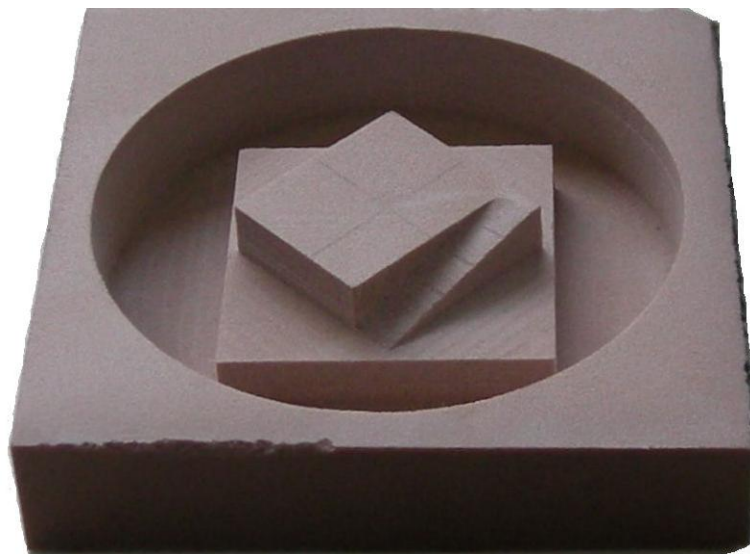
Oblast použití: Prototypové a kopírovací modely

(Hlavní) Návrhářské modely

	Pracovní modely	
Barva:	Hnědá	
Technická data:	Koeficient tepelné roztažnosti (ISO 75):	ca. $52 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
	Teplotní odolnost:	ca. $70 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tvrдость Shore D (ISO 868):	ca. 67
	Pevnost v tlaku (ISO 604):	ca. 26 N/mm^2
	Pevnost v ohybu (ISO 178):	ca. 30 N/mm^2
	Měrná hmotnost:	ca. $0,70 \text{ g/cm}^3$
	- neobsahuje žádné halogeny, změkčovadla nebo rozpouštědla	
	- vyrobeno bez přísad znečišťující vodu	
Nástroje:	Nástroje pro zpracování dřeva nebo kovu	

Necuron 651 neobsahuje žádná plnidla, která uvolňují při broušení nebezpečný prach. Obsah prachu ve vzduchu by přesto neměl překročit 6 mg/m^3 . Při zpracování by měla být dodržována ochranná opatření, doporučena profesní skupinou chemického průmyslu. [22]

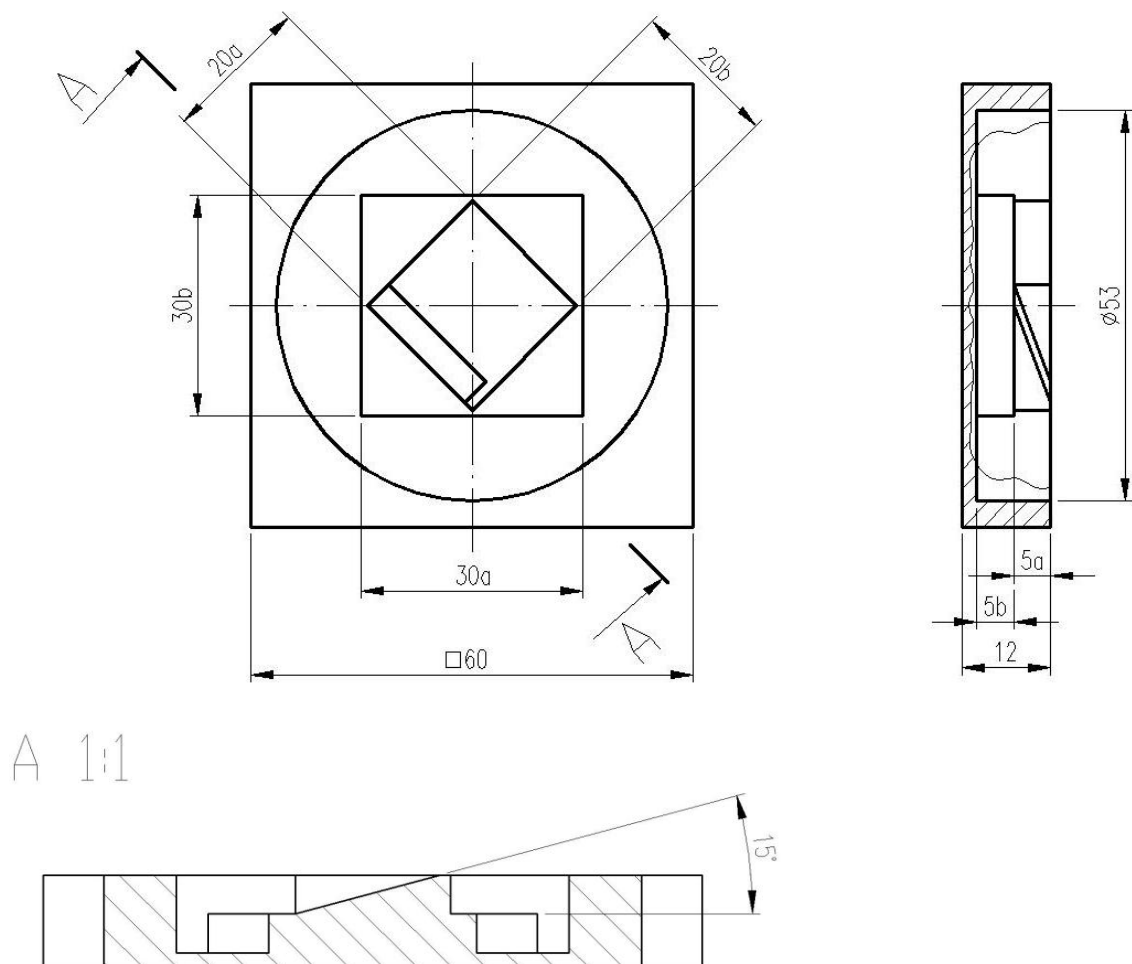
Ve vytvrzeném stavu není žádná obsažená látka nebezpečná ve smyslu nařízení o nebezpečných látkách. Vzniklé odpady je možno spalovat ve vhodném povoleném zařízení nebo přivážet na povolenou skládku za dodržení zákonných předpisů. [22]



Obr. 73. Zhotovený zkušební vzorek

Zkušební vzorky byly vyrobeny při stejných řezných rychlostech, kde rychlost posuvů činila 0,07 m/min a otáčky vřetene 20 000 ot./min. Jako obráběcí nástroj byla použita 4 břitá fréza o \varnothing 3mm.

CNC program zkušební vzorku byl vytvořen v CAD/CAM softwaru EdgeCAM. Polotovar má tvar kvádr s podstavou čtverce o délce stran 60 mm. Ve středu je kruhová díra o hloubce 10mm, uvnitř které se nachází větší kvádr o délce stran 30 mm a výšce 5 mm. Na tomto kvádru je menší kvádr o délce stran 20 mm a výšce 5 mm, jenž je pootočen oproti většímu kvádru o 90° . Část tohoto kvádru navíc obsahuje šikmou plochu o šířce 4 mm pod úhlem 15° . Měřené rozměry jsou zakótovány na následujícím schématu.



Obr. 74. Schéma zkušební vzorku

12.1 Naměřené hodnoty

Zkoumané rozměry zkušebních vzorku byly měřeny měřidly uvedenými v Tab. 6. Tato měřidla mají vyhovující rozlišitelnost vzhledem k přesnosti, s jakou frézka obrábí.

Tab. 6. Použitá měřící zařízení

Název	Označení (výrobce)	Rozsah měření	Rozlišitelnost	Měřené rozměry
Výškoměr	Mitutoyo 192-663-10	0-300 mm	0,01 mm	5a, 5b
Posuvné měřítko	JOBI profi G06006312	0-150 mm	0,01 mm	20a, 20b, 30a, 30b, Ø53p
Optický úhломěr	Somet A1-018	0°-90°	10'	15°u

Podmínky měření:

Měření proběhlo za těchto podmínek: teplota vzduchu 21 °C, tlak vzduchu 1010 hPa, vlhkost vzduchu 69%.

Standardní nejistota typu A:

Jedná se o základní kvantitativní charakteristiku nejistoty měření. Označuje se symbolem u_A (z anglického uncertainty). Tato nejistota odpovídá v podstatě náhodným chybám dle klasického přístupu. Jejich příčiny se považují za neznámé a hodnota nejistoty typu A klesá s počtem měření. Proto se požaduje minimálně 5 - 10 měření. Je vyhodnocena pomocí statistických metod a je charakterizována standardní odchylkou aritmetického průměru.

Výpočet nejistoty u_A :

a) Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

\bar{x} - aritmetický průměr je statistická veličina, která v jistém smyslu vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot.

x_i - *i*tá hodnota

n - celkový počet hodnot

b) Směrodatná odchylka

$$s_o = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

s_o - směrodatná odchylka je kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru.

c) Nejistota typu A

$$k_{uA} \leq 10 = 1 \quad (5)$$

$$u_A = k_{uA} \cdot \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (6)$$

k_{uA} - koeficient nejistoty typu A, závislý na počtu zkoumaných hodnot

K výpočtům byl využit software Microsoft Excel.

Tab. 7. Naměřené rozměry zkušebních vzorků

Vzorek č. 1									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,84	20,04	29,91	30,03	5,08	4,99	15°10'	53,33	53,32
2	19,86	20,01	29,93	30,02	5,05	5,01	15°12'	53,38	53,35
3	19,85	20,02	29,90	30,03	5,07	5,00	15°12'	53,42	53,45
4	19,85	20,01	29,92	30,01	5,05	5,01	15°11'	53,36	53,37
5	19,83	20,03	29,92	30,00	5,06	4,98	15°11'	53,42	53,41
Průměr	19,85	20,02	29,92	30,02	5,06	5,00	15°11'	53,38	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	
Vzorek č. 2									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,83	20,06	29,93	30,06	5,04	4,98	15°11'	53,40	53,39
2	19,81	20,03	29,90	30,05	5,05	4,99	15°14'	53,36	53,35
3	19,83	20,04	29,88	30,03	5,03	4,97	15°12'	53,34	53,46
4	19,80	20,06	29,91	30,05	5,03	5,01	15°11'	53,37	53,34
5	19,81	20,05	29,92	30,04	5,02	4,98	15°13'	53,44	53,41
Průměr	19,82	20,05	29,91	30,05	5,03	4,99	15°12'	53,38	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	
Vzorek č. 3									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,86	20,08	29,92	30,01	5,07	5,03	15°12'	53,43	53,35
2	19,89	20,06	29,90	30,00	5,06	5,02	15°10'	53,38	53,39
3	19,87	20,06	29,90	29,99	5,06	5,00	15°09'	53,40	53,44
4	19,88	20,07	29,91	30,02	5,08	5,02	15°10'	53,32	53,35
5	19,89	20,09	29,91	30,01	5,05	5,01	15°12'	53,43	53,41
Průměr	19,88	20,07	29,91	30,01	5,06	5,02	15°11'	53,39	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	

Vzorek č. 4									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,82	20,03	29,89	30,04	5,05	5,00	15°11'	53,45	53,41
2	19,79	20,02	29,88	30,02	5,05	4,98	15°10'	53,37	53,38
3	19,81	20,04	29,88	30,05	5,03	4,99	15°13'	53,41	53,40
4	19,83	20,07	29,87	30,04	5,04	4,98	15°10'	53,34	53,34
5	19,82	20,05	29,88	30,03	5,03	5,01	15°12'	53,45	53,39
Průměr	19,81	20,04	29,88	30,04	5,04	4,99	15°11'	53,40	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	
Vzorek č. 5									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,80	20,05	29,91	29,98	5,08	5,01	15°10'	53,43	53,35
2	19,78	20,02	29,88	30,00	5,06	5,01	15°09'	53,45	53,44
3	19,82	20,02	29,90	30,02	5,08	4,99	15°10'	53,38	53,39
4	19,81	20,04	29,88	30,00	5,07	5,00	15°11'	53,43	53,37
5	19,80	20,02	29,89	29,99	5,05	5,01	15°10'	53,37	53,43
Průměr	19,80	20,03	29,89	30,00	5,07	5,00	15°10'	53,41	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	
Vzorek č. 6									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,87	20,05	29,90	30,01	5,04	4,96	15°13'	53,34	53,44
2	19,85	20,04	29,91	30,00	5,06	4,99	15°11'	53,38	53,38
3	19,87	20,08	29,90	30,00	5,04	4,97	15°14'	53,41	53,39
4	19,86	20,06	29,90	29,99	5,03	4,97	15°13'	53,32	53,37
5	19,88	20,08	29,92	30,02	5,06	4,99	15°12'	53,39	53,33
Průměr	19,87	20,06	29,91	30,00	5,05	4,98	15°13'	53,37	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	
Vzorek č. 7									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,84	20,03	29,87	30,01	5,06	4,99	15°10'	53,39	53,36
2	19,85	20,01	29,88	29,99	5,09	4,97	15°10'	53,37	53,42
3	19,82	20,03	29,87	29,97	5,07	5,01	15°09'	53,46	53,38
4	19,84	20,02	29,90	30,00	5,07	4,97	15°11'	53,40	53,36
5	19,83	20,01	29,88	29,99	5,09	4,99	15°11'	53,42	53,44
Průměr	19,84	20,02	29,88	29,99	5,08	4,99	15°10'	53,41	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	

Vzorek č. 8									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,78	20,00	29,91	30,04	5,01	5,00	15°09'	53,42	53,39
2	19,81	20,02	29,90	30,01	5,01	4,98	15°08'	53,37	53,34
3	19,81	19,99	29,92	30,02	4,99	5,00	15°08'	53,34	53,40
4	19,79	20,00	29,89	30,00	5,00	4,97	15°07'	53,41	53,36
5	19,80	20,02	29,90	30,02	4,98	4,99	15°09'	53,44	53,45
Průměr	19,80	20,01	29,90	30,02	5,00	4,99	15°08'	53,40	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	
Vzorek č. 9									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,82	20,03	29,88	29,98	5,07	5,01	15°08'	53,34	53,47
2	19,79	20,01	29,86	29,96	5,09	4,99	15°09'	53,39	53,36
3	19,82	20,00	29,89	30,01	5,08	4,99	15°08'	53,42	53,39
4	19,81	20,03	29,86	30,00	5,06	4,98	15°10'	53,36	53,46
5	19,81	20,01	29,87	29,98	5,08	5,00	15°07'	53,45	53,40
Průměr	19,81	20,02	29,87	29,99	5,08	4,99	15°08'	53,39	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	
Vzorek č. 10									
Měření č.:	Rozměr 20a [mm]	Rozměr 20b [mm]	Rozměr 30a [mm]	Rozměr 30b [mm]	Rozměr 5a [mm]	Rozměr 5b [mm]	Úhel 15°u [mm]	Rozměr Ø53p [mm]	
1	19,81	20,03	29,92	29,99	5,03	4,98	15°13'	53,46	53,37
2	19,83	20,00	29,91	30,01	5,06	4,96	15°10'	53,41	53,46
3	19,85	20,01	29,93	30,02	4,98	4,98	15°11'	53,39	53,40
4	19,81	20,01	29,92	29,98	5,02	5,00	15°12'	53,44	53,38
5	19,82	20,04	29,90	29,99	5,01	4,99	15°11'	53,42	53,44
Průměr	19,82	20,02	29,92	30,00	5,02	4,98	15°11'	53,42	
Nejistota typu A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0°01'	0,01	

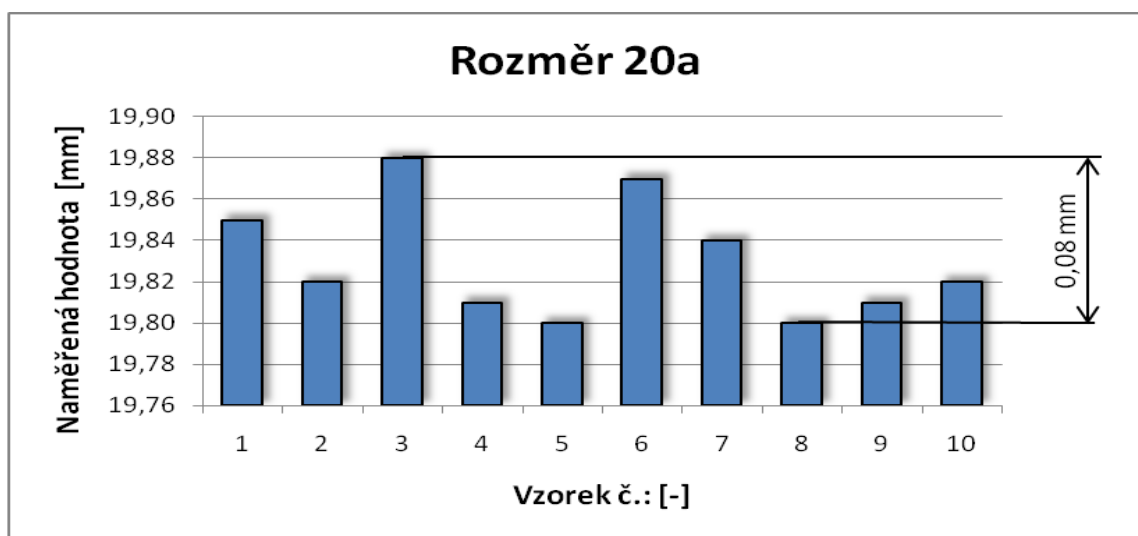
Pro zaručení opakovatelnosti (výsledků měření – těsnosti shody mezi výsledky po sobě následujících měření téže měřené veličiny, provedených za stejných podmínek měření) byly všechny zkušební vzorky vyrobeny z materiálu NECURON 651 při rychlostech posuvů 0,07 m/min. Otáčky vřetena činily 20 000 ot./min. Jako obráběcí nástroj byla použita válcová fréza o Ø 3 mm se čtyřmi břity.

Podmínky opakovatelnosti: tentýž postup měření, tentýž pozorovatel, tentýž měřicí přístroj, totéž místo, opakování v průběhu krátké časové periody.

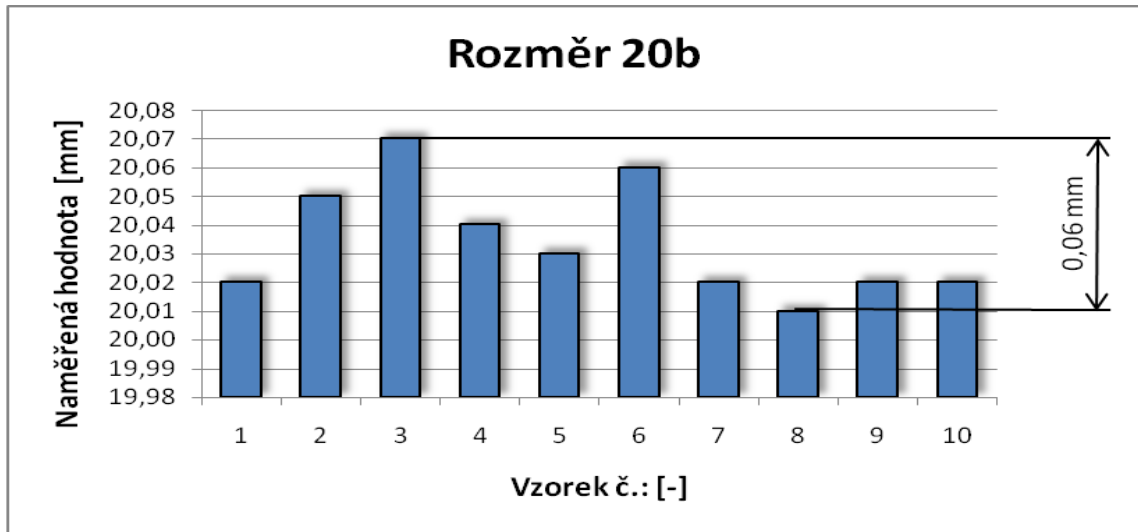
Tab. 8. Souhrn průměrných hodnot rozměrů všech zkušebních vzorků

Vzorek č.:	Programová hodnota 20 mm		Programová hodnota 30 mm		Programová hodnota 5 mm		Programová hod. 15°	Programová hod. Ø53 mm
	Rozměr	Rozměr	Rozměr	Rozměr	Rozměr	Rozměr	Úhel	Rozměr
	20a [mm]	20b [mm]	30a [mm]	30b [mm]	5a [mm]	5b [mm]	15° [°]	Ø53p [mm]
1	19,85±0,01	20,02±0,01	29,92±0,01	30,02±0,01	5,06±0,01	5,00±0,01	15°11'±0°01'	53,38±0,01
2	19,82±0,01	20,05±0,01	29,91±0,01	30,05±0,01	5,03±0,01	4,99±0,01	15°12'±0°01'	53,38±0,01
3	19,88±0,01	20,07±0,01	29,91±0,01	30,01±0,01	5,06±0,01	5,02±0,01	15°11'±0°01'	53,39±0,01
4	19,81±0,01	20,04±0,01	29,88±0,01	30,04±0,01	5,04±0,01	4,99±0,01	15°11'±0°01'	53,40±0,01
5	19,80±0,01	20,03±0,01	29,86±0,01	30,00±0,01	5,07±0,01	5,00±0,01	15°10'±0°01'	53,41±0,01
6	19,87±0,01	20,06±0,01	29,91±0,01	30,00±0,01	5,05±0,01	4,98±0,01	15°13'±0°01'	53,37±0,01
7	19,84±0,01	20,02±0,01	29,88±0,01	29,99±0,01	5,08±0,01	4,99±0,01	15°10'±0°01'	53,41±0,01
8	19,80±0,01	20,01±0,01	29,90±0,01	30,02±0,01	5,00±0,01	4,99±0,01	15°08'±0°01'	53,40±0,02
9	19,81±0,01	20,02±0,01	29,87±0,01	29,99±0,01	5,08±0,01	4,99±0,01	15°08'±0°01'	53,39±0,01
10	19,82±0,01	20,02±0,01	29,92±0,01	30,00±0,01	5,02±0,01	4,98±0,01	15°11'±0°01'	53,42±0,01
Variační rozpětí	0,08	0,06	0,06	0,06	0,08	0,04	0°05'	0,05

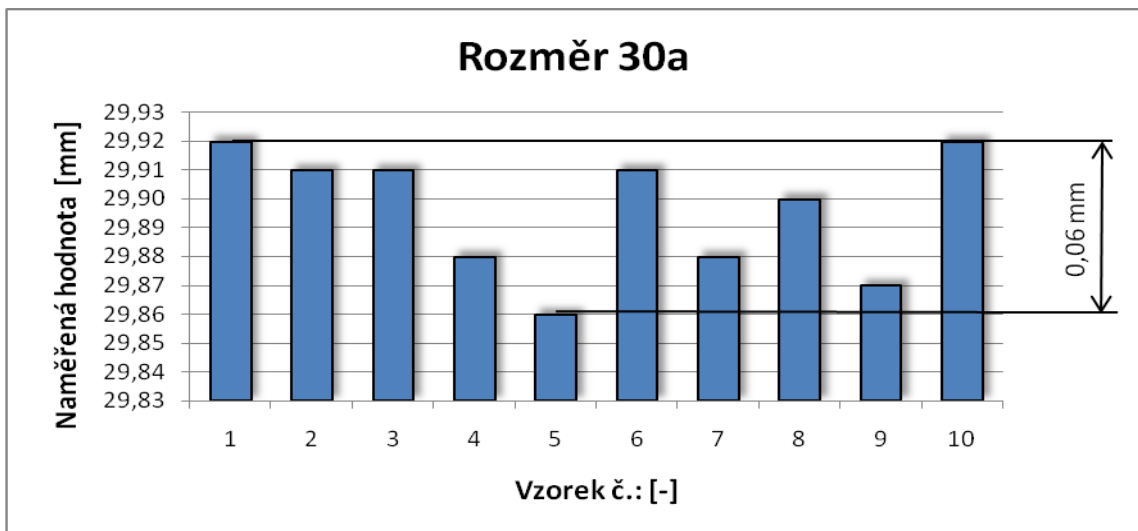
12.2 Grafické znázornění naměřených hodnot



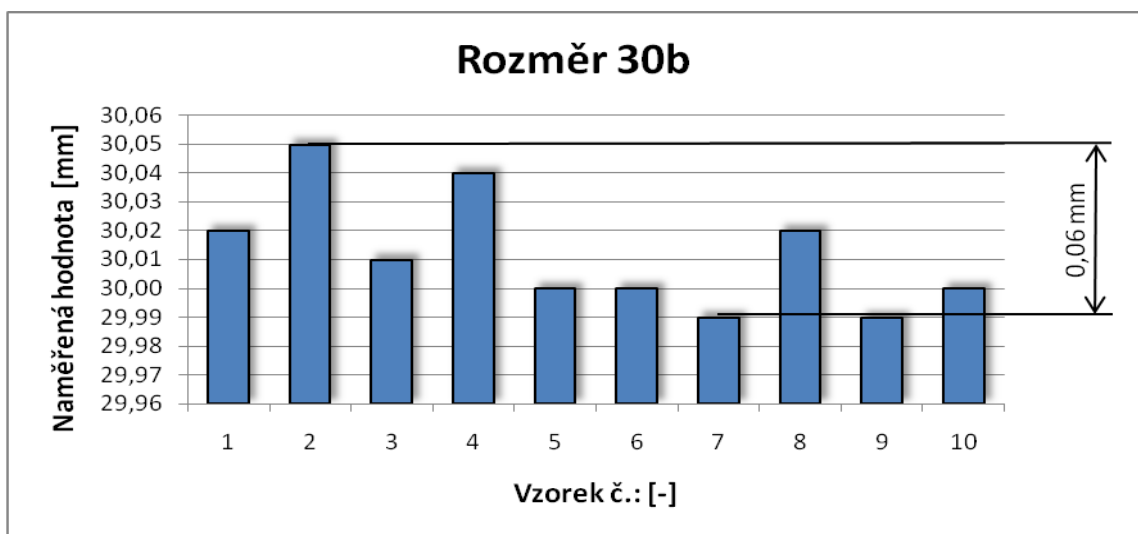
Obr. 75. Porovnání naměřených hodnot rozměru 20a



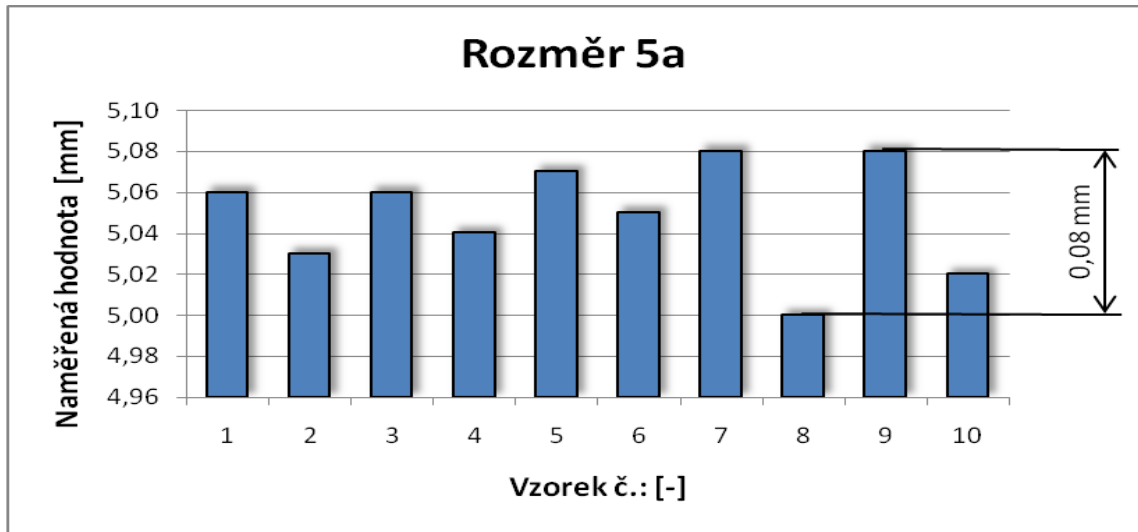
Obr. 76. Porovnání naměřených hodnot rozměru 20b



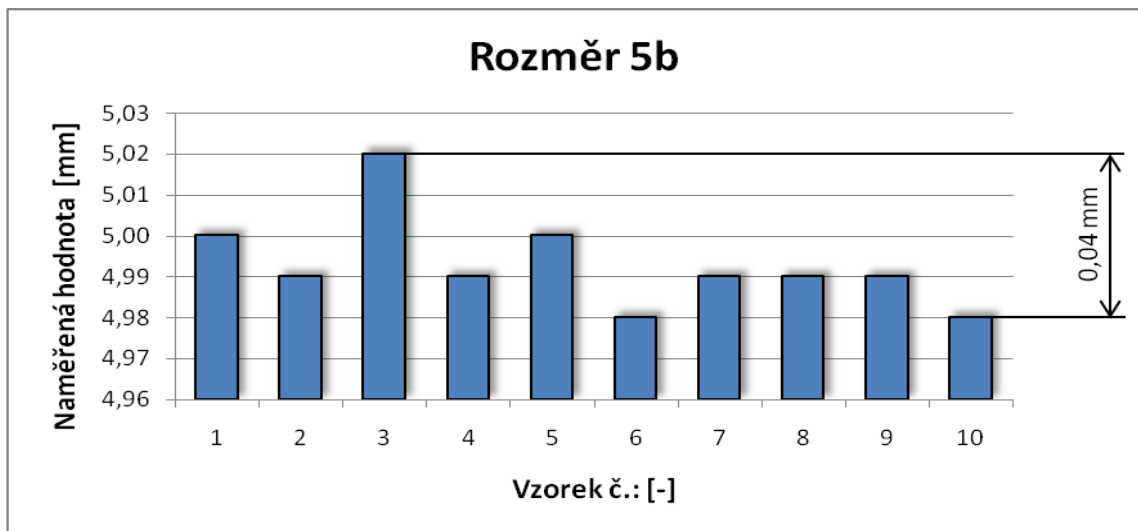
Obr. 77. Porovnání naměřených hodnot rozměru 30a



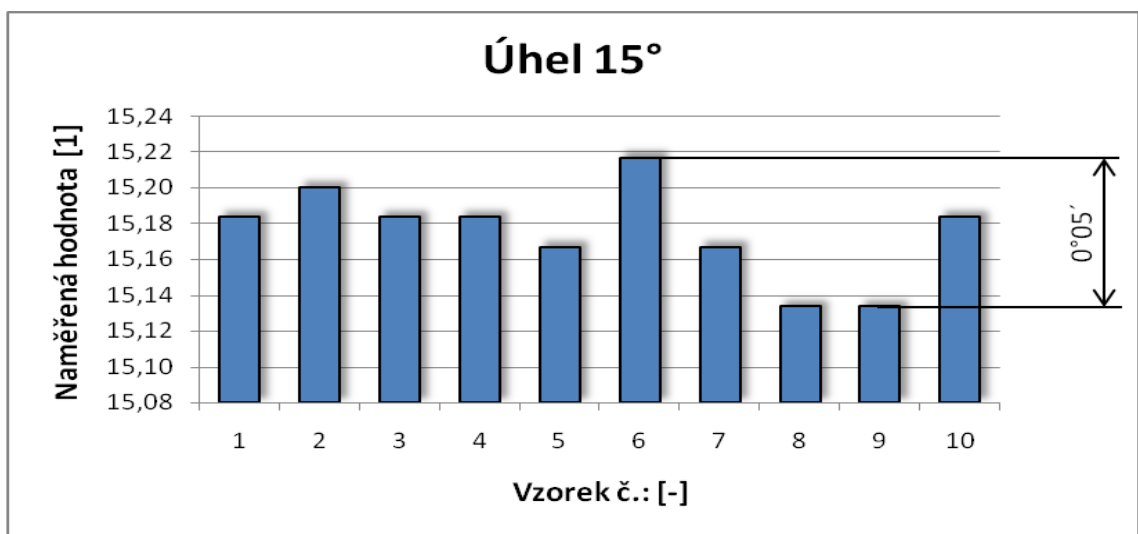
Obr. 78. Porovnání naměřených hodnot rozměru 30b



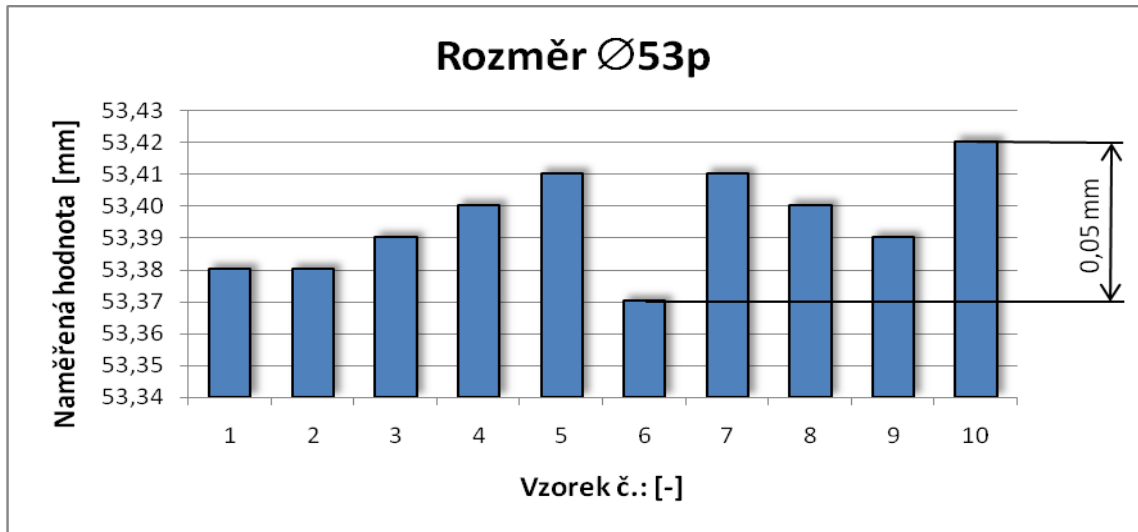
Obr. 79. Porovnání naměřených hodnot rozměru 5a



Obr. 80. Porovnání naměřených hodnot rozměru 5b



Obr. 81. Porovnání naměřených hodnot úhlu 15°u



Obr. 82. Porovnání naměřených hodnot rozměru Ø53p

Z naměřených hodnot vyplývá, že největší rozdíl programové hodnoty rozměru od rozměru vyrobeného, je u Ø 53mm. Primárně je rozdíl způsoben nepřesností frézky, ale hraje zde roli i absence postprocesoru, jež by měl být pro optimální využití vlastností frézky vytvořen. Největší podíl na nepřesnosti rozměru Ø53p má vůle v převodovém systému osy Y.

13 PARAMETRY NAVRŽENÉHO/ZKONSTRUOVANÉHO ZAŘÍZENÍ

PARAMETRY FRÉZKY

Rozměry stroje:	390 x 280 x 360 mm
Hmotnost:	7,9 kg
Maximální rozsah posuvů:	v ose X 205 mm v ose Y 115 mm v ose Z 28 mm
Vřeteno:	Příkon 160 W Napájení 230V/50 Hz Otáčky 15000 – 35000 ot./min
Max. programovatelná rychlost posuvů:	v ose X 0,5 m/min v ose Y 0,3 m/min v ose Z 0,2 m/min
Programovatelný krok:	v ose X 0,026 mm v ose Y 0,014 mm v ose Z 0,003 mm
Upínací průměr nástroje:	6 mm
Řídící jednotka:	PC
Doporučené materiály obrobku:	PVC, PMMA, PC _p , ABS, PP, PS, Necuron 651

PARAMETRY ŘÍDICÍ ELEKTRONIKY

Rozměry:	352 x 257 x 83 mm
Napájení:	230V/50 Hz
Komunikace:	Rozhraní PC – LPT port
Počet řízených os:	3
Systém řízení motorů:	STEP/DIR
Typ motorů:	Bipolární
Nastavení kroků:	1/1, 1/2, 1/4, 1/8
Možné úrovně nastavení výkonu krokových motorů:	65%, 100%
Vizualizace:	Otáčky vřetena (LED displej) Stav krokových motorů (LED)
Řízení otáček vřetena:	PWM
Snímání otáček vřetena:	Indukční senzor
Bezpečnostní okruh:	E - Stop
Ochrana proti poškození PC:	Optické oddělení výkonové elektroniky
Ochrana proti poškození elektroniky:	Odpojení napájení při zkratu a přetížení

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo dále rozvíjet navržené a zkonstruované laboratorní zařízení pro obrábění plastů tak, aby bylo dosaženo lepších výsledků v oblasti přesnosti stroje spolu se zdokonalením elektronických řídicích systému frézky. Jedná se o 3 osou CNC řízenou frézku portálové konstrukce, u které bylo nutné nejen navrhnout a zkonstruovat samotný obráběcí stroj, ale také navrhnout a sestavit řídicí elektroniku spolu se zvolením vhodného řídicího softwaru. Jelikož při konstrukci zařízení byl kladen velký důraz na pořizovací náklady, ke konstrukci byly použity i díly z jiných vyřazených strojů. To vneslo do celkové konstrukce frézky neduhu jako nižší tuhost celého zařízení a nižší přesnosti jednotlivých os oproti stavu, kdyby byly v konstrukci použity díly nové, nevykazující opotřebení funkčních ploch.

Během práce na přístroji se ukázalo, že by bylo velice prospěšné mít nejen přehled o aktuálních otáčkách vřetena při obráběcím procesu, ale aby zařízení převzalo plnou kontrolu nad vřetenem. Proto byl vývoj elektronického vybavení frézky směřován k automatickému řízení otáček vřetena. To přineslo několik problémů, jako například volbu vhodného snímače otáček vřetena, jeho montáž do sestavy, návrh elektronického systému pro zpracování a předávání dat řídicímu PC a následné propojení s příslušným řídicím softwarem.

Při řešení otázky návrhu zařízení pro snímání otáček vřetena bezkontaktním způsobem byl problém rozdělen na několik základních částí, jež byly třeba vyřešit. Zejména bylo třeba navrhnout elektronickou konstrukci otáčkoměru, který by rovněž obsahoval zobrazovací jednotku pro snadné odečtení aktuálních otáček vřetena a následně zvolit vhodný snímač otáček, jenž by pracoval spolehlivě a umožnil snímat otáčky vřetena v plném rozsahu. Také byla vyžadována snadná montáž do sestavy vřetena CNC frézky. Snímač rovněž neměl bránit možnému budoucímu zakrytí vřetena.

Návrh elektronického schématu otáčkoměru byl inspirován moduly dodávanými firmou Jaromír Buček. Jejich konstrukce byla upravena tak, aby co nejvíce vyhovovala požadavkům měření otáček vřetena CNC frézky. Otáčkoměr je navržen na kompaktní jednostranné desce plošných spojů, kde se veškeré připojení vodičů děje pomocí konektorů.

Ve výběru vhodného snímače otáček vřetena byly zvažovány dva možné principy: fotoelektrický a indukční. Jako nejlepší se ukázal indukční senzor, kdy jeho snímací schopnost není ovlivněna nečistotami.

Po úspěšném zvládnutí úkolu návrhu bezkontaktního snímání otáček vřetena, následoval vývoj automatického řízení otáček vřetena. Pod pojmem plně automatické řízení otáček vřetena bylo myšleno, že řídicí software Mach3 plně převezme kontrolu nad funkcemi vřetena. To znamenalo, že dle příkazů v CNC programu by se mělo vřeteno automaticky aktivovat, respektive deaktivovat, a rovněž by se měly automaticky nastavovat a udržovat otáčky vřetena.

Nejprve bylo nutné vytvořit regulaci otáček elektromotoru vřetena pomocí elektrických veličin, jako je napětí nebo proud. První návrh tkvěl ve využití integrovaného triakového regulátoru v pohonu vřetena. Tento návrh nakonec nebyl uskutečněn díky své komplikovanosti.

Druhý návrh využíval obdobný princip regulace, pouze elektronický obvod byl sestaven jako externí modul. Ovšem ani tento modul neposkytoval uspokojivé výsledky.

Tyto neúspěchy vedly k zakoupení již hotového modulu speciálně navrženého pro dané účely. Jde o univerzální regulátor pro sériové elektromotory K2636. Tento regulátor splnil všechny požadavky a během provozu se velice osvědčil. Velká výhoda tohoto regulátoru spočívala v zachování krouticího momentu i při nízkých otáčkách motoru.

Následující krok vedl k úpravě modulu regulace otáček vřetena tak, aby jej bylo možné ovládat elektrickým napětím či proudem. První navržené řešení spočívalo v posílání pulzů na bázi tranzistoru BC517 zkonstruovaným generátorem. Slabina tohoto řešení tkvěla v regulaci pouze jedné půlperrody napájecího napětí, díky čemuž elektromotor v nižších otáčkách vykazoval nestabilní chod. Druhý pokus se zaměřil na řízení průchodnosti tranzistoru IRF540N, jenž by nahradil regulační potenciometr modulu K2636. Testy ukázaly nefunkčnost i tohoto řešení, která byla způsobena použitým typem tranzistoru. Třetí návrh tkvěl v zachování zapojení regulačního obvodu, pouze tranzistor IRF540N byl nahrazen tranzistorem BD711. Obvod s tímto tranzistorem fungoval dle požadavků.

Dalším krokem bylo navržení elektronického obvodu zpracovávajícího výstupní signál z LPT portu počítače a ten převést na spojitý napěťový signál pro optočlen regulátoru K2636. Zprvu probíhaly pokusy se signálem typu STEP/DIR. K převodu signálu tohoto typu byl testován integrovaný obvod LM2907, což je převodník frekvence na napětí. Tento pokus ztroskotal na neschopnosti řídicího PC spolehlivě generovat na LPT portu pulzy o vysoké frekvenci. Následující pokusy probíhaly s výstupním signálem typu PWM. Nejdříve byly

vyzkoušeny dva typy převodníků PWM na U založené na invertorech. Měření ovšem poukázalo na nestabilitu výstupního signálu, tudíž na nepoužitelnost tohoto systému převodu. Po dalším zkoumání problému se podařilo sestrojít převaděč PWM na U s použitím integrovaného obvodu NE5532P. Doladěním obvodu se podařilo získat tížených vlastností, konstrukce tak vyhověla.

Posledním úkolem po stránce elektronických obvodů bylo vytvoření zpětné vazby otáček vřetena pro řídicí počítač. Signál ze snímače je pomocí jednoduchého elektronického obvodu založeném na optočlenu přiveden na vstupní pin LPT portu řídicího PC.

Automatické řízení otáček vřetena bylo úspěšně dokončeno po konfiguraci řídicího softwaru Mach3. Před uvedením systému do provozu ještě byly provedeny malé úpravy v oddělovací desce LPT portu. Konfigurace softwaru Mach3 se týkala nastavení vstupních a výstupních pinů dle řídicí elektroniky, dále nastavením parametrů elektromotoru vřetena a vhodným nastavením parametrů řídicího výstupního signálu PWM. Automatické řízení otáček vřetena zajišťuje softwarový PID regulátor integrovaný v Mach3.

Kvalita a přesnost obrobených ploch je primárně dána přesností os obráběcího stroje. Frézka tedy byla podrobena měření přesností polohování metodou laserové interferometrie. Postup měření udává norma ČSN EN ISO 230, přesnost polohování potom její část ČSN EN ISO 230 - 2. Měření poukázalo na neduhy použitého systému posuvů osy X a Y, kdy se potvrdily domněnky o protažení ozubených řemenů. Problém lze řešit použitím tužších ozubených řemenů. Bohužel u osy Y by pouze výměna ozubeného řemenu nevystačovala. Zde je hlavní příčinou velké nepřesnosti polohování vůle v převodovém mechanismu krokového motoru. Pokusy vedoucí k eliminování této vůle skončily nezdarem, proto jako nejlepší řešení se naskýtá stávající krokový motor nahradit výkonnějším typem a převodový systém úplně vypustit. To ovšem znamená konstrukční zásah do stroje a navýšení investic. Měření přesnosti polohování proběhlo i na ose Z. Bohužel zjištěné výsledky nejsou korektní, jelikož značné zatížení posuvu osy způsobené upnutou měřicí soustavou vedlo ke zkreslení naměřených dat. Krokový motor s největší pravděpodobností nedisponoval dostatečným krouticím momentem, čímž při jeho špičkovém zatížení během pohybu z minimální polohy do maximální polohy posuvu došlo ke ztrátě kroků.

Výsledná přesnost polohování osy X činí 0,55 mm, osy Y 1,42 mm. Laserový interferometr navíc poukázal na nepřesnou kalibraci krokových motorů osy X a Y. Osa Z byla nově kalibrována teprve při tomto měření, jelikož prošla konstrukční úpravou.

Získané hodnoty přesnosti polohování jednotlivých os neslouží pouze k popisu daného zařízení, ale lze je využít k samotnému zpřesnění polohování. Jedna z možností je využití křivky průměrné oboustranné polohové úchyly v poloze. Dle velikosti úchylek od nulové čáry můžeme stanovit, do kterých míst je vhodné upínat polotovary. Pokud bude na obrobku místo se zvýšenou přesností rozměru, jednoduše jej upneme do míst, kde je průměrná oboustranná polohová úchyly v poloze nejbližší nule. Křivku lze ale využít mnohem efektivněji, pokud se v inverzní podobě načte do řídicího softwaru a ten pak podle ní provádí korekci polohy posuvu. Ve stávající fázi vývoje zařízení ještě nemohla být tato funkce využita, jelikož doposud nejsou nainstalovány snímače nulového bodu. Další možnosti jak zvýšit přesnost daného zařízení pomocí naměřených dat je necitlivost v ose – parametr B. V softwaru Mach3 se nachází funkce *Backlash*, kde lze nakonfigurovat velikost vůli v pohybových mechanismech jednotlivých os.

K ověření funkčnosti zkonstruované CNC frézky bylo vyrobeno celkem deset zkušebních vzorků. Ty jsou navrženy tak, aby bylo možno srovnat činnost frézky v jednotlivých osách, přičemž vyhodnocení probíhá formou porovnání naprogramovaných rozměrů se skutečnými rozměry vyrobených vzorků. Získané údaje jsou statisticky vyhodnoceny a pro přehlednost zpracovány do grafické podoby. Největší odchylka požadovaného rozměru od skutečného, která činila cca 0,4 mm, nastala na rozměru $\varnothing 53p$.

Původní posuvový mechanismus osy Z poměrně rychle podléhal opotřebení. Výskyt tohoto problému již byl předpokládán při samotné konstrukci posuvu, jelikož použité prvky nebyly příliš vhodné pro takovou aplikaci. Původní mechanismus posuvu byl tak v této diplomové práci nahrazen mechanismem novým, postaveným na posuvovém šroubu KERK NTB F4M01T osazeným dělenou bezvůlovou maticí s možností nastavení předpětí. Z důvodu snížení tření mezi šroubem a maticí je povrch šroubu opatřen teflonovou vrstvou.

Elektronické vybavení CNC frézky bylo navíc rozšířeno o vizualizaci stavu krokových motorů, která se velice osvědčila při manuálním ovládní frézky. Vizualizace stavu krokových motorů nyní probíhá pomocí diod typu LED na předním panelu přístrojové krabice.

Každý motor disponuje třemi stavovými LED. První (modrá) indikuje, zda je motor aktivní, druhá a třetí (zelená a červená) indikuje směr otáčení motoru, čili směr pohybu posuvu.

Dále bylo zkonstruováno krytování vřetena, které z velké části vyřešilo problém s vnikajícími třískami a nečistotami do mechaniky vřetena. Krytovaním se rovněž zamezilo možnému vzniku úrazu na rotujících částech vřetena jako je spojka a snímací kotouček otáček.

Při práci s materiály podobných vlastností jaké má NECURON 651, bylo takřka nutností zkonstruovat krytování i pro osu Y. Třísky dopadající na vedení této osy způsobovaly po čase trhavé pohyby posuvu, jelikož na sebe vázaly mazivo a vzrostla tak třecí síla ve vodičích prvcích. První pokus tkvěl v použití skládaných prachovek. Ty se ovšem během práce stroje neosvědčily. Nově navržené pevné krytování sestává ze dvou částí a je vyrobeno z tenkého ocelového plechu. Tento kryt nijak neovlivňuje pracovní možnosti stroje a disponuje vysokou účinností. Ve srovnání s původními prachovkami došlo i k výraznému zlepšení estetické stránky stroje.

Přínosná se ukázala i konstrukce chrániče vodičů, jenž funguje na principu energetického řetězu. Chránič nejen že zabraňuje možnému poškození vodičů, ale také vylepšil vzhled zařízení.

V rámci pokračujícího vývoje zařízení by bylo vhodné doplnit stávající konstrukci následujícími prvky. V první řadě by bylo vhodné nahradit dosavadní běžná ložiska ve vřetenu ložisky vysokootáčkovými. Při otáčkách vřetena nad 30 000 ot/min, totiž docházelo po delší době provozu zařízení k jejich přehřívání. Bohužel ceny těchto ložisek jsou vysoké. Dále by bylo velice užitečné osadit posuvy koncovými snímači a snímači nulového bodu. Eliminovala by se tak možnost kolize posuvů v koncových polohách a také by bylo možno zvýšit přesnost stroje díky údajům z měření přesnosti polohování os.

V rámci zvýšení bezpečnosti a zamezení vzniku nepořádku kolem zařízení by bylo vhodné kolem celé frézky vytvořit uzavřený kryt. Pro snadnou obsluhu stroje by měl kryt disponovat přístupovým systémem ke stolu frézky. Rovněž by bylo vhodné zařízení doplnit o systém odsávání třísek. Odsávání by bylo nejvhodnější upnout na vřeteno frézky blízko obráběcího nástroje tak, aby byly třísky odsávány co nejdříve po jejich vzniku.

Celkové investice do zařízení nyní činí 12 750,- Kč. V rámci této diplomové práce byly nainstalovány nové prvky o celkové hodnotě 4 500,- Kč. Z toho ceny jednotlivých položek

činily: elektronické součástky 700,- Kč, indukční senzor 990,- Kč, regulátor otáček KV2636 660,- Kč, kuličková ložiska 150,- Kč, posuvový šroub KERK 2 000,- Kč, montážní materiál 250,- Kč.

Z předešlých nákladů činila investice do elektronického vybavení zařízení 4 500,- Kč. Náklady spojené s mechanickou konstrukcí frézky dosáhly částky 3 500,- Kč.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. Praha: VŠCHT, 1999. 202 s. ISBN 80-7080-367-3.
- [2] ŘASA, Jaroslav, GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3 : Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2000. 2 sv. (256, 221 s.). ISBN 80-7183-207-3.
- [3] PETRUŽELA, Tomáš. *Vývoj laboratorního zařízení na obrábění plastů*. Zlín, 2009. 99 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [4] *Výrobní technologie II : Technologie strojního obrábění* [online]. 0.91. c2003 [cit. 2009-01-27]. Dostupný z WWW: <http://www.sniper.webzdarma.cz/download/others/tech_str_obr.pdf>.
- [5] KALIŠ, Václav. *Frézování, hoblování, obrážení, protahování*. Žďár nad Sázavou: Střední škola technická, Žďár nad Sázavou, 2008. 88 s.
- [6] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha : BEN - technická literatura, 2004. 192 s. ISBN 80-7300-114-4.
- [7] *Panelová měřidla* [online]. 2011 [cit. 2011-05-05]. ČIDLA, SNÍMAČE. Dostupné z WWW: <<http://www.panelovameridla.cz/panelovameridla/eshop/9-1-CIDLA-SNIMACE/3-2-Indukcni>>.
- [8] *CNCShop.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-03-14]. 92 - LM8kabel. Dostupné z WWW: <<http://www.cncshop.cz/upload/products/preview/92-LM8kabel.jpg>>.
- [9] *ČSN ISO 230-1 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 92 s.
- [10] *ČSN ISO 230-2 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Srpen 2010. 36 s.
- [11] *Bucek.name* [online]. [2004-] [cit. 2011-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.bucek.name/>>.

- [12] PETRUŽELA, Tomáš. *Stolní CNC frézka se snímáním otáček vřetena*. [s.l.], 2009. 35 s. SVOČ. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [13] *Datasheet catalog for integrated circuits* [online]. c2011 [cit. 2011-01-03]. NE556 Datasheet pdf. Dostupné z WWW: <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/N/E/5/5/NE556.shtml>.
- [14] *Semiconductor and Integrated Circuit Devices* [online]. c1999-2011 [cit. 2011-01-03]. ON Semiconductor MC14553B: 3-Digit BCD Counter. Dostupné z WWW: <<http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=MC14553BCP>>.
- [15] *Velleman nv* [online]. c2011 [cit. 2011-03-08]. Velleman nv. Dostupné z WWW: <<http://www.velleman.eu/distributor/support/downloads/?code=K2636>>.
- [16] *GM electronic* [online]. 2011 [cit. 2011-02-10]. F-KV2636 (765-019) VELLEMAN. Dostupné z WWW: <<http://www.gme.cz/cz/-p765-019.html>>.
- [17] *Eshop.technoline* [online]. c2008 [cit. 2011-02-10]. Dostupný z WWW: <<http://eshop.technoline.cz/shop/full/img607.jpg>>.
- [18] *Sick* [online]. [2009] [cit. 2009-11-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.sick.cz/cz/produkty/00/0/01/cs.html>>.
- [19] *A9R9* [online]. [s.l.] : [s.n.], 12.10.2008 [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.c-n-c.cz/download/file.php?id=2821&sid=af68fbd8051c6179d900d72d611058ca>>.
- [20] *LM2907* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2003 [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/8817/NSC/LM2907.html>>.
- [21] *Renishaw* [online]. 2011.04.27 [cit. 2011-05-02]. Key XL - 80 system hardware. Dostupné z WWW: <<http://www.renishaw.com/media/img/gen/e498ad7c92c34554b072572b394c43a1.jpg>>.
- [22] *Fileserver.info-brno* [online]. [s.l.] : [s.n.], 15.2.2010 [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW: <fileserver.info-brno.cz/463-NECUMER-m-listy.pdf>.

- [23] *Codeproject* [online]. c1999-2009 [cit. 2011-05-1]. Dostupný z WWW:
<<http://www.codeproject.com/KB/system/PaPiC/papic3.gif>>.
- [24] *Magazín postřeh* [online]. c2009 [cit. 2011-05-03]. Triakový regulátor výkonu
230V/12A. Dostupné z WWW:
<<http://www.postreh.com/phprs/view.php?cisloclanku=2006110201>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a až h	Ozubené převody pro diferenciální dělení.
a_l	Tloušťka třísky pro úhel φ_l .
a_e	Hloubka řezu.
a_{max}	Maximální tloušťka třísky.
Asi	Actuator Sensor Interface.
B	Šířka obrobku.
C	Kondenzátor.
C	Kapacita.
CNC	Computer Numerical Control.
CP0	Sestupná hrana impulzu.
CP1	Náběžná hrana impulzu.
d_1	Průměr řezné části frézky.
DPS	Deska Plošných Spojů.
EL	Uchování okamžitého stavu čítače.
F	Výsledná řezná síla.
F	Šířka fazetky.
F_{ax}	Axiální síla.
F_c	Složka řezné síly.
F_{cN}	Kolmá složka řezné síly.
F_e	Chemická značka železa.
F_f	Posuvová složka řezné síly.
F_{fN}	Kolmá složka posuvové síly.
F_p	Odpor vedení.
H	Hloubka řezu.

Hi	High – logická jednička.
<i>i</i>	Počet.
IR	Infrared Emitting.
IO1B	Integrovaný obvod 1B.
ISO	The International Organization for Standardization.
K20	Slinutý karbid.
k_{uA}	Koeficient nejistoty typu A.
L	Cívka.
<i>L</i>	Indukčnost cívky.
<i>l</i>	Dráha.
LED	Light Emitting Diode.
Log0	Logická nula.
Log1	Logická jednička.
LPT	Line Print Terminal.
M_t	Zátěžový moment.
<i>n</i>	Otáčky.
n	Celkový počet hodnot.
n_o	Otáčky.
<i>p</i>	Jmenovitý interval.
p	Tlak.
PC	Personal Computer.
PLC	Programmable Logic Controller.
PVC	Polyvinilchlorid.
PWM	Pulse Width Modulation.
<i>Q</i>	Činitel jakosti cívky.

R	Náhodné číslo.
RES	Nulování čítače.
RO	Nástroj s břity z rychlořezné oceli.
R_m	Střední mez pevnosti.
R_v	Výsledný odpor cívky.
R_z	Ztrátový odpor.
s	Posuv.
SK	Nástroj s břity ze slinutých karbidů.
s_o	Směrodatná odchylka.
s_z	Posuv na zub.
T	Teplota.
TC	Výstup přenosu.
u_A	Standardní nejistota typu A.
v	Rychlost.
VAC	Střídavé napětí.
v_C	Řezná rychlost.
vcc	Napájecí napětí.
VDC	Stejnoseměrné napětí.
v_f	Rychlost posuvu.
v_M	Výstupní napětí.
W	Vlastnosti světla.
\bar{x}	Aritmetický průměr.
α_f	Úhel hřbetu na fazetce.
α_o	Úhel hřbetu.
γ_o	Úhel čela.

Δl	Dráhový rozdíl.
ΔR	Rozdíl odporů.
Δt	Časový rozdíl.
Δu	Rozdíl napětí.
δ	Úhel řezu.
ε_r	Úhel špičky.
κ_r	Úhel nastavení hlavního ostří.
λ	Úhel sklonu šroubovice.
φ_1	Úhel okamžité polohy zubu.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Vrták na vrtání reaktoplastů [2].....	15
Obr. 2. Stavitelný vykružovací nástroj [2].....	16
Obr. 3. Vrták na vrtání termoplastů [2]	17
Obr. 4. Válcová fréza pro frézování vyztužených a vrstvených plastů [2]	19
Obr. 5. Vrták na vrtání vyztužených a vrstvených plastů [2].....	19
Obr. 6. Frézování obvodem válcové frézy [2]	23
Obr. 7. Frézování čelem čelní frézy [2]	24
Obr. 8. Frézování obvodem válcové frézy [2]	24
Obr. 9. Frézování čelem čelní frézy [2]	25
Obr. 10. Frézování a) nesousledné, b) sousledné [2].....	25
Obr. 11. Některé druhy fréz [2].....	27
Obr. 12. Zuby fréz [2]	27
Obr. 13. Fréza [2].....	28
Obr. 14. Příklady mechanického upnutí břitových destiček na fréze [2].....	28
Obr. 15. Frézování složitých tvarů skládanou frézou [2].....	29
Obr. 16. Příklady fyzikálních veličin snímaných senzory [6].....	32
Obr. 17. Princip indukčního senzoru [6].....	33
Obr. 18. Transformátorové náhradní schéma indukčního senzoru	34
Obr. 19. Blokové schéma indukčního senzoru [6].....	36
Obr. 20. Obvyklé tvary kvádrového a válcového senzoru [7] [8].....	37
Obr. 21. Vnitřní uspořádání válcového senzoru [6].....	37
Obr. 22. Připojení dvou-, tří- a čtyřdrátových senzorů [6].....	39
Obr. 23. Běžný zkušební cyklus [10].....	43
Obr. 24. Metoda měření zaměřovacím laserem [9]	45
Obr. 25. Laserinterferometrická metoda [9]	45
Obr. 26. Elektronické schéma integrovaného obvodu NE556 [13]	48
Obr. 27. Elektronické schéma integrovaného obvodu 4553 [14]	49
Obr. 28. Multiplexní režim zobrazovací jednotky [12]	50
Obr. 29. Sestavený obvod na nepájivém kontaktním poli [12].....	51
Obr. 30. DPS otáčkoměru [12]	51
Obr. 31. Přední panel přístrojové krabice	52

Obr. 32. Indukční senzor [17]	53
Obr. 33. Montáž indukčního senzoru.....	54
Obr. 34. Vestavěný regulátor otáček pohonu vřetena	56
Obr. 35. Elektronické schéma regulátoru K2636 [15].....	57
Obr. 36. Modul K2636 a modul otáčkoměru v sestavě řídicí elektroniky.....	58
Obr. 37. Generátor pulzů	59
Obr. 38. Regulace pomocí IRF540N	60
Obr. 39. Regulace pomocí BD711	61
Obr. 40. Doporučené schéma zapojení LM2907 [20].....	62
Obr. 41. Sestavené testovací obvody na nepájivém kontaktním poli	63
Obr. 42. Elektronická schémata převodníků PWM na U pomocí invertorů.....	64
Obr. 43. Elektronické schéma převodníku PWM na U pomocí NE5532P.....	64
Obr. 44. DPS převodníku PWM na U	65
Obr. 45. Elektronické schéma zpětné vazby otáček vřetena.....	66
Obr. 46. Nastavení řídicích signálů pohonu os a vřetena.....	66
Obr. 47. Úpravy na oddělovací desce LPT portu - červeně	67
Obr. 48. Nastavení vstupních signálů	68
Obr. 49. Nastavení výstupních signálů	69
Obr. 50. Konfigurace ovládání vřetena a chlazení.....	69
Obr. 51. Kalibrace vřetena	70
Obr. 52. Nová konstrukce posuvového mechanismu osy Z	71
Obr. 53. Montáž posuvového šroubu na osu Z	72
Obr. 54. Elektronické schéma vizualizace stavu krokových motorů.....	73
Obr. 55. DPS vizualizace stavu krokových motorů	74
Obr. 56. Stavba krytu vřetena	75
Obr. 57. Kryt vřetena, prachovky osy Y	76
Obr. 58. Krytování osy Y	77
Obr. 59. Energetický řetěz	78
Obr. 60. XL - 80 [21].....	79
Obr. 61. Měřicí sestava pro osu X	80
Obr. 62. Sestava stacionárního interferometru, odražeč, osa X.....	81
Obr. 63. Software laserového interferometru - měření osy X.....	83

Obr. 64. Přesnost polohování.....	84
Obr. 65. Výsledky měření přesnosti polohování osy X	85
Obr. 66. Měřicí sestava pro osu Y	87
Obr. 67. Sestava stacionárního interferometru, odražeč, osa Y	88
Obr. 68. Výsledky měření přesnost polohování osy Y	90
Obr. 69. Měřicí sestava pro osu Z.....	91
Obr. 70. Sestava stacionárního interferometru, odražeč, osa Z	92
Obr. 71. Výsledky měření přesnost polohování osy Z.....	94
Obr. 72. Zkušební vzorek.....	96
Obr. 73. Zhotovený zkušební vzorek	97
Obr. 74. Schéma zkušební vzorku	98
Obr. 75. Porovnání naměřených hodnot rozměru 20a	103
Obr. 76. Porovnání naměřených hodnot rozměru 20b	104
Obr. 77. Porovnání naměřených hodnot rozměru 30a	104
Obr. 78. Porovnání naměřených hodnot rozměru 30b	104
Obr. 79. Porovnání naměřených hodnot rozměru 5a	105
Obr. 80. Porovnání naměřených hodnot rozměru 5b	105
Obr. 81. Porovnání naměřených hodnot úhlu 15°u.....	105
Obr. 82. Porovnání naměřených hodnot rozměru $\varnothing 53p$	106

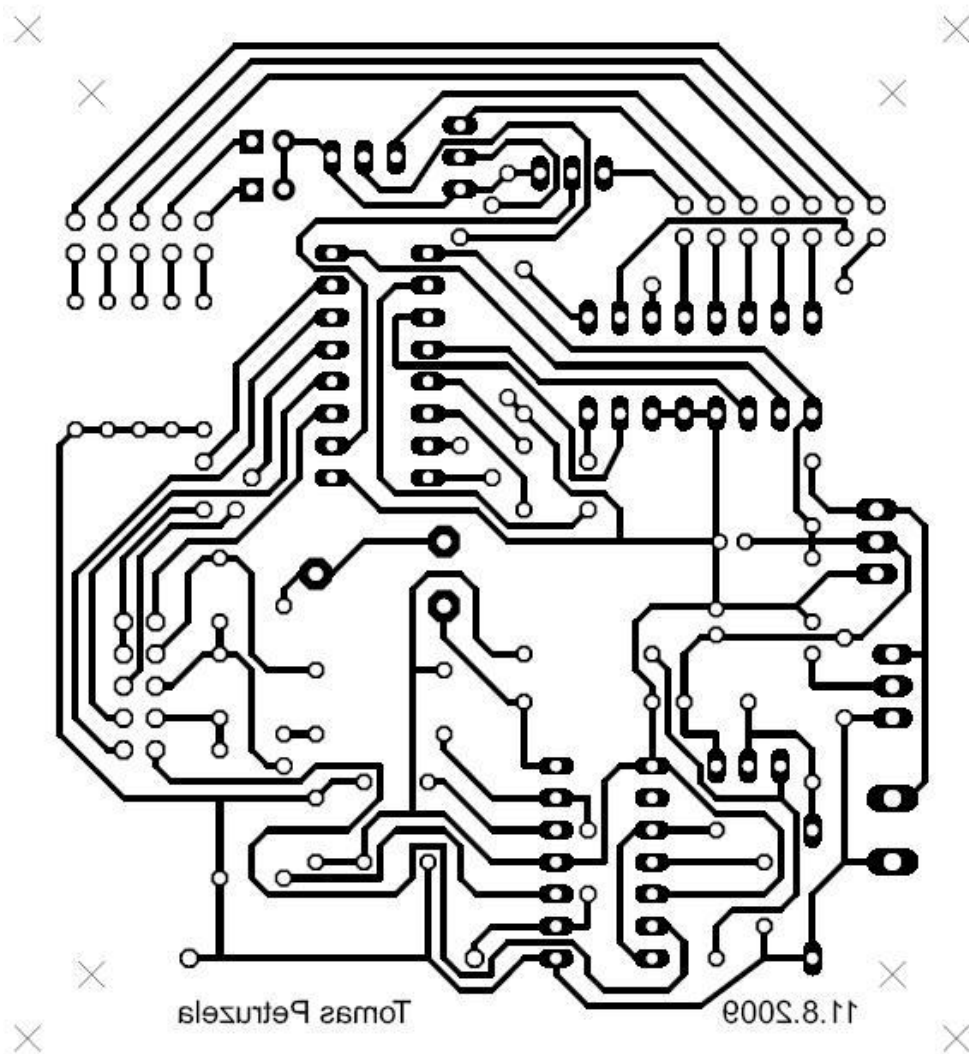
SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Řezné podmínky pro obrábění reaktoplastů [2] [3]	20
Tab. 2. Řezné podmínky pro obrábění termoplastů [2] [3]	21
Tab. 3. Řezné podmínky pro obrábění vyztužených a vrstvených plastů [2] [3]	21
Tab. 4. Ukázka převodu některých fyzikálních veličin na elektrické signály [6]	32
Tab. 5. Hodnoty redukčního faktoru vybraných materiálů [6]	35
Tab. 6. Použitá měřicí zařízení	99
Tab. 7. Naměřené rozměry zkušebních vzorků	100
Tab. 8. Souhrn průměrných hodnot rozměrů všech zkušebních vzorků	103

SEZNAM PŘÍLOH

- PI Elektronické schéma otáčkoměru
- PII DPS otáčkoměru
- PIII Seznam součástí otáčkoměru
- PIV Osazovací plán DPS otáčkoměru
- PV Zapojení pinů LPT portu
- PVI Výkres zkušebního vzorku
- PVII Výkres sestavy frézky
- PVII CD - ROM obsahující model frézky, fotografickou dokumentaci řídicí elektroniky a frézky, CNC program zkušebního vzorku.

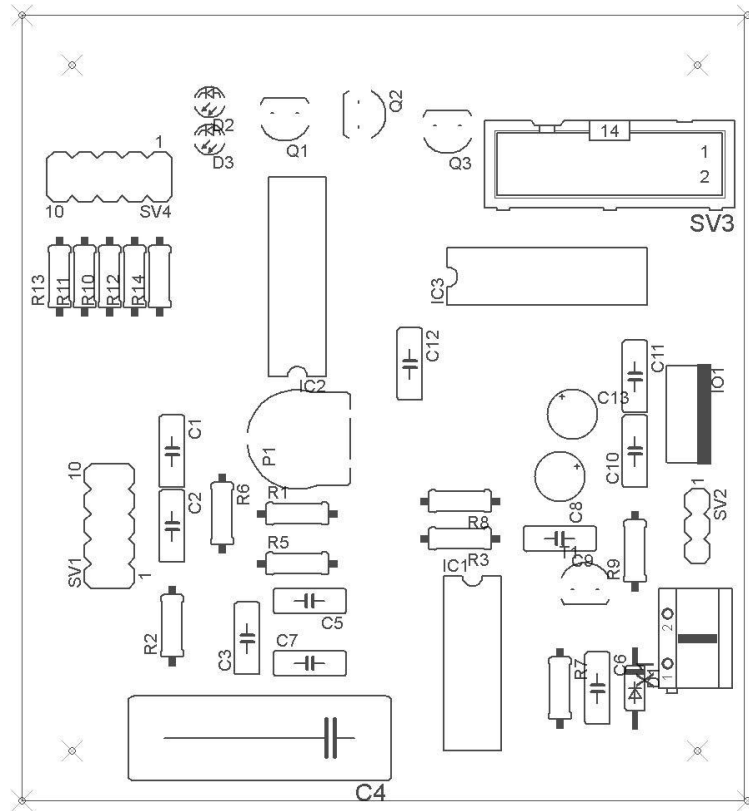
PŘÍLOHA P II: DPS OTÁČKOMĚRU



PŘÍLOHA P III: SEZNAM SOUČÁSTEK OTÁČKOMĚRU

R1,R2,R7	- Odpor 10k	3ks
R3	- Odpor 2k2	1ks
R5	- Odpor 680k	1ks
R6	- Odpor 82k	1ks
R8	- Odpor 100k	1ks
R9	- Odpor 29k	1ks
R10,R11,R13	- Odpor 220R	3ks
R12,R14	- Odpor 1k	2ks
C1,C2,C5,C6	- Keramický kondenzátor 10n	4ks
C3,C7,C10,C11	- Keramický kondenzátor 100n	4ks
C4	- MKT/1M	1ks
C8,C13	- Elekt. kondenzátor rad. 100 μ F/10V	2ks
C9,C12	- Keramický kondenzátor 1n	2ks
D1	- Dioda 1N4148 DO35-10	1ks
D2,D3	- LED 3mm	2ks
IC1	- NE556	1ks
IC2	- 4553N	1ks
IC3	- D347D	1ks
IO1	- Stabilizátor napětí L7805	1ks
P1	- Trimr PT-10V_LEZ 250k	1ks
Q1,Q2,Q3	- Tranzistor BC556	3ks
SV1,SV4	- Konektor MA05-2	2ks
SV2	- Konektor MA03-1	1ks
SV3	- Konektor ML14	1ks
T1	- Tranzistor BC546	3ks
X1	- AK500/2	3ks
Jumper	- JUMPER-ZAV RED, BLU propojka	5ks
DPS	- FHPCU75 75x100	1ks
Induktivní senzor	- IA08BSF15PO	1ks
Displej	- KW2 – 281ABA	3ks

PŘÍLOHA P IV: OSAZOVACÍ PLÁN DPS OTÁČKOMĚRU



PŘÍLOHA P V: ZAPOJENÍ PINŮ LPT PORTU [23]

