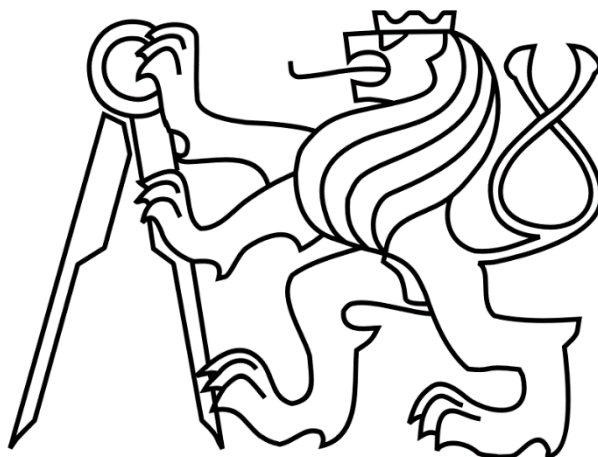


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Bakalářská práce

Metody pro stanovení výrobní přesnosti CNC frézky a aplikace vybrané

2021

Jana Kulichová

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kulichová** Jméno: **Jana** Osobní číslo: **473428**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Metody pro stanovení výrobní přesnosti CNC frézky a aplikace vybrané metody

Název bakalářské práce anglicky:

Methods for the determination of machining precision of 3-axis CNC milling machine and its applications

Pokyny pro vypracování:

Zásady zkoušek obráběcích strojů dle ISO 230.
Zkoušky a zkušební artefakty pro určení přesnosti 3-osých obráběcích strojů.
Návrh artefaktu a příprava CNC programu pro realizaci zkoušky.
Analýza výsledků a zhodnocení přesnosti vybraného obráběcího stroje.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 5.8.2021

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady a věcné připomínky při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. a Ing. Michalu Slanému za pomoc při přípravě CAM programu a s vlastním obrábění. Též děkuji své rodině a přátelům za podporu během studia.

Anotace

Klíčová slova:

frézka, obrábění, CNC frézka, zkušební artefakty, CMM, měření přesnosti, frézování

Anotace:

Bakalářská práce se zaměřuje na měření přesnosti CNC frézky. V první části se zaměřuje na teorii zkoušek dle normy ISO 230 a na zkušební artefakty, které slouží též k měření přesnosti obráběcích strojů. V druhé části práce je popsáno vytváření praktické části, modelování artefaktu, tvorba programu a vlastní obrábění daného artefaktu. Nakonec byla měřena přesnost obrábění pomocí CMM a byla vyhodnocena výsledná přesnost.

Annotation

Keywords:

milling machine, machining, CNC milling machine, testing artefact, measurement accuracy, milling

Anotation:

Bachelor thesis is focused on accuracy measurement of CNC milling machine. In the first part it focuses on the theory of testing according to ISO 230 norm and on testing artefacts, which are used for accuracy measurement of milling machines. In the second part there is a description of the practical part, artefact modelling, creation of the program and milling of the given artefact. At the end the accuracy of milling was measured and the result accuracy was evaluated.

Seznam použitých veličin, jednotek a zkratek

<i>CMM</i>	<i>Coordinate Measurement Machine</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization v překladu „Mezinárodní organizace pro normalizaci“</i>
<i>ČSN</i>	<i>chráněné označení českých norem</i>
<i>NAS</i>	<i>National Aerospace Standard</i>
<i>CAM</i>	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
<i>CNC</i>	<i>Computer Numerical Control</i>

Obsah

1	Přesnost obráběcích strojů	11
2	Zásady zkoušek obráběcích strojů	12
2.1	Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení, nebo kvazistatických podmínek	13
2.1.1	Zkoušky statické shody a zkoušky hystereze	13
2.1.2	Zkoušky geometrické přesnosti os s lineárním pohybem	16
2.1.3	Zkoušky chyb lineárního polohování	19
2.1.4	Zkoušky úhlové chyby pohybu	20
2.1.5	Geometrické zkoušky přesnosti os otáčení	22
2.1.6	Vyrovňování os pohybu-rovnoběžnost, kolmost a průsečík	24
2.1.7	Zkoušky geometrické přesnosti funkčních povrchů stroje – přímosti, rovinnosti, kolmosti a rovnoběžnosti	24
2.2	Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách	26
2.2.1	Lineární osy:	26
2.2.2	Zkoušky v otočných osách	27
2.3	Určení tepelných vlivů	28
2.3.1	Zkouška ETVE	30
2.3.2	Tepelné deformace způsobené otáčením vřetena	32
2.3.3	Tepelné deformace způsobená lineárními pohyby součástí	33
2.4	Zkoušky kruhové interpolace číslicově řízených obráběcích strojů	35
2.4.1	Dvousměrná odchylka kruhovitosti - G(b)	36
2.4.2	Odchylka kruhovitosti – G	36
2.4.3	Radiální odchylky – F	37
2.4.4	Průměrná dvousměrná radiální odchylka – D	37
2.5	Určení emise hluku	38

2.5.1	Skupinové zvukové události	39
2.5.2	Jednotlivé zvukové události (u lisů).....	39
2.6	Zkouška diagonálního přestavení.....	39
2.7	Geometrická přesnost od rotace	41
2.7.1	Zkoušení radiální chyby pohybu.....	41
2.7.2	Chyba pohybu nakloněním	43
2.7.3	Axiální chyba pohybu	44
2.7.4	Zkouška vřetena – Pevný citlivý směr:	44
3	Zkušební artefakty pro určení přesnosti tříosých obráběcích strojů.....	46
3.1	Porovnání NPL-WP-150 Freeform reference standard a NAS 979 Testing tool artefact.....	46
3.1.1	NPL-WP-150 Freeform Reference Standardy	47
3.1.2	NAS 979.....	48
3.2	B-NAS 979	49
3.3	Citlivost na kinematické chyby pro monolitický artefakt.....	51
3.4	Válcový obrobek	53
4	Návrh artefaktu a příprava CNC programu pro realizaci zkoušky	57
4.1	Návrh artefaktu.....	57
4.2	Návrh CNC programu	58
4.3	Vlastní obrábění	60
4.3.1	Příprava polotovaru.....	60
4.3.2	Obrábění na CNC frézce	61
4.3.3	Analýza artefaktu s využitím CMM.....	64
5	Analýza výsledků a zhodnocení přesnosti vybraného obráběcího stroje	68
5.1	Rovinnost	68
5.2	Válcovitost	68
5.3	Kruhovitost.....	69

5.4	Přímost	70
5.4.1	Přímost jednotlivých os.....	70
5.4.2	Přímost s použitím lineární interpolace	71
5.5	Rovnoběžnost.....	72
5.5.1	Rovnoběžnost stran kváдру.....	72
5.5.2	Rovnoběžnost interpolovaných stran kváдру.....	73
5.6	Kolmost	74
5.6.1	Kolmost stran kváдру	74
5.6.2	Kolmost interpolovaných stran kváдру	75
5.7	Přesnost rozměrů	75
5.7.1	Výšky jednotlivých ploch	75
5.7.2	Rozměry kváдру.....	76
5.7.3	Rozměry interpolovaného kváдру.....	77
6	Závěr.....	79
	Seznamy	80
	Seznam použitých zdrojů	80
	Seznam obrázků	82
	Seznam tabulek.....	85

1 Přesnost obráběcích strojů

Požadavky na přesnost výrobků se neustále zvyšují, což vede k zpřesňování výrobních tolerancí, musí se tedy v návaznosti na to zvyšovat i přesnost a účinnost obráběcích strojů. Pro co nejúčinnější práci obráběcího stroje je třeba eliminovat vliv okolí, například vibrace, či provádět údržbu. Údržba je nedílnou součástí zlepšování výrobní přesnosti. Jedná se o součást životního cyklu obráběcího stroje, je třeba stanovit výrobní požadavky a postupně dosáhnout spolehlivosti a bezporuchovosti, k tomu se musí chápat celkového fungování obráběcího stroje.

Reaktivní údržba řeší poruchy vlivem lidského pochybení, vady konstrukce či materiálu. Tato údržba bývá dosti náročná, a to i po finanční stránce. Důvody jsou dlouhé odstávky strojů, zajištění či skladování náhradních dílů, ušlý zisk během vadné produkce nebo přesčasy pracovníků.

Proaktivní údržba je způsob zajišťující maximální dostupnost obráběcích strojů s čím nejmenším počtem odstávek. Při vzniku náhodné chyby trvají opravy delší dobu než u reaktivní údržby, jelikož například nemusí být naskladněny náhradní díly. Snížení náhodných chyb můžeme dokázat například preventivní údržbou.

Preventivní údržba je založena na periodických kontrolách a údržbě obráběcích strojů. Příkladem je mazání či lehké přenastavení stroje, ale i výměna větší části stroje, u které by mohla hrozit porucha. [1]

V této práci se zaměřuji na výrobní přesnost CNC frézky, nejdříve jsem nastudovala normu Zásad zkoušek obráběcích strojů, dále prozkoumala používané přejímací artefakty, vytvořila si model vlastního artefaktu a následně simulaci obrábění v CAM softwaru. Artefakt jsem obrobila na dané frézce a přesnosti kontrolovala pomocí CMM.

2 Zásady zkoušek obráběcích strojů

V této části budu převážně čerpat z prvních sedmi částí technické normy ISO 230 Zásady zkoušek obráběcích strojů, jsou znázorněny v *Tabulce 1*:

Tabulka 1: Zásady zkoušek obráběcích strojů

ČSN ISO 230	Zásady zkoušek obráběcích strojů
ČSN ISO 230-1:2014	Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení, nebo kvazistatických podmínek
ČSN ISO 230-2:2010	Stanovení přesnosti opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách
ČSN ISO 230-3:2010	Určení tepelných vlivů
ČSN ISO 230-4:2010	Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených strojů
ČSN ISO 230-5:2001	Určení emise hluku
ČSN ISO 230-6:2003	Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (diagonální přestavení)
ČSN ISO 230-7:2013	Geometrická přesnost os rotace

Před začátkem zkoušek je vždy potřeba provést přípravné operace a těmi jsou

- Ustavení stroje před zkouškou (smontování, provedení vyrovnání stroje a provedení funkčních zkoušek)
- Vyrovnání do vodorovné polohy (docílení statické stability stroje pro snadnější měření)
- Předběžné kontroly (ověření posuvů, otáček vřetena, aj.)
- Provozní podmínky (běh stroje, klid stroje)

Doporučuje se, aby dodavatel/výrobce předložil pokyny týkající se charakteru teplotního prostředí, který je akceptovatelný pro splnění dané specifikace stroje. Tyto specifikace by měly například obsahovat: specifikaci průměrné teploty v místnosti, možné rozsahy těchto teplot a jejich teplotní gradienty. Odpovědností uživatele je zajistit potřebné teplotní podmínky pro provoz a odzkoušení stroje v místě instalace. Pokud uživatel splní veškeré podmínky dané výrobcem, přechází odpovědnost za splnění vlastností stroje na dodavatele/výrobce. Ideální prostředí je při teplotě 20°C. Pokud je teplota jiná je nutné použít korekci, avšak každý rozdíl v teplotě může způsobit další nejistoty.

Nejistota měření musí být brána v úvahu při specifikování tolerancí a při vyhodnocování shody se specifikovanými tolerancemi. Když jsou zpracovány výsledky měření, indikace kvality výsledku musí být dána tak, aby dovolila porovnávání

výsledků měření (mezi sebou, nebo mezi specifikovanými hodnotami). Tato indikace je pak vyhodnocena jako nejistota měření. [2]

2.1 Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení, nebo kvazistatických podmínek

Zkoušky v této části normy jsou pro měření chyby v pohybu mezi součásti obráběcího stroje, která drží obrobek a součástí stroje, která drží řezný nástroj. Popsaná nastavení jsou pouze doporučující a mohou být nahrazena jinými přístroji a nastaveními schopnými stejného měření a mající stejnou nebo menší nejistotu měření.

Obecně jsou zkoušky prováděny s 2 přípravky:

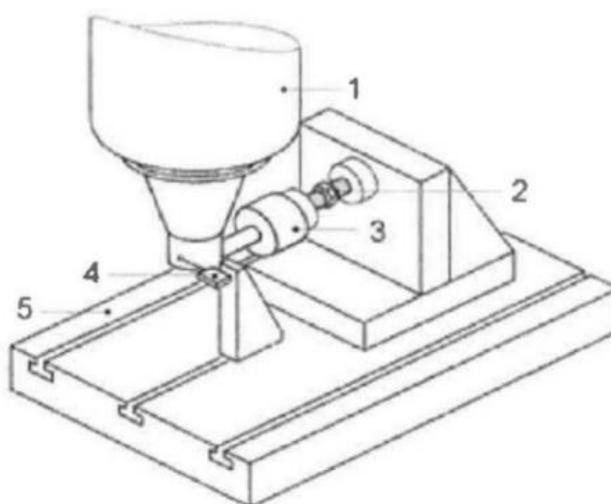
- 1) ustanovuje referenční bod na povrchu
- 2) drží některý typ snímače, aby odečítal proti tomuto referenčního bodu

Tato část ISO 230 se vztahuje pouze na zkoušky přesnosti. Nezabývá se ani funkčními zkouškami stroje (vibrace, trhavé pohyby částí atd.), ani zjišťováním charakteristických parametrů (otáčky, posuvy), které mají být obvykle provedeny před zkouškami přesnosti. Cílem je normalizovat metody zkoušení přesnosti obráběcích strojů, které pracují buď bez zatížení, nebo za dokončovacích podmínek obrábění, pomocí geometrických zkoušek, nebo zkoušek obráběním. [2]

2.1.1 Zkoušky statické shody a zkoušky hystereze

Zkoušky statické shody a hystereze stroje použitím vnější síly

Lineární akční člen a snímač síly jsou pevně upevněny v sérii mezi stranu držící nástroj (vřeteno) a stroje držící obrobek (stůl) ve směru podél zkoušené lineární osy. Znázorněno na *Obrázku 1*.



Legenda

- 1 těleso vřetena
- 2 diferenciální šroub
- 3 zatěžovací článek
- 4 snímač lineárního posunutí
- 5 povrch stolu stroje

Obrázek 1: Nastavení pro zkoušku statické shody [2]

Postup zkoušky:

- 1) Vytvořit podmínku nulové síly akčním členem a nastavení snímače lineárního posunutí na nulu.
- 2) Působit maximálním zkušebním zatížením za použití akčního členu a nazveme ho kladným směrem.
- 3) Zaznamenat sílu a odečet posunutí.
- 4) Aktivovat akční člen v opačném směru, dokud síla neklesne na 1% z maximální použité síly (kladné zatížení).
- 5) Zaznamenat sílu a odečet posunutí.
- 6) Pokračovat pohybem akčního členu ve stejném (záporném) směru, dokud síla nebo výchylka dosáhne maximální (záporné) hodnoty.
- 7) Zaznamenat síly a odečet posunutí.
- 8) Přepnout akční člen do opačného (kladného) směru, dokud síla neklesne na 1% maximální síly (záporné zatížení).
- 9) Zaznamenání sílu a odečet posunutí.

Analyzování výsledků:

Shoda pro osu je celkový rozsah zaznamenaných posunutí dělený celkovým rozsahem zaznamenaných sil, vyjádřených v mikrometrech na newton ($\mu\text{m}/\text{N}$). Hystereze stroje pro osu je vypočtena jako rozsah zaznamenaných posunutí mezi kladnými body zatížení a zápornými body, vyjádřená v μm . Tento výpočet hystereze obsahuje shodu stroje s $-P$ a $+P$, tedy dává velmi malé hodnocení hystereze (jelikož $-P$ a $+P$ jsou 1% max. použité síly). [2]

Zkoušky statické shody a hystereze stroje použitím vnitřní síly

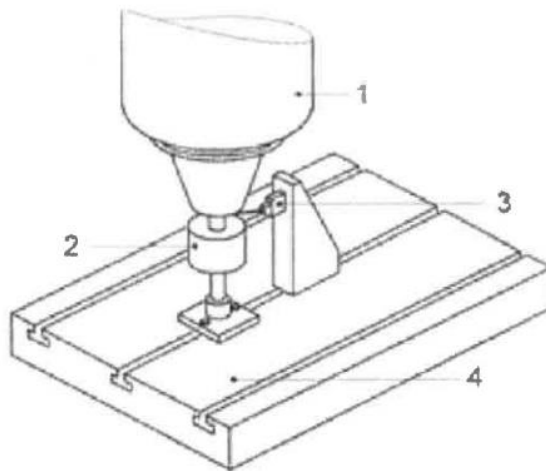
U této metody je snímač lineárního posunutí nastaven pro odečet relativního pohybu mezi stranou stroje držící nástroj (př. vřeteno) a stranou stroje držící obrobek (př. stůl) ve směru podél zkoušené lineární osy. Zatěžovací článek je vyrovnán se stejnou osou stroje a je pevně uchycen mezi stůl stroje a vřeteno. Statické zatížení je generováno pohybující se osou stroje. Doporučení je, aby nastavení bylo takové, že zatěžovací článek je aktivní jak při tahu, tak při tlaku.

Postup zkoušení:

- 1) Nastavit indikátoru na nulu při každém začátku zkoušky
- 2) Pohyb zkoušenou osou stroje po malých krocích, dokud není dosaženo maximální specifikované síly, nebo maximální specifikované výchylky (kladný směr)
- 3) Zaznamenat předpokládané posunutí, posunutí měřené indikátorem a sílu
- 4) Pohyb osou po krocích v obráceném (záporném) směru, dokud síla neklesne na jedno procento maximální síly
- 5) Zaznamenat předpokládané posunutí
- 6) Pohybovat osou po krocích ve stejném (záporném) směru, dokud síla nedosáhne její max. hodnoty
- 7) Zaznamenat předpokládaná posunutí
- 8) Pohyb osy po krocích zpět v kladném směru, dokud síla neklesne na jedno procento maximální síly (záporné předběžné zatížení)
- 9) Zaznamenat předpokládaná posunutí

Analyzování výsledků

Shoda hystereze stroje, je vypočtená výchylka (skutečné posunutí mínus očekávané posunutí) v každém měřeném bodě. Shoda ve směru osy je vypočtena jako celkový rozsah výchylek dělený celkovým rozsahem síly (vyjádřené v $\mu\text{m}/\text{N}$). Hystereze stroje pro osu je vypočtena jako rozsah výchylek mezi kladnými body předběžného zatížení a zápornými body. Tento výpočet hystereze obsahuje shodu stroje s $-P$ a $+P$, tedy dává velmi malé hodnocení hystereze (jelikož $-P$ a $+P$ jsou 1% max. použité síly). Nastavení pro zkoušku je znázorněno na *Obrázku 2*. [2]



Legenda

- 1 těleso vřetena
- 2 zatěžovací článek
- 3 snímač lineárního posunutí
- 4 povrch stolu stroje

Obrázek 2: Nastavení pro zkoušku statické shody a zkoušku hystereze stroje působením vnitřní síly pohybem hlavy vřetena [3]

2.1.2 Zkoušky geometrické přesnosti os s lineárním pohybem

Všechny obráběcí stroje se sestávají z pohyblivých saní, stolů nebo jiných prvků, jejichž účelem je měnit, buď ručně, nebo automaticky relativní polohu mezi obrobkem a řezným nástrojem.

Předpoklad je tuhé těleso, lineární saně, vykonávající šest chybných pohybů spojených s nominálním lineárním pohybem:

- a) Jedno lineární posunutí (polohování) chybu pohybu podél zamýšleného pohybu dráhy
- b) Dvě přímé chyby pohybu ve dvou kolmých směrech na směr dráhy

c) Tři úhlové chyby, které se otáčejí okolo tří vzájemně kolmých os (X, Y, Z)

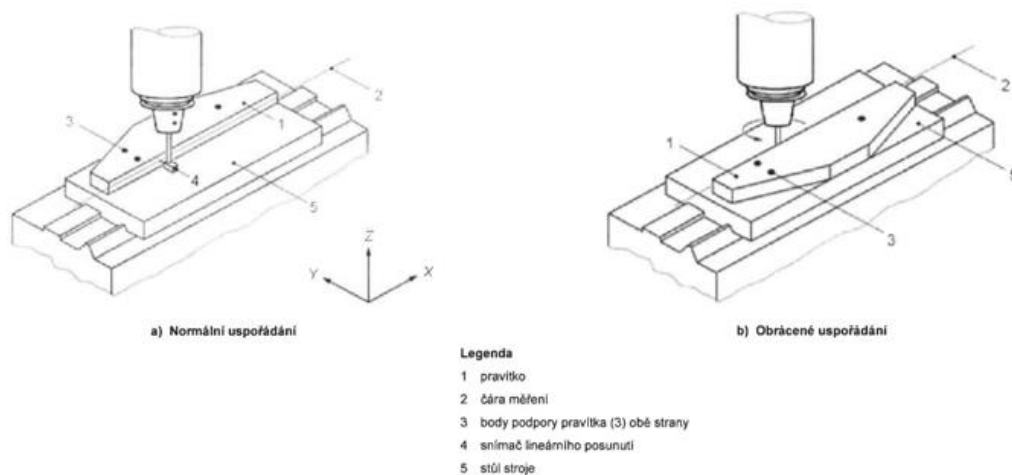
Zkoušky chyby pohybu přímosti

Tato chyba při pohybu přímosti součásti obráběcího stroje pohybující se na lineární trajektorii je přímo ovlivněna přímostí a rovinností povrchu stejně, jako formou, umístěním a orientací geometrických vlastností obrobku produkovaném obráběcím strojem.

Měřicí metody jsou založeny na měření posunutí vzhledem k referenční přímosti, referenční přímost může být fyzický artefakt (pravítko, napnutý drát, nebo referenční čára produkovaná světelným paprskem optického záření. [2]

a) pravítko se snímačem lineárního posunutí a jeho obrácená metoda

Reference přímosti je pravítko, kterým určujeme úchytky v přímosti ve svislém a vodorovném směru. Snímač lineárního posunutí musí být umístěn co nejbližší k funkčnímu bodu pohybující se součásti. Měření musí být provedeno pohybem snímače lineárního posunutí podél pravítka a zaznamenáno pozorované posunutí. Zkouška má dvě možné uspořádání, což vidíme na *Obrázku 3*.

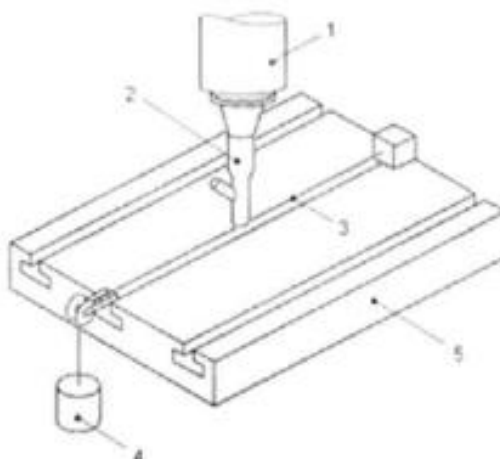


Obrázek 3: Uspořádání měření přímosti při použití pravítka

Obrácená metoda spočívá v tom, že se po první sadě měření v normálním uspořádání pravítko otočí o 180° okolo jeho podélné osy, a snímač lin. posunutí je také otočen, aby četl posunutí proti stejnému referenčnímu povrchu. [2]

b) Mikroskop a ocelový drát:

Drát průměru přibližně 0,1 mm je natažen tak, aby byl rovnoběžný se směrem kontrolovaného pohybu. Trajektorie tohoto pohybu je monitorována mikroskopem, nebo jiným vhodným zařízením upnutým ve vřetenu stroje. Sestavení zkoušky zobrazuje *Obrázek 4*.

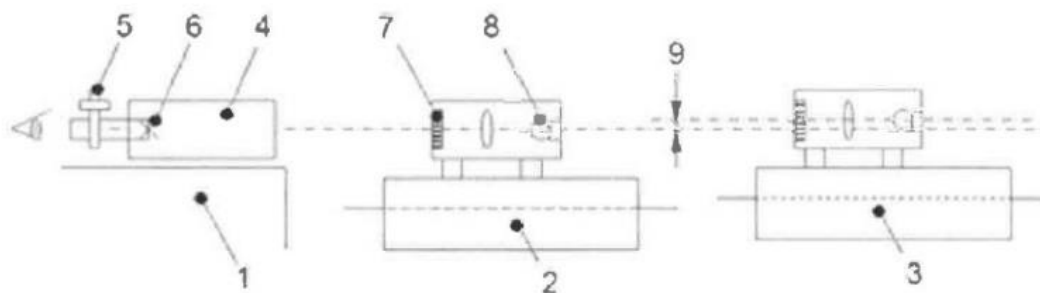


- Legenda
- 1 vřeteno
 - 2 mikroskop
 - 3 napnutý drát
 - 4 závaží
 - 5 stůl

Obrázek 4: Měření chyby přímosti při použití napnutého drátu a mikroskopu

c) Vyrovnávací dalekohled

Optická trasa zakládá referenční přímost. Měření je prováděno tak, aby reprezentovalo vzájemnou polohu mezi nástrojem a obrobkem. Dalekohled se montuje na část, která nese obrobek a terč musí být na součásti, která nese nástroj. Terč musí být kolmý k ose kontrolovaného pohybu a jeho střed musí být co nejbližší funkčnímu bodu. Musí se zabránit místním ohybům, jinak se měření stávají nerelevantními. Schéma zkoušky je na *Obrázku 5*. [2]



Legenda

- 1 strana obrobku (stůl)
- 2 strana nástroje (poloha 1)
- 3 strana nástroje (poloha 2)
- 4 dalkohled
- 5 odečítací mikrometr
- 6 nitkový kříž
- 7 terč
- 8 světelný zdroj
- 9 měřená úchylka

Obrázek 5: Měření chyby přímosti použitím vyrovnávajícího dalekohledu

d) Vyrovnávací laser a laserový interferometr přímosti

Laserový paprsek nebo středová čára dvou zrcadlového reflektoru je referencí přímosti měření a musí reprezentovat vzájemnou polohu mezi nástrojem a obrobkem. Laserová hlava je namontována na nosiči obrobku a terč na nosiči nástroje.

Postup měření a analýza dat:

- 1) Součást stroje, jejíž pohyb je zkoušen, musí být polohována do série cílových poloh přes celou dráhu, která je předmětem zkoušky.
- 2) Měřený interval nesmí být větší, než je 25 mm pro osy délek 250 mm nebo méně. Pro delší osy, nesmí být interval větší, než 1/10 délky osy.
- 3) V cílové pozici musí stroj zůstat dostatečně dlouho, aby se zaznamenala potřebná data.

2.1.3 Zkoušky chyb lineárního polohování

Měřicí přístroj posunutí musí být nastaven tak, aby měřil vzdálenost posuvu zkoušené součásti stroje (saní). Saně musí být umístěny do každé polohy ručně, nebo numerickým řízením. Každá hodnota je zaznamenávána a rozdíl mezi hodnotou cílové

polohy a měřenou hodnotou je vypočten, jako úchylka lineárního polohování. Pro měření se používá laserový interferometr popsáný v následujícím bodě. [2]

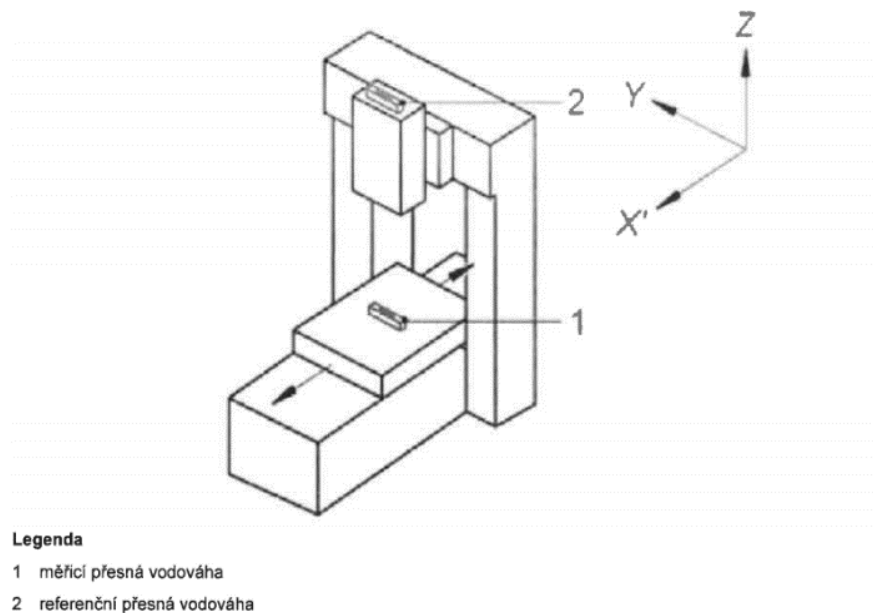
2.1.4 Zkoušky úhlové chyby pohybu

U tohoto typu zkoušek můžeme měřit u lineárních os tři úhlové chyby pohybu v kolmých rovinách (rolování, sklon, vybočování). Měřicí přístroj úhlu musí být nastaven tak, aby měřil vzájemnou úhlovou chybu pohybu mezi nástrojovou a obrobkovou stranou stroje tak, jak se součást stroje (saně) posouvá podél své lineární chyby pohybu.

Společné metody většinou používají přesné vodováhy pro měření rolování (otáčení okolo osy lineárního pohybu), laserový úhlový interferometr či autokolimátor pro měření sklonu a vybočování osy (otáčení okolo os kolmých na pohybu).

Přesná vodováha

Přístroj musí být upevněn na pohybující se součást. Měření mezi součásti stroje držící nástroj a obrobkovou součástí se má provádět použitím dvou přesných vodováh, jak je znázorněno na *Obrázku 6*.

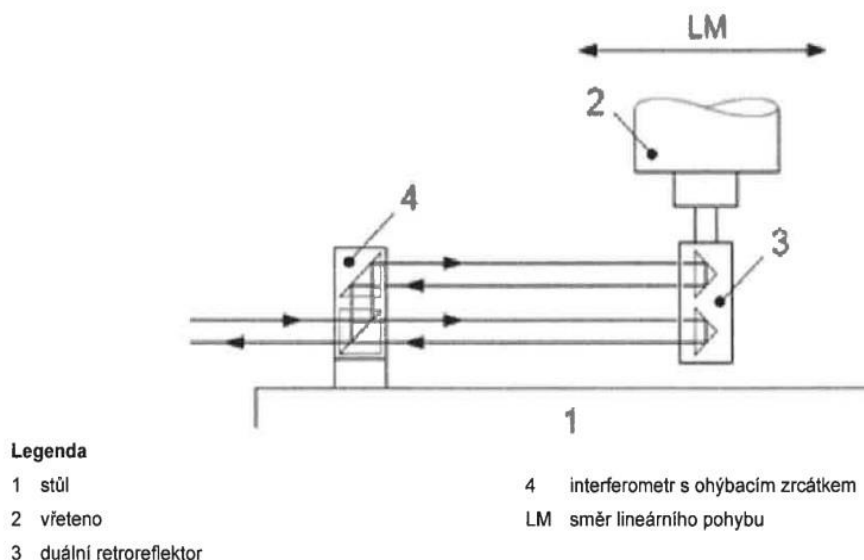


Obrázek 6: Měření úhlové chyby pohybu v ose X s přesnými vodováhami

Laserový úhlový interferometr

Používá se pro měření otáčení okolo os kolmých na lineární osu pohybu (sklon, vybočování). Přístroj je sestaven ze dvou kusů optiky: úhlového interferometru

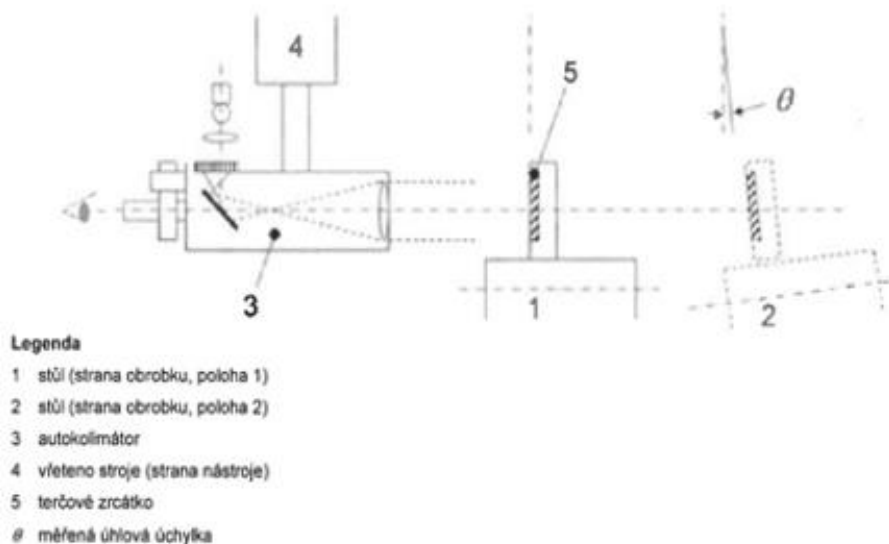
a duálního retroreflektoru. Úhlový interferometr poskytuje dva rovnoběžné paprsky oddělené známou vzdáleností, duální retroreflektor vrací každý paprsek zpět do interferometru. Schéma měření je na *Obrázku 7*. [2]



Obrázek 7: měření úhlové chyby pohybu použitím laserového úhlového interferometru

Autokolimátor

Autokolimátor musí být namontován na stacionární součást stroje, souose s osou pohybu. Terčové zrcátko je namontováno na pohybující se součást a otáčí se okolo vodorovné osy, kolmo na optickou osu, což znamená vertikální posunutí nitkového kříže v ohniskové rovině. Schéma na *Obrázku 8*. Obě tyto součásti musí být mezi obrobkovou a nástrojovou stranou stroje. Měří se vizuální mikrometr, který se otáčí v rozmezí 90° a zároveň úhel otočení terčového zrcátka okolo vertikální osy. [2]



Obrázek 8: Měření pomocí autokolimátoru

2.1.5 Geometrické zkoušky přesnosti os otáčení

Zkoušky popisují geometrickou přesnost os otáčení (radiální, axiální, nakloněnou a čelní chybu pohybu a jejich synchronní a asynchronní součásti, stejně jako strukturální pohyb pro pevný a otáčivý citlivý směr).

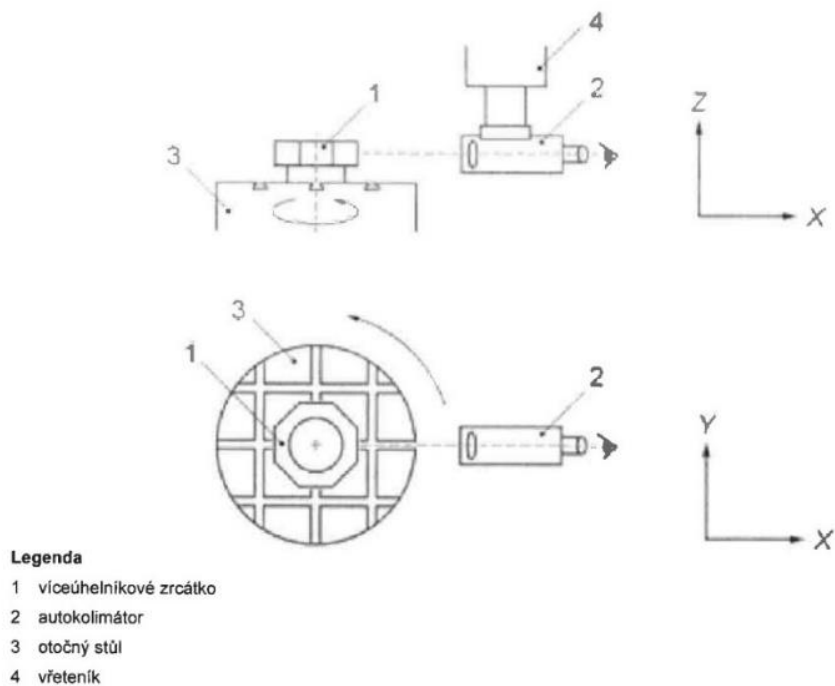
Chyba pohybu úhlového polohování

Mnoho obráběcích strojů je vybaveno rotačními osami se souvislými nebo diskretními polohovacími možnostmi (rotační stoly, indexovací stoly, výkyvné hlavy aj.). Rotační osy s možností souvislého polohování bývají zpravidla řízeny číslicovým řízením (NC) a rotační osy s diskretními polohovacími možnostmi mohou být řízeny různými typy (ruční, mechanické, NC aj.). [2]

Pro tento typ chyby máme několik způsobů měření:

a) Mnohoúhelník a autokolimátor

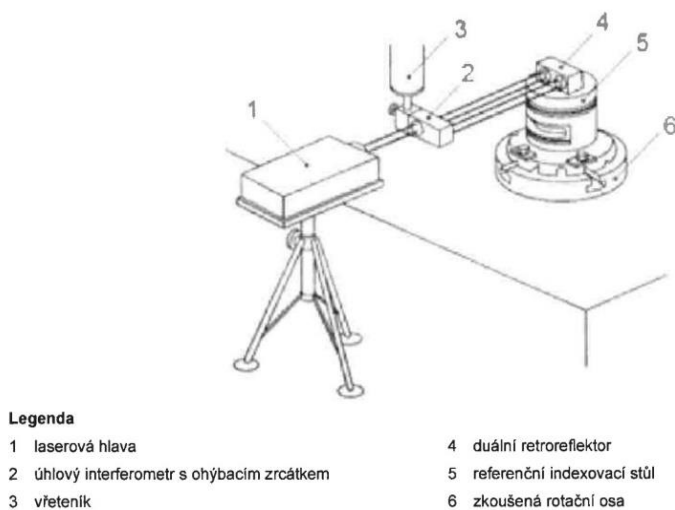
Optický mnohoúhelník, slouží jako referenční úhlový artefakt, by měl být nainstalován přibližně soustředně k rotační součásti stroje, aby byl měřitelný autokolimátorem. Ten je namontován na nerotační část stroje (např. vřeteník). Přírůstky úhlového polohování zkoušené rotační součásti by měly být stejné, nebo násobkem téhož úhlu mezi referenčním povrchem artefaktu. To zobrazuje *Obrázek 9*.



Obrázek 9: Měření chyby úhlového polohování použitím autokolimátoru a mnohoúhelníku

b) Referenční indexovací stůl s laserovým interferometrem/autokolimátorem

Indexovací stůl musí být upevněn na rotační součásti stroje (rotační stůl). Ploché odrážecí zrcadlo nebo úhlová optika musí být upevněna na referenční indexovací stůl a její povrch musí být kolmý na světelný paprsek. Laserový interferometr/autokolimátor je upevněn na nerotační části stroje. Indexovací stůl se má otáčet proti směru hodinových ručiček, rotační součásti po směru hodinových ručiček. Schéma měření ukazuje *Obrázek 10*. Tento typ měření může být použit pro měření chyby úhlového polohování dané indexovací rotační osy. [2]



Obrázek 10: Měření chyby pohybu úhlového polohování použitím referenčního indexovacího stolu

2.1.6 Vyrovnávání os pohybu-rovnoběžnost, kolmost a průsečík

Rovnoběžnost os pohybu a její metody:

- házení stacionárního bodu
- chyba rovnoběžnosti mezi osou lineárního pohybu a stacionární osou
- Měření dvou chyb přímosti pohybu

Chyba rovnoběžnosti mezi osou lineárního pohybu a průměrnou čarou rotační os vřetena stroje – metody používající

- laserový interferometr přímosti
- zkušební trn, nebo pravítko a snímač lineárního posunutí
- zkušební kuličku a snímač lin. posunutí

Chyba souososti průměrných čar osy:

- házení stacionárního bodu

Chyba kolmosti os pohybu:

- mezi dvěma osami lineárního pohybu
- mechanický referenční úhelník a snímač lin. posunutí
- referenční pravítko a referenční indexovací stůl
- optický úhelník a laserový interferometr přímosti
- chyba kolmosti mezi dvěma průměrnými čarami os

2.1.7 Zkoušky geometrické přesnosti funkčních povrchů stroje – přímosti, rovinnosti, kolmosti a rovnoběžnosti

Chyba přímosti funkčních povrchů stroje

- Metody založené na měření vzdálenosti
- Metody s pravítkem
- Metody napnuté struny a mikroskopu
- Metody s vyrovnávacím dalekohledem
- Metody založené na měření úhlů:
- Chyba přímosti referenčních drážek nebo referenčního povrchu stolu
- Chyba přímosti vodících ploch
- Chyba přímosti válcových povrchů

- Chyba přímosti jednotlivých svislých povrchů

Rovinnost stolů stroje

- Pomocí přímé desky
- Pomocí přímé desky a snímače lin. posunutí
- Pomocí pravítka
- Měření rovinnosti optickými metodami
- Autokolimátorem
- Laserovým interferometrem

Pozice a orientace funkčních povrchů

- Rovnoběžnost čar a rovin
- Rovnoběžnost dvou rovin
- Rovnoběžnost dvou os
- Rovnoběžnost mezi osou a rovinou
- Rovnoběžnost mezi osou lineárního pohybu a rovinou
- Rovnoběžnost mezi osou a průsečnicí dvou rovin

Házení rotačních součástí

- Házení vnějšího povrchu
- Házení vnitřního povrchu

Chyba pravoúhlosti a kolmosti mezi čarami a rovinami

- Dvě roviny ve vzájemném úhlu 90°
- Stacionární osa a rovina 90° jedna ke druhé
- Chyba kolmosti mezi osou lin. pohybu a rovinou
- Chyba kolmosti mezi osou lin. pohybu a stacionární osou
- Kolmost mezi osou otáčení a stacionární osou
- Kolmost osy otáčení k rovině

[2]

2.2 Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách

Tato část je specifikací metody zkoušek a vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v osách číslicově řízených strojů přímým měřením. V jednotlivých osách jsou tyto zkoušky určeny pro měření relativního posunutí mezi zařízeními, které upíná nástroj a zařízeními, které upíná obráběný díl. Používá se jak pro lineární osy, tak pro osy otočné, ale nelze ji použít pro měření ve více osách. Lze ji použít při: typové zkoušce, přijímací zkoušce, při porovnávacích zkouškách, při periodickém ověření, při korekci stroje aj.

Stroj musí být programován tak, aby se nastavovaná část pohybovala podél, nebo okolo osy do řady zadaných poloh, ve kterých zůstane natolik dlouho, aby byla skutečná poloha dosažena, změřena a zaznamenána. Měří se hlavně změna relativní polohy mezi částí nesoucí nástroj a částí nesoucí obrobek ve směru pohybu k měřené ose, proto je nutné správně nastavit měření. [3]

2.2.1 Lineární osy:

Zkoušky v lineárních osách do 2000 mm

Je nutné zvolit minimálně 5 poloh na 1 metr a minimálně 5 poloh celkově. Měření musí být provedeno ve všech zadaných polohách za použití běžného cyklu a do každé polohy musí být najeto v obou směrech pětkrát, přičemž musí být zajištěno normální chování stroje

Zkoušky v lineárních osách nad 2000 mm

Celý rozsah dráhy musí být zkoušen při jednosměrném nastavení do zadaných poloh, s průměrnou délkou intervalu $p = 250$ mm v obou směrech pohybu. Pokud je snímač segmentový, musí být zajištěny další polohy tak, aby bylo zajištěno, že ke každému segmentu náleží alespoň jedna zadaná poloha. [3]

2.2.2 Zkoušky v otočných osách

Zkoušky v otočných osách do 360°

Zkoušky musí být provedeny v zadaných polohách uvedených v *Tabulce 2*, musí být vloženy zkoušky pro 0°, 90°, 180° a 270°, pokud jsou k dispozici. Každá poloha musí být dosažena pětkrát.

Tabulka 2: Zadané polohy pro otočné osy

Rozsah měřené dráhy	Minimální počet zadaných poloh
< 90°	3
>90° a < 180°	5
>180°	8

Zkoušky otočných os přes 360°

V osách s celkovým rozsahem 5 otáček (1800°) musí být zkoušeno při jednom jednosměrném nastavení do zadaných poloh s minimálně 8 zadanými polohami na otáčku.

Analyzování výsledků:

Pro lineární osy do 2000 mm a rotační osy do 360° se pro každou polohu vyhodnotí soubor aplikovatelných parametrů stanovených dle normy a stanoví se hranice úchylek.

Pro lineární osy nad 2000 mm a rotační osy nad 360° se pro každou zadanou polohu se vyhodnotí stejný soubor aplikovatelných parametrů stanovený dle normy. Neaplikovatelné jsou například: odhady pro jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy, opakovatelnosti polohy a přesnosti nastavení polohy aj.

Po každém měření je vystaven protokol o měření, tento protokol vydává každý subjekt, který je způsobilý k provádění zkoušky. Tento protokol je vypracován na základě podkladů z normy, která udává parametry, které musí být uvedeny v protokolu. [3]

Body, které se musí odsouhlasit před zkouškou:

- Hodnota teplotního gradientu
- Umístění přístroje a snímačů pro měření teploty
- Postu ohřevu stroje
- Rychlost posuvu mezi zadanými polohami
- Poloha měřeného rozsahu dráhy, která je uvažována jako běžný pracovní rozsah
- Polohy součástí, které nejsou předmětem zkoušky
- Doba prodlevy v jednotlivých polohách
- Stanovení první a poslední polohy

[3]

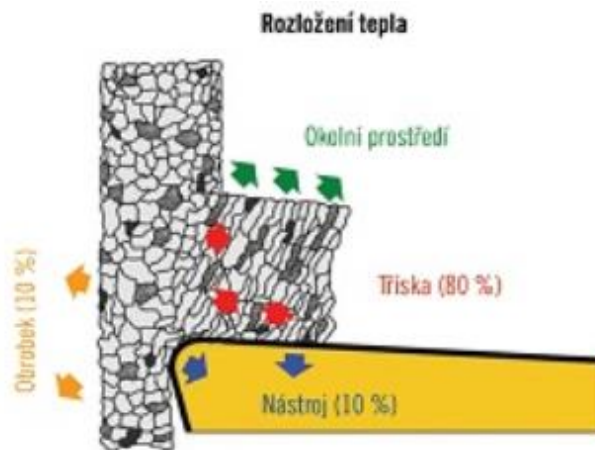
2.3 Určení tepelných vlivů

Jelikož se při frézování zuby frézy střídavě střetávají s materiálem, tak zde dochází k nekontinuálnímu zahřívání rezných hran třením, čas, kdy zub odebírá materiál je dán úhlem záběru a daným procesem frézování.



Obrázek 11: Úhly záběru frézy [13]

Deset procent tepla, které při obrábění vzniká, přechází do obrobku, deset procent jde do nástroje a osmdesát procent okamžitě odchází s třískou. To, že většina vzniklého tepla je odpádkem třískou napomáhá k tomu, že se tímto teplem nezkracuje životnost nástroje opotřebením, ani se nesnižuje kvalita obráběného dílu. [13]



Obrázek 12: Rozložení tepla při frézování [13]

Množství vzniklého tepla závisí na tvrdosti materiálu i na řezné rychlosti, více tepla vzniká, pokud se jedná o tvrdší materiál či obrábíme vyššími rychlostmi. Možnou korekcí je chlazení, aby bylo efektivní, tak je třeba chladicí kapalinu směřovat přímo na střet nástroj s obráběnou plochou. [13]

Tepelné vlivy z působení různými tepelnými zdroji mají za následek deformace obráběcího stroje a jeho systému správného nastavení polohy. Zkoušky tepelných vlivů mohou být použity pro:

- zkoušky různých typů obráběcích strojů (typové zkoušky)
- zkoušky jednotlivých obráběcích strojů (přejímací zkoušky)

Norma nám stanovuje v zásadě 3 typy zkoušek pro určení tepelných vlivů na obráběcím stroji, všechny tyto 3 typy zkoušek mohou být použity samostatně, nebo v libovolné kombinaci:

- 1) Zkouška pro určení chyby vzniklé v důsledku kolísání teploty prostředí (ETVE)
- 2) Zkouška tepelných deformací způsobených otáčením vřetena
- 3) Zkouška tepelných deformací způsobených pohybem v lineárních osách

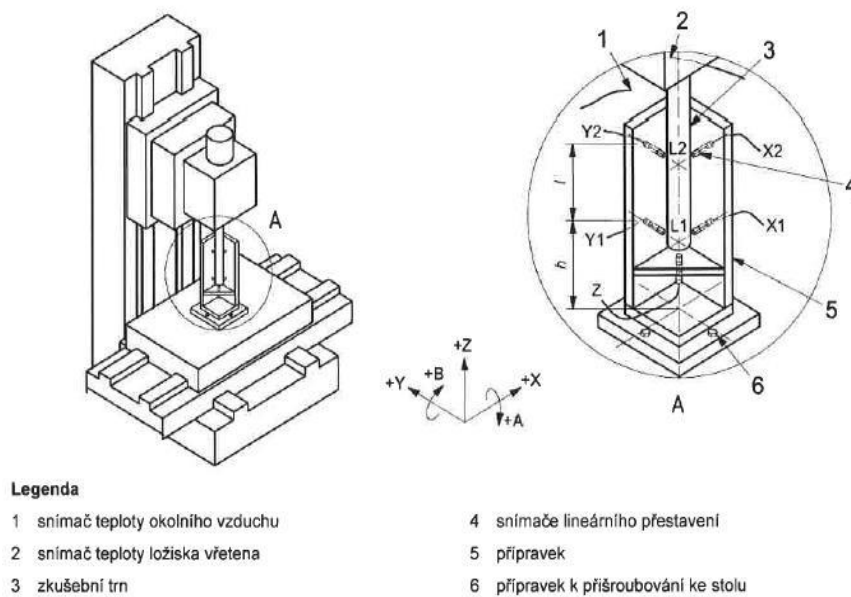
K měření tepelných vlivů se používá systém pro měření přestavení s odpovídajícím rozsahem, rozlišovací schopností, teplotní stabilitou a nejistotou měření (laserový interferometr, snímače pro měření okolního prostředí a pro měření deformací na vřetenu), snímače teploty s dostatečnou rozlišovací schopností, zařízení

pro shromažďování dat (vícekanálové zapisovače, nebo systém založený na monitorování pomocí PC), zkušební trn (z materiálu dle specifikace stroje, nebo materiálu dohodnutým mezi výrobcem a uživatelem) a přípravek pro namontování snímačů přestavení (také z materiálu dle specifikací stroje). [4]

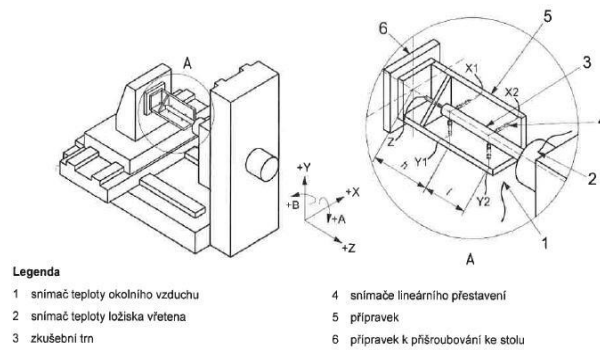
2.3.1 Zkouška ETVE

Tato zkouška nám slouží pro zjištění vlivů změn okolní teploty na stroj a také pro odhad chyby způsobené teplotou v průběhu měření provozních vlastností. Tento typ zkoušek nesmí být použit pro porovnání strojů. Zkouška musí být určena metodou driftu. Celková nejistota při měření vlastností stroje způsobená teplotními vlivy je stanovena jako kombinovaná standardní tepelná nejistota. Je požadováno, aby osy rotace byly zásobeny energií a drženy v „klidové“ poloze

Typické uspořádání zkoušení ETVE a tepelných deformací způsobených otáčením vřetena a pohybem v lineárních osách je zobrazeno na *Obrázku 13*, *Obrázku 14* a *Obrázku 15*.

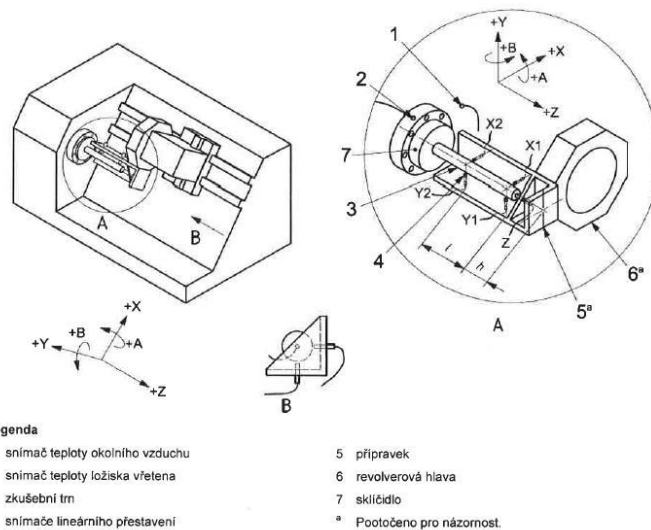


Obrázek 13: Typické uspořádání zkoušení ETVE a tepelných deformací způsobených otáčením vřetena a pohybem v lineárních osách obráběcí centrum se svislou osou vřetena [4]



Obrázek 2 – Typické uspořádání zkoušení ETVE a tepelných deformací způsobených otáčením vřetena a pohybem v lineárních osách na obráběcím centru s vodorovnou osou vřetena

Obrázek 14: Typické uspořádání zkoušení ETVE a tepelných deformací způsobených otáčením vřetena a pohybem v lineárních osách na obráběcím centru s vodorovnou osou vřetena [4]



Obrázek 3 – Typické uspořádání zkoušení ETVE a tepelných deformací způsobených otáčením vřetena a pohybem v lineárních osách na soustružnickém centru se šikmým ložem

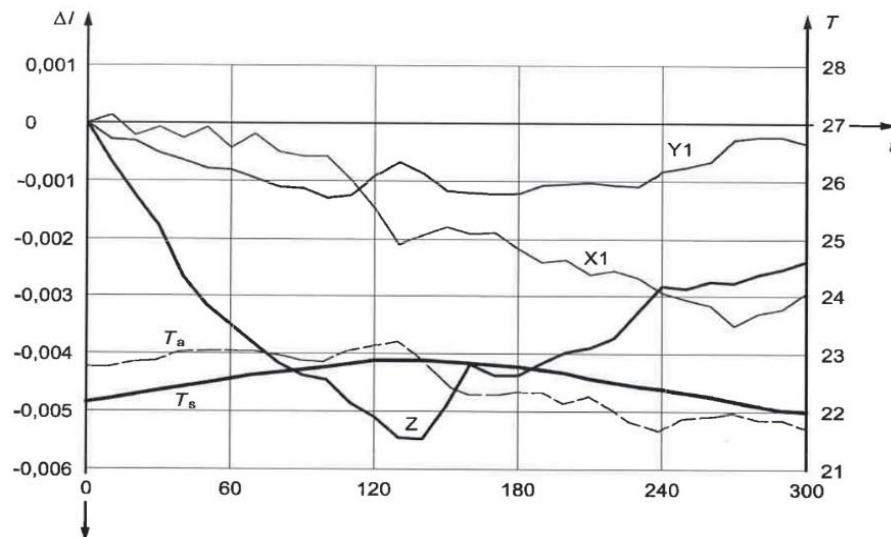
Obrázek 15: Typické uspořádání zkoušení ETVE a tepelných deformací způsobených otáčením vřetena a pohybem v lineárních osách na soustružnickém centru se šikmým ložem [4]

Pro tuto zkoušku je důležité, aby přípravek, na kterém jsou snímače pro měření lineárního přestavení, byl bezpečně připevněn na neotáčející se část stroje, abychom mohli měřit:

- Relativní přestavení mezi částí stroje, která drží nástroj a částí stroje, která drží obrobek ve 3 kolmých směrech rovnoběžných s osami stroje tzn. „zkouška driftu“
- Naklápění, nebo natáčení kolem osy X a osy Y obráběcího stroje.

Jakmile je příprava měření hotova, může se začít se zkouškou driftu. Výsledkem měření je graf, vyjadřující závislost tepelných deformací a teploty na čase, který nesmí

být použit pro porovnávání strojů. Výsledné hodnoty jsou uvažovány pro kombinované standardní teplotní nejistoty v měřeních (přesnost lineárního přestavení v každé ose, nebo měření kruhové interpolace ve 3 navzájem kolmých rovinách stroje). Pokud záznam ukáže významné změny podmínek, pak musí být měření anulováno a prohlášeno za neplatné. Pak je provedeno nové vyhodnocení ETVE, nebo upraveny podmínky měření. [4]



Obrázek 16: Teplota deformace v závislosti na čase pro zkoušku ETVE [4]

2.3.2 Tepelné deformace způsobené otáčením vřetena

Účelem této zkoušky je zjistit vlivy vnitřního tepla vznikajícího otáčením vřetena, výsledného teplotního gradientu na stroji a deformace stroje pozorované mezi nástrojem a obrobkem. Protože se deformace vztahují k teplu vznikajícímu otáčením vřetena, provádí se tato zkouška pouze na strojích s otáčejícími se vřeteny

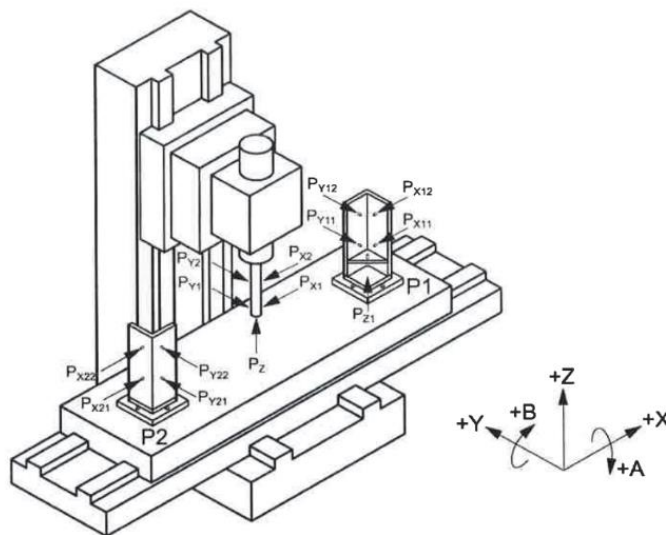
Princip zkušební metody je podobný, jako u zkoušky ETVE, s tím, že zde měříme tepelné deformace. Měření provádíme tak, že zaznamenáváme teplotu stroje měřenou co nejbližší předního ložiska vřetena a dále pak okolní teplotu vzduchu v těsné blízkosti stroje, aby se zabránilo vlivu ohřívání stroje. Při zkoušce by mělo být použito proměnné spektrum frekvence otáčení nebo konstantní frekvence otáčení, která odpovídá určitému procentu max. frekvence. Zvolená frekvenční spektra otáčení by měla odpovídat použití stroje a výstupy všech snímačů musí být zaznamenávány po dobu 4 hodin. [4]

2.3.3 Tepelné deformace způsobená lineárními pohyby součástí

Principem této zkoušky je identifikovat vlivy vnitřního tepla způsobeného systémem stroje pro nastavování polohy a třením ve vedení na deformace stroje mezi obrobkem a nástrojem. Místa měření se volí blízko koncových bodů dráhy, ale ne dále než 2 m od sebe. Do každého měřicího místa může být najeto pouze z jiného místa, měření proto zahrnuje chybu vzniklou reverzací lineárního pohybu. [4]

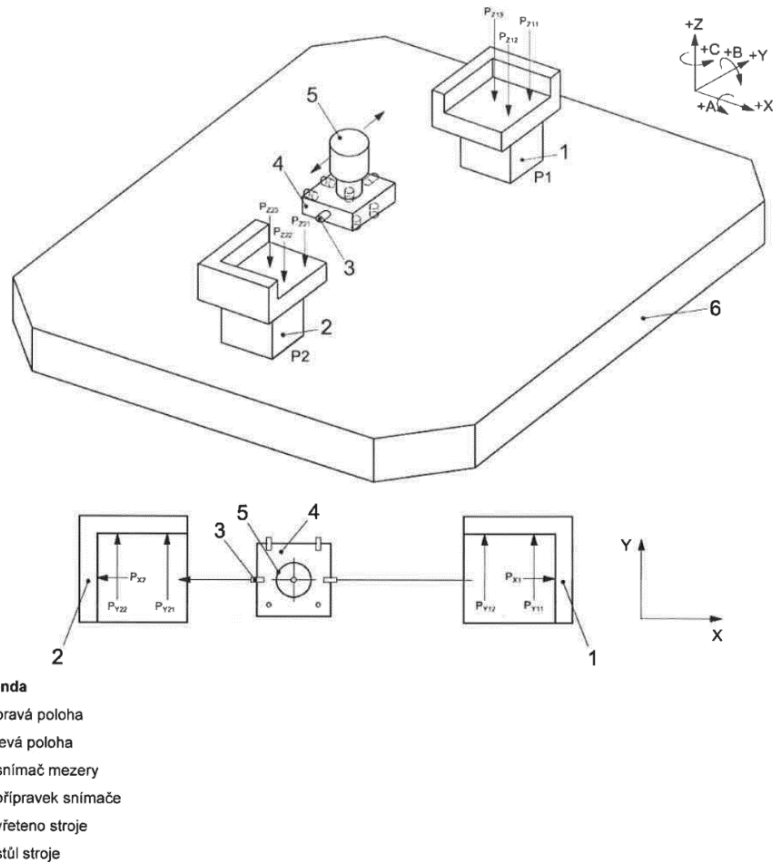
Tato zkouška může mít 3 různá uspořádání:

Uspořádání č. 1 se skládá ze dvou přípravků, každý s pěti snímači lineárního přestavení a zkušebního trnu. Zkušební trn musí být upevněn na vřeteno a dva přípravky musí být pevně uchyceny na každém konci dráhy zdvihu stolu. Snímače musí být nastaveny tak, aby měřily změnu polohy a orientace zkušebního trnu v každé koncové poloze. Zobrazeno na *Obrázku 17*.



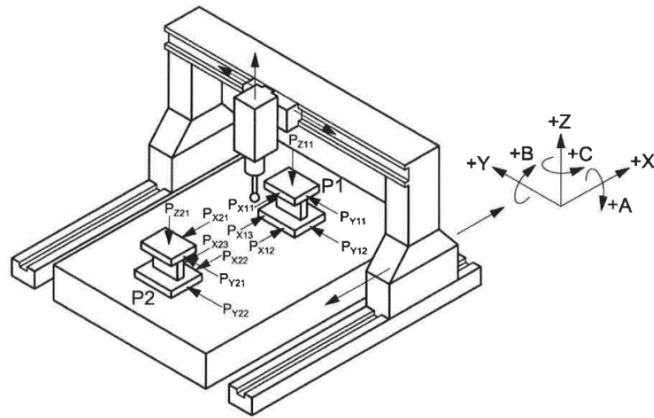
Obrázek 17: Typické uspořádání měření teplotních deformací v důsledku pohybu stolu v ose X obráběcího centra [4]

Uspořádání č. 2 se sestává z jednoho přípravku se sedmi snímači přestavení a dvou bloků v zadaných polohách. Přípravek snímače je upevněn na vřeteno a dva body jsou umístěny na každém konci dráhy, jak je vidět na *Obrázku 18*. Toto přestavení umožňuje současné měření šesti složek teplotní deformace v jednom směru pohybu a dvou na sebe kolmých směrech a tří úhlových os okolo tří lineárních os. [4]



Obrázek 18: Alternativní uspořádání měření tepelných deformací způsobené pohybem saní obráběcího centra ose X [4]

Uspořádání č. 3 skládá se z dotykové sondy stroje a dvou bloků v zadaných polohách. Tyto bloky jsou upevněny na každém konci dráhy, jak je uvedeno na *Obrázku 19*. Ideálně dotykem šesti bodů na každém artefaktu a zaznamenáním poloh stroje X, Y, Z může být vypočítáno až šest složek tepelné deformace. Výběr měřicích bodů by měl být proveden pečlivě a měl by zajistit, aby všechny sledované úhlové deformace vykazovaly rozdíly.[4]



Obrázek 19: Typické uspořádání měření teplotních deformací pohybem portálu v ose X obráběcího centra při použití dotykové sondy [4]

Zkušební cyklus se skládá z 2 časových úseků, a to z čtyřhodinového cyklování v ose a 1 hodiny chladnutí. Měření probíhá tak, že se saně dostanou do polohy 1, kde setrvají tak dlouho, aby se zaznamenaly odečty přestavení, pak saně přejedou do polohy 2. Tento způsob se několikrát opakuje do konce měřicího cyklu, přičemž se zaznamenávají data v obou zadaných polohách, výsledkem je pak soubor grafů. Pro každou osu stroje musí být uvedeny následující grafy závislosti na čase:

- Grafy pro dvě zvolené zadané polohy.
- Čtyři grafy kolmých lineárních deformací v zadaných polohách.
- Čtyři nebo šest grafů úhlových deformací v zadaných polohách.
- Musí být k dispozici grafy okolní teploty a teploty stroje měřené během zkoušky.

[4]

2.4 Zkoušky kruhové interpolace číslcově řízených obráběcích strojů

Parametry zkoušky:

- Průměr nebo poloměr jmenovité dráhy
- Rychlost výsledného posuvu
- Smysl pohybu (ve směru nebo v proti směru pohybu hodinových ručiček)
- Souřadné osy, ve kterých je pohyb vykonáván
- Umístění měřicího přístroje v pracovním prostoru obráběcího stroje
- Jakýkoliv způsob kompenzace, který byl použit v průběhu zkušební cyklu

Pro určení dvousměrné odchylky kruhovitosti $G(b)$ a průměrné dvousměrné radiální odchylky D musí být měřeny dvě skutečné dráhy, jedna při pohybu po směru hodinových ručiček a druhá v pohybu proti směru hodinových ručiček. Všechna naměřená data odpovídající skutečné dráze musí být zahrnuta do vyhodnocení. Při měření radiální odchylky F části kružnice musí být minimalizovány chyby seřízení. [5]

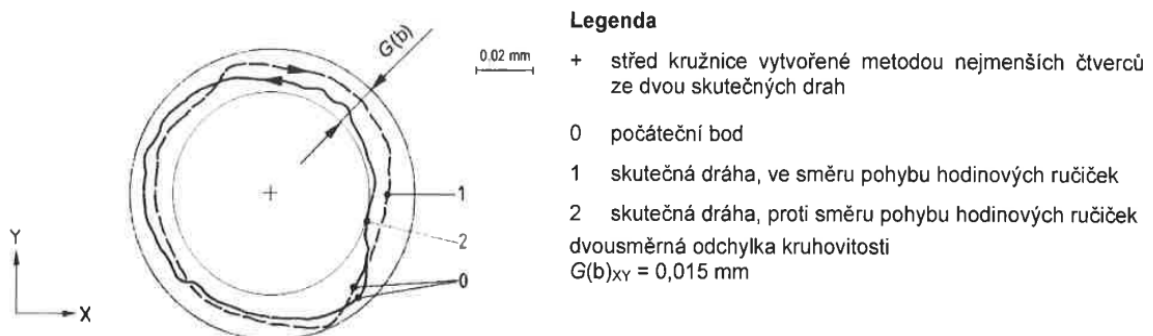
2.4.1 Dvousměrná odchylka kruhovitosti - $G(b)$

Minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic ohraničující dvě skutečné dráhy, kde jedna dráha je tvořena pohybem ve směru hodinových ručiček a druhá dráha je tvořena proti směru hodinových ručiček.

Vyhodnocení je jako: maximální radiální rozsah odchylky kolem středu kružnice, vytvořené ze dvou skutečných drah metodou nejmenších čtverců:

1 kružnice je vypočítána z pohybu po směru ručiček

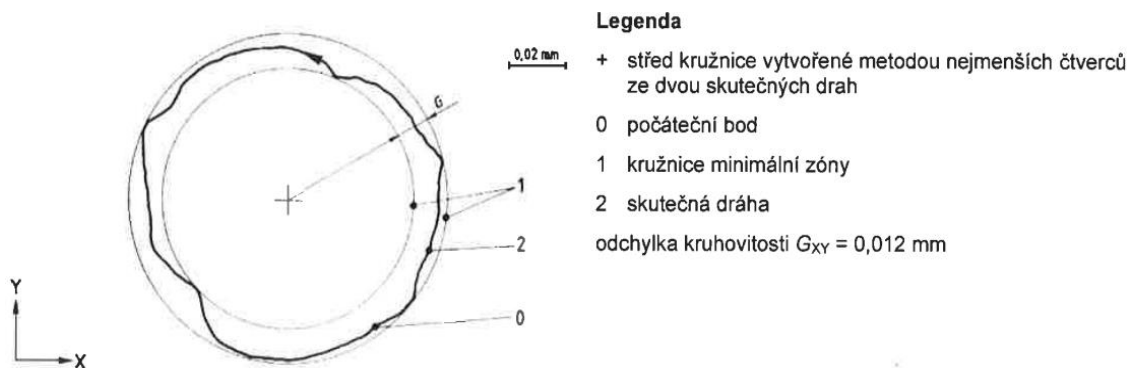
2 kružnice je vypočítána z pohybu proti směru ručiček



Obrázek 20: Vyhodnocení dvousměrné odchylky kruhovitosti $G(b)$ [5]

2.4.2 Odchylka kruhovitosti – G

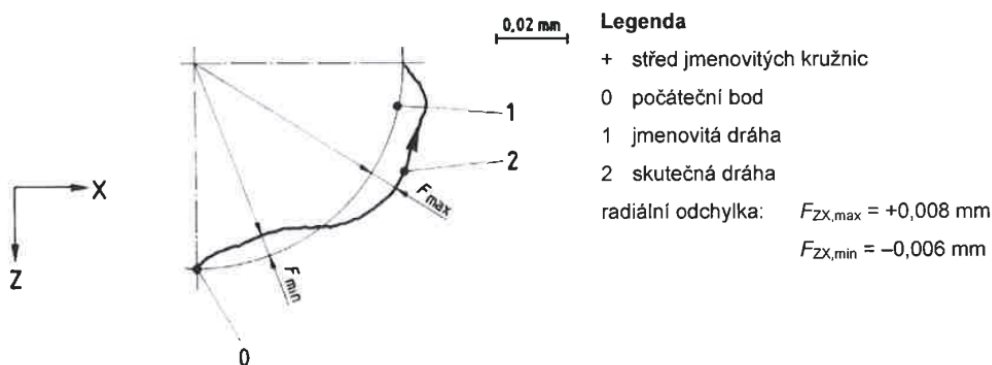
Minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic ohraničující skutečnou dráhu ve směru nebo proti směru pohybu hodinových ručiček vrstevnicové dráhy, která může být vyhodnocena jako maximální radiální rozsah okolo kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců. Graficky na *Obrázku 21*.



Obrázek 21: Vyhodnocení odchylky kruhovitosti G [5]

2.4.3 Radiální odchylky – F

Radiální odchylkou nazýváme rozdíl mezi skutečnou dráhou a jmenovitou dráhou, přičemž střed dráhy zjistíme buď vystředěním měřicích přístrojů na obráběcím stroji nebo středící analýzou (metoda nejmenších čtverců). Radiální odchylka je dána hodnotami F_{\max} a F_{\min} . Zobrazeno na *Obrázku 22*.

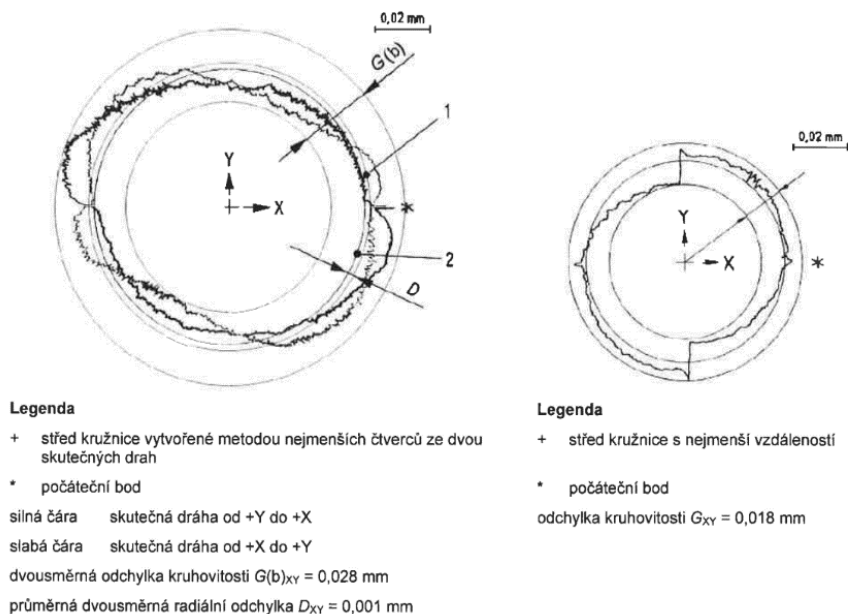


Obrázek 22: Vyhodnocení radiální odchylky F [5]

2.4.4 Průměrná dvousměrná radiální odchylka – D

Jedná se o odchylku mezi poloměrem kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců dvou úplných kružnic skutečných drah, kde je dráha provedena pohybem ve směru hodinových ručiček a druhá dráha v protisměru.

Parametry zkoušek spočívají ve stanovení jmenovitých drah, rychlosti výsledného posuvu, smyslu pohybu v směru nebo protisměru hod. ručiček a kalibrace přístroje. Pro názornost zkoušek by měly být výsledky prezentovány ve formě grafického záznamu s číselnými hodnotami. [5]



Obrázek 23: Příklad preventace dat pro dvousměrnou kruhovou odchylku $G(b)$ a průměrnou dvousměrnou radiální odchylku D a odchylku kruhovitosti G [5]

2.5 Určení emise hluku

Hovoříme o metodách pro měření hluku obráběcích a tvářecích strojů, které jsou pevně umístěny na podlahu a souvisejících pomocných zařízení přímo v dílně. Účelem těchto měření je zjistit údaje o emisi hluku na těchto strojích. Zjištěné údaje mohou být použity pro účely deklarace a ověření emise hluku obráběcích a tvářecích strojů šířených vzduchem. Také mohou být použity pro porovnávání vlastností různých strojů, nebo zařízení stejných skupin ve stanovených podmínkách prostředí při normalizovaných podmínkách montáže a pracovních podmínkách. Metody zde popsané jsou vhodné pro měření všech druhů hluku, které stroje vydávají.

Stroj musí být správně umístěn a připevněn, k tomu existují tzv.: „typické podmínky“ Velké stroje umísťovat do jam, případně nad hladinu odrazivosti. Tyto typické podmínky musí být, pokud je to možné dodrženy, případně je dovoleno jejich napodobení. U pomocných zařízení musí být zajištěno, aby žádný elektrický vodič, trubky, nebo vzduchové potrubí připojené ke zkoušenému stroji nevyžaduje přílišné množství akustické energie.

Měření hluku musí být prováděno dle příslušných norem, pokud takové normy neexistují, musí stroj pracovat takovým způsobem, jako by pracoval normálně. Emise

hluku stroje musí být určena pro jakýkoliv požadovaný soubor pracovních podmínek, tyto podmínky musí být v průběhu zkoušky konstantní.

Hladina emisního akustického tlaku se určuje v místě obsluhy, což je specifické místo používané obsluhou a může být umístěno ve volném prostoru v místnosti, ve kterém pracuje zdroj, v kabině připevněné ke zdroji nebo v krytu vzdáleném od zdroje. Vhodná volba poloh mikrofónů a měřicích zařízení je tam, kde se zabrání nepříznivým vlivům na mikrofóny, které používáme pro měření (vítr, elektrické pole, aj.). Způsob, jakým je stroj nainstalován, má značný vliv na emisi hluku, proto musí být postupováno dle příslušných norem pro měření hluku specifických druhů strojů. [6]

2.5.1 Skupinové zvukové události

V každé poloze mikrofónu se odečtou hodnoty hladin akustického tlaku a špičkových hladin akustického tlaku. Tyto hodnoty se měří v každé periodě stroje.

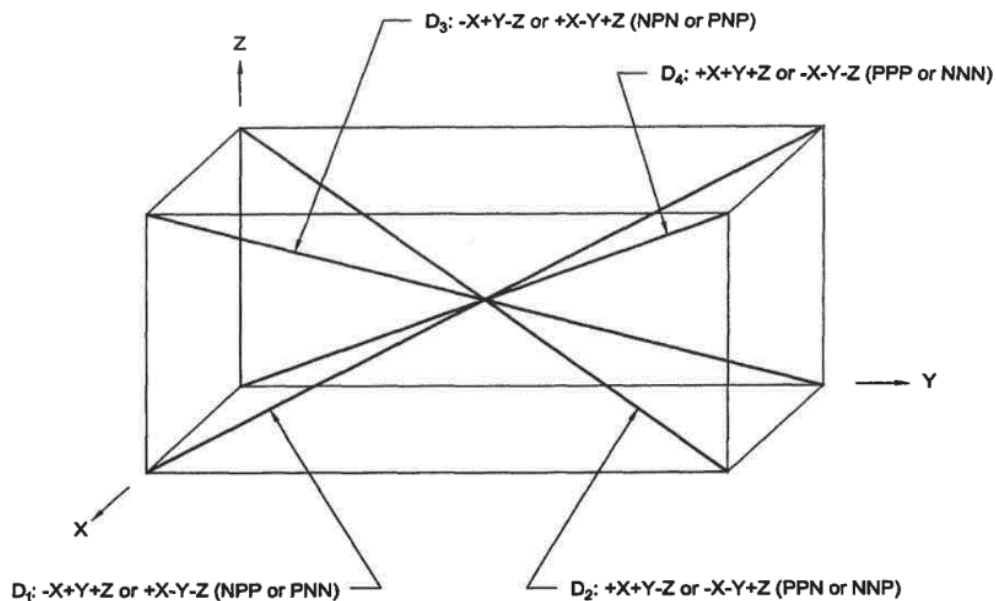
Z měření určíme hladiny akustického tlaku při chodu zkoušeného stroje, hladiny akustického tlaku způsobené hlukem v pozadí, špičkovou hladinu akustického tlaku ve specifikovaných místech. [6]

2.5.2 Jednotlivé zvukové události (u lisů)

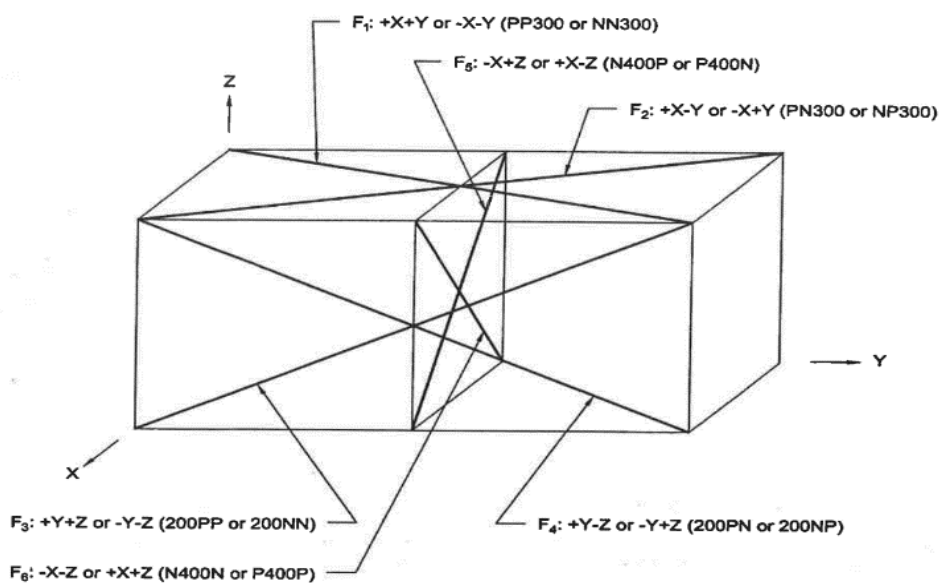
V tomto případě měříme hladinu akustického tlaku pro jednotlivé události. Informace, které jsou měřeny a vyhodnocovány jsou datum a místo, zkoušený stroj (typ, rozměry, výrobce aj), podmínky zkoušky (podmínky připevnění stroje, umístění stroje, popis pracovních podmínek), akustické prostředí (úpravy zdí, stropu a podlahy), přístrojové vybavení (zařízení pro kalibraci, použité měřicí zařízení) a údaje o hluku (všechny údaje o měření akustického hluku a tlaku). [6]

2.6 Zkouška diagonálního přestavení

Zkoušky diagonálního přestavení umožňují odhadnutí objemových vlastností obráběcího nástroje. Kompletní objemové zkoušky jsou finančně i časově náročné a tyto zkoušky nám náklady redukuje. Na diagonálách tělesa mohou být doplněny o měření na diagonálách stěn, o zkoušky na přímkách rovnoběžných se souřadnicovými osami. Mohou být použity také pro účely přejímky a pro opětovné ověření vlastností stroje v případě, že parametry zkoušky jsou použity pro porovnávání. Pracovním objemem jsou stanoveny 4 diagonály tělesa, což ukazuje *Obrázek 24a* *Obrázek 25*. [7]



Obrázek 24: Čtyři diagonály tělesa pravoúhlého hranolu [7]



Obrázek 25: Příklady diagonál stěny pravoúhlého hranolu [7]

Může být stanoveno 6 různých typů diagonály stěny a pro každou zvolenou diagonálu je nutné dále stanovit její umístění ve třetí ose.

U obou příkladů si můžeme určit 2 systémy značení:

- Souřadnicemi X, Y, Z (kladný směr, nebo záporný směr)
- Označení smyslu dráhy N – negative, P – positive

Pro měření je možno použít laserinterferometr, nebo obdobný měřicí systém se srovnatelnou přesností. Postup měření je podobný jako pro měření lineárních os, lineární přestavení ale nejsou měřena ve směru rovnoběžném s lineárními osami, nýbrž ve směru diagonály pracovního objemu nebo stěny obráběcího stroje. U dvourozměrného stroje musí být měření provedeno ve 2 diagonálách stěny. U třírozměrného stroje musí být měření provedeno ve 4. diagonálách tělesa pracovního objemu a může být provedeno ve všech 6 diagonálách stěn, nebo dle toho, jak je dohodnuto.[7]

2.7 Geometrická přesnost os rotace

Vřetena, rotační hlavy a rotující a naklápěcí stoly obráběcích strojů vytvářejí osy rotace, které také mají nechtěné pohyby v prostoru jako výsledek vícenásobných zdrojů chyb. Obecně lze říct, že chyba pohybů kolmá na citlivý směr (směr kolmý na perfektní povrch obrobku v místě okamžitého bodu obrábění, nebo měření) je považována za necitlivý směr (jakýkoliv směr kolmý na necitlivý) a není vyhodnocována.

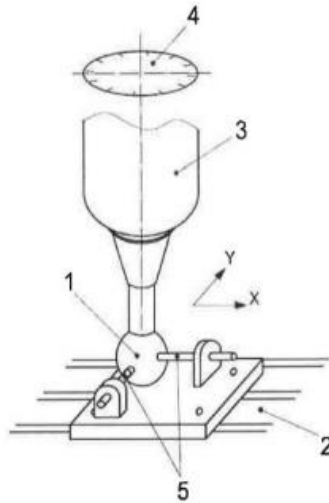
Pro správné vyhodnocení je důležité sledovat radiální, axiální, nebo čelní umístění ve kterém jsou měření prováděna, identifikace přípravků a měřidel, nastavení měření, směry úhlu citlivého směru (axiální, radiální, střední dle situace), rychlosti a otáčky vřetena aj.

Zkouška se provádí se stejným nastavením jako ETVE. Nejprve změříme strukturální pohyb s aktivním napájením a aktivními pomocnými systémy, ale vypnutými pohony, pak měříme pohyb struktury s aktivními systémy stroje a aktivními pomocnými systémy, jako je hydraulický systém se zapnutými pohony stroje. Výsledek je hodnota strukturálního pohybu v rozsahu zaznamenaném v relativně krátkém časovém úseku (1s). Tyto zkoušky jsou aplikovatelné při operacích obrábění s otáčením v citlivém směru (vyvrtávání, frézování, vrtání a tvarové broušení). [8]

2.7.1 Zkoušení radiální chyby pohybu

Varianta 1:

Přesná zkušební kulička nebo jiný vhodný „artefakt“, jako například válec, je namontována ve vřetenu stroje. Snímače jsou umístěny na stole a kulička je centrovaná dle schématu na *Obrázku 26*.



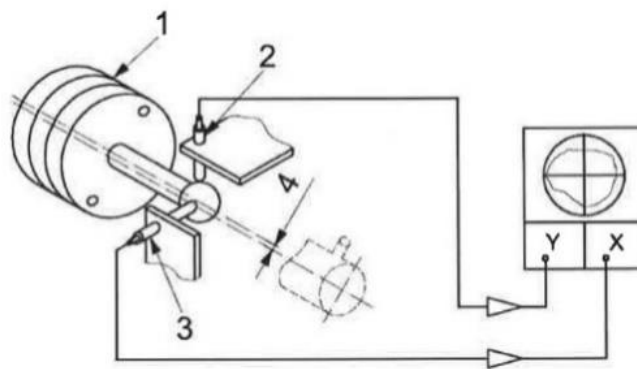
Legenda

- 1 referenční artefakt (zkušební kulička)
- 2 stůl
- 3 vřeteno
- 4 měřicí zařízení úhlové polohy
- 5 snímač posunutí

Obrázek 26: Schéma uspořádání zkoušky radiální chyby pohybu s rotujícím citlivým směrem používající měřicí zařízení úhlové polohy a vystředěný referenční artefakt [8]

Varianta 2:

Místo použití rotačního kodéru, úhlová poloha vřetena může být také stanovena namontováním kuličky mírně excentricky. Toto uspořádání generuje signály, které překrývají výstupy snímače posunutí. Úhlová poloha vřetena tak může být vypočtena použitím takových signálů nezbytných pro polární diagram. To zobrazuje Obrázek 27.



Legenda

- 1 kmitací deska
- 2 vertikální snímač
- 3 horizontální snímač
- 4 posunutí kuličky ve směru nástroje

Obrázek 27: Schéma uspořádání zkoušky radiální chyby pohybu s rotujícím citlivým směrem používající rotační kodér [8]

Polární diagramy jsou znázornění chyb pohybů os rotace generované grafickým zobrazením posunutí, oproti úhlu otáčení vřetena. Měření radiální chyby pohybu musí být provedena ve 3 rychlostech otáčení vřetena:

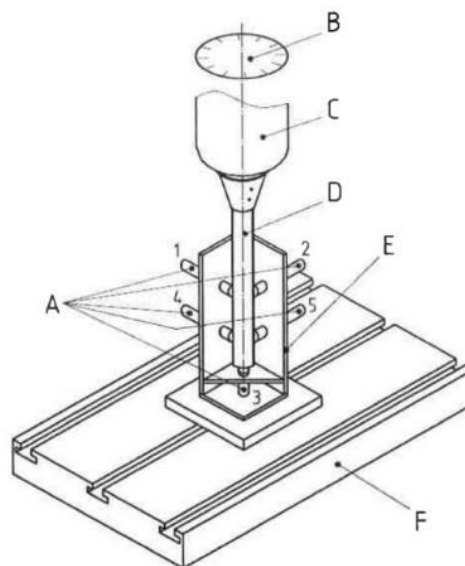
- 10 % z maximální rychlosti vřetena
- 50 % z maximální rychlosti vřetena
- 100 % z maximální rychlosti vřetena

2.7.2 Chyba pohybu nakloněním

Toto měření vyžaduje měření radiální chyby pohybu ve dvou prostorově oddělených bodech. Zkoušený artefakt se dvěma kuličkami vzdálenými od sebe o danou vzdálenost, nebo válcový trn, který může být přichycen k vřetenu a vyrovnaný k ose otáčení vřetena.. Pro měření naklonění můžeme použít 2 metody:

použití 2 snímačů a měření ve 3 rychlostech otáčení vřetena dle předchozích obr.

použití 4 snímačů a měření ve 3 rychlostech otáčení vřetena dle *Obrázku 28*



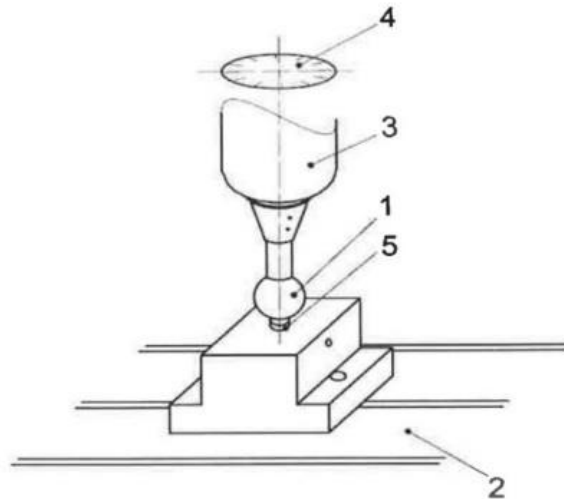
Legenda

- A snímače (1 až 5)
- B měřicí zařízení úhlu
- C vřeteno
- D zkušební trn
- E přípravek
- F stůl

Obrázek 28: Zkušební systém s pěti snímači pro měření chyby pohybů pro otáčení vřetena citlivým směrem [8]

2.7.3 Axiální chyba pohybu

V tomto měření je přesná zkušební kulička namontována na vřetenu stroje. Snímač posunutí je namontován na stole, axiálně proti zkušební kuličce. Zkouška je prováděna také ve 3 rychlostech otáčení (10%, 50%, 100%) a jsou zaznamenávány posunutí, a úhlová poloha vřetena. Uspořádání zkoušky je na *Obrázku 29*.



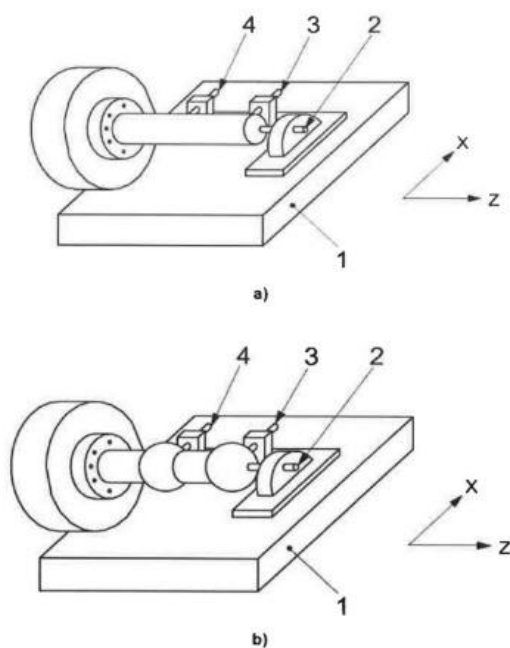
Legenda

- 1 referenční artefakt (zkušební kulička)
- 2 stůl
- 3 vřeteno
- 4 měřicí zařízení úhlové polohy
- 5 snímač posunutí

Obrázek 29: Uspořádání zkoušky pro měření axiální chyby pohybu [8]

2.7.4 Zkouška vřetena – Pevný citlivý směr:

Tyto zkoušky jsou aplikovatelné na operace obrábění s pevnými citlivým směrem (soustružení a broušení válcových povrchů). Upnutí je shodné s předešlými zkouškami, zkušební tělísko (kulička, jiný artefakt) je namontován na vřetenu stroje a snímače posunutí jsou v místě nástroje, nebo příslušném přípravku. I v tomto případě měříme radiální chybu pohybu, axiální chybu pohybu a chybu nakloněním dle uspořádání na *Obrázku 30*.



- Legenda**
- 1 křížové saně
 - 2 axiální snímač
 - 3 radiální snímač 2
 - 4 radiální snímač 1

Obrázek 30: Uspořádání zkoušky pro měření chyby pohybu vřetena s pevným citlivým směrem [8]

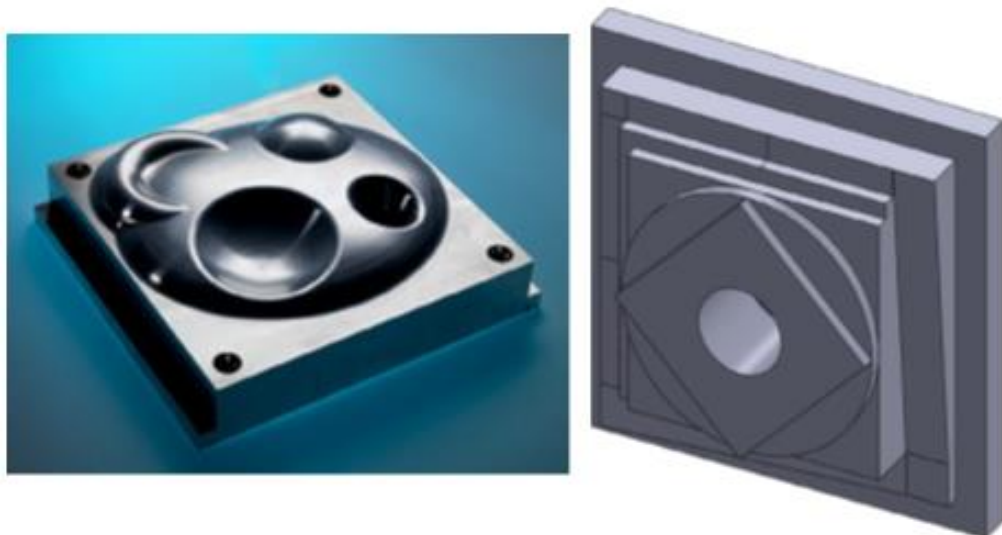
Zkoušky v technické normě ISO 230 se snaží analyticky hodnotit jednotlivé parametry, ale často prováděny za podmínek neodpovídajících podmínkám v provozu, například na nezátíženém stroji. Další metodou, jak zkoušet přesnost obráběcích strojů, je pomocí zkušebních těles. Díky jejich geometrii jsme schopni hodnotit jednotlivé parametry daném artefaktu. [8]

3 Zkušební artefakty pro určení přesnosti tříosých obráběcích strojů

Porovnání artefaktů lze použít k tomu, aby téměř každé obráběcí centrum udržovalo tolerance poblíž své specifikace opakovatelnosti a kompenzovalo tepelné účinky. Snímání artefaktů může poskytnout ideální řešení pro rychlé ověření obráběcího stroje. Většina moderních CNC obráběcích strojů je nyní vybavena sondami, které lze automaticky načítat pomocí měniče nástrojů. Snímání předem kalibrovaného artefaktu může ověřit, že parametry kinematické chyby jsou v toleranci, a zajistit sledovatelnost jakékoli následné operace snímání. Následné zkoušení hrubovacích řezů nebo obětovaných řezů provedených pro účely testování pak může ověřit kompletní výkon systému obráběcího stroje s citlivostí na všechny zdroje chyb, včetně chyb vřetena, opotřebení nástroje a chyb řídicí jednotky.

3.1 Porovnání NPL-WP-150 Freeform reference standard a NAS 979 Testing tool artefact

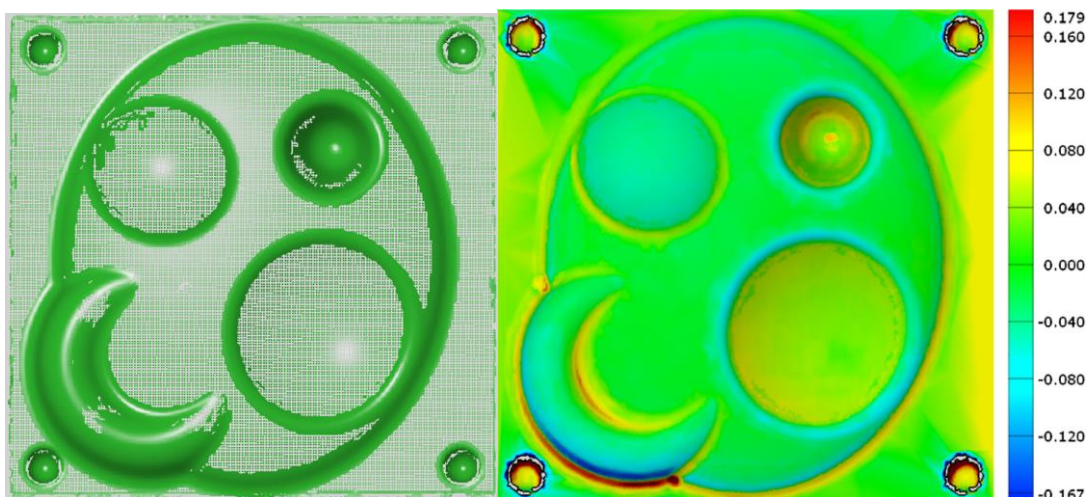
Artefakty jsou zobrazeny na *Obrázku 31*. Kalibrace obou zmíněných artefaktů se provádí pomocí stejného postupu CMM, což přispívá k systematické chybě. Během experimentů se na artefakty aplikuje antireflexní sprej pro účinnější sběr dat. Po provedení teplotně kompenzované kalibrace se skenerem z artefaktu získají mračna bodů. Z těch se následně vytvářejí sítě. Ty jsou zarovnány do generované sítě s vysokou hustotou z inspekčních dat CMM pokrývajících celý povrch. Zarovnání zahrnuje výpočet optimální tuhé transformace mezi každou sítí a má relativně malou chybu. To umožňuje získat 220 odchylek v pravidelných přírůstcích, které jsou extrahovány z barevné mapy pro výpočet nejistoty. [9]



Obrázek 31: NPL-WP-150 Freeform Reference Standardy a NAS 979 Testovací artefakt pro obráběcí stroje [9]

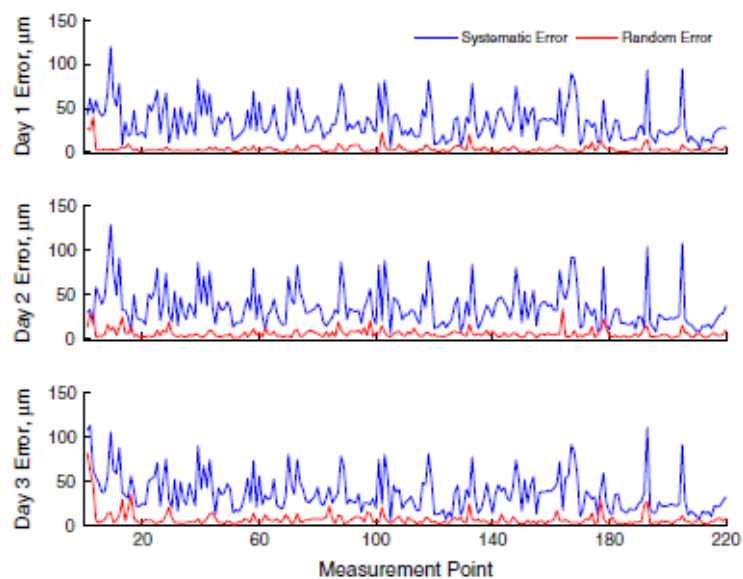
3.1.1 NPL-WP-150 Freeform Reference Standardy

Hodnoty nejistoty naznačují vysokou úroveň opakovatelnosti mezi jednotlivými skeny a měřicími body. Další posouzení lze provést zvážením absolutního systému rozptylu tematické chyby a krátkodobého driftu. V průběhu času při měření v testovaných podmínkách má drift minimální vliv na nejistotu, ale existuje relativně vysoká úroveň systematické chyby v procesu. Náhodné chyby mají statisticky významný rozdíl, i když tyto jsou během 3 dnů rozdíl $<2 \mu\text{m}$.



Obrázek 32: Barevné mapy zobrazující náhodné nejistoty [9]

Vliv geometrie na chybu je znázorněn na *Obrázku 33*. Zde jsou náhodné chyby na nižší úrovni než systematické chyby, ale obě kolísají s geometrií, vykazující každý den podobný, ale neidentický profil. [9]

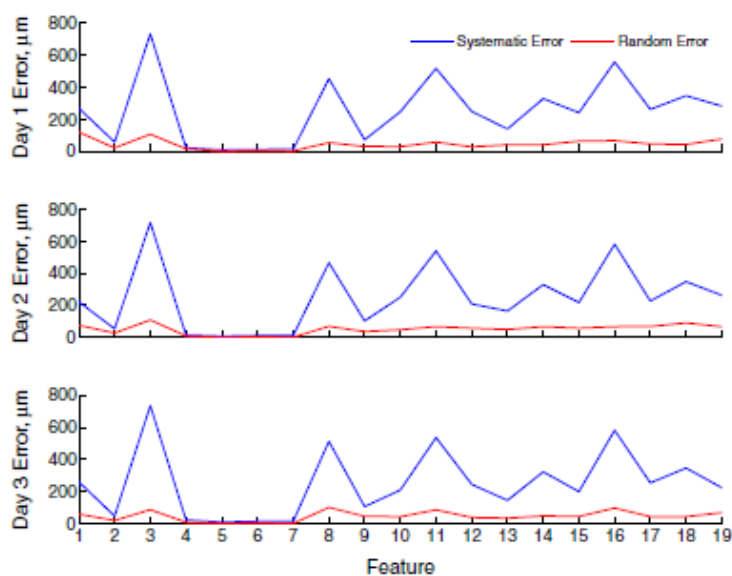


Obrázek 33: Vliv geometrie na chybu při daném měření [9]

3.1.2 NAS 979

Nejistota tohoto artefaktu je výrazně vyšší než pro předchozí artefakt, tím mohou být obě chyby negativně ovlivněny kvůli velkému rozdílu v počtu získaných bodů mezi skenerem a CMM. To je praktická výzva při ověřování jednoho metrologického systému proti dalšímu, který je založen na jiné technologii, což nevyhnutelné z důvodu nedostatku alternativ.

Vliv geometrie na absolutní chybu, tj specifický rys artefaktu ukazuje na *Obrázku 34* odlišné systematické a náhodné úrovně chyb pro každou funkci.



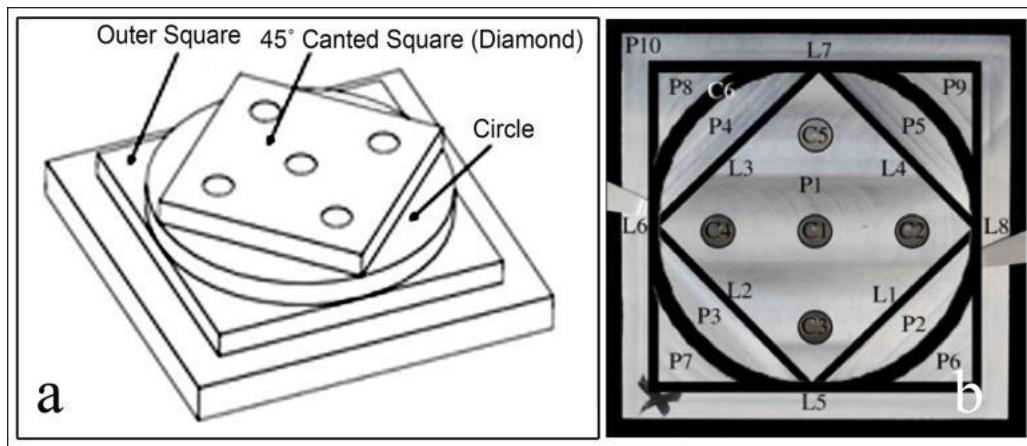
Obrázek 34: prismatické geometrické chyby artefaktu.[9]

Ve srovnání má artefaktů NAS 979 podstatně vyšší celkovou nejistotu a systematické chyby s tím spojené. Geometrie lze považovat za významný zdroj systematické chyby, i když na různých úrovních pro každou třídu geometrie. [9]

3.2 B-NAS 979

NAS 979 je standardem při vyšetřování obráběcích strojů. Jeho úkolem je poskytnout informace pro výběr řezných zkoušek potřebných k vyhodnocení výkonu konvenčních a numericky řízených obráběcích strojů s výjimkou vrtacích a soustružnických strojů, a poskytnout standardní formát pro záznam a hlášení skutečných výsledků výkonu. [10]

Artefakt je na *Obrázku 35*. Materiálem testovací části je hliník.



Obrázek 35: B-NAS 979 [10]

U tohoto experimentu byl testovací díl NAS 979 kvůli testování na 3osém CNC obrábění upraven na hranolovou komponentu s názvem „Bath Modified NAS 979 (B-NAS 979) Test Part“. Tedy dva stupně součásti byly odstraněny. Kromě toho byla zkosená strana součásti odstraněna tak, jak bylo definované v normě pro vizuální pozorování během obrábění, nikoli pro měření. Dále na součást byly přidány čtyři díry, které by byly použity ke zkoumání přesnosti polohy. Zobrazeno na *Obrázku 35a*.

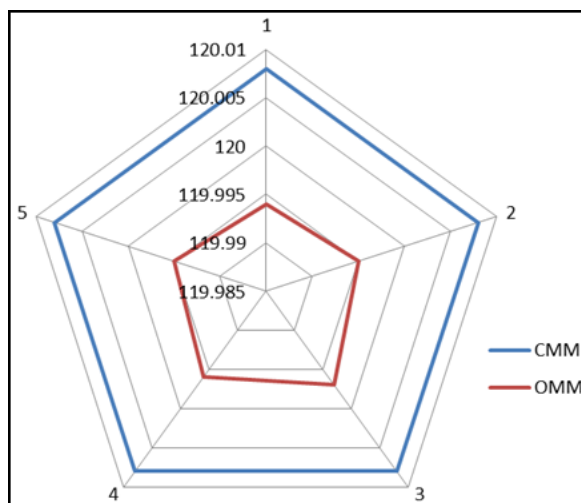
Před měřicími operacemi byly na testovací části B-NAS 979 generovány kontrolní čáry, roviny, kružnice a válec, které jsou znázorněny na *Obrázku 35b*. Kruhy by měly posoudit umístění a přesnost tvarů, zatímco čáry a roviny by měli zkontrolovat rozměrovou a úhlovou přesnost. Průměr a poloha středového bodu kruhů by tedy definovala výstupní parametry procesu kontroly. [10]

Zkušební část se skládá z vnějšího čtverce, kruhu, 45° šikmého čtverce, dvou rampových řezů o pěti stupních a dvou kuželových řezů. Každá z těchto funkcí byla navržena pro konkrétní požadavky na zkoušky.

- Vnější čtverec:
 - Rozměrová přesnost
 - Rovnoběžnost
 - Plohost
 - Pravoúhlost (kolmost)
- Kruh:
 - Rozměrová přesnost
 - Kontrola průměru
 - Kontrola středového bodu
 - Soustřednost
- Čtvereček 45° se skloněným středem:
 - Rozměrová přesnost
 - Integrovaná osa rovnoběžnosti
 - Integrovaná pravoúhlost osy (kolmost)
 - Plohost
- Rampové řezy o 5° zanoření a zvednutí:
 - Kontrola úhlové odchylky
- Kuželové řezy:
 - Vizuální pozorování rovnoměrnosti a stanovení skluzu

Čtyři testovací díly B-NAS 979 byly obráběny pomocí vertikálního CNC stroje. Každá zkušební část byla měřena pětkrát na obráběcím stroji po obrábění a před uvolněním na základě měřicího plánu. Je třeba si uvědomit, že operace měření v OMM (měření na stroji) byly omezeny na bodovou kontrolu.

Aby bylo možné analyzovat výsledky měření, byly rozděleny do šesti tříd, konkrétně kontrola tvaru, kontrola polohy, měření délky v rovině XY, měření délky podél osy Z, úhlová kontrola v rovině XY a 3D úhlová kontrola. *Obrázek 36* ilustruje srovnání výsledků měření opakovaných pětkrát. [10]



Obrázek 36: srovnání výsledků měření získaných z OMM a CMM [10]

Pro standard měřicího zařízení, je skutečná hodnota měřené veličiny ze své podstaty neurčitá. Standard tedy zmínil, že skutečná hodnota je hodnota získaná z dokonalosti měření. V tomto případě byly skutečné hodnoty měření považovány za průměrnou hodnotu měření získaná CMM jako jedno z nejpřesnějších měřicích zařízení. Průměrné hodnoty měření získaná CMM jsou v literatuře označovány jako skutečné hodnoty.

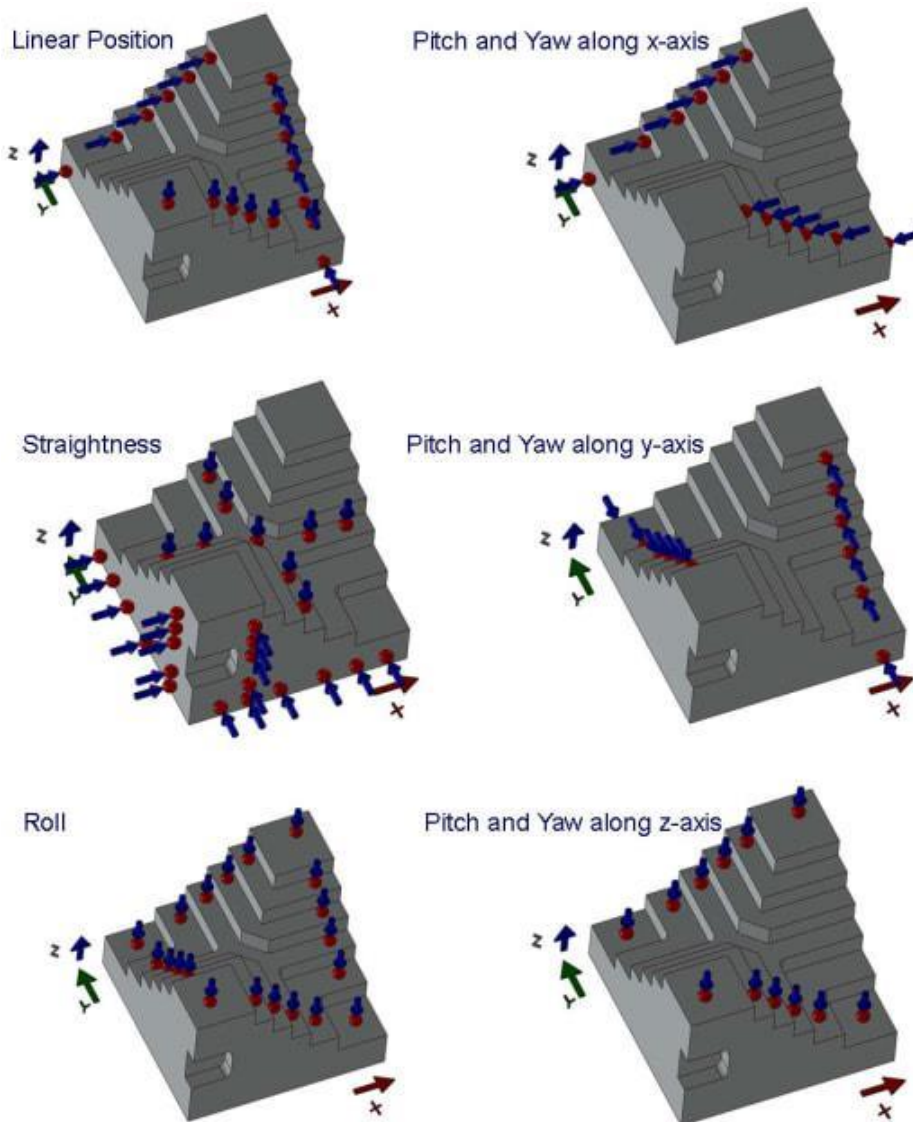
Přesnost měření obráběcího stroje je přiměřeně vyšší než jeho přesnost obrábění, i když to neplatí pro prvky, které nejsou rovnoběžné s osou obráběcího stroje, kde nelze provést sondáž. To naznačuje, že ve většině případů mají obráběcí stroje možnost vyšší přesnosti kontroly, než je přesnost jejich obrábění. Je třeba zmínit, že doba měření s výjimkou doby nastavení byla pro CMM 7 minut a 12,5 minuty OMM, zatímco CMM poskytuje mnohem více informací o měření. [10]

3.3 Citlivost na kinematické chyby pro monolitický artefakt

Základní snímání se provádí krátce po kalibraci stroje, když je známo, že kinematické chyby jsou v rámci tolerance. Souřadnice povrchů sondy z artefaktu jsou uloženy v řídicí jednotce obráběcího stroje jako R-proměnné. Před řezáním je třeba ověřit, že kinematické chyby jsou v toleranci, abychom zajistili sledovatelnost pro následné operace snímání. Umístění a směr zkoušené plochy zajišťuje citlivost na všechny kinematické chyby obráběcího stroje s dostatečným prostorovým rozsahem a rozlišením. Skutečný návrh artefaktu a zohlednění pozic sondy závisí na velikosti a konfiguraci ověřovaného obráběcího stroje. [11]

Sondují se řezané povrchy, aby se plně ověřila přesnost obráběcího stroje. Stejně jako u sondovaných bodů musí pokrývat rozsah všech poloh a směrů, aby byl stroj řádně ověřen. U menších strojů lze použít monolitický artefakt, ale u větších strojů může být praktičtější použít modulární artefakt s řadou sekcí připevněných ke konstrukci obráběcího stroje. V takovém případě je důležité, aby účinky, jako je tepelná deformace nebo nárazy, nezpůsobily zrcadlení chyb ve struktuře obráběcího stroje v artefaktu.

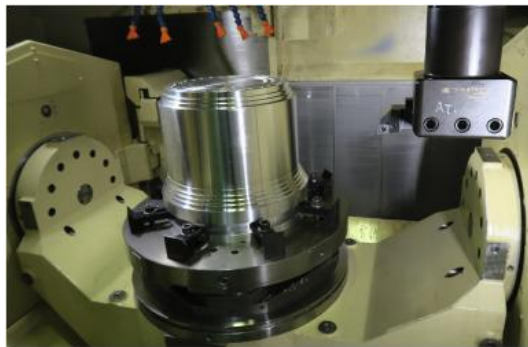
Artefakt, který byl zde použit, je zobrazen níže na *Obrázku 37* se šípkami označujícími polohy a směry sondování, které dávají citlivost na specifické kinematické chyby. Je třeba poznamenat, že mnoho bodů sondy poskytuje citlivost na více než jeden zdroj chyby; to je důvod, proč u této metody není možné oddělení chyb. [11]



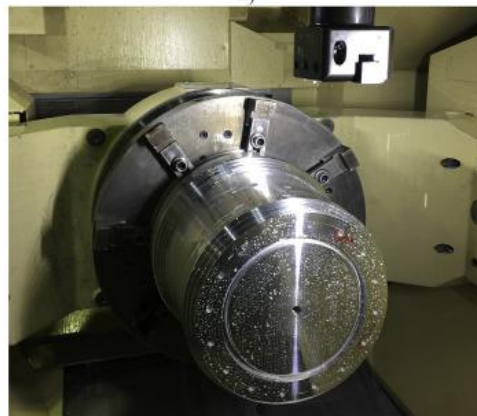
Obrázek 37: Artefakt se šípkami označujícími polohy a směry sondování [11]

3.4 Válcový obrobek

Konvenčně se válcový obrobek s relativně velkým průměrem obrobí soustružením na velkém číslicově řízeném soustruhu vertikálního typu. Mezi typické příklady takového obrobku patří válcová část pláště v tryskovém turbínovém motoru letadla. Artefakt je *Obrázku 38*.



a)



b)

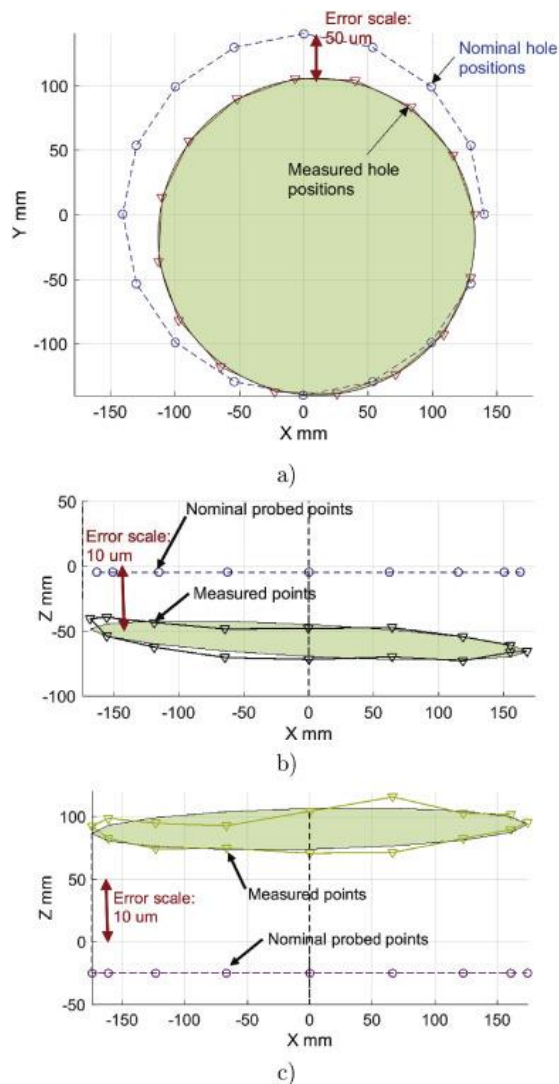
Obrázek 38: Válcový obrobek [12]

Aby se minimalizoval vliv chybových pohybů stroje, výrobce často upřednostňuje „obrábění 3+2 osy“, kde je každý prvek obráběn s obrobkem (nebo nástrojem) fixovaným v omezené sadě úhlových poloh. Obráběním na pětiosém obráběcím centru s otočným stolem umožňujícím soustružnické operace lze výrazně snížit čas a náklady na obrábění ve srovnání s konvenčními procesy, které používají jak svislý soustruh, tak obráběcí centrum.

Pro takové obrábění je jedním z hlavních příspěvateľů chyb kvazistatická chyba polohy a orientace průměrných linií rotační osy. Podmínky obrábění, např. rychlost posuvu, rychlost otáčení osy C, hloubky řezu by měly být zvoleny správně tak, aby povrchová úprava byla dostatečně dobrá, aby nenarušila měření CMM, a vliv

řezných sil na hotový zkušební kus šel minimalizovat. Výše uvedené přezkoumání obrábění se většinou týkají frézovacích operací. Při soustružnických operacích generuje teplo motor pro otočný stůl. Cílem je navrhnout zkoušku obrábění pro soustružnické operace otočným rotačním zařízením tak, aby bylo možné pozorovat geometrické chyby stroje pod tepelným vlivem otáčení stolu. [12]

Obráběcí stroj by neměl být ovlivňován žádnými významnými obráběcími silami. Předpokládá se, že vliv vibrací řezání, dynamických chyb řízení servomotoru a opotřebení nástroje je dostatečně malý. Rovněž je třeba poznamenat, že chyba nastavení zkušebního kusu nemá vliv na výsledek zkoušky, pokud je dostatečně malá, aby významně neovlivnila skutečnou hloubku řezu v dokončovacím procesu. Experimentální nastavení je znázorněno na *Obrázku 39*. Rychlost otáčení osy C je regulována, referenční kruhová drážka byla dokončena rádiusovou stopkovou frézou.

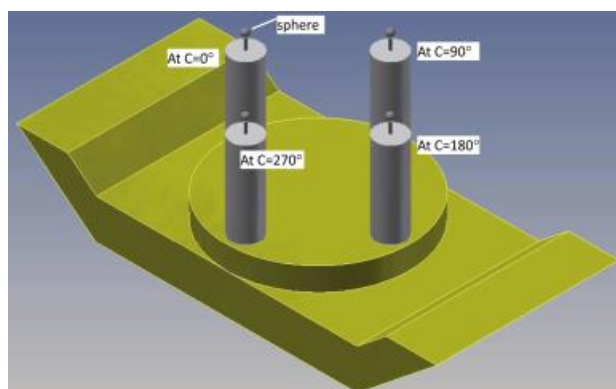


Obrázek 39: Přesnost obráběného válcového artefaktu [12]

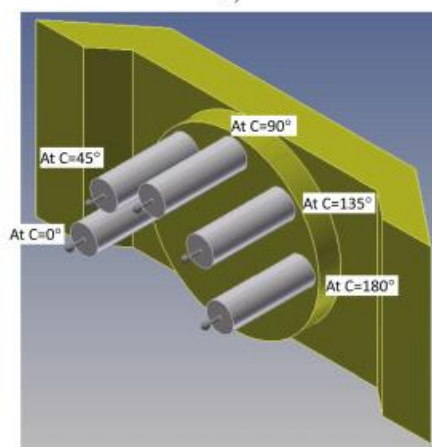
Chyba mezi nominálním a měřeným bodem se zvětší, když:

- a) Měřené polohy otvorů budou v rovině XY. Chyba mezi jmenovitou a měřenou polohou díry se zvětší 1000krát, roztečná kružnice děr má chybu soustřednosti k počátku souřadnicového systému měření, to je většinou způsobeno chybou polohy průměrné čáry osy C v $A=0^\circ$.
- b) Měřené body na spodní ploše promítnuté do roviny XZ, které ukazují chybu rovnoběžnosti s povrchem základny. To je způsobeno chybou pravoúhlosti průměrné čáry osy C k osám X a Y
- c) Měřené body na spodní ploše, Chyba je způsobena chybou polohy průměrné čáry osy A v obou směrech Y a Z

Obrázek 40 ilustruje postup zkoušky. Na stole stroje je upevněna přesná koule. Když $A=0$, osa C je indexována v každých 90° a trojrozměrná poloha středu koule se měří sondováním pěti bodů na jejím povrchu. Analogicky, když $A=-90^\circ$, je poloha středu koule změřena v $C=0, 45, 90, 135, 180^\circ$.



a)



b)

Obrázek 40: Postup zkoušky válcového obrobku [12]

Výzkumné práce ukázaly, že řezná kapalina může mít významný vliv na chyby polohy a orientace rotační osy. Proces obrábění může být ovlivněn mnoha dalšími faktory, např. teplo generované motorem rotačního stolu, teplo procesem úběru materiálu a vliv řezné síly na např. průhyb nástroje nebo drsnost povrchu. Sondovací test jimi není ovlivněn. Geometrické chyby stroje ve skutečných procesech obrábění lze lépe pozorovat při zkoušce obrábění. [12]

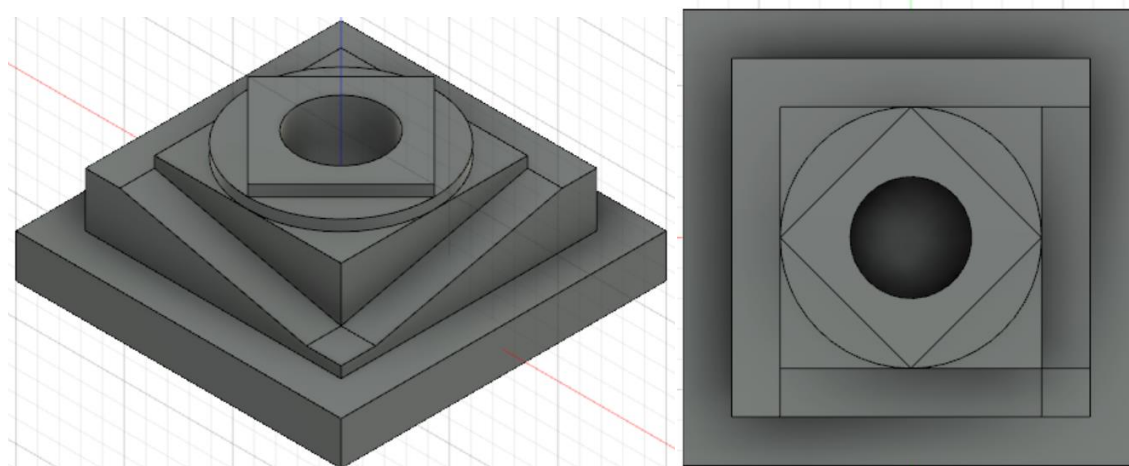
4 Návrh artefaktu a příprava CNC programu pro realizaci zkoušky

Nyní se dostáváme k praktické části mé práce. Mým úkolem bylo vytvořit model artefaktu a následně připravit program pro jeho obrobení. Dále zde popíšu přípravu a průběh obrábění, zvolené stroje a nástroje. V poslední části se dostaneme k vybrané metodě měření přesnosti obráběcího stroje.

4.1 Návrh artefaktu

Model artefaktu jsem vytvářela, aby dosáhl rozměrů 150x150x50 mm, zároveň aby jednotlivé plochy měly šířku 16mm, což odpovídá dvěma drahám nástroje o průměru 8mm. Pro modelování artefaktu jsem zvolila 3D CAD software Solidworks, z kterého jsem pak exportovala model pro práci v dalších programech.

Při návrhu artefaktu jsem vycházela z B-NAS 979, jelikož cílem mého měření bylo měření přesnosti ve třech osách, stejně tak jako u tohoto přijímacího artefaktu. Bylo potřeba doplnit prvky, abychom byli schopni měřit i další přesnosti, např. lineární interpolaci, k tomu jsem brala inspiraci z NAS 979. Výsledek ukazuje *Obrázek 41*.



Obrázek 41: Artefakt vymodelovaný v CAD softwaru

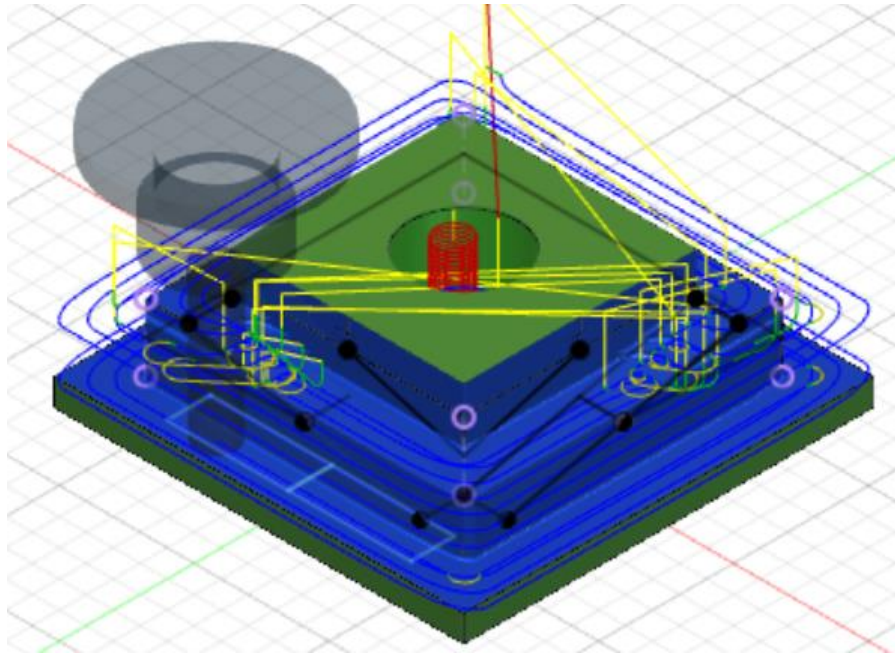
Model obsahuje tyto část, na kterých můžeme měřit tyto přesnosti:

- Nakloněné plochy
 - Lineární interpolace
- Válec
 - Rozměrová přesnost
 - Kruhovitost
- Kvádr
 - Přímost
 - Rovnoběžnost
 - Kolmost
 - Rozměrová přesnost
- Kvádr otočený o 45°
 - Přímost
 - Rozměrová přesnost
 - Rovinnost (jakožto nejvyšší plocha)
 - Lineární interpolace
 - Integrovaná osa rovnoběžnosti
 - Integrovaná pravoúhlost osy (kolmost)

4.2 Návrh CNC programu

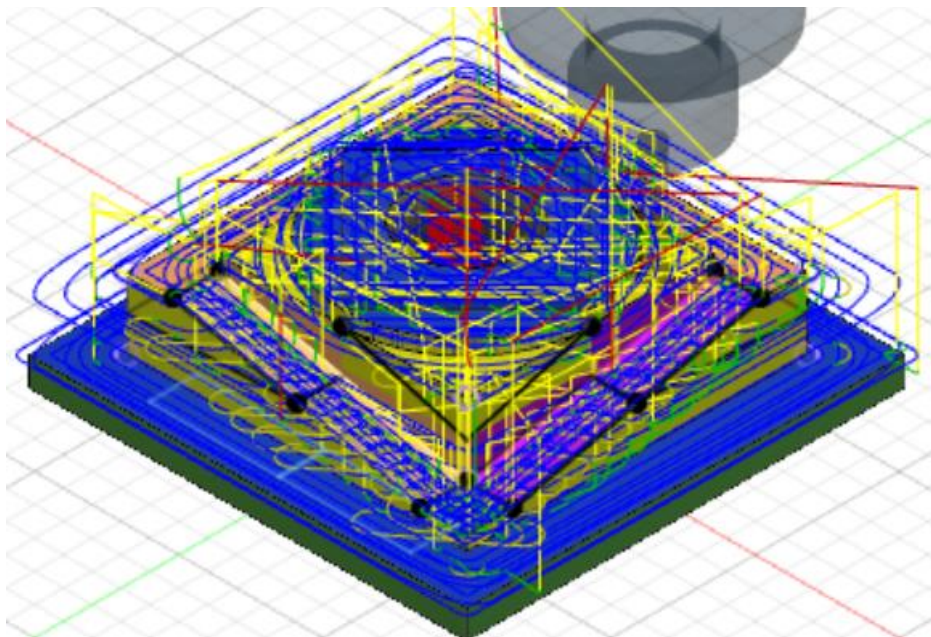
CNC program k realizaci zkoušky jsem vytvářela pomocí programu Autodesk Fusion 360. Zde se generovaly dráhy nástrojů, simulace obrábění a zadávala jsem zde řezné podmínky pro jednotlivé nástroje. Ukázka z programu je vidět na *Obrázku 42*. Tento program jsem volila zejména z důvodu jeho bezplatné studentské licence a zkušenostem s ním ze svého předchozího studia na fakultě.

Nejprve jsem nahrála model svého artefaktu a určila počátek souřadnicového systému. Poté jsem začala s tvořením drah pro sražení čela a hrubování, abych měla artefakt připraven s přídávkem 0,2mm a mohla pokračovat dokončovacími operacemi. První operace s dokončovací frézou musela být na šikmých plochách, které jsem nejdříve obrobila s přídávkem 0,2mm, poté jsem dodělala dráhy, aby se celý artefakt obrobil na čisto.



Obrázek 42: Ukázka ze simulace v Autodesk Fusion 360

Při tvorbě programu jsem musela převážně dbát na obrobiteľnosť a dávat pozor, aby nástroj nemohl narazit do artefaktu, tím by došlo k porušení artefaktu. Program jsem pripravovala tak, aby při obrábění nedocházelo k zbytečným přejezdům nástroje, a aby každá plocha byla obrobena, ale pouze jednou, kdyby tomu bylo naopak, zbytečně by se prodlužoval obráběcí čas. Celková doba obrábění by dle programu mělo být 43 minut a 39 sekund. Na Obrázku 43 jsou vidět všechny vygenerované dráhy nástrojů.



Obrázek 43: Artefakt s všemi drahami nástrojů

4.3 Vlastní obrábění

4.3.1 Příprava polotovaru

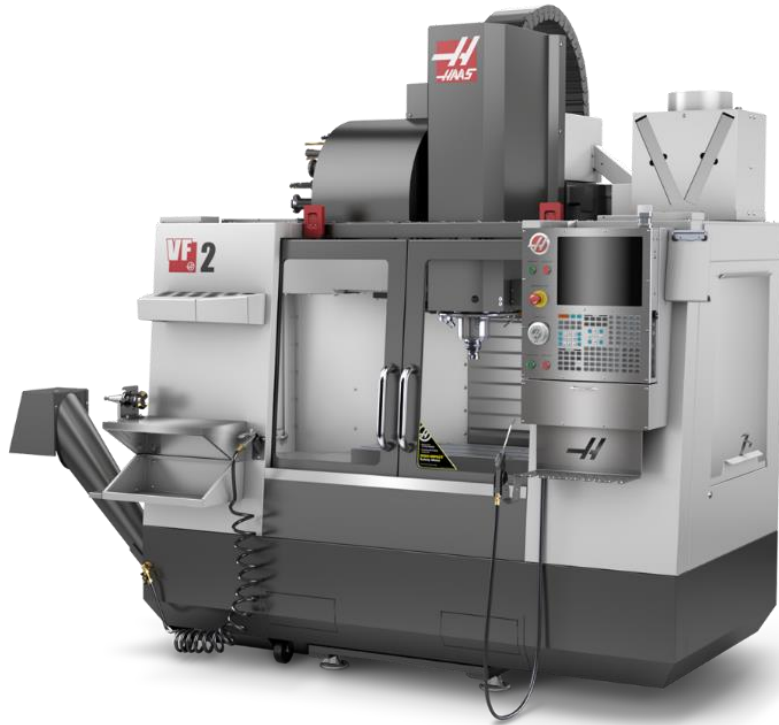
První krok při obrábění bylo na konvenční frézce připravit polotovar na požadované rozměry. Původní rozměry polotovaru byly přibližně 165x167 mm, výšku polotovaru jsme neměnili, u té stačilo, aby byla alespoň 50 mm a vše navíc pouze pomáhalo k lepšímu upnutí při dalších operacích. Polotovar jsem upnula do svěráku a postupně jsem odebírala vrstvy materiálu po přibližně 0,5mm v ose Z až na požadovanou velikost. V průběhu jsem kontrolovala rozměr posuvným měřítkem a dle toho pokračovala v odebírání materiálu. Vrstvu odebíraného materiálu jsem si hlídala na digitálním ukazateli. Poté bylo nutné, abych pilníkem srazila hrany. Tím se předchází možnému pořezání při další manipulaci s artefaktem. Obrábění na konvenční frézce ukazuje *Obrázek 44*.



Obrázek 44: Konvenční frézka s upnutým polotovarem

4.3.2 Obrábění na CNC frézce

Po důkladné kontrole programu následovalo obrábění na vybraném stroji, jehož přesnost jsme chtěli ověřit. Jedná se o CNC frézku HAAS VF-2, vertikální obráběcí centrum s maximálním výkonem 22,4 kW a maximálními otáčkami 8100 za minutu. Stroj je na *Obrázku 45* a na *Obrázku 46* ukázka z obrábění.

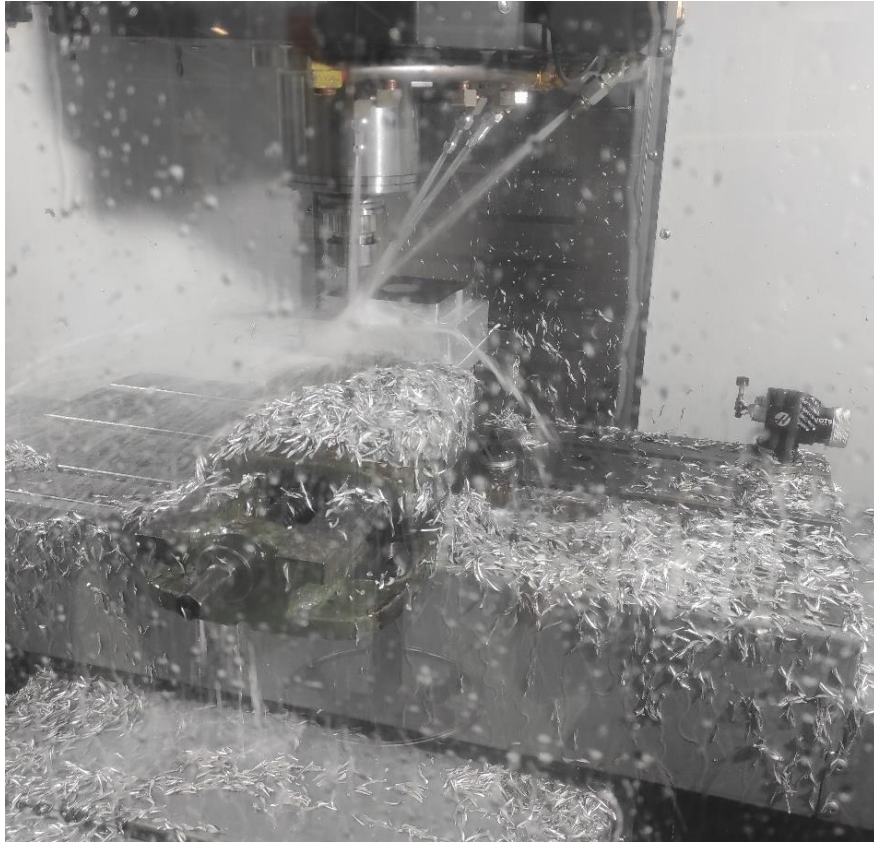


Obrázek 45: CNC frézka HAAS VF-2 [14]



Obrázek 46: Obrábění na CNC frézce HAAS VF-2

Celkový čas obrábění byl 43 minut a 55 sekund, což je pouze o 16 sekund více než byl odhadovaný čas programem, tedy 99,39% shoda výsledku simulace s reálným obráběním, což je výborný výsledek. Artefakt jsem do stroje upevněn pomocí svěraku a dle vygenerovaného NC kódu jsem spustila obrábění, které probíhalo s chladicí kapalinou. Hrubování probíhalo s přídavkem na obrábění 0,2 mm a postupně se odebírala vrstva až 5 mm. Při dokončování bylo třeba nejdříve nástrojem upravit šikmé plochy, aby ve všech místech byl odpovídající přídavek na obrábění a poté fréza načisto projela všechny obráběné plochy artefaktu. *Obrázek 47* a *Obrázek 48* jsou fotky z hrubování na dané frézce.



Obrázek 47: Obrábění s chladicí kapalinou na CNC frézce HAAS VF-2



Obrázek 48: Artefakt po hrubování

Frézy pro obrábění jsem volila, aby byly vhodné pro materiál mého artefaktu, kterým je vysokopevnostní slitina hliníku EN AW-7075 (AlZn5.5MgCu). Tento materiál je velmi dobře obrobitelný a lešitelný, má nízkou odolnost proti korozi a má vysokou pevnost v tahu (460-540 MPa). Používá se například v leteckém průmyslu nebo při výrobě strojů, jelikož má zároveň vysokou tvrdost a nízkou hmotnost. Druhým kritériem pro výběru frézy byla velikost ploch, které jsem frézovala. Dokončovací frézu jsem měla od začátku vybranou 8 mm, čemuž jsem přizpůsobovala již svůj model. Jednalo se o frézu Dormer Pramet S6118.0. Hrubovací frézu jsem zvolila s průměrem 15,2 mm. Další parametry fréz jsou vypsány v *Tabulce 3*.

Tabulka 3: Parametry použitých fréz

	Hrubovací fréza	Dokončovací fréza
Průměr	15,2 mm	8 mm
Počet břitů	2	3
Řezná rychlost	200 m/min	200 m/min
Hloubka třísky	max. 25 mm	max. 25 mm
Posuv na zub	0,03 mm/zub	0,05 mm/zub
Krok do boku	max. 6 mm	max. 5 mm
Přídavek na hrubování	0,2 mm	---

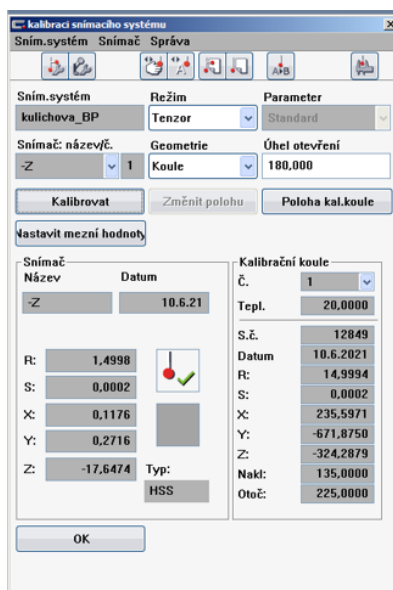
4.3.3 Analýza artefaktu s využitím CMM

Měření artefaktu pro posouzení přesnosti CNC frézky probíhalo na CMM Zeiss UPMC Carat 850. Jedná se o souřadnicový měřicí stroj, který je vybaven dotykovým snímacím systémem HSS a je ovládán softwarem Zeiss Calypso. Maximální dovolená chyba indikace měření ve 3D u₃ dle směrnice VDI/VDE 2617 část 2.1, je $u_3 = (0,7 + L / 600) \mu\text{m}$, jedná se tedy o vysoce přesný stroj. Vedení má uložené na vzduchových ložiskách, která brání ovlivnění měření vibracemi z okolí. Maximální rychlost stroje je 65 mm/s. Rozměry měřených objektů jsou omezeny pouze použitým snímacím systémem a měřicím rozsahem přístroje, což je v ose X 850 mm, v ose Y 1200 mm a v os Z 600 mm. Použité CMM je na *Obrázku 49*.



Obrázek 49: CMM Zeiss UPMC Carat 850 [15]

Měření probíhalo za referenční teploty 20,6 °C, s nastavenou teplotní kompenzací. Koeficient teplotní roztažnosti slitiny EN AW-7075 je $23,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Nejdříve jsem musela upevnit artefakt za pomoci sady upínek do závitů ve stolu stroje. Následně jsem upevnila kouli pro kvalifikaci snímacího systému použitého pro samotné měření. Kvalifikace snímače probíhá ve dvou krocích, kdy v prvním je zaměřena poloha kalibrační koule referenčním snímačem. Následně je koule přeměřena i snímačem, který chceme kvalifikovat. Z rozdílu rozměru koule a její polohy je vypočten rozměr měřicího doteku a jeho poloha vůči referenčnímu snímači. Do programu CALYPSO jsem nahrála model artefaktu, který jsem použila k programování CMM. Na *Obrázku 50* je ukázka z programu Calypso a na *Obrázku 51* upevnění artefaktu na stůl CMM.



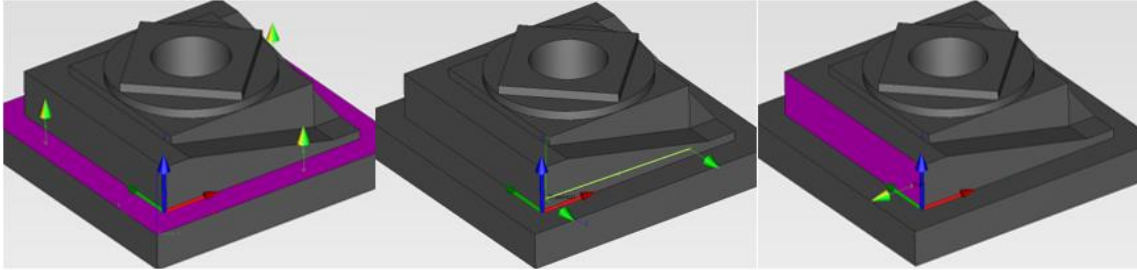
Obrázek 50: Kalibrace snímacího systému v softwaru Zeiss Calypso



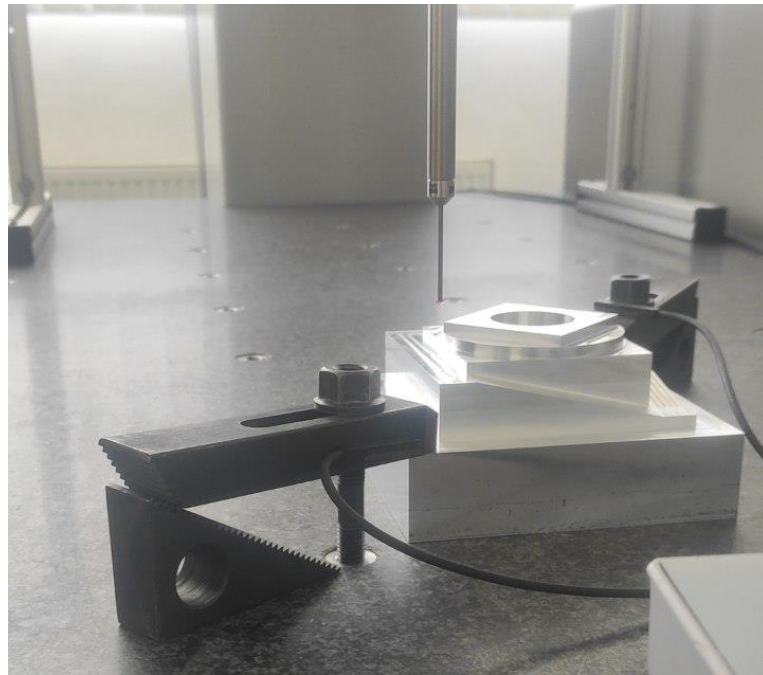
Obrázek 51: Upevněný artefakt a kalibrační koule

Vyrovnání dílu bylo provedeno za spodní obrobenu rovinu, přímkou na jednom z boků a bodem na protilehlé stěně metodou 3-2-1. Tuto rovinu, přímkou a bodem mám zobrazené na *Obrázku 52*. Po vyrovnání dílu jsem začala snímat jednotlivé geometrické prvky (elementy) na kterých jsem následně vyhodnocovala rozměrové a geometrické specifikace. První snímanou částí byla nejvyšší plocha, na které jsme měřili rovinnost. Snímali jsme kolem všech hran a poté kolem středové válcové díry, na té pokračovalo měření válcovitosti. Naskenováním obvodu vnějšího válce jsme změřili jeho

kruhovitost. Poté se měřili ostatní části artefaktu, tedy kvádr a kvádr otočený o 45°. Snímání sondou je vidět na *Obrázku 53*. Postupným měřením jednotlivých stran jsme zjistili jejich přímosti, porovnáním mezi sebou rovnoběžnost protilehlých a kolmost mezi vedlejšími stranami. Se zadáním tolerancí jsme z všech z těchto dat získali grafické znázornění v programu Zeiss Calypso.



Obrázek 52: Rovina, přímka a bod k vyrovnání polohy artefaktu



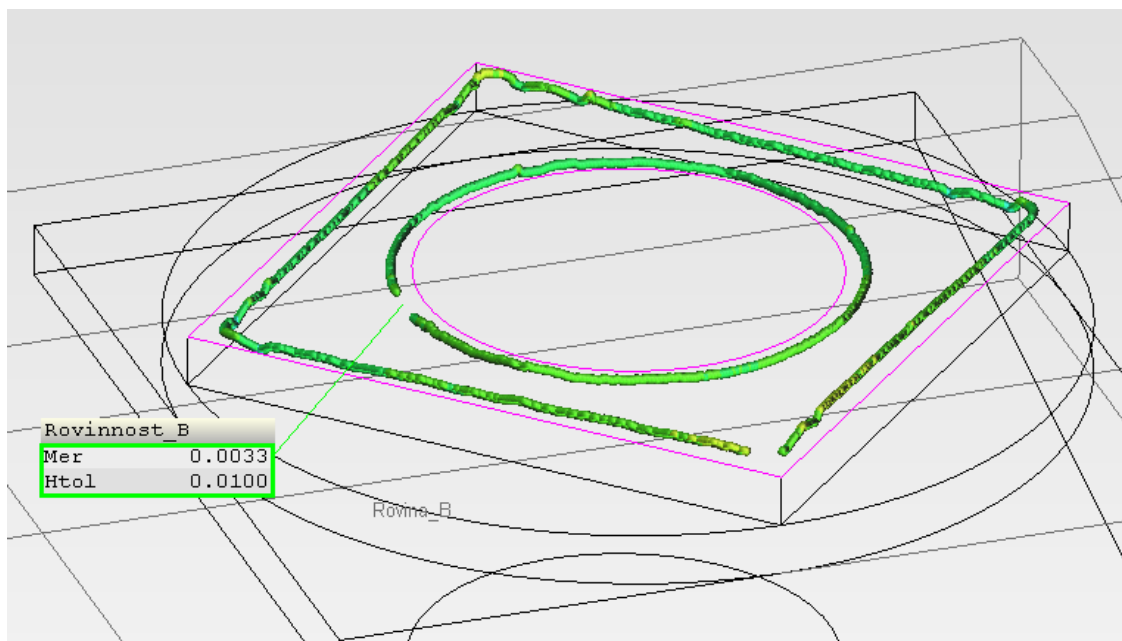
Obrázek 53: Snímání sondou

5 Analýza výsledků a zhodnocení přesnosti vybraného obráběcího stroje

Analýza výsledků probíhá pomocí softwaru Calypso, který je nejen řídicím softwarem pro programování a ovládání CMM, ale také metrologickým softwarem. Výstupy z tohoto softwaru v dalších bodech ilustrují výrobní přesnost zvolené CNC frézky HAAS VF-2.

5.1 Rovinnost

Rovinnost jsem vyhodnocovala na horní rovině artefaktu. Jako strategii měření jsem použila kruhovou dráhu ekvidistantní ke středovému otvoru a tzv. polylinii ekvidistantní k vnějším bokům, jak je patrné i z *Obrázku 54*.

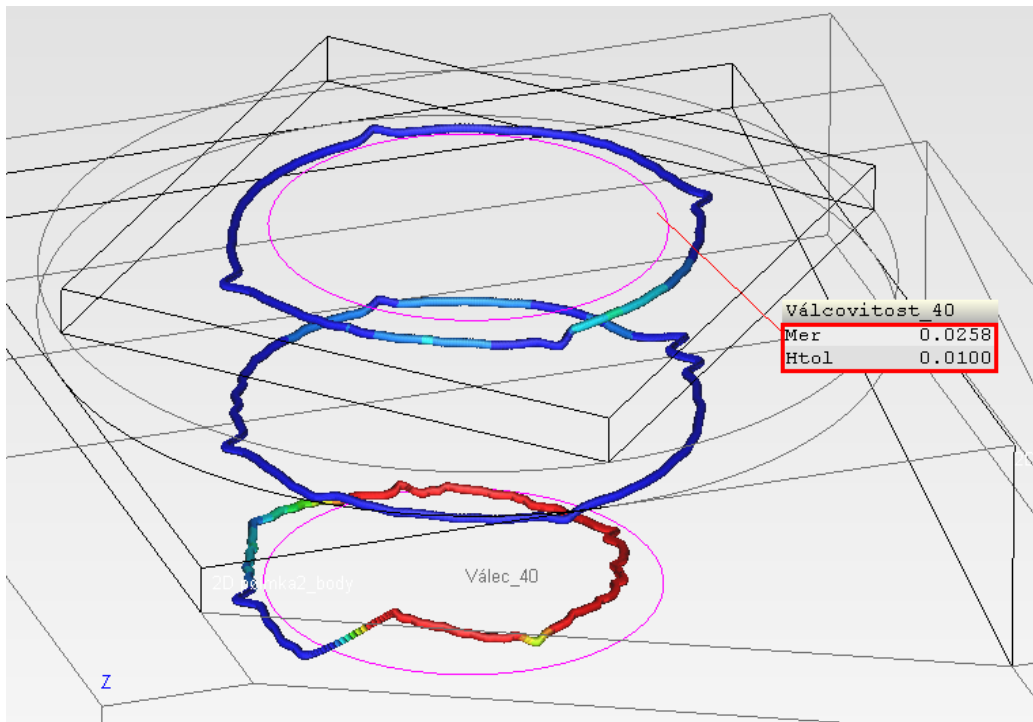


Obrázek 54: Výsledek měření rovinnosti

Výsledek měření rovinnosti je 3,3 μ m, což je velmi nízká hodnota.

5.2 Válcovitost

Válcovitost byla měřena na vnitřní válcové díře. Body byly snímány postupně ve třech výškách, nahoře, uprostřed a téměř u dna, jak je vidět na *Obrázku 55*. Zde se muselo dbát, aby sonda nezajížděla příliš nízko, aby nedošlo k narušení měření či k jejímu poškození dotekem o dno válcové díry.

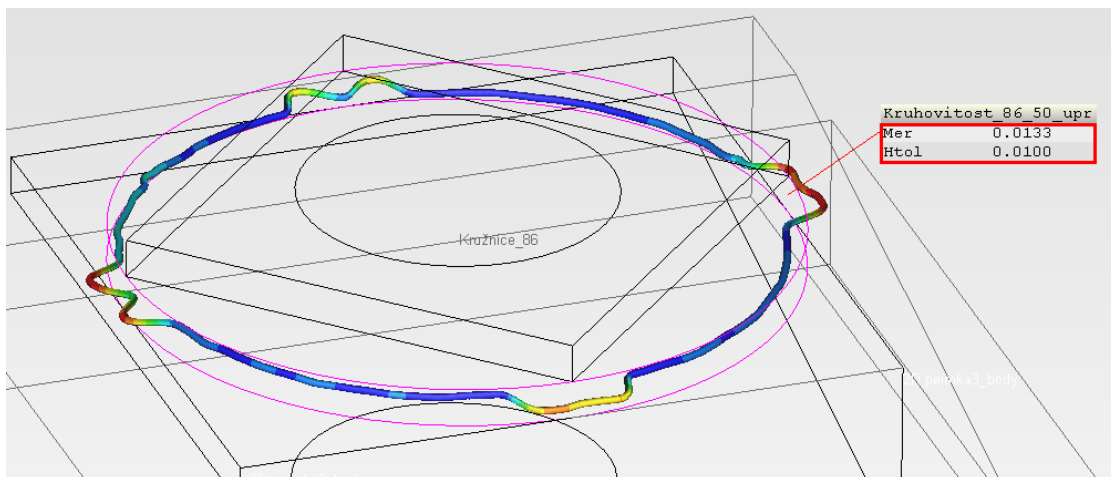


Obrázek 55: Výsledek měření válcovitosti

Z Obrázku 55 je patrné, že body v horní a prostřední části válcové díry se téměř shodují v nepřesnostech a nijak zásadně neliší od jmenovité hodnoty, nicméně je zde patrná pravděpodobně vůle v kuličkových šroubech, či nedokonalá regulace pohybu při kruhové interpolaci. Ovšem ve spodní části díry artefaktu docházelo v průběhu obrábění ke špatnému vyplachování třísek, pravděpodobně jejich nahromadění zde vedlo k rozvibrování či vychýlení nástroje a tím ke zhoršení chyby tvaru ve spodním řezu až na úroveň 0,0258mm. Chyba válcovitosti na této díře tím dosáhla hodnoty 25,8 μ m.

5.3 Kruhovitost

Kruhovitost měříme snímáním bodů po obvodu vnějšího válce. Zde se největší nepřesnosti našli v místech odpovídajících úhlům 0°, 90°, 180° a 270°, jak lze vidět na Obrázku 56, jedná se o místa, kde dochází k přechodu osy X, respektive osy Y z jednoho směru do opačného, tyto chyby v sobě mohou kombinovat vůle ve vedení kuličkových šroubů, tak chybu nastavení kruhové interpolace, která lze do určité míry korigovat a tato korekce bude nezbytná. Celková nepřesnost byla změřena na 0,0133 mm.



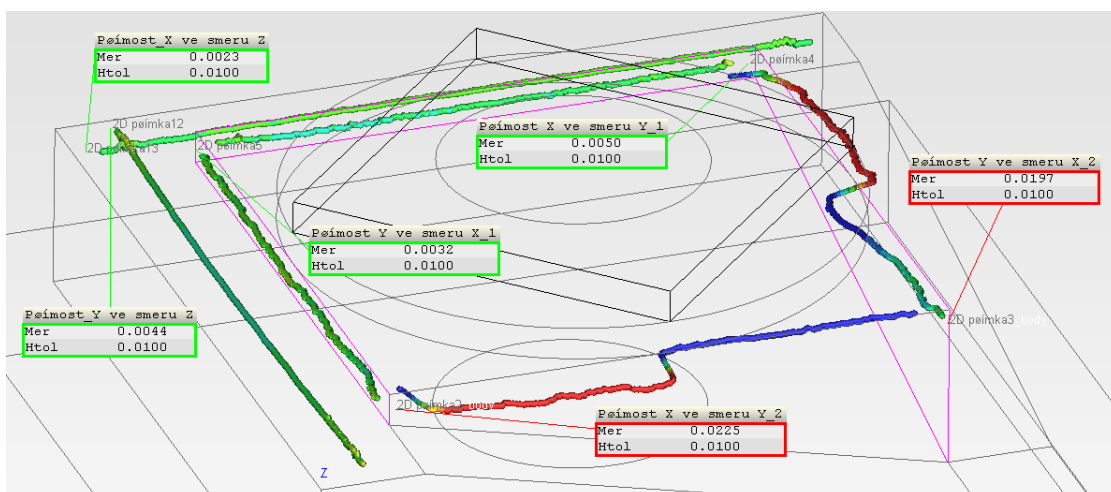
Obrázek 56: Výsledek měření kruhovitosti

5.4 Přímost

Přímost je měřena na dvou kvádrech, kdy jeden z nich odpovídá směru os X a Y a druhý z nich je natočen o 45°, musí být tedy vyráběn s využitím lineární interpolace souběžně se pohybujícími os X a Y. Jedná se tedy o interpolaci a měření přesnosti ve dvou osách namísto jedné osy na rozdíl od neinterpolovaného kvádrů.

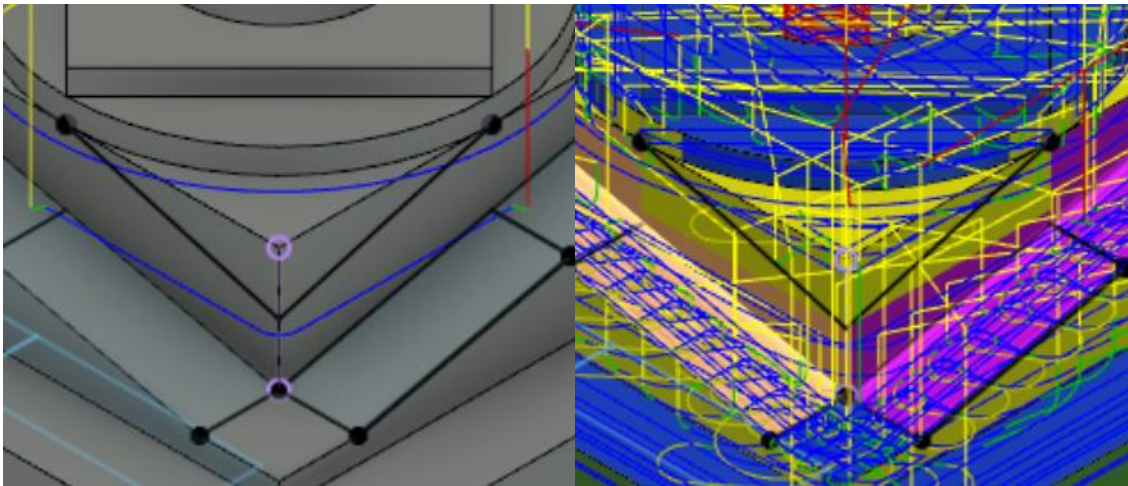
5.4.1 Přímost jednotlivých os

Na neinterpolovaném kvádrů měříme přímost na bočních stranách, kde se jedná o přímost osy X ve směru osy Y nebo naopak. Přímost můžeme měřit i na horní straně následujícího kvádrů, což se zobrazeno na *Obrázku 57*. V tomto případě se jedná o přímost osy X nebo Y směru osy Z.



Obrázek 57: Výsledek měření přímosti na neinterpolovaných plochách

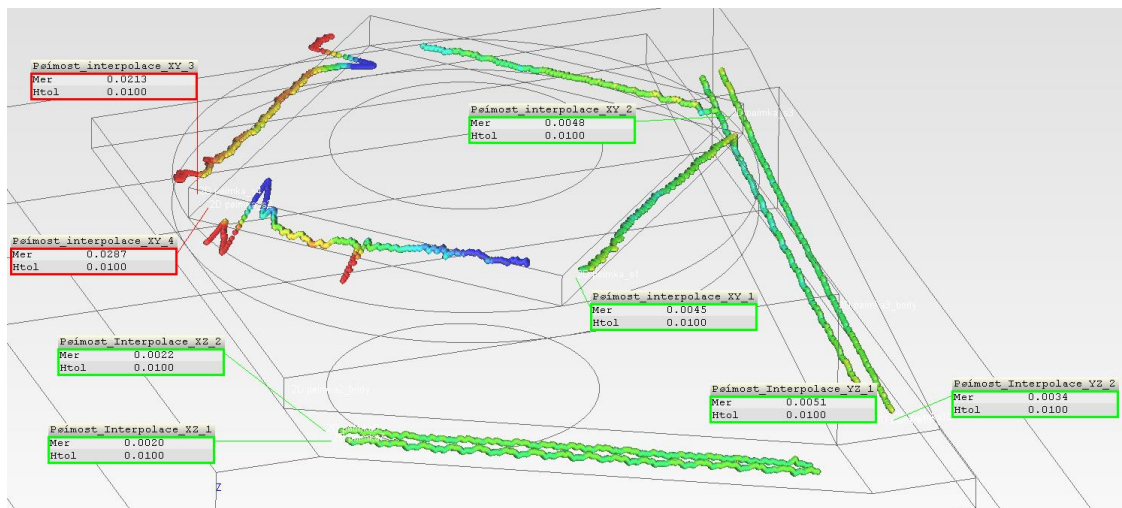
Přímosti ve směru osy Z, stejně tak i dvě ze čtyř přímostí měřené na boku kvádrů mají nepřesnost maximálně 5 μm . Stěny přilehlé k šikmým plochám byly z důvodu délky řezné části nástroje obráběny ve dvou drahách stroje, druhou dráhu ukazuje *Obrázek 58* spodní modrou čarou a žlutým pruhem. Toto napojení způsobilo vznik zubu na těchto stěnách, jak je detailně zobrazeno na obrázku výše. Výsledná nepřesnost je zde čtyřikrát větší než u zbylých, z grafického znázornění je vidět, že i při druhém průjezdu docházelo k úběru materiálu a tloušťka takto odebrané vrstvy je přibližně 15 μm .



Obrázek 58: Ukázka dráhy nástroje z CAM

5.4.2 Přímost s použitím lineární interpolace

Zde se měří přímost na bočních stěnách kvádrů natočeného o 45°. Jedná se o přímost ve směru zároveň osy X a Y. Interpolovanou přímost lze měřit též na šikmých plochách, kde se jedná o přímost os ve směru XZ a YZ. Viz *Obrázek 59*.



Obrázek 59: Výsledek měření přímosti na interpolovaných plochách

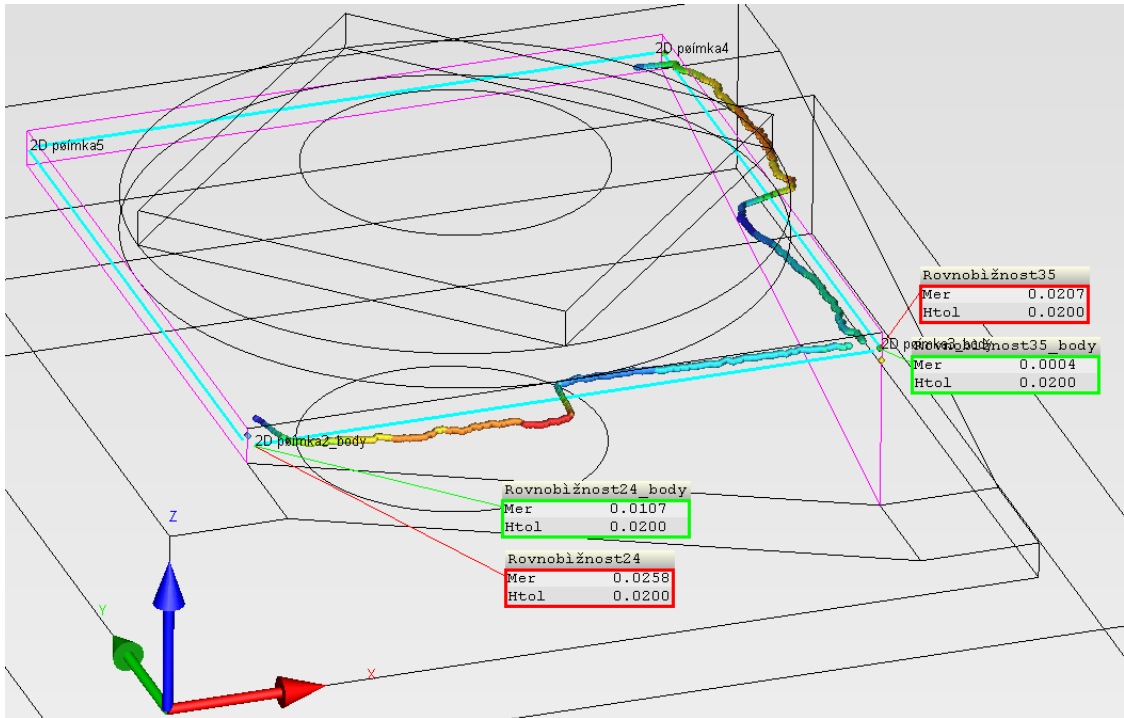
Lineární interpolace v XZ a YZ dosahuje hodnot přímosti 2 μm resp. 3 μm . Lineární interpolace v XY na dvou stěnách kvádru dosahuje hodnot do 5 μm , na dvou protilehlých ovšem došlo k výraznému zhoršení přímosti na úroveň 21,3 μm a 28,7 μm , což je pětikrát větší hodnota. I po kontrole drah v CAM softwaru jsem nenašla vysvětlení této nepřesnosti. Další možný důvod vzniku této nepřesnosti je větší vůle v kuličkových šroubech.

5.5 Rovnoběžnost

Měření rovnoběžnosti probíhá srovnáním naměřených přesností protějších stran již měřeného kvádru a kvádru otočeného o 45°.

5.5.1 Rovnoběžnost stran kvádru

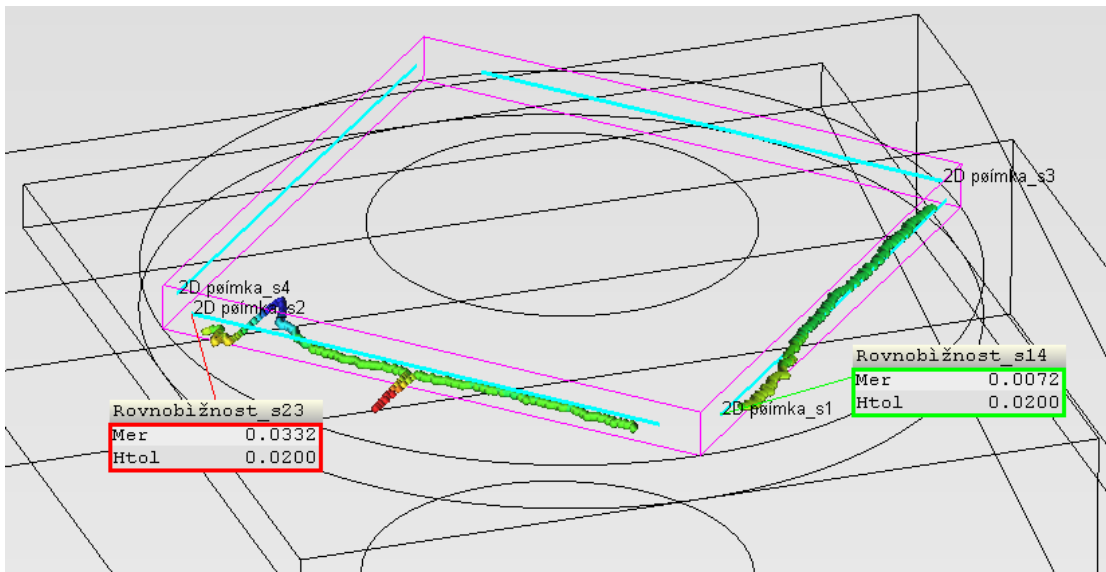
Vzhledem k chybě při obrábění, kvůli které nám některé přímosti vyšly s vysokou hodnotou nepřesnosti, jsme rovnoběžnost porovnávali i bodově, tedy z nasnímaných 2 bodů, které nám vytvořily teoretickou úsečku, kterou porovnávám se stranou s nízkou nepřesností. Viz Obrázek 60.



Obrázek 60: Výsledek měření rovnoběžnosti na neinterpolovaném kvádru

Porovnáváme-li nasnímané přesnosti, nacházíme se v obou případech hodnotách vyšší nepřesnosti přes 0,02mm. Na druhou stranu při bodovém srovnání jsou hodnoty nepřesnosti 4 μ m a 10,7 μ m, díky tomu lze tvrdit, že rovnoběžnost je přesná, pouze sebou nese chybu přímosti.

5.5.2 Rovnoběžnost interpolovaných stran kvádru



Obrázek 61: Výsledek měření rovnoběžnosti na interpolovaném kvádru

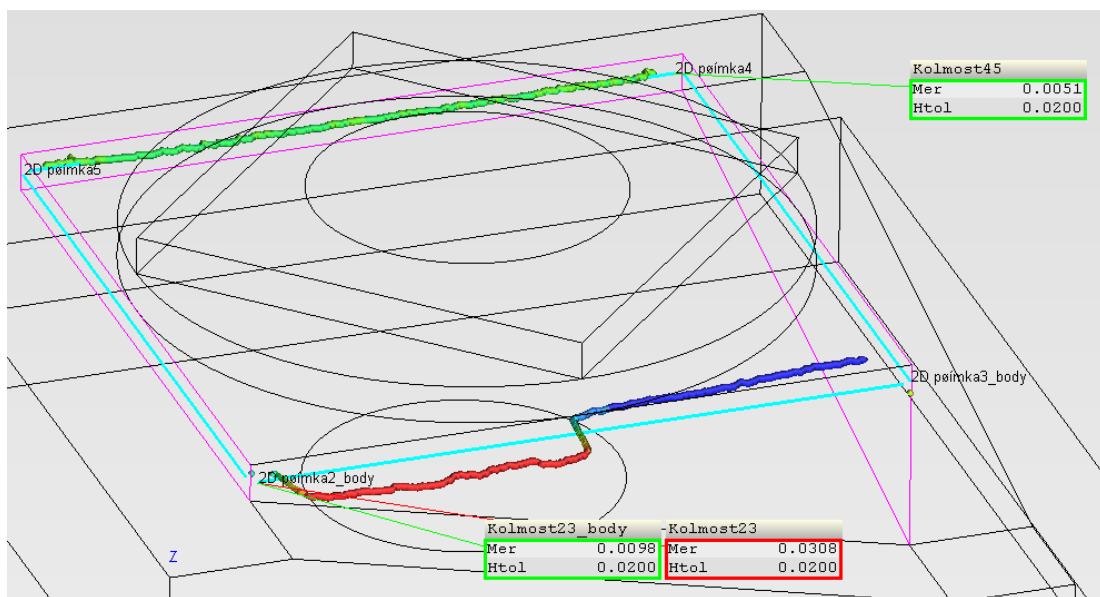
U první dvojice rovnoběžných stran kváдру otočeného o 45° nám vyšla nepřesnost 7 μm , zatímco druhá nepřesnost vyšla mnohem vyšší a to 33,2 μm , jak je vidět na *Obrázku 61*. Tento velký rozdíl byl způsoben výběrem stran, když základna byla strana s vyšší nepřesností přímosti a porovnávaná strana měla nepřesnost přímosti nižší, vyšla i nepřesnost rovnoběžnosti nízká a naopak.

5.6 Kolmost

Měření kolmosti probíhá srovnáním naměřených přesností dvou vedlejších stran již měřeného kváдру a kváдру otočeného o 45°.

5.6.1 Kolmost stran kváдру

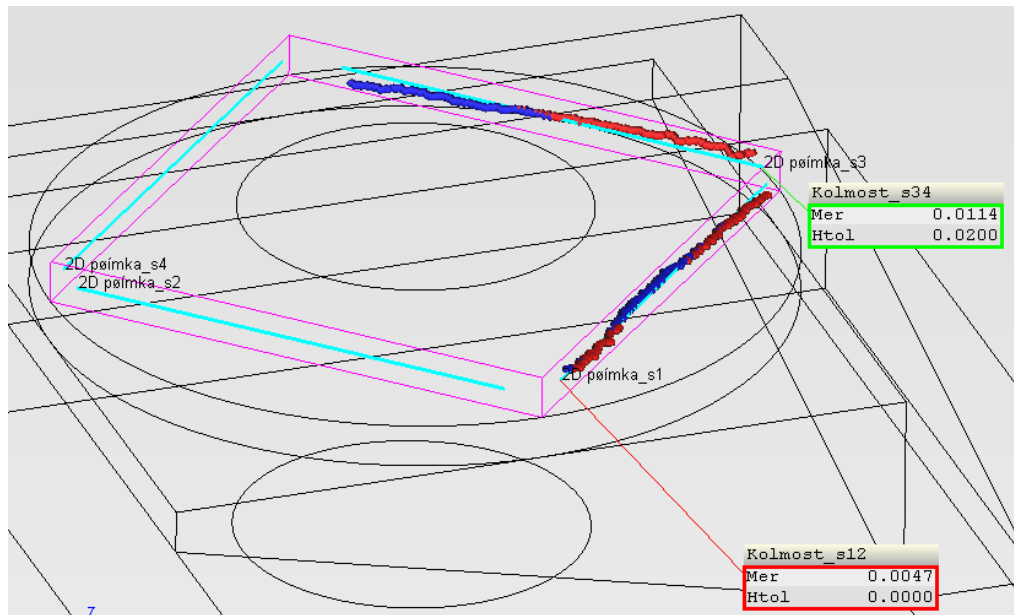
Stejně jako u rovnoběžnosti budeme u kváдру uvažovat přesnost jak ze změřených přímostí, tak i bodové porovnání. Zvolila jsem porovnání kolmostí stran s větší chybou přímostí spolu a s menší chybou přesnosti spolu, jak je znázorněno na *Obrázku 62*.



Obrázek 62: Výsledek měření kolmosti na neinterpolovaném kváдру

Strany s přesnými přímostmi mají nepřesnost od jmenovité hodnoty 5 μm , zbylé 2 strany při bodovém porovnání pouze 1 μm , však při porovnání jejich přímostí mají nepřesnost 30,8 μm .

5.6.2 Kolmost interpolovaných stran kvádru



Obrázek 63: Výsledek měření kolmosti na interpolovaném kvádru

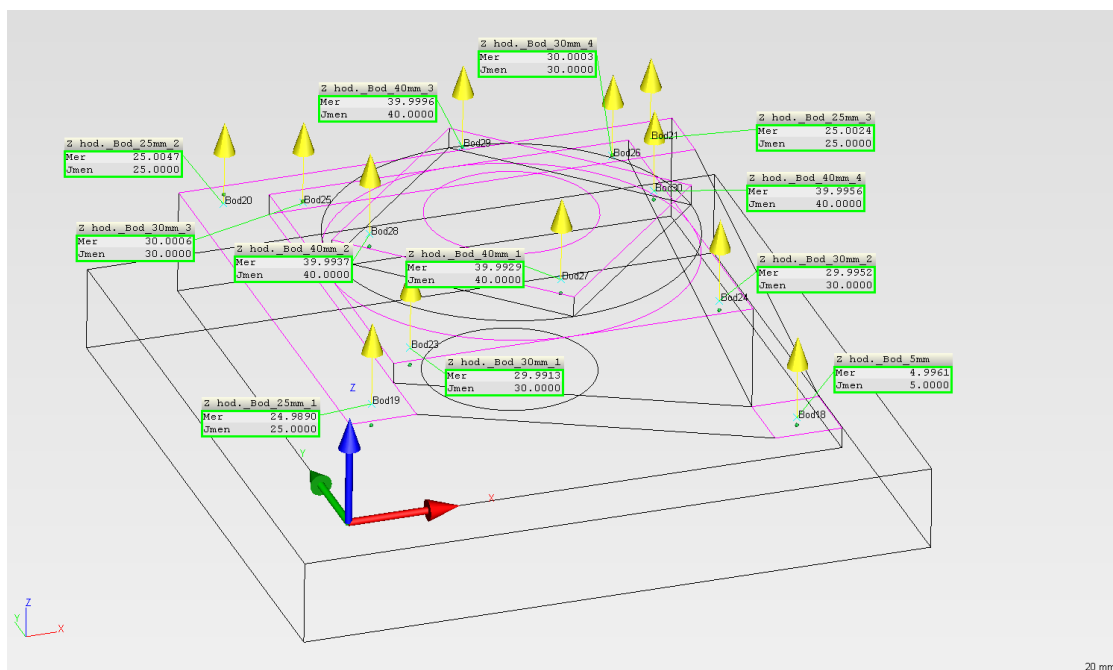
Kolmosti u interpolovaných stran jsou obě hodnoty poměrně nízké a to 11,4 μ m a 4,7 μ m. Bohužel nepozorností nemám v *Obrázku 63* u jedné dvojice zvolenou toleranci, proto je hodnota vyznačena červeně.

5.7 Přesnost rozměrů

Nyní pomocí sondy přeměřím rozměry některých prvků a porovná s rozměry nahraného modelu.

5.7.1 Výšky jednotlivých ploch

Sonda najíždí v určených bodech na povrch artefaktu a vzdálenost porovná s modelem, vzdálenosti jsou měřeny od základny, kterou je nejspodnější obráběná plocha, tato rovina byla použita i pro vyrovnání. Viz *Obrázek 64*.

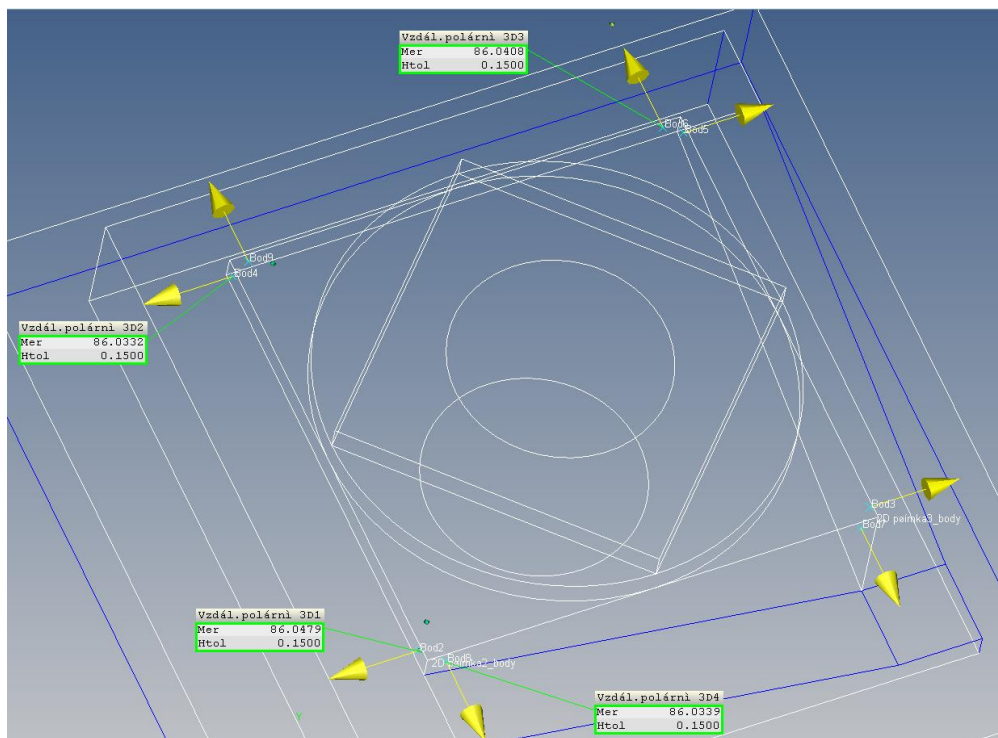


Obrázek 64: Výsledek měření přesnosti jednotlivých výšek

Největší odchylka od jmenovité hodnoty je 0,011mm a nachází se na obrázku ve spodním levém rohu, většina hodnot se však neliší od jmenovité hodnoty o více než 0,005mm. Všechny hodnoty a jejich rozdíl od naměřené hodnoty nalezneme níže v *Tabulce 4*. Z výše uvedených výsledků je možné usoudit na přesnost polohování v ose Z v námi obráběném rozsahu 40 mm.

5.7.2 Rozměry kvádrů

Pro kontrolu přesnosti rozměru válce se snímali vždy 2 protilehlé body a tím se změřila vzdálenost mezi nimi. Jmenovitá hodnota délky strany kvádrů je 86 mm. Naměřené hodnoty jsou vidět na *Obrázku 65*.

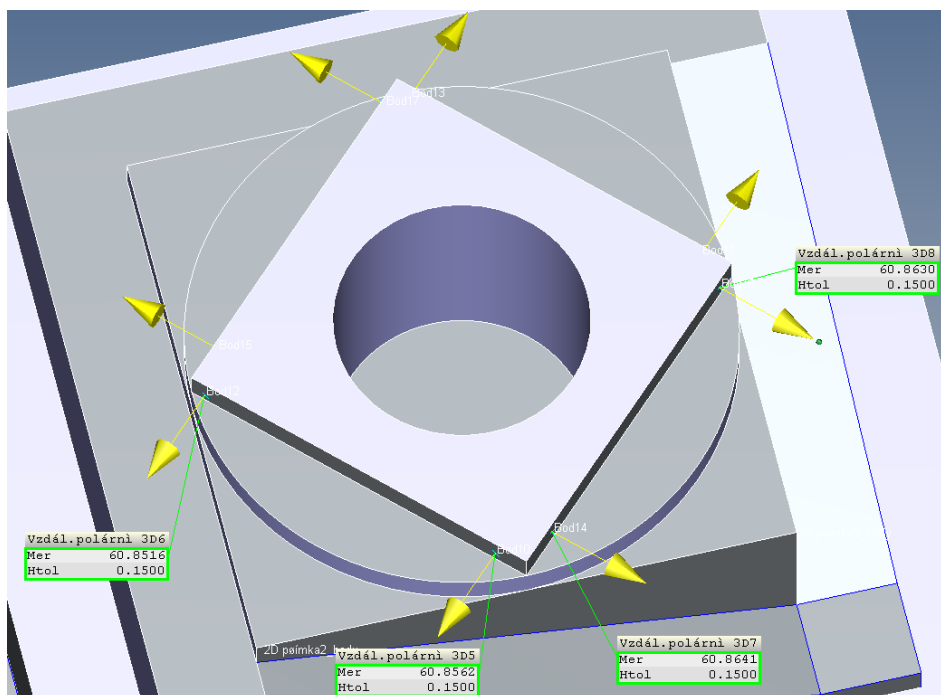


Obrázek 65: Výsledek měření přesnosti rozměrů kvádru

Největší naměřená odchylka od jmenovité hodnoty byla naměřena 0,0479mm, což je hodnota výrazně vyšší než v ose Z, nicméně zde je nutné zmínit, že nebyla provedena korekce na průměr nástroje.

5.7.3 Rozměry interpolovaného kvádru

Zde jsme měření prováděli stejně jako u kvádru. Jmenovitá hodnota délky strany je 60,81mm, naměřené hodnoty jsou vidět z Obrázku 66.



Obrázek 66: Výsledek měření přesnosti rozměrů interpolovaného kvádru

Všechny naměřené hodnoty se od jmenovitých hodnot neliší o více než 0,05mm, i v tomto případě lze chybu zdůvodnit neprovedenou korekcí na průměr nástroje.

Tabulka 4: Tabulka jmenovitých a naměřených hodnot a jejich rozdílů

Bod číslo (dle obr.)	Jmenovitá hodnota	Měřená hodnota	Rozdíl
29	40	39,9996	0,0004
28	40	39,9937	0,0063
27	40	39,9929	0,0071
30	40	39,9956	0,0041
25	30	30,0006	0,0006
23	30	29,9913	0,0087
24	30	29,9952	0,0048
26	30	30,0003	0,0003
19	25	24,9890	0,011
20	25	25,0047	0,0047
21	25	25,0024	0,0024
18	5	4,9961	0,0039
kvádr			
4/5	86	86,0332	0,0332
6/7	86	86,0408	0,0408
8/9	86	86,0339	0,0339
2/3	86	86,0479	0,0479
Kvádr otoč. o 45°			
12/13	60,81	60,8516	0,0416
10/11	60,81	60,8562	0,0462
14/15	60,81	60,8641	0,0541
16/17	60,81	68,863	0,053

6 Závěr

V teoretické části jsem se zaměřila na technickou normu ČSN ISO 230, získané informace jsem dále využila u vytváření praktické části. Druhým tématem byly přejímací artefakty, z nichž jsem zvolila NAS 979 pro inspiraci pro svůj artefakt.

Při tvorbě programu pro realizaci zkoušky jsem kvůli nedostatečné délce řezné části nástroje zvolila obrábět stěnu kvádrů v šikmých ploch nadvakrát. To způsobilo i na oko viditelnou hranu, která způsobuje nepřesnosti v přímosti těchto dvou stěn kvádrů. Chyba přímosti se poté táhne do rovnoběžnosti a kolmosti, proto v těchto případech porovnávám dvěma způsoby, prvním je standartně přímost s přímostí a druhým je porovnání pomocí dvou zvolených bodů na straně s nepřesností. Chyba přímosti v ose X, ose Y u stran bez „zubu“ a v přímosti v ose Z vycházely do 5 μm , u přímosti v ose X, ose Y se stran se „zubem“ maximálně vychází 25 μm . Při použití lineární interpolace dosahovala chyba přímosti hodnot do 5 μm ve směru XZ a YZ. Přímost interpolace v osách XY vyšla z pro mě neznámého důvodu ve dvou ze čtyř případů vyšší hodnota kolem 25 μm .

Nepřesnost válcovitosti byla způsobena nedostatečným odvodem třísek při obrábění. Tyto třísky ve spodní části válcové díry zanechali hmatatelné škody, celková chyba válcovitosti dosáhla hodnoty 25,8 μm . Chyba tvaru při kruhové interpolaci dosahovala hodnot 13,3 μm . Maximální chyba rozměru v osách X a Y dosahovala hodnoty 28 μm , maximální chyba rozměru v ose Z dosáhla hodnoty 11 μm .

Výsledkem mé práce je změření přesnosti nově pořízené CNC frézky HAAS VF-2 do haly na fakultě. Téma měření přesnosti obráběcích strojů je jen z těži vyčerpatelné a lze ho uchopit mnoha způsoby, mohla bych v něm tedy pokračovat při své diplomové práci.

Seznamy

Seznam použitých zdrojů

- [1] NOVÁK, Petr. *Problematika bezpečnosti řídicích systémů s IPC* [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <http://akce.fs.vsb.cz/1999/asr99/Proceedings/papers/17/17.htm>
- [2] ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení, nebo kvazistatických podmínek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [3] ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Stanovení přesnosti opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [4] ČSN ISO 230-3. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 3: Určení tepelných vlivů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [5] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [6] ČSN ISO 230-5. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 5: Určení emise hluku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [7] ČSN ISO 230-6. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 6: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [8] ČSN ISO 230-7. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 7: Geometrická přesnost os rotace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

- [9] BARNFATHER, Joshua. *Photogrammetric measurement process capability for metrology assisted robotic machining* [online]. [cit. 2021-3-1]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/NAS-979-machine-tool-test-artefact_fig5_283778937
- [10] CHAHARSOOGHI, Alborz Shokrani, Vimal DHOKIA a Stephan NEWMAN. *Investigation of computer integrated inspection techniques in CNC manufacturing systems* [online]. [cit. 2021-3-5]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/161911112.pdf>
- [11] MUELANER, Jody. *Rapid Machine Tool Verification for Calibrating CNC Machines* [online]. [cit. 2021-3-5]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/rapid-machine-tool-verification-for-calibrating-cnc-machines>
- [12] IBARAKI, Soichi, Tetsushi ASANO a Ibuki YOSHIDA. *A machining test to identify rotary axis geometric errors on a five-axis machine tool with a swiveling rotary table for turning operations* [online]. [cit. 2021-3-5]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141635918305087?casa>
- [13] *Tepelné zatížení při frézování* [online]. [cit. 2021-7-5]. Dostupné z: [https://www.udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=6420&cHash=33e28a77c9&type=98](https://www.udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=6420&cHash=33e28a77c9&type=98)
- [14] *VF - 2* [online]. [cit. 2021-7-5]. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2.html>
- [15] *CMM Zeiss UPMC Carat 850* [online]. [cit. 2021-7-5]. Dostupné z: www.hi-top.com.tw
- [16] *EN AW-7075 (AlZn5.5MgCu)* [online]. [cit. 2021-7-21]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-7075/>

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: NASTAVENÍ PRO ZKOUŠKU STATICKÉ SHODY [2]	14
OBRÁZEK 2: NASTAVENÍ PRO ZKOUŠKU STATICKÉ SHODY A ZKOUŠKU HYSTEREZE STROJE PŮSOBENÍM VNITŘNÍ SÍLY POHYBEM HLAVY VŘETENA [3].....	16
OBRÁZEK 3: USPOŘÁDÁNÍ MĚŘENÍ PŘÍMOSTI PŘI POUŽITÍ PRAVÍTKA.....	17
OBRÁZEK 4: MĚŘENÍ CHYBY PŘÍMOSTI PŘI POUŽITÍ NAPNUTÉHO DRÁTU A MIKROSKOPU	18
OBRÁZEK 5: MĚŘENÍ CHYBY PŘÍMOSTI POUŽITÍM VYROVNÁVAJÍCÍHO DALEKOHLEDU	19
OBRÁZEK 6: MĚŘENÍ ÚHLOVÉ CHYBY POHYBU V OSE X S PŘESNÝMI VODOVÁHAMÍ	20
OBRÁZEK 7: MĚŘENÍ ÚHLOVÉ CHYBY POHYBU POUŽITÍM LASEROVÉHO ÚHLOVÉHO INTERFEROMETRU	21
OBRÁZEK 8: MĚŘENÍ POMOCÍ AUTOKOLIMÁTORU	22
OBRÁZEK 9: MĚŘENÍ CHYBY ÚHLOVÉHO POLOHOVÁNÍ POUŽITÍM AUTOKOLIMÁTORU A MNOHOÚHELNÍKU	23
OBRÁZEK 10: MĚŘENÍ CHYBY POHYBU ÚHLOVÉHO POLOHOVÁNÍ POUŽITÍM REFERENČNÍHO INDEXOVACÍHO STOLU	23
OBRÁZEK 11: ÚHLY ZÁBĚRU FRÉZY [13].....	28
OBRÁZEK 12: ROZLOŽENÍ TEPLA PŘI FRÉZOVÁNÍ [13]	29
OBRÁZEK 13: TYPICKÉ USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠENÍ ETVE A TEPELNÝCH DEFORMACÍ ZPŮSOBENÝCH OTÁČENÍM VŘETENA A POHYBEM V LINEÁRNÍCH OSÁCH OBRÁBĚCÍ CENTRUM SE SVISLOU OSOU VŘETENA [4]	30
OBRÁZEK 14: TYPICKÉ USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠENÍ ETVE A TEPELNÝCH DEFORMACÍ ZPŮSOBENÝCH OTÁČENÍM VŘETENA A POHYBEM V LINEÁRNÍCH OSÁCH NA OBRÁBĚCÍM CENTRU S VODOROVNOU OSOU VŘETENA [4]	31
OBRÁZEK 15: TYPICKÉ USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠENÍ ETVE A TEPELNÝCH DEFORMACÍ ZPŮSOBENÝCH OTÁČENÍM VŘETENA A POHYBEM V LINEÁRNÍCH OSÁCH NA SOUSTRUŽNICKÉM CENTRU SE ŠÍKMÝM LOŽEM [4]	31
OBRÁZEK 16: TEPLOTA DEFORMACE V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO ZKOUŠKU ETVE [4]	32
OBRÁZEK 17: TYPICKÉ USPOŘÁDÁNÍ MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH DEFORMACÍ V DŮSLEDKU POHYBU STOLU V OSE X OBRÁBĚCÍHO CENTRA [4].....	33
OBRÁZEK 18: ALTERNATIVNÍ USPOŘÁDÁNÍ MĚŘENÍ TEPELNÝCH DEFORMACÍ ZPŮSOBENÉ POHYBEM SANÍ OBRÁBĚCÍHO CENTRA OSE X [4]	34
OBRÁZEK 19: TYPICKÉ USPOŘÁDÁNÍ MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH DEFORMACÍ POHYBEM PORTÁLU V OSE X OBRÁBĚCÍHO CENTRA PŘI POUŽITÍ DOTYKOVÉ SONDY [4]	35
OBRÁZEK 20: VYHODNOCENÍ DVOUSMĚRNÉ ODCHYLKY KRUHOVITOSTI G(B) [5]	36
OBRÁZEK 21: VYHODNOCENÍ ODCHYLKY KRUHOVITOSTI G [5]	37
OBRÁZEK 22: VYHODNOCENÍ RADIÁLNÍ ODCHYLKY F [5]	37
OBRÁZEK 23: PŘÍKLAD PREVENTACE DAT PRO DVOUSMĚRNOU KRUHOVOU ODCHYLKU G(B) A PRŮMĚRNOU DVOUSMĚRNOU RADIÁLNÍ ODCHYLKU D A ODCHYLKU KRUHOVITOSTI G [5]	38
OBRÁZEK 24: ČTYŘI DIAGONÁLY TĚLESA PRAVOÚHLÉHO HRANOLU [7]	40

OBRÁZEK 25: PŘÍKLADY DIAGONÁL STĚNY PRAVOÚHLÉHO HRANOLU [7].....	40
OBRÁZEK 26: SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠKY RADIÁLNÍ CHYBY POHYBU S ROTUJÍCÍM CITLIVÝM SMĚREM POUŽÍVAJÍCÍ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ ÚHLOVÉ POLOHY A VYSTŘEDĚNÝ REFERENČNÍ ARTEFAKT [8]	42
OBRÁZEK 27: SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠKY RADIÁLNÍ CHYBY POHYBU S ROTUJÍCÍM CITLIVÝM SMĚREM POUŽÍVAJÍCÍ ROTAČNÍ KODÉR [8]	42
OBRÁZEK 28: ZKUŠEBNÍ SYSTÉM S PĚTI SNÍMAČI PRO MĚŘENÍ CHYBY POHYBŮ PRO OTÁČENÍ VŘETENA CITLIVÝM SMĚREM [8]	43
OBRÁZEK 29: USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠKY PRO MĚŘENÍ AXIÁLNÍ CHYBY POHYBU [8].....	44
OBRÁZEK 30: USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠKY PRO MĚŘENÍ CHYBY POHYBU VŘETENA S PEVNÝM CITLIVÝM SMĚREM [8].....	45
OBRÁZEK 31: NPL-WP-150 FREEFORM REFERENCE STANDARDY A NAS 979 TESTOVACÍ ARTEFAKT PRO OBRÁBĚČÍ STROJE [9]	47
OBRÁZEK 32: BAREVNÉ MAPY ZOBRAZUJÍCÍ NÁHODNÉ NEJISTOTY [9]	47
OBRÁZEK 33: VLIV GEOMETRIE NA CHYBU PŘI DANÉM MĚŘENÍ [9]	48
OBRÁZEK 34: PRISMATICKÉ GEOMETRICKÉ CHYBY ARTEFAKTU.[9]	48
OBRÁZEK 35: B-NAS 979 [10]	49
OBRÁZEK 36: SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ ZÍSKANÝCH Z OMM A CMM [10]	51
OBRÁZEK 37: ARTEFAKT SE ŠÍPKAMI OZNAČUJÍCÍMI POLOHY A SMĚRY SONDOVÁNÍ [11].....	52
OBRÁZEK 38:VÁLCOVÝ OBROBEK [12]	53
OBRÁZEK 39:PŘESNOST OBRÁBĚNÉHO VÁLCOVÉHO ARTEFAKTU [12]	54
OBRÁZEK 40:POSTUP ZKOUŠKY VÁLCOVÉHO OBROBKU [12]	55
OBRÁZEK 41: ARTEFAKT VYMODELOVANÝ V CAD SOFTWARE	57
OBRÁZEK 42: UKÁZKA ZE SIMULACE V AUTODESK FUSION 360.....	59
OBRÁZEK 43: ARTEFAKT S VŠEMI DRAHAMI NÁSTROJŮ.....	59
OBRÁZEK 44: KONVENČNÍ FRÉZKA S UPNUTÝM POLOTOVAREM	60
OBRÁZEK 45: CNC FRÉZKA HAAS VF-2 [14]	61
OBRÁZEK 46: OBRÁBĚNÍ NA CNC FRÉZCE HAAS VF-2	62
OBRÁZEK 47: OBRÁBĚNÍ S CHLADÍCÍ KAPALINOU NA CNC FRÉZCE HAAS VF-2	63
OBRÁZEK 48: ARTEFAKT PO HRUBOVÁNÍ	63
OBRÁZEK 49: CMM ZEISS UPMC CARAT 850 [15]	65
OBRÁZEK 50: KALIBRACE SNÍMACÍHO SYSTÉMU V SOFTWARE ZEISS CALYPSO	66
OBRÁZEK 51: UPEVNĚNÝ ARTEFAKT A KALIBRAČNÍ KOULE	66
OBRÁZEK 52: ROVINA, PŘÍMKA A BOD K VYROVNÁNÍ POLOHY ARTEFAKTU	67
OBRÁZEK 53: SNÍMÁNÍ SONDOU	67
OBRÁZEK 54: VÝSLEDEK MĚŘENÍ ROVINNOSTI	68
OBRÁZEK 55: VÝSLEDEK MĚŘENÍ VÁLCOVITOSTI.....	69
OBRÁZEK 56: VÝSLEDEK MĚŘENÍ KRUHOVITOSTI	70

OBRÁZEK 57: VÝSLEDEK MĚŘENÍ PŘÍMOSTI NA NEINTERPOLOVANÝCH PLOCHÁCH	70
OBRÁZEK 58: UKÁZKA DRÁHY NÁSTROJE Z CAM	71
OBRÁZEK 59: VÝSLEDEK MĚŘENÍ PŘÍMOSTI NA INTERPOLOVANÝCH PLOCHÁCH	72
OBRÁZEK 60: VÝSLEDEK MĚŘENÍ ROVNOBĚŽNOSTI NA NEINTERPOLOVANÉM KVÁDRU	73
OBRÁZEK 61: VÝSLEDEK MĚŘENÍ ROVNOBĚŽNOSTI NA INTERPOLOVANÉM KVÁDRU	73
OBRÁZEK 62: VÝSLEDEK MĚŘENÍ KOLMOSTI NA NEINTERPOLOVANÉM KVÁDRU	74
OBRÁZEK 63: VÝSLEDEK MĚŘENÍ KOLMOSTI NA INTERPOLOVANÉM KVÁDRU	75
OBRÁZEK 64: VÝSLEDEK MĚŘENÍ PŘESNOSTI JEDNOTLIVÝCH VÝŠEK	76
OBRÁZEK 65: VÝSLEDEK MĚŘENÍ PŘESNOSTI ROZMĚRŮ KVÁDRU	77
OBRÁZEK 66: VÝSLEDEK MĚŘENÍ PŘESNOSTI ROZMĚRŮ INTERPOLOVANÉHO KVÁDRU.....	78

Seznam tabulek

TABULKA 1: ZÁSADY ZKOUŠEK OBRÁBĚCÍCH STROJŮ.....	12
TABULKA 2: ZADANÉ POLOHY PRO OTOČNÉ OSY	27
TABULKA 3: PARAMETRY POUŽITÝCH FRÉZ	64
TABULKA 4: TABULKA JMENOVITÝCH A NAMĚŘENÝCH HODNOT A JEJICH ROZDÍLU.....	78