

Kalibrace polohovacího systému frézky FC 16 CNC/PC dle normy ČSN 230-2

Bc. Miroslav Raška

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav Raška**
Osobní číslo: **T13643**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Kalibrace polohovacího systému frézky FC 16 CNC/PC dle normy ČSN ISO 230-2**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická část
2. Princip kontroly CNC strojů
3. Nezbytné matematické metody pro kontrolu CNC strojů
4. Základy statistiky pro CNC stroje
5. Nejistoty a chyby měření
6. Praktická část
7. Popis CNC frézky včetně sestavení programu pro měření jejího polohování
8. Použití laserového interferometru Renishaw pro kalibraci všech tří os
9. Numerické výpočty
10. Vyhodnocení a kalibrační postup

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. CHUDÝ, Vladimír. Meranie technických veličín. 1. vyd. Bratislava: STU, 1999, 689 s. ISBN 80-227-1275-2.
2. HINDLS, Richard. Statistika pro ekonomy. 8. vyd. Praha: Professional Publishing, 2007. ISBN 978-80-86946-43-6.
3. BUMBÁLEK, Leoš a kol. Kontrola a měření. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2009, 206 s. ISBN 978-80-7333-072-9.
4. ČSN ISO 230-2. Zásady zkoušek obráběcích strojů: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 36 s.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Vladimír Pata
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:


13. května 2015

Ve Zlíně dne 19. března 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně dne 20.04.2015.



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

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

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

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

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

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

³¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá kalibrací polohovacího systému frézky FC 16 CNC/PC podle normy ČSN ISO 230-2. Teoretická část je věnována principu kontroly CNC strojů, využití matematických metod, použití statistiky, nejistotám a chybám měření při kalibraci.

V praktické části se řeší popis CNC frézky, sestavení programu pro měření polohování, použití laserového interferometru Renishaw, numerické výpočty, vyhodnocení a kalibrační postup.

Klíčová slova: kalibrace, statistika, laser interferometrie, CNC frézka

ABSTRACT

This thesis deals with the calibration of the milling machine positioning system FC 16 CNC/PC according to ISO 230-2. The theoretical part is dedicated to the control principle of CNC machines, using mathematical methods, statistics, uncertainties and measurement errors during calibration.

Practical part solves CNC milling machine description, program assembly for measuring of the motion, using of the laser interferometer Renishaw, numerical calculations, evaluation and calibration procedure.

Keywords: calibration, statistics, laser interferometry, CNC milling machine

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi, za odborné vedení, čas a ochotu, kterou mi věnoval při vypracování této diplomové práce.

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

Ve Valašských Kloboukách dne 20.04.2015.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PRINCIP KONTROLY CNC STROJŮ	13
1.1 ÚČEL ZKOUŠKY	13
1.2 PŘÍPRAVNÉ OPERACE.....	13
1.3 TOLERANCE.....	14
1.4 LINEÁRNÍ CHYBA POHYBU LINEÁRNÍ OSY	14
1.5 ZKOUŠKY GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI OS S LINEÁRNÍM POHYBEM.....	15
1.5.1 Zkoušky chyby pohonu přímosti.....	15
1.5.2 Přístrojové vybavení a uspořádání měření	16
1.6 ZKOUŠKY CHYBY POHYBU LINEÁRNÍHO POLOHOVÁNÍ.....	17
1.6.1 Laserový interferometr	18
1.6.2 Periodická chyba pohybu lineárního polohování	18
2 NEZBYTNÉ MATEMATICKÉ METODY PRO KONTROLU CNC STROJŮ	19
2.1 ZKOUŠKY V LINEÁRNÍCH OSÁCH DO 2 000 MM.....	19
2.2 VOLBA ZADANÉ POLOHY	20
2.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRO LINEÁRNÍ OSY DO 2 000 MM.....	20
3 ZÁKLADY STATISTIKY VHODNÉ PRO CNC	24
3.1 KVANTITATIVNÍ PROMĚNNÉ	25
3.2 MÍRA POLOHY	25
3.3 MÍRA VARIABILITY	25
3.3.1 Míra relativní variability (variační koeficient).....	26
3.4 TEORIE PRAVDĚPODOBNOTI A OPAKOVATELNOSTI	27
3.5 TESTOVÁNÍ HYPOTÉZ	28
3.5.1 Testovací procedura	30
3.5.2 T – test.....	30
3.5.3 F – test	31
3.5.4 Grubbsův test extrémních odchylek.....	32
4 NEJISTOTY A CHYBY MĚŘENÍ	34
4.1 NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ.....	34
4.1.1 Kalibrační protokol s nejistotou v μm	34
4.1.2 Kalibrační protokol s nejistotou v $\mu\text{m}/\text{m}$	34
4.1.3 Bez kalibračního protokolu	35
4.2 NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM PŘESAZENÍ MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ K OSE ZKOUŠENÉHO STROJE.....	35
4.3 NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM MĚŘENÍ TEPLoty	35
4.4 NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM KOEFICIENTU ROZTAŽNOSTI	36
4.4.1 Nejistota měření vlivem koeficientu roztažnosti stroje.....	36
4.4.2 Nejistota měření vlivem koeficientu roztažnosti měřicího zařízení.....	36

4.5	NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM KOLÍSÁNÍ CHYBY ENVIRONMENTU.....	37
4.6	ODHAD NEJISTOTY PARAMETRŮ	37
4.6.1	Odhad nejistoty pro jednosměrnou opakovatelnost	37
4.6.2	Odhad nejistoty pro necitlivost	37
4.7	NEJISTOTA DVOUSMĚRNÉ OPAKOVATELNOSTI	38
4.8	NEJISTOTA SYSTEMATICKÝCH ÚCHYLEK	38
4.9	NEJISTOTA PŘESNOSTI POLOHOVÁNÍ	38
4.10	CHYBY VZNIKLÉ V DŮSLEDKU CHYBNĚ NASTAVENÉHO INTERFEROMETRU	39
4.10.1	Chyba vznikající mrtvou dráhou	39
4.10.2	Kosinova chyba	39
4.10.3	Abbého chyba.....	40
II	PRAKTICKÁ ČÁST	41
5	POPIS MĚŘENÉ CNC FRÉZKY FC 16 CNC/PC.....	42
5.1	PROGRAM PRO MĚŘENÍ POLOHOVÁNÍ	43
6	POUŽITÍ LASER INTERFEROMETRU RENISHAW PRO KALIBRACI.....	45
6.1	TECHNICKÉ PARAMETRY SYSTÉMU.....	46
6.2	POSTUP KALIBRACE.....	47
6.2.1	Nastavení laser interferometru	47
6.2.1.1	Nastavení paprsku.....	47
6.2.2	Měření dat	50
6.2.3	Vyhodnocení polohování softwarem Renishaw Laser XL Capture.....	55
7	NUMERICKÉ VÝPOČTY	59
7.1	DVOUSMĚRNÁ PŘESNOST NASTAVENÍ POLOHY V OSE A (ROV. 25)	59
7.2	JEDNOSMĚRNÁ PŘESNOST NASTAVENÍ POLOHY V OSE A ↑ (ROV. 23).....	59
7.3	JEDNOSMĚRNÁ PŘESNOST NASTAVENÍ POLOHY V OSE A ↓ (ROV. 24).....	59
7.4	DVOUSMĚRNÁ SYSTEMATICKÁ POLOHOVÁ ÚCHYLKA V OSE E (ROV. 21)	59
7.5	JEDNOSMĚRNÁ SYSTEMATICKÁ POLOHOVÁ ÚCHYLKA V OSE E ↑ (ROV. 19)	60
7.6	JEDNOSMĚRNÁ SYSTEMATICKÁ POLOHOVÁ ÚCHYLKA V OSE E ↓ (ROV. 20)	60
7.7	PRŮMĚRNÁ DVOUSMĚRNÁ POLOHOVÁ ÚCHYLKA V OSE M (ROV. 22).....	60
7.8	DVOUSMĚRNÁ OPAKOVATELNOST NASTAVENÍ POLOHY V POLOZE R_i (ROV. 17) 60	
7.9	JEDNOSMĚRNÁ OPAKOVATELNOST NASTAVENÍ POLOHY V OSE R ↑. (R. 15).....	61
7.10	JEDNOSMĚRNÁ OPAKOVATELNOST NASTAVENÍ POLOHY V OSE R ↓ (R. 16).....	61
7.11	PRŮMĚRNÁ NECITLIVOST V OSE B (ROV. 10).....	61
7.12	NECITLIVOST V OSE B (ROV. 9)	61
8	VÝPOČET ODHADU NEJISTOT MĚŘENÍ LINEÁRNÍHO POLOHOVÁNÍ	62

8.1	NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ (ROV. 40).....	62
8.2	NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM PŘESAZENÍ MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ K OSE ZKOUŠENÉHO STROJE (ROV. 41).....	62
8.3	NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM MĚŘENÍ TEPLoty MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ (ROV. 40).....	63
8.4	NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM MĚŘENÍ TEPLoty STROJE (ROV. 42).....	63
8.5	NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM KOEFICIENTU ROZTAŽNOSTI MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ (ROV. 44).....	63
8.6	NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM KOEFICIENTU ROZTAŽNOSTI STROJE (ROV. 43)	63
8.7	NEJISTOTA MĚŘENÍ VLIVEM KOLÍSÁNÍ CHYBY ENVIRONMENTU (ROV. 45).....	64
8.8	ODHAD NEJISTOTY PARAMETRŮ	64
8.9	ODHAD NEJISTOTY PRO JEDNOSMĚRNou OPAKOVATELNOST (ROV. 46).....	64
8.10	ODHAD NEJISTOTY PRO NECITLIVOST (ROV. 47)	64
8.11	NEJISTOTA DVOUSMĚRNÉ OPAKOVATELNOSTI (ROV. 48)	65
8.12	NEJISTOTA SYSTEMATICKÝCH ÚCHYLEK (ROV. 49)	65
8.13	NEJISTOTA PRŮMĚRNÝCH SYSTEMATICKÝCH ÚCHYLEK (ROV. 50)	65
8.14	NEJISTOTA PŘESNOSTI POLOHOVÁNÍ (ROV. 51)	66
8.15	PŘEHLED ODHADU NEJISTOT MĚŘENÍ LINEÁRNÍHO POLOHOVÁNÍ.....	66
9	VYHODNOCENÍ KALIBRACE POLOHOVÁNÍ DLE NORMY ČSN 230-2.....	69
10	KALIBRAČNÍ POSTUP	70
10.1	SOUVISEJÍCÍ NORMY	70
10.2	KVALIFIKACE PRACOVNÍKŮ PROVÁDĚJÍCÍCH KALIBRACI.....	70
10.3	PROSTŘEDKY POTŘEBNÉ PRO KALIBRACI.....	70
10.4	DEFINICE, ROVNICE, MĚŘENÉ PARAMETRY A NEJISTOTY MĚŘENÍ	70
10.5	MÍSTO KALIBRACE	71
10.6	OBEČNÉ PODMÍNKY KALIBRACE – REFERENČNÍ PODMÍNKY	71
10.7	POSTUP A VYHODNOCENÍ KALIBRACE	71
10.8	URČENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ PŘI VLASTNÍ KALIBRACI	71
10.9	KALIBRAČNÍ PROTOKOL	71
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK.....	80
	SEZNAM PŘÍLOH.....	81

ÚVOD

Přesnost tvarů a rozměrů výrobků vypovídá o pracovní přesnosti stroje. Nejistotu výroby definujeme jako přesnost, s níž vyrobíme součást na daném stroji při definovaných provozních podmínkách. V nejistotě výroby jsou zahrnuté úchyly způsobené strojem a ostatními činiteli. Úchyly od požadované přesnosti, které vznikají na vlastním stroji, jsou nazývány nejistotou práce. Sem patří vše, co souvisí se systematickou a náhodnou úchylností. Mezi systematické úchyly řadíme geometrické úchyly konstrukčních částí stroje, tepelné vlivy a statistickou a dynamickou tuhost. Pro náhodné úchyly způsobené obráběcím strojem je určující šířka rozptylu polohy. Tato udává, s jakou reprodukovatelností může být výrobek na obráběcím stroji vyroben. Mezi náhodné úchyly řadíme kmitání, technologické soustavy stroj – nástroj – obrobek a změny zatížení (pecky, lunkry působící na řezný proces). Náhodné úchyly lze zjistit jedině opracováním souborů součástí a vyhodnocením pomocí statistiky.

U CNC obráběcích strojů, u kterých se nastavuje poloha, je mírou pro polohovou přesnost nejistota polohy. Polohová nejistota udává, s jakou přesností lze dosáhnout libovolně zvolené polohy v rozsahu zdvihu jednotlivých os. Nejistoty polohy, zjištěné pro jednotlivé pohybové osy zařízení, musí být menší nebo rovny tolerancím polohy zařízení, které jsou předepsány výrobcem. [1]

Kalibrační postupy pro stanovení přesnosti a opakovatelnosti polohy u CNC obráběcích strojů specifikuje norma ČSN ISO 230-2. Zkoušky určují relativní posun mezi zařízením, které upíná nástroj, a zařízením, které upíná obráběný díl. [2]

Pro zjištění chyb polohovacího systému stroje musíme změřit rozdíly mezi zamýšlenou a skutečnou polohou pohyblivé části v různých bodech podél kontrolované osy. Tohoto dosáhneme přemístováním osy stroje do řady postupných poloh při použití laserinterferometru k měření přesnosti a opakovatelnosti těchto pohybů jednotlivých poloh.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRINCIP KONTROLY CNC STROJŮ

Geometrická přesnost strojů, její kalibrace a měření jsou popsány normami ČSN ISO 230. Jedná se soubor dokumentů popisujících geometrickou přesnost strojů pracujících bez zatížení (část 1), stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v osách u CNC strojů (část 2), vyhodnocení tepelných vlivů (část 3), zkoušky kruhové interpolace u CNC strojů (část 4) a stanovení emise hluku (část 5) [1]

Norma se zabývá jen zkouškami přesnosti a nebere v úvahu funkční zkoušky stroje, jako jsou vibrace, trhavé pohyby částí strojů atd. Nezabývá se ani zjišťováním charakteristických parametrů stroje, jako jsou otáčky a posuvy. Tyto zkoušky se obvykle provádí před zkouškami přesnosti. [1]

ČSN ISO 230 připouští i využití jiných metod, které tato norma neobsahuje, pokud tyto metody přinášejí srovnatelné nebo lepší informace o stroji. Norma tedy výrobce nesusazuje a významní výrobci strojů si mnohdy stanovují své standardy, které jsou mnohem přesnější než standardy normalizované. [1]

1.1 Účel zkoušky

Účelem zkoušky geometrické přesnosti je zjistit geometrickou strukturu CNC strojů, tj. přesnost vzájemných poloh a pohybů těchto funkčních částí strojů, které pak ovlivňují pracovní přesnost. [1] Měření je prováděno pro zjištění chyby pohybu nebo polohy mezi součástmi obráběcího stroje, která drží obrobek, a součástí stroje, která drží řezný nástroj. [2]

1.2 Přípravné operace

Před začátkem měření musí být CNC stroj ustaven na pevném základu do vodorovné polohy pomocí vodováhy. Během zkoušek není možno tyto polohy měnit nebo upravovat. Stroj je potřeba uvést do tepelně ustáleného stavu. Pokud možno do stavu, který je co nejbližší normálním provozním podmínkám. V souladu s ISO 1 se jedná o teplotu 20 °C. Maximální kolísání teplot je v rozsahu os je od 2 do 10 %. [2] Pokud teplota neodpovídá 20 °C, je nezbytné pro opravu výsledků použít korekci diferenciálního tepelného roztažení (NDE) mezi systémem nastavení v ose zkušebního zařízení. Typický minimální rozsah korekce po výslednou nejistotu je 2 μ m/m°C. Z tohoto důvodu musí být během měření zaznamenávány skutečné teploty.

V průběhu 12 hodin před a v průběhu měření musí být teplotní gradient ve °C/hod. v rozsahu dohodnutých limitů mezi dodavatelem a uživatelem. Pokud je použita matematická korekce NDE, pak je nezbytné do kalibračního protokolu uvést polohy snímače teploty, expansivní koeficienty a typ kompenzačního programu. [3]

Geometrické zkoušky se provádí na stroji v klidu, nebo když běží za kvazistatických podmínek bez zatížení. Pokud se ale dodavatel a výrobce dohodnou, lze zkoušky provést s obrobkem o specifikované hmotnosti. Před započítím měření je zapotřebí zajistit, aby nastavení a funkce přístroje pracovaly správně v prostředí obráběcího stroje. Při kalibraci pomocí laserového interferometru je zapotřebí zajistit především stabilitu. Nastavení zkoušky stability je navrženo tak, aby zajistilo, že montáž měřících přístrojů výrazně neovlivní nejistotu měření. Naměřené hodnoty v klidu a při pohybu stroje by neměl překročit 10% tolerance specifikované zkoušky. [2]

Měření musí být nastaveno tak, aby byla měřena změna relativní polohy mezi součásti nosící nástroj a součásti nosící obrobek, a to ve směru pohybu měřené osy. Poloha měřícího zařízení se musí uvést v kalibračním protokolu. [3]

Měření na stroji je zapotřebí provádět při normálních pracovních podmínkách, proto musí měření předcházet vhodný ohřívací postup. Záznam o ohřívacím postupu je zapotřebí uvést do kalibrovacího protokolu. [3]

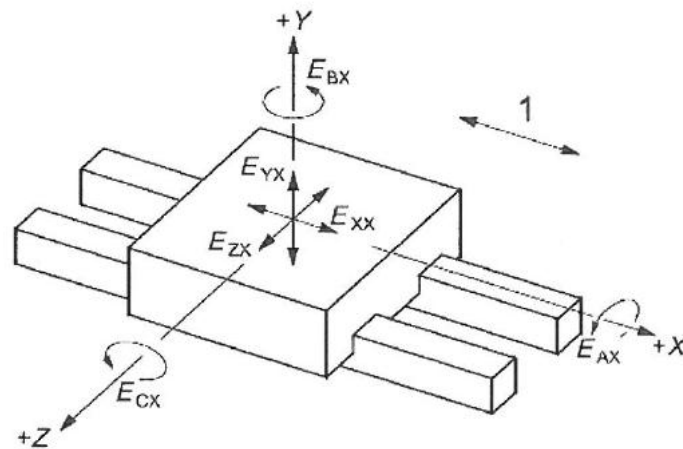
1.3 Tolerance

Jedná se o indikaci dovolené chyby charakteristiky obráběcího stroje a parametru geometrické přesnosti, které budou při kalibraci vyhodnocovány a musí být stanovené v souladu s funkčními požadavky. Při stanovení tolerancí se musí brát v úvahu požadavky na výrobu, montáž a kontrolu. Tolerance se musí vyjádřit v jednotkách, které odpovídají měřeným charakteristikám při zkoušce. [2]

1.4 Lineární chyba pohybu lineární osy

Mohou nastat tři chyby pohybu funkčního bodu pohybující se součásti. (Funkční bod je střed řezného nástroje, kde se dotýká součásti za účelem odběru materiálu.) Jedna podél směru nominálního pohybu a další dvě podél dvou kolmých směrů na tento směr. Lineární chybný pohyb podél směru nominálního pohybu je označen jako chy-

ba pohybu lineárního polohování. Zbývající dvě chyby pohybu jsou označovány jako chyby pohybu přímosti.



Legenda

- 1 určený lineární pohyb v ose X
- E_{AX} úhlová chyba pohybu kolem osy A (valivá)
- E_{BX} úhlová chyba pohybu kolem osy B (vybočovací)
- E_{CX} úhlová chyba pohybu kolem osy C (klopení)
- E_{XX} chyba pohybu lineárního polohování osy X; polohování odchylek osy X
- E_{YX} chyba pohybu přímosti ve směru osy Y
- E_{ZX} chyba pohybu přímosti ve směru osy Z

Obr. 1. Úhlová a lineární chyba pohybu při pohybu v ose x. [2]

1.5 Zkoušky geometrické přesnosti os s lineárním pohybem

U všech obráběcích strojů skládajících se z pohyblivých částí, jejichž účelem je měnit relativní dráhu mezi obrobkem a řezným nástrojem, je zapotřebí provádět zkoušky geometrické přesnosti. Předpokládáme, že těleso je bez deformací vlivem zatížení, jedná se tedy o tuhé těleso. Při lineárním pohybu může dojít k šesti chybám při pohybu. My se budeme zabývat jedním lineárním posunutím (polohování) a zde vzniklou chybou ve směru zamýšlené dráhy. Dále pak mohou vzniknout dvě přímé chyby pohybu ve dvou kolmých směrech na směr dráhy a tři úhlové chyby pohybu, kterými je otáčení okolo tří vzájemně kolmých os. Chyby přímosti a úhlové chyby jsou považovány jen za geometrické chyby. Kdežto chyby lineárního posunutí (polohování) jsou funkcí jak geometrie, tak i charakteristiky pohonného systému osy. [2]

1.5.1 Zkoušky chyby pohonu přímosti

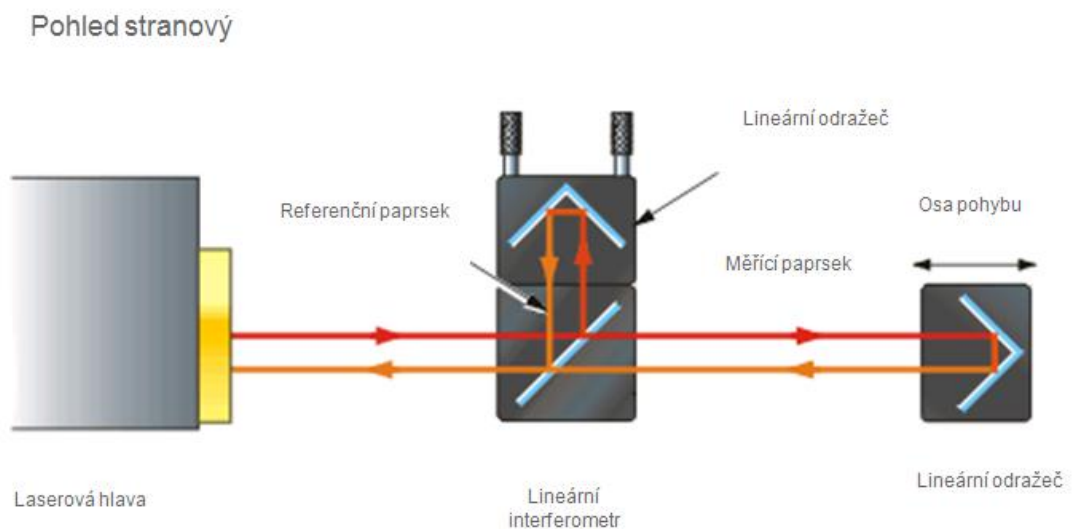
Chyba pohybu přímosti součástí CNC stroje pohybujícího se na lineární trajektorii je přímo ovlivněna přímostí a rovinností povrchu, umístěním a orientací geometrických

vlastností obrobku, který je na stroji obráběn. Metody, kterými se zjišťují chyby, jsou založeny na měření posunutí vzhledem k referenční přímosti. Je míněna referenční čára interferometru (světelný paprsek optického záření). Referenční přímost musí být rovnoběžná se směrem pohybu pohybujících se součástí. Měřicí přístroj vyhodnocuje odchylku vzdálenosti mezi referenční přímostí a trajektorií pohybu (úchylka pohybu) v různých bodech v celé měřené délce. Bude zjištěna relativní odchylka mezi nástrojovou stranou stroje a obrobkovou stranou stroje. [2]

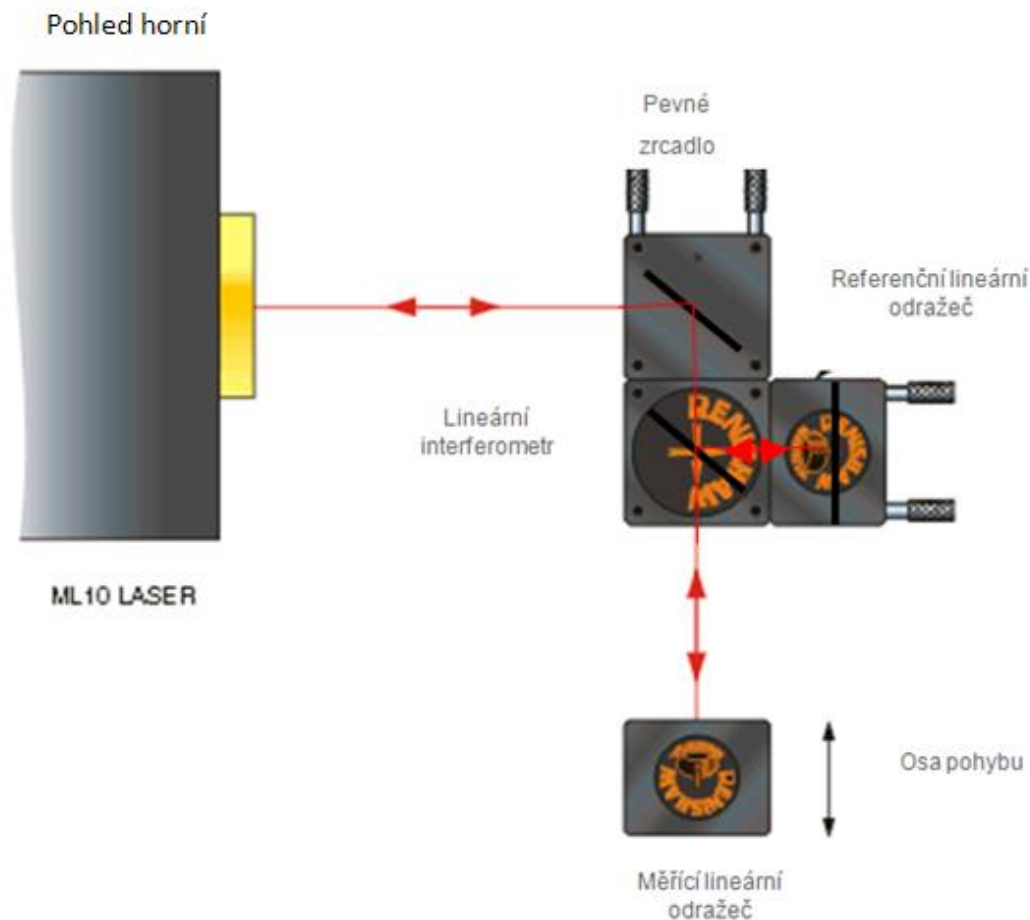
1.5.2 Přístrojové vybavení a uspořádání měření

Snímač lineárního posunutí se musí umístit co nejblíže funkčnímu bodu součásti, která se pohybuje.[2]

Laserový interferometr přímosti se skládá z Wollastonova prismatu a dvouzrcadlového reflektoru přímosti. Referenční přímost měření je definována středovou čarou dvouzrcadlového reflektoru. Změny v poloze jsou tak indikovány interferometrem. Měření se provádí tak, že musí reprezentovat vzájemnou polohu mezi nástrojem a obrobkem. Dvouzrcadlový reflektor je montován na obrobek a Wollastonovo prisma na nástroj.



Obr. 2. Princip lineárních měření pomocí laserového interferometru ve směru osy měření. [5]



Obr. 3. Princip lineárních měření pomocí laserového interferometru v kolmém směru.[5]

Jakýkoliv místní ohyb nám způsobí změnu polohy linky reflektoru. Získané výsledky v takovém případě neodpovídají přímosti, která by byla získána na obráběné součásti. Nejlepších výsledků je možno dosáhnout pevným upevněním reflektoru na podpěru zobrazující tuhý obrobek upnutý ke stolu. [2]

Všechny optické přístroje, jako jsou laserové interferometry, jsou citlivé na změny parametrů vzduchu. Proto je při měření doporučena zkouška driftu.[2]

1.6 Zkoušky chyby pohybu lineárního polohování

Měřicí přístroj musí být nastaven tak, aby měřil vzdálenost posuvu kontrolované součásti stroje. Měří se relativní pohyb mezi nástrojem a pracovní stranou stroje. Pohybující se část musí být umístěna do každé cílové polohy ručně nebo numerickým řízením. Každá hodnota měřené polohy je zaznamenána a z rozdílu hodnot cílo-

vé polohy a měřené hodnoty je vypočítán jako úchylka lineárního polohování. (viz ISO 230-2) [2]

Měření chyby lineárního polohování je ovlivněno umístěním linky měření vlivem úhlové chyby pohybující se části a Abbého přesazením. Což je vzdálenost mezi zadaným bodem měření a referenční linkou měřicího systému. [2]

1.6.1 Laserový interferometr

Při měření chyby pohybu lineárního polohování laserovým interferometrem, je použito retroreflektoru (odražeč) a interferometru. Jeden je namontován na straně nástroje a druhý na straně obrobku. Laserový paprsek vycházející z laserové hlavy musí být co nejvíce rovnoběžný s lineárním pohybem, jinak při nesprávném nastavení se projeví Kosinova chyba. Všechny optiky musí být pevně upevněny ke stroji, aby se eliminovala vibrace a výchylky vlivem akcelerace. Ostatní snímače teploty vzduchu, tlaku a vlhkosti musí být co nejbliž dráze paprsku pro kompenzaci „lomu“ vzduchu. Okolní teplota vzduchu by měla odpovídat 20 °C. Pokud je teplota jiná, musí být zváženi další přispěvatelé k nejistotě při odhadu očekávané přesnosti obráběného dílu.[2]

Postup měření a analýza dat se provádí v souladu s ISO 230-2. [2]

1.6.2 Periodická chyba pohybu lineárního polohování

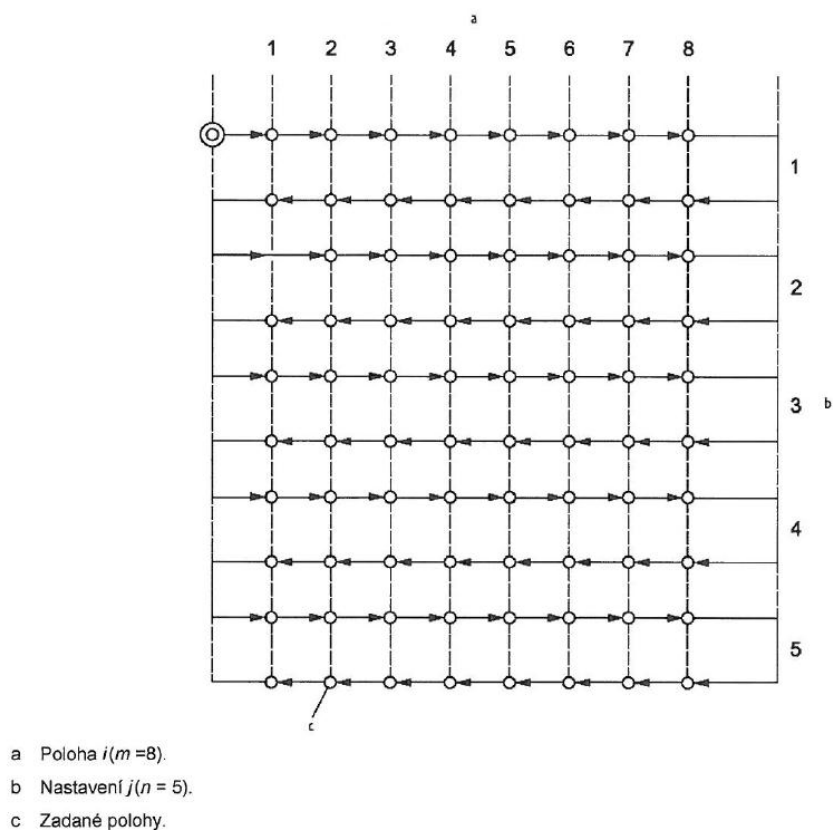
Chyba pohybu polohování saní stroje je periodická v intervalu, který je shodný s periodicitou stupnic stroje. Pro poziční měřítko laserového interferometru je stupnicí vlnová délka světla nebo její zlomek. Sada 21 stejně rozdělených cílových poloh se rozdělí přes dvě periody očekávané periodické úchylky. Jedno jednosměrné měření se provádí ve všech cílových polohách. Periodická lineární polohovací odchylka P je maximální rozsah kontrolovaných úchylek při polohování. [2]

2 NEZBYTNÉ MATEMATICKÉ METODY PRO KONTROLU CNC STROJŮ

Jsou popsány v ČSN ISO 230-2 a metoda je založena na opakovaném měření v každé poloze. Parametry jsou pak definovány a vypočteny. Jejich nejistoty jsou odhadnuty a popsány v příloze A výše uvedené normy. [3]

2.1 Zkoušky v lineárních osách do 2 000 mm

Minimálně musí být zvoleno pět poloh na jeden metr. Stroj musí být naprogramován tak, aby se pohyblivá část stroje pohybovala v ose do zadaných poloh a v těchto polohách zůstala dostatečně dlouho, aby poloha byla změřena a zaznamenána. Měření se provádí při použití běžného cyklu a do každé polohy musí být v obou směrech najeto pětkrát. (viz obrázek 4.) [3]



Obr. 4. Běžný zkušební cyklus. [3]

2.2 Volba zadané polohy

V případě, že souřadnice zadané polohy mohou být voleny libovolně, použije se všeobecný vzorec. [3]

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

2.3 Vyhodnocení výsledků pro lineární osy do 2 000 mm

Pro každou zadanou polohu P_i a pro 5 nastavení polohy ($n=1$) v každém směru se vyhodnotí následující parametry:

Zadaná poloha P_i je poloha, do které je naprogramován pohyb pohybující se části. Index i udává jednu určitou polohu ze všech zadaných poloh. [3]

$$P_i = (i = 1 \text{ až } n) \quad (2)$$

Skutečná poloha P_{ij} je naměřená poloha dosažená pohybující se částí při j -tem nastavení do i -té zadané polohy. [3]

$$P_{ij} = (i = 1 \text{ až } m, j=1 \text{ až } n) \quad (3)$$

Úchylka polohy, polohová úchylka x_{ij} je rozdíl mezi skutečnou a zadanou polohou. [3]

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (4)$$

Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze \bar{x}_1 je aritmetický průměr polohových úchylek při n polohách v jednom směru a druhém směru $\uparrow\downarrow$. [3]

$$\bar{x}_1 \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (5)$$

$$\bar{x}_1 \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (6)$$

Průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze \bar{x}_1 je aritmetický průměr jednosměrných polohových úchylek $\bar{x}_i \uparrow$, a $\bar{x}_i \downarrow$ zjištěných při najíždění do polohy. [3]

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}_1 \uparrow - \bar{x}_1 \downarrow}{2} \quad (7)$$

Necitlivost v poloze B_i je rozdíl mezi průměrnými jednosměrnými polohovými úchytkami při najíždění do polohy v obou směrech. [3]

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (8)$$

Necitlivost v ose B je největší hodnota z hodnot necitlivosti v poloze. [3]

$$B = \max |B_i| \quad (9)$$

Průměrná necitlivost v ose \bar{B} je aritmetický průměr hodnot necitlivosti v ose. [3]

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n B_i \quad (10)$$

Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze s_i při sérii n najetí do polohy v jednom a druhém směru $\uparrow\downarrow$. [3]

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_j \uparrow)^2} \quad (11)$$

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_j \downarrow)^2} \quad (12)$$

Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze je rozsah odvozený z odhadu jednosměrné opakovatelnosti při rozšíření o koeficient 2 v jednom a druhém směru $\uparrow\downarrow$. [3]

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \quad (13)$$

$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (14)$$

Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose R je největší hodnota opakovatelnosti v kterékoliv poloze ve směru osy v jednom a druhém směru $\uparrow\downarrow$. [3]

$$R \uparrow = \max. [R_i \uparrow] \quad (15)$$

$$R \downarrow = \max. [R_i \downarrow] \quad (16)$$

Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze R_i [3]

$$R_i = \max. [2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (17)$$

Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose R je největší hodnota opakovatelnosti nastavení polohy v kterékoliv poloze podél nebo okolo dané osy. [3]

$$R = \max. [R_i] \quad (18)$$

Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose E je rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednosměrných polohových úchylek při nastavování polohy v jednom směru nebo v jakékoliv poloze, které byly zjištěny v kterékoliv poloze podél nebo okolo dané osy v jednom i druhém směru $\uparrow\downarrow$. [3]

$$E \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow] \quad (19)$$

$$E \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow] \quad (20)$$

Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose E je rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednosměrných polohových úchylek při nastavování polohy v obou směrech, nebo mezi těmi, které byly zjištěny v kterékoliv poloze podél nebo okolo dané osy. [3]

$$E = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (21)$$

Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose M je rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou průměrných dvousměrných polohových úchylek \bar{x}_i v kterékoliv poloze podél nebo okolo dané osy. [3]

$$M = \max. [\bar{x}_i] - \min. [\bar{x}_i] \quad (22)$$

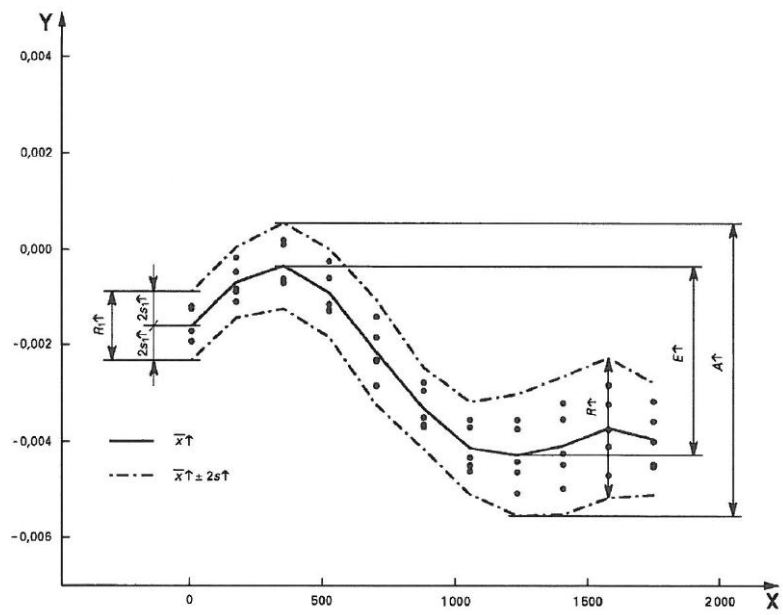
Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose A je rozsah odvozený ze spojení jednosměrných systematických úchylek a odhadu pro opakovatelnost při jednosměrném nastavení polohy při použití koeficientu rozšíření 2 v jednom i v druhém směru $\uparrow\downarrow$. [3]

$$A \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow] \quad (23)$$

$$A \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow] \quad (24)$$

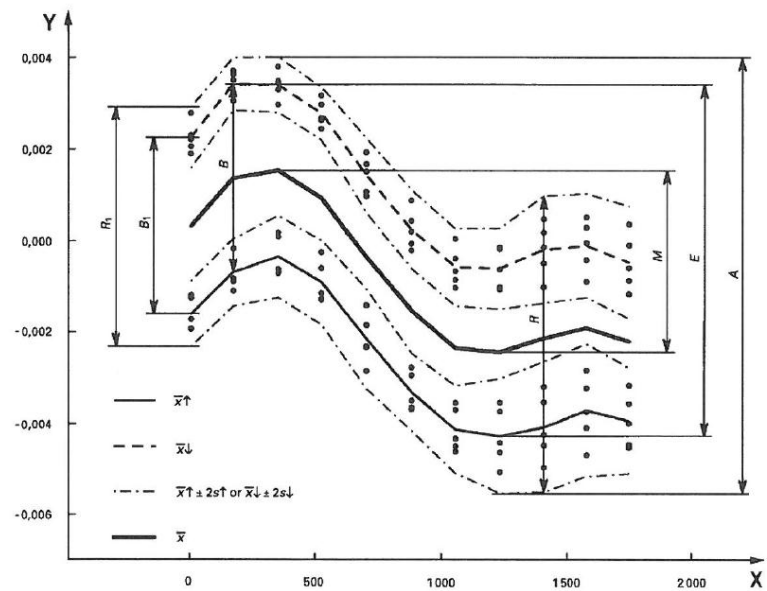
Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose A je rozsah odvozený ze spojení dvousměrných systematických úchylek a odhadu pro opakovatelnost při dvousměrném nastavení polohy při použití koeficientu rozšíření 2. [3]

$$A = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow] \quad (25)$$



Legenda
 X poloha, mm
 Y úchyłka, mm

Obr. 5. Jednosměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy. [3]

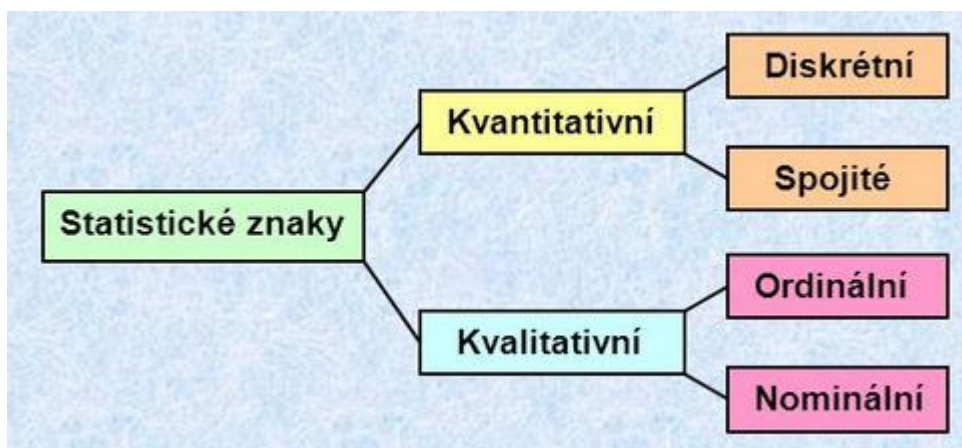


Legenda
 X poloha, mm
 Y úchyłka, mm

Obr. 6. Dvousměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy. [3]

3 ZÁKLADY STATISTIKY VHODNÉ PRO CNC

Statistika se zabývá zkoumáním **hromadných jevů a procesů**. Jevy a procesy se vyskytují u velkého množství **prvků**. Ty prvky nazýváme **statistickými jednotkami**. Vlastnosti statistických jednotek vyjadřují **statistické znaky**. Lze-li varianty znaků vyjádřit číselně, jedná se pak o znaky **kvantitativní** (počet členů domácnosti, spotřeba elektřiny, výše nájemného, atd.). Můžeme-li je vyjádřit slovně, jedná se o znaky **kvalitativní** (druh vlastnictví bytu, místo trvalého pobytu). [4] Kvantitativní znaky dělíme na **diskrétní** neboli nespojité (jedná se jen o určité hodnoty, digitální výstupy - naměřené hodnoty pomocí interferometru) a **spojité** (všechny hodnoty v čase, analogové výstupy). Kvalitativní znaky dále dělíme na **nominální** neboli jmenné, nelze je setřídít (barva, pohlaví) a **ordinální** neboli jmenné, lze je setřídít (měsíc, den, rok).



Obr. 7. Rozdělení statistických znaků. [4]

Množinu všech statistických jednotek, u nichž zkoumáme příslušné statistické znaky, nazýváme **statistickým souborem**. Statistický soubor všech jednotek, který je vlastním předmětem sledování, je nazýván **základním souborem**. Tento soubor je ale zpravidla velmi velký, proto se velmi často z úsporných a časových důvodů provádí výběrové šetření, kdy ze základního souboru jsou vybrány jen některé jednotky. Takto získaný soubor se nazývá **výběrový soubor**. Výsledky, které získáme z výběrového souboru, nám pak slouží k provádění úsudku o základním souboru. [4]

Na volbě statistických jednotek a vhodného výběru statistických znaků závisí úspěch a výsledky zpracovávaných statistik. Proto je potřebné správnému vymezení statistického souboru, volbě statistických jednotek a statistickému znaku věnovat náležitou pozornost. Statistická jednotka i zjišťované znaky musí být přesně vymezeny z hlediska obsahu zjišťovaného znaku. [4]

3.1 Kvantitativní proměnné

Získané údaje o statistických znacích se snažíme vyjádřit pomocí koncentrované formy určitých charakteristik, které v dostatečné přesnosti charakterizují základní rysy zkoumaného souboru. Při popisu statistického souboru nás zajímá především **míra polohy** rozdělení četností a **míra variability** četností. Míra polohy se vyjadřuje pomocí různých druhů středních hodnot. Počítají se střední hodnoty ze všech jednotek statistického souboru. [4]

3.2 Míra polohy

Zcela převažujícím druhem průměru, který je uplatňován při řešení téměř všech úloh je **průměr aritmetický**. Ze zjištěných hodnot x_1, x_2, \dots, x_n , které nejsou uspořádány, kde n je počet proměnných, lze prostý aritmetický průměr vypočítat jako:

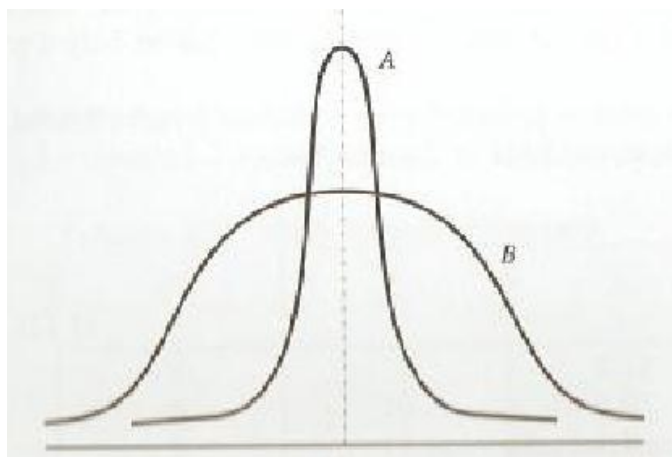
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (26)$$

Při použití aritmetického průměru je vhodné provést analýzu, zda aritmetický průměr není ovlivněn extrémně odlišnými hodnotami malého počtu. [4]

Při kalibrování CNC frézky bude aritmetický průměr využit u **průměrné jednostranné polohové úchytky v poloze \bar{x}_1** .

3.3 Míra variability

Někdy se setkáváme se situací, že míra polohy, tedy aritmetický průměr je stejný, ale rozmístění hodnot je rozdílné. (viz obrázek 8.) Jedná se o variační rozpětí R . [4]



Obr. 8. Rozdělení lišící se variabilitou. [4]

Měření variability má význam při posuzování vypovídající schopnosti aritmetického průměru. Obecně lze říci, že vypovídající schopnost aritmetického průměru je tím větší, čím je variabilita sledovaného znaku menší. V případě měř variability jde o jednu z nejdůležitějších charakteristik ve statistice. Nejznámější a nejvyužívanější mírou variability je **rozptyl** s_x^2 . Je definován jako aritmetický průměr ze čtverců odchylek jednotlivých hodnot od průměru. Je počítáno se všemi hodnotami z neuspořádaného souboru. [5]

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (27)$$

Rozptyl sám o sobě není interpretovatelnou veličinou, protože výsledek je ve čtvercích měrných jednotek. Přednost se proto dává druhé odmocnině rozptylu, tzv. **směrodatné odchylce**, která je vždy kladná. [5]

$$s_x = \sqrt{s_x^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (28)$$

Při kalibrování CNC frézky bude aritmetický průměr využit při **odhadu jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze s_i** . [5]

3.3.1 Míra relativní variability (variační koeficient)

Abychom mohli srovnat variabilitu statistického znaku u dvou a více souborů, u kterých se liší úroveň znaků, nebo variabilitu znaků souborů s různými měrnými jednotkami, v uvedených případech použijeme relativní charakteristiku variability. Nejvýznamnější mírou variability je **variační koeficient**. Je definován jako poměr směrodatné odchylky a aritmetického průměru. [4]

$$V_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (29)$$

Tento koeficient vliv úrovně nebo vliv měrné jednotky vylučuje tím, že charakteristiky absolutní variability dává do poměru k průměru. [4]

Variační koeficient je jeden z nejdůležitějších koeficientů ve statistice a udává nám, do jaké míry můžeme důvěřovat aritmetickému průměru. Čím menší je variační koeficient, tím důvěryhodnější je hodnota aritmetického průměru. Jinak řečeno, variační

koeficient nám udává, kolik procent z aritmetického průměru tvoří směrodatná odchylka.

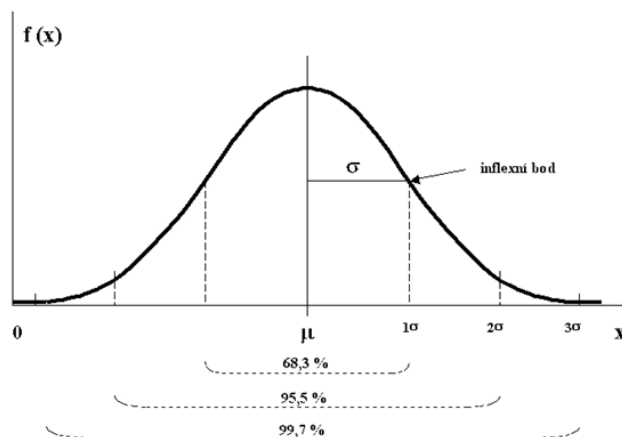
3.4 Teorie pravděpodobnosti a opakovatelnosti

Pokud při měření odstraníme systematické chyby, tak nám zůstanou jen chyby náhodné. Náhodné chyby měření jsou způsobeny velkým počtem neznámých a vzájemně nezávislých příčin. Proto bývá normální rozdělení označováno jako zákon chyb. O naměřených výsledcích pak mluvíme jako o normálním (Gaussově) rozdělení. [4]

Normální rozdělení má vlastnosti, které lze využívat při popisu chování náhodné veličiny:

- v rozmezí $\pm 6\sigma$ od střední hodnoty se nachází 99,8 % všech hodnot měřené veličiny z 1000 hodnot měřené veličiny
- v rozmezí $\pm 3\sigma$ od střední hodnoty se nachází 99,73% všech hodnot měřené veličiny
- v rozmezí $\pm 2\sigma$ od střední hodnoty se nachází 95,45 % všech hodnot měřené veličiny. **Této skutečnosti využijeme u jednosměrné a dvousměrné opakovatelnosti nastavení polohy v poloze.**
- v rozmezí $\pm 1\sigma$ od střední hodnoty se nachází 68,27 % všech hodnot měřené veličiny [5]

Čím užší je Gaussova křivka, tím přesnější je opakovatelnost a kvalita výsledků měření.



Obr. 9. Gaussova křivka pravděpodobnosti. [6]

3.5 Testování hypotéz

Provádí se u výběrových souborů. Tento výběr pak použijeme k rozhodnutí o tom, zda vyslovená hypotéza je správná nebo nesprávná. Tento proces ověřování správnosti nebo nesprávnosti hypotézy pomocí výsledků, získaných náhodným výběrem, se nazývá testování hypotéz. [4]

Předpoklad, který vyslovíme o určité charakteristice či tvaru rozdělení v základním souboru, nazýváme **nulovou hypotézou**. Někdy též testovanou hypotézou a značíme ji H_0 . Hypotézu o konkrétní hodnotě průměru v základním souboru bychom napsali [4]

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad (30)$$

Proti nulové hypotéze stavíme **hypotézu alternativní** H_A , která nějakým způsobem popírá konstatování formulované nulovou hypotézou. [4]

$$H_A: \mu \neq \mu_0 \quad (31)$$

$$H_A: \mu > \mu_0 \quad (32)$$

$$H_A: \mu < \mu_0 \quad (33)$$

V případě za a) popírá H_A platnost H_0 bez další specifikace oboru hodnot parametru μ . Tedy hodnota parametru μ je jiná, než udává H_0 . Takto definovanou hypotézu nazýváme **dvoustrannou hypotézou** a test hypotézy **dvoustranným testem**. [4]

V případě b) a c) popírá H_A platnost H_0 a zároveň vymezuje jednostranně obor hodnot parametrů v základním souboru. Parametry jsou buď větší, nebo menší než hodnota daná hypotézou H_0 . Takto definovaná hypotéza se nazývá **jednostrannou hypotézou** a test hypotézy **jednostranným testem**. [4]

Vzhledem k tomu, že při testování hypotézy jde o úsudek prováděný z údajů získaných náhodným výběrem, můžeme se ve svých úvahách dopustit i chybných závěrů. Například se nám stane, že zamítneme testovanou hypotézu H_0 , ačkoliv ve skutečnosti platí. V tomto případě se dopustíme tzv. **chyby prvního druhu**. Pravděpodobnost, že se dopustíme této chyby, pak značíme α . (tzv. hladina významnosti). Druhá možnost chybného závěru spočívá v tom, že přijímáme nulovou hypotézu H_0 , ačkoliv ve skutečnosti platí H_A . V tomto případě se dopustíme tzv. **chyby druhého druhu**. Pravděpodobnost, že se dopustíme této chyby, pak značíme β . [4]

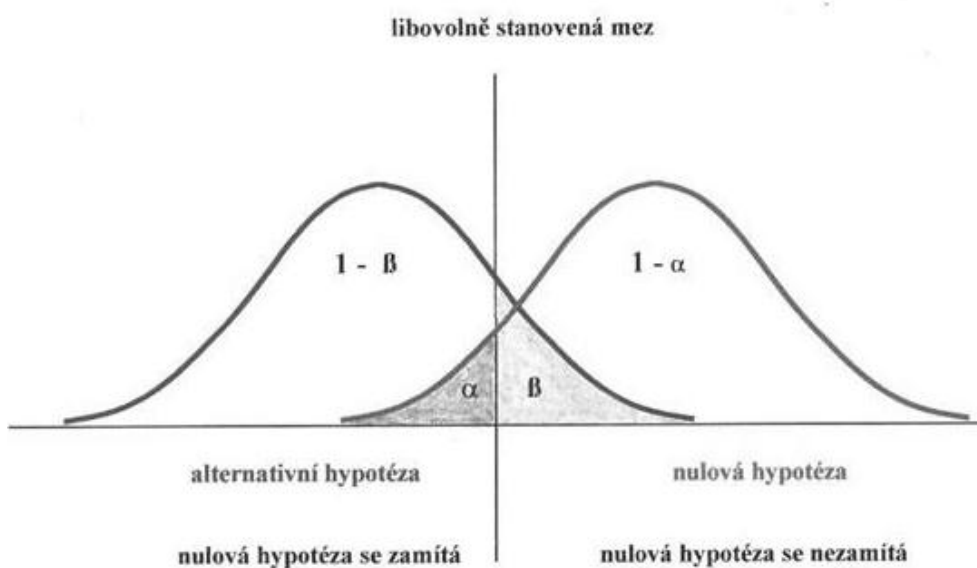
		Výsledek testu	
		Nezamítáme H_0	Zamítáme H_0
Skutečnost	Platí H_0	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí: $1 - \alpha$ (spolehlivost)	Chyba I. druhu Pravděpodobnost rozhodnutí: α (hladina významnosti)
	Platí H_A	Chyba II. druhu Pravděpodobnost rozhodnutí: β	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí: $1 - \beta$ (síla testu)

Obr. 10. Chyby I. a II. druhu a jejich pravděpodobnosti. [6]

Pravděpodobnost $1 - \beta$ vyjadřuje **sílu testu**. Jde o pravděpodobnost, že správně zamítáme nulovou hypotézu H_0 , platí-li alternativní hypotéza H_A . Jinými slovy, udává pravděpodobnost, že se nedopustíme chyby II. druhu. [4]

Je pochopitelné, že usilujeme o to, aby pravděpodobnost chyby I. a II. druhu byla minimální. Lze dokázat, že pravděpodobnost chyby 1. druhu má za následek zvýšení pravděpodobnosti chyby II. druhu a naopak. Ideální cestou, jak snížit pravděpodobnost β a zachovat pravděpodobnost α , je zvýšení rozsahu výběru n . [5]

Tyto testy se vesměs opírají o klasický přístup spočívající v tom, že zvolíme pevnou pravděpodobnost chyby I. druhu, tzv. **hladinu významnosti α** ve výši nejčastěji 5%. [4]



Obr. 11. Vzájemný vztah mezi chybou 1. druhu α a chybou 2. druhu β . [6]

3.5.1 Testovací procedura

Testovací postup je odvozen tak, aby při dané hladině významnosti zajistil minimální pravděpodobnost chyby II. druhu, tedy sílu testu.

1. Formulujeme nulovou a alternativní hypotézu.
2. Zvolíme hladinu významnosti, a tak dostaneme kritickou hodnotu.
3. Z dat vypočítáme testovací kritérium.
4. Porovnáme testovací kritérium s kritickou hodnotou. Pokud je hodnota testovacího kritéria větší než hodnota kritická, pak zamítáme nulovou hypotézu. [4]

3.5.2 T – test

T-test rozhoduje o shodě dvou středních hodnot. Tento test patří mezi jeden z nejpoužívanějších v průmyslových aplikacích i v různých marketingových průzkumech. Porovnáme zde dva výběry. Na základě těchto porovnání pak provádíme úsudek o dvou základních souborech, z nichž byly výběry provedeny. [6]

Předpokládáme, že máme dva normálně rozdělené soubory se středními hodnotami μ_1 a μ_2

a rozptyly σ_1^2 a σ_2^2 . Z těchto základních souborů jsme provedli náhodné výběry o rozsahu n_1 a n_2 a stanovili výběrové průměry \bar{x}_1 a \bar{x}_2 , pak:

Nulová a alternativní hypotéza

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ resp. $\mu_1 - \mu_2 = 0$

- a) $H_A: \mu_1 < \mu_2$ resp. $\mu_1 - \mu_2 < 0$ Volíme, pokud je \bar{x}_1 jednoznačně nižší než \bar{x}_2
- b) $H_A: \mu_1 > \mu_2$ resp. $\mu_1 - \mu_2 > 0$ Volíme, pokud je \bar{x}_1 jednoznačně větší než \bar{x}_2
- c) $H_A: \mu_1 \neq \mu_2$ resp. $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ Volíme, pokud je \bar{x}_1 v blízkosti \bar{x}_2 [6]

Hladina významnosti

Volíme hladinu významnosti α (0,05 nebo 0,01)

Testovací kritérium

Pro testování rozdílu středních hodnot použijeme nepárový t -test pro různé rozptyly:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1 - 1} + \frac{s_2^2}{n_2 - 1}}} \quad (34)$$

Kritická hodnota a hladina významnosti

Vypočtenou statistiku t porovnáme s tabulkovou kritickou hodnotou $t_{1-\alpha/2}(v)$, nalezenou ve statistických tabulkách podle daného v a zvolené hladiny významnosti α (0,05 nebo 0,01).

Závěr

Je-li $t \leq t_{1-\alpha/2}(v)$: Nezamítáme nulovou hypotézu H_0 , tzn., že střední hodnota pokusného souboru se neliší od střední hodnoty kontrolního souboru.

Závěr: aplikovaný pokusný zásah byl neúčinný, protože nebyla ovlivněna střední hodnota pokusného souboru vlivem aplikace zásahu ve srovnání se střední hodnotou kontrolního souboru ($p > 0,05$).

Je-li $t > t_{1-\alpha/2}(v)$: Zamítáme nulovou hypotézu H_0 , tzn., že střední hodnota pokusného souboru se liší od střední hodnoty kontrolního souboru.

Závěr: pokusný zásah byl účinný, protože způsobil změnu střední hodnoty u pokusného souboru vlivem aplikace pokusného zásahu ve srovnání se střední hodnotou kontrolního souboru ($p < 0,05$ resp. $p < 0,01$). [7]

3.5.3 F – test

F-testem rozhodujeme o rozdílech dvou rozptylů (σ^2). Je důležitý i pro porovnání přesnosti dvou metod měření. Výpočet F-testu vychází z dat dvou výběrových souborů, které jsou předmětem srovnávání - obvykle pokusný a kontrolní soubor. O každém z těchto souborů předpokládáme, že pochází z populace s Gaussovým normálním rozdělením s parametry μ a σ^2 , pak:

Nulová a alternativní hypotéza

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

Hladina významnosti

Volíme hladinu významnosti α (0,05 nebo 0,01)

Testovací kritérium

$$F = \frac{s_1^2 \text{ největší z rozptylů}}{s_2^2 \text{ nejmenší z rozptylů}} \quad (35)$$

Kritická hodnota a hladina významnosti

Vypočtenou statistiku F porovnáme s tabulkovou kritickou hodnotou, nalezenou ve statistických tabulkách, podle daného v a zvolené hladiny významnosti α (0,05 nebo 0,01).

Závěr

Je-li $F > F_{\text{krit.}}$: zamítáme nulovou hypotézu $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$.

Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší (tj. výběry pocházejí ze dvou různých základních souborů s rozdílnými rozptyly σ_1^2 a σ_2^2).

($p < 0,05$ (příp. $p < 0,01$ podle zvolené hladiny významnosti α)).

Je-li $F < F_{\text{krit.}}$: nulovou hypotézu H_0 nemůžeme zamítnout.

Rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší (tj. pravděpodobně výběry pochází ze stejného základního souboru se stejným rozptylem σ^2). ($p > 0,05$). [8]

3.5.4 Grubbsův test extrémních odchylek

Grubbsův test je možno použít za předpokladu normálního rozdělení pravděpodobnosti sledované náhodné veličiny. Na základě vypočteného testovacího kritéria se vyloučí extrémní hodnoty. Jedná se o hrubé chyby, které je nutno ze souboru vyloučit.

Postup:

1. Seřadíme hodnoty výběrového souboru do vzestupné variační řady.
2. Vypočteme aritmetický průměr (\bar{x}) a směrodatnou odchylku (s) ze všech hodnot souboru.
3. Stanovíme nulovou H_0 a alternativní hypotézu H_A . H_0 vznikla náhodným procesem, H_A vznikla jinak než náhodným procesem (hrubá chyba).
4. Zvolíme hladinu významnosti α (0,05 nebo 0,01).
5. Vypočítáme testovací kritérium pro první (případně poslední n -tou) hodnotu variační řady:

$$T_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s} \quad (36)$$

$$T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s} \quad (37)$$

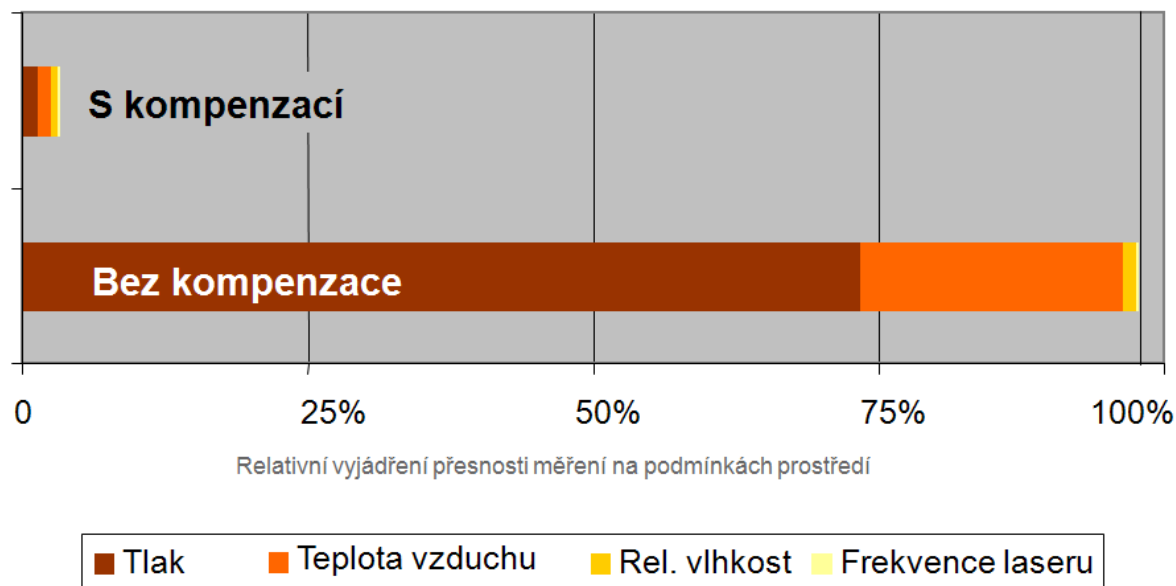
6. Vypočtené testovací kritérium porovnáme s tabulkovou kritickou hodnotou pro příslušné n výběrového souboru a zvolenou α pro Grubbsův test.

Pokud $T_{1(n,\alpha)} > T_{\text{krit.}}$ - první (případně poslední) hodnotu variační řady vyloučíme ze souboru a musíme vypočítat nový průměr \bar{x} a směrodatnou odchylku s již bez této extrémní hodnoty.

Pokud $T_{1(n,\alpha)} \leq T_{\text{krit.}}$ - první (poslední) hodnota variační řady patří do souboru a vyloučit ji nemůžeme (není extrémně odlehlou hodnotou). [6]

4 NEJISTOTY A CHYBY MĚŘENÍ

Mezi faktory ovlivňující nejistoty měření patří měřicí zařízení, přesazení měřicího zařízení k ose zkoušeného stroje, nejistota vlivem kompenzace teploty stroje, pokud se měří při teplotách jiných než 20 °C a kolísání chyby vlivem environmentu. [3]



Obr. 12. Měření s kompenzací a bez kompenzace. [5]

4.1 Nejistota měření vlivem měřicího zařízení

Je doporučeno použít kalibrační měřicí přístroj. Pokud kalibrační protokol uvádí maximální nejistotu: [3]

4.1.1 Kalibrační protokol s nejistotou v μm

$$U_{DEVIACE} = U_{CALIBRATION} \quad (38)$$

kde

$U_{DEVIACE}$ je nejistota vlivem měřicího zařízení,

$U_{CALIBRATION}$ je nejistota kalibrace podle kalibračního certifikátu v mikrometrech s faktorem krytí $k=2$. [3]

4.1.2 Kalibrační protokol s nejistotou v $\mu\text{m}/\text{m}$

$$U_{DEVIACE} = U_{CALIBRATION} * L \quad (39)$$

kde: L je měřená délka v metrech (m).[3]

4.1.3 Bez kalibračního protokolu

A výrobce uvádí rozsah chyby v $\mu\text{m/m}$.

$$U_{DEVIACE} = 0,6 * R_{DEVIZE} * L \quad (40)$$

kde

R_{DEVIZE} je rozsah chyby určené výrobcem zařízení v dílech na milion v (ppm) nebo v mikrometrech na metr ($\mu\text{m/m}$).[3]

4.2 Nejistota měření vlivem přesazení měřicího zařízení k ose zkoušeného stroje

Měřicí zařízení se musí ustavit rovnoběžně s osou zkoušeného stroje, jinak je měření zatíženo chybou. Vliv většinou nebývá sekundární, pokud je ovšem přesazení větší než 1mm a osa zkoušeného stroje je menší než 300 mm, pak může být vliv přesazení významný. U laserového interferometru zajistíme přesazení v mezích 1 mm, když pohyb odráženého paprsku je nastaven dle doporučení výrobce. Pokud je ustaveno tak, aby bylo dosaženo dostatečné intenzity odráženého paprsku, pak může být přesazení až 4 mm, proto se to nedoporučuje. [3]

$$U_{MISALIGNMENT} = \frac{0,3 * R_{MISALIGNMENT}^2}{L} \quad (41)$$

kde

$U_{MISALIGNMENT}$ (mm)

$R_{MISALIGNMENT}$ je přesazení v milimetrech (mm)

L je měřená délka v metrech (m) [3]

4.3 Nejistota měření vlivem měření teploty

Výběr měřicího bodu je důležitý pro měření teploty. Doporučuje se, aby se jednalo o bod upínacího zařízení obrobku. Bod měření musí být uveden ve zkušebním protokolu. Mezi další vlivy patří upevnění teplotního snímače, který se musí pevně upevnit, a nejistota měření teplotního snímače. Tyto vlivy jsou vyjádřeny jako možný rozsah chyb měření teploty. Většina laserových interferometrů automaticky kompenzuje

roztažnost zařízení (tj. vliv teploty vzduchu) a zahrnuje tuto nejistotu do celkové deklarované nejistoty měření. V tomto případě bude nejistota teploty vlivem měření teploty $U_{M,DEVICE}$ rovna nule. Hlavním faktorem nejistoty měření délky zůstane nejistota měření vlivem měření teploty stroje $U_{M,MASCHINE TOOL}$ v (μm) [3]

$$U_{M,MASCHINE TOLL} = 0,6 * \alpha * L * R(\theta) \quad (42)$$

kde

α je koeficient roztažnosti stroje ve vztahu ke zkoušené ose v [$\mu\text{m}/(\text{m} * ^\circ\text{C})$]

L je měřená délka v metrech (m)

$R(\theta)$ je možný rozsah teploty vlivem nejistoty měření [3]

4.4 Nejistota měření vlivem koeficientu roztažnosti

V praxi se koeficient roztažnosti měřicího zařízení a stroje zjistí z příručky nebo návodu k použití. Skutečný koeficient roztažnosti se ale od těchto údajů může lišit. Rozdíl se uvádí v mikrometrech na metr a stupeň Celsia [$\mu\text{m}/(\text{m} * ^\circ\text{C})$]. Vyhodnocuje se nejistota vzniklá vlivem možné chyby v koeficientu roztažnosti stroje a měřicího zařízení. [3]

4.4.1 Nejistota měření vlivem koeficientu roztažnosti stroje

$$U_{E,MASCHINE TOLL} = 0,6 * \Delta T * L * R(\alpha) \quad (43)$$

kde

ΔT je rozdíl skutečné teploty T od teploty 20 °C

L je měřená délka v metrech (m)

$R(\alpha)$ je rozsah chyby koeficientu roztažnosti stroje v [$\mu\text{m}/(\text{m} * ^\circ\text{C})$] [3]

4.4.2 Nejistota měření vlivem koeficientu roztažnosti měřicího zařízení

$$U_{E,DEVICE} = 0,6 * \Delta T * L * R(\alpha) \quad (44)$$

kde

ΔT je rozdíl skutečné teploty T od teploty 20 °C

L je měřená délka v metrech (m)

$R(\alpha)$ je rozsah chyby koeficientu roztažnosti stroje v $[\mu\text{m}/(\text{m} * ^\circ\text{C})]$ [3]

4.5 Nejistota měření vlivem kolísání chyby environmentu

Provádí se pomocí zkoušky driftu. Než zahájíme měření délky, osa stroje se pohne do extrémní polohy. Během času, který je přibližně zapotřebí pro měření délky, se zaznamenává aktuální poloha odečtená na měřicím zařízení. Rozsah odečtené hodnoty E_{EV} je zbývající chyba kolísání environmentu, která je použita pro odhad odpovídající nejistoty. [3]

$$U_{EVE} = 0,6 * E_{EV} \quad (45)$$

kde

U_{EVE} je nejistota měření vlivem kolísání environmentu v (μm)

E_{EV} je rozsah zjištěný při zkoušce driftu v (μm) [3]

4.6 Odhad nejistoty parametrů

Pro lineární osy do rozsahu 2 000 mm se předpokládá pět posuvů nahoru a pět posuvů dolů. V úvahu se berou následující faktory k nejistotě měření: měřicí zařízení, přesazení měřicího zařízení vzhledem ke zkoušené ose stroje, kolísání environmentu, teplota a koeficient teplotní roztažnosti měření stroje a měřicího zařízení. [3]

4.6.1 Odhad nejistoty pro jednosměrnou opakovatelnost

$$U(R \uparrow, R \downarrow) = 2 * U_{EVE} \quad (46)$$

kde

$U(R \uparrow, R \downarrow)$ je nejistota měření jednosměrné opakovatelnosti $k=2$ pro 5 měřicích zdvihů v (μm)

U_{EVE} je nejistota měření vlivem kolísání environmentu v (μm) [3]

4.6.2 Odhad nejistoty pro necitlivost

Pro osy do 2 000 mm.

$$U(B) = 0,9 * U_{EVE} \quad (47)$$

kde

$U(B)$ je nejistota měření necitlivosti $k=2$ pro 5 měřících zdvihů v (μm)

U_{EVE} je nejistota měření vlivem kolísání environmentu v (μm) [3]

4.7 Nejistota dvousměrné opakovatelnosti

$$U(R) = 2,2 * U_{EVE} \quad (48)$$

kde

$U(R)$ je nejistota měření dvousměrné opakovatelnosti $k=2$ pro 5 měřících zdvihů v (μm)

U_{EVE} je nejistota měření vlivem kolísání environmentu v (μm) [3]

4.8 Nejistota systematických úchylek

Pro osy do 2 000 mm.

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow) \quad (49)$$

$$= \sqrt{U_{D.+}^2 + U_{MIS.+}^2 + U_{M.M.T.+}^2 + U_{M.D.+}^2 + U_{E.M.T.+}^2 + U_{E.D.+}^2 + \frac{1}{5} U_{EVE}^2}$$

$$U(M) \quad (50)$$

$$= \sqrt{U_{D.+}^2 + U_{MIS.+}^2 + U_{M.M.T.+}^2 + U_{M.D.+}^2 + U_{E.M.T.+}^2 + U_{E.D.+}^2 + \frac{1}{10} U_{EVE}^2}$$

kde

$U(M)$ je nejistota měření pro průměrnou úchylku polohy M $k=2$ pro 5 měřících zdvihů v (μm) [3]

4.9 Nejistota přesnosti polohování

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow) = \sqrt{U(E)^2 + U(R \uparrow, R \downarrow)^2} \quad (51)$$

kde

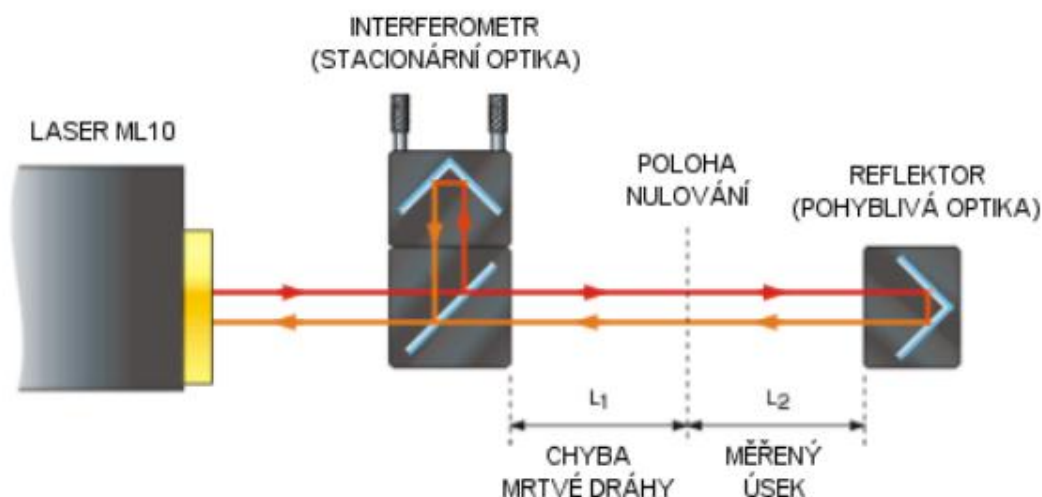
$U(A, A \uparrow, A \downarrow)$ je nejistota měření přesnosti polohování $k=2$ pro 5 měřících zdvihů v (μm) [3]

4.10 Chyby vzniklé v důsledku chybně nastaveného interferometru

Při měření délek pomocí interferometru mohou nastat tři chyby.

4.10.1 Chyba vznikající mrtvou dráhou

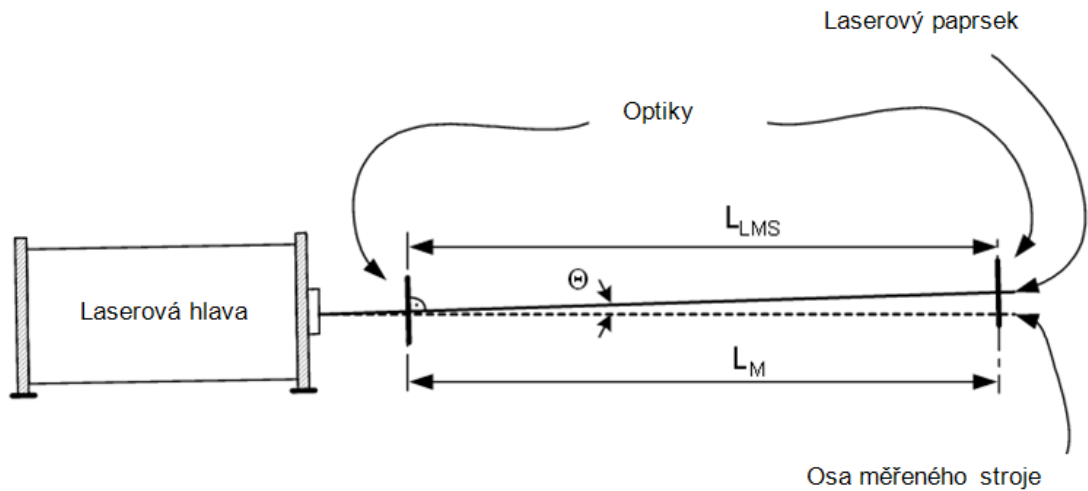
Chyba mrtvé dráhy při měření pomocí interferometru vzdálenosti L_2 je závislá na vzdálenosti mezi dvěma optickými prvky při nulování systému. Pokud se nemění vzdálenost mezi interferometrem a reflektorem a mění se podmínky prostředí v okolí laserového paprsku, pak vlnová délka (ve vzduchu) se bude měnit podél celé dráhy ($L_1 + L_2$), ale laserový měřicí systém ji bude kompenzovat pouze podél dráhy L_2 . Na dráze L_1 nebude chyba mrtvé dráhy kompenzována. Pokud se stacionární a pohyblivá optika dotýkají v době nulování, bude se jednat o chybu zanedbatelnou. [9]



Obr. 13. Chyba mrtvé dráhy. [10]

4.10.2 Kosinova chyba

Pokud laserový paprsek není rovnoběžný s osou měřeného stroje, dojde k rozdílu mezi skutečnou a měřenou vzdáleností. Jedná se o chybu špatného seřízení a nazývá se Kosinova chyba. Její velikost závisí na velikosti úhlu mezi laserovým paprskem a osou stroje. Čím je větší úhel, tím je chyba větší. Při chybném nastavení optického paprsku je vzdálenost L_{LMS} menší než skutečná vzdálenost L_M . [11]

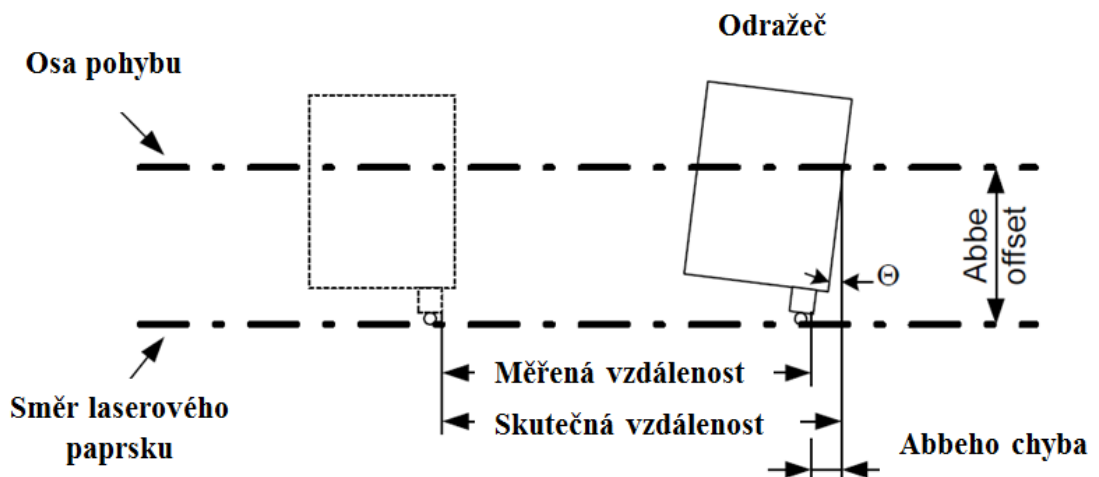


Obr. 14. Kosinova chyba. [11]

4.10.3 Abbého chyba

Abbého chyba nastane, když se měřená část nepohybuje perfektně přímo po ose měření a když se vlivem úhlových pohybů natočí pohyblivý odražeč. Chyba natočení pohyblivého odražeče je tím větší, čím větší je vzdálenost mezi osou měřeného stroje a osou měřicího paprsku. Tato vzdálenost se nazývá Abbého odsazení (offset).

Abychom minimalizovali Abbého chybu, je důležité ustavení optické cesty laserinterferometru co nejblíže ose pohybu měřeného stroje. [11]



Obr. 15. Abbého chyba. [11]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POPIS MĚŘENÉ CNC FRÉZKY FC 16 CNC/PC

Jedná se o vertikální a horizontální univerzální frézku. CNC frézky FC 16 najdou uplatnění hlavně při výuce programování. Frézka je vhodná hlavně pro frézování plastů, dřeva a hliníku.



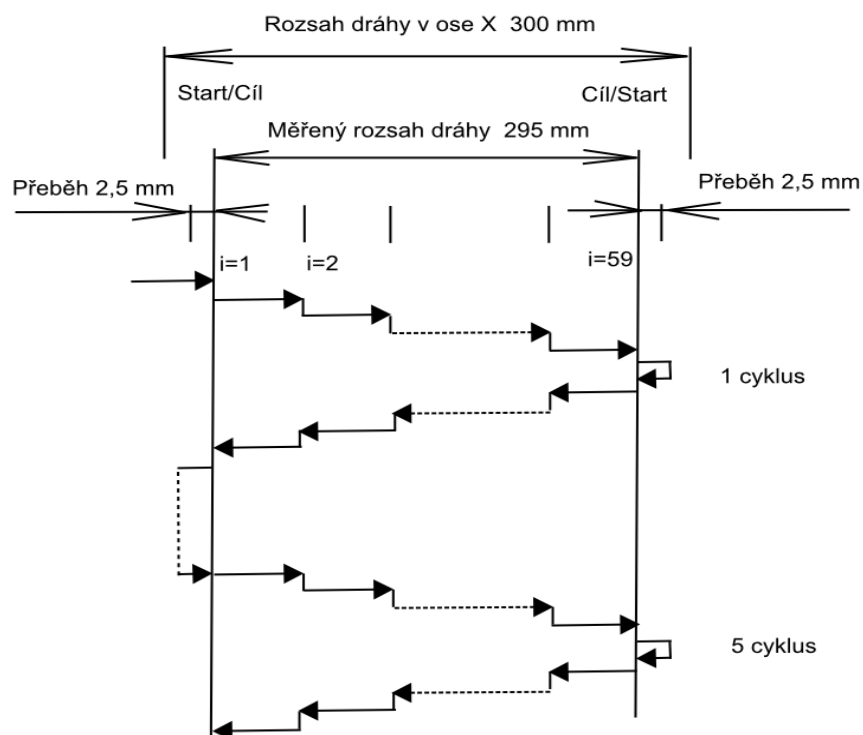
Obr. 16. Frézka CNC FC 16 CNC/PC [19]

Základní parametry frézky:

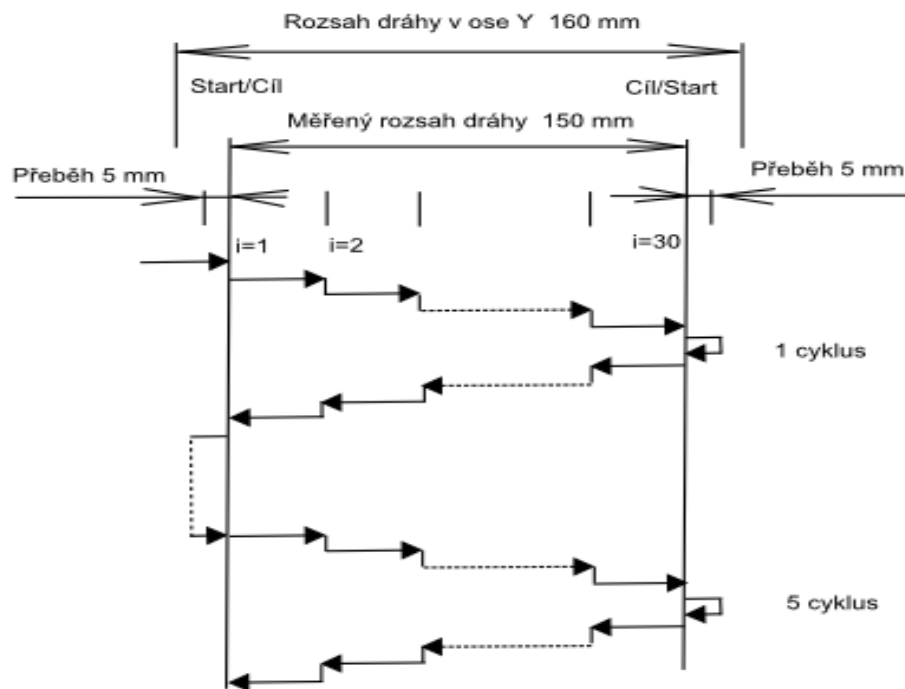
- Typ: FC 16 NCP/PC
- Inventární číslo: 002, výrobce: Tos
- Maximální otáčky vřetena: 3600 ot./min.
- Maximální rychlost posuvu: 300 mm/min.
- Pracovní krok: 0.001 mm
- Rozsah osy X: 300mm
- Rozsah osy Y: 160 mm
- Rozsah osy Z: 250 mm
- Pracovní prostor 300 x 160 x 350 mm
- Upínací kužel vřetena: ISO 30
- Výkon hlavního elektromotoru: 0,5 kW
- Rozměry: 950x800x800 mm
- Hmotnost stroje: 2.500 kg

5.1 Program pro měření polohování

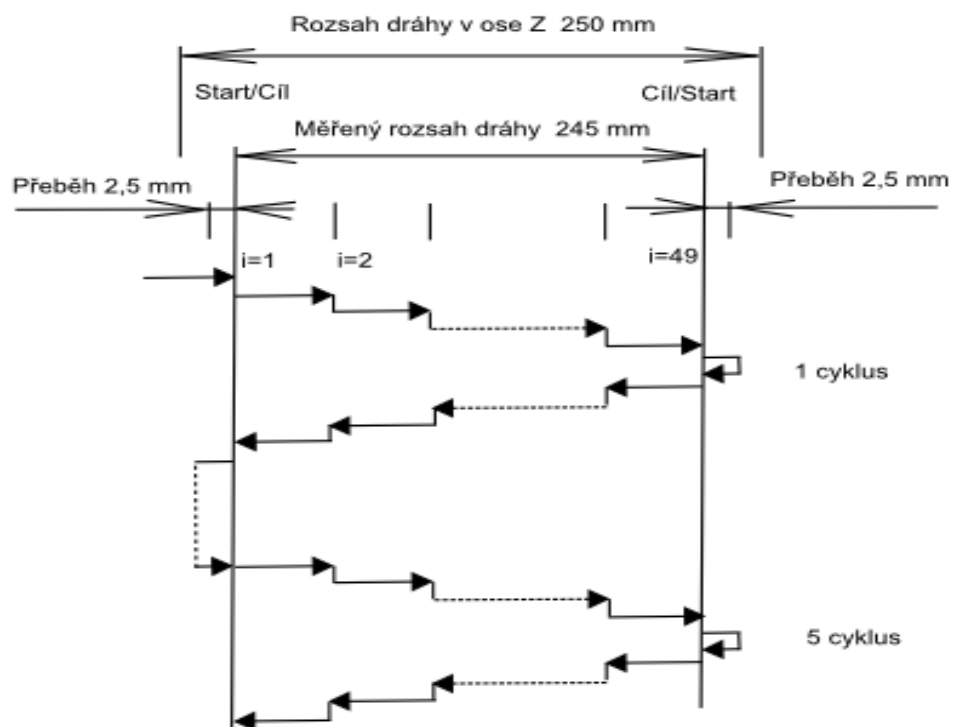
Dle ČSN 230-2 musí být měření provedeno ve všech zadaných polohách při použití lineárního bidirekcionálního pětichodého cyklu. Což znamená, že u osy X bylo do každé polohy (59 poloh) najeto pětkrát (5 cyklů) v obou směrech. Interval mezi jednotlivými polohami je 5 mm. Ukázky programovacích cyklů pro jednotlivé osy: viz obrázky 17, 18 a 19.



Obr. 17. Lineární bidirekcionální 5-chodý cyklus pro osu X



Obr. 18. Lineární bidirekcionální 5-chodý cyklus pro osu Y



Obr. 19. Lineární bidirekcionální 5-chodý cyklus pro osu Z


6 POUŽITÍ LASER INTERFEROMETRU RENISHAW PRO KALIBRACI

Laser XL-80 poskytuje velmi stabilní svazek laserového záření s vlnovou délkou, která odpovídá národním a mezinárodním normám. Stabilita frekvence vyzařované vlnové délky je $\pm 0,05$ ppm za 1 rok a $\pm 0,02$ ppm za 1 hodinu. Těchto velmi dobrých hodnot je dosaženo dynamickou teplotní stabilizací délky laserové trubice v řádu několika málo nanometrů. Zaručená přesnost lineárního měření je $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$ v celém rozsahu podmínek prostředí, tj. při teplotách $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku 650 mbar až 1150 mbar. Systém identifikuje hodnoty s frekvencí 50 kHz i při maximální rychlosti lineárního měření 4 m/s. Dosahované lineární rozlišení 1 nm je zachováno v celém rozsahu rychlostí měření. [18]



Obr. 20. Laserový systém Renishaw XL-80 [18]

6.1 Technické parametry systému

Parametry systému			
Rozsah lineárního měření	80 metrů		
Přesnost lineárního měření	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$		
Přesnost frekvence laseru	$\pm 0,05 \mu\text{m/m}$		
Rozlišení	1 nm		
Maximální rychlost snímaného pohybu	4 m/s*		
Frekvence snímání dat	10 Hz – 50 kHz**		
Doba stabilizace	< 6 minut		
Pracovní teplota	0 °C – 40 °C		
Snímače parametrů prostředí			
	Rozsah	Přesnost	
Teplota materiálu	0 °C – 55 °C	$\pm 0,1 \text{ °C}$	
Teplota vzduchu	0 °C – 40 °C	$\pm 0,2 \text{ °C}$	
Tlak vzduchu	650 mbar – 1150 mbar	$\pm 1 \text{ mbar}$	
Relativní vlhkost (%)	0 % – 95% nekondenzující	$\pm 6\%$	
*1,6 m/s (při rozlišení obdélníkového výstupního signálu 80 nm) 0,2 m/s (při rozlišení 10 nm)			
** 20 MHz v režimu výstupu obdélníkového signálu			

Obr. 21. Parametry systému Renishaw XL – 80 [18]

Přesnost měření polohování je závislá nejenom na přesnosti známé vlnové délky laserového paprsku, ale i na parametrech okolního prostředí. Zejména hodnoty teploty, tlaku a relativní vlhkosti vzduchu mohou ovlivnit vlnovou délku laserového paprsku, a tím i přesnost měření.

6.2 Postup kalibrace

Kalibrovaná frézka byla zapnuta a po aktivaci řídicího systému byly nastaveny referenční hodnoty pro jednotlivé osy. Frézka byla očištěna od nečistot vzniklých předchozím obráběním. Abychom mohli ustavit optické prvky laser interferometru, musela být demontována část krytu a manuálně zablokován bezpečnostní prvek pohonu frézky.

6.2.1 Nastavení laser interferometru

Laserová hlava byla připevněna na stativ ve směru měřené osy. Veškeré seřizovací prvky laserové hlavy byly nastaveny na střední rozsah pro zajištění všech dostupných jemných nastavení a pro následné přesné seřízení směru laserového paprsku.

Po prvotním ustavení byly laserová hlava i pevný a pohyblivý snímač ustaveny do vodorovné polohy pomocí vodováhy v podélném i příčném směru.

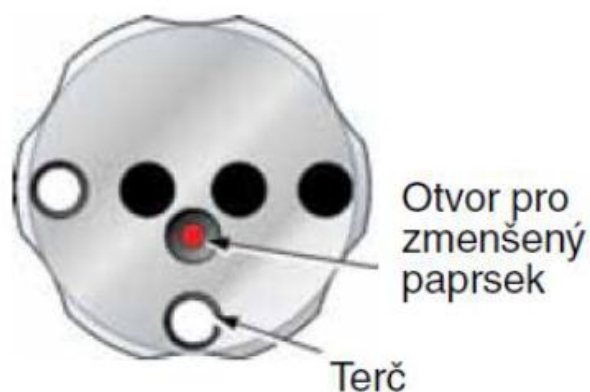


Obr. 22. Vyrovnání laserové hlavy pomocí vodováhy

6.2.1.1 Nastavení paprsku

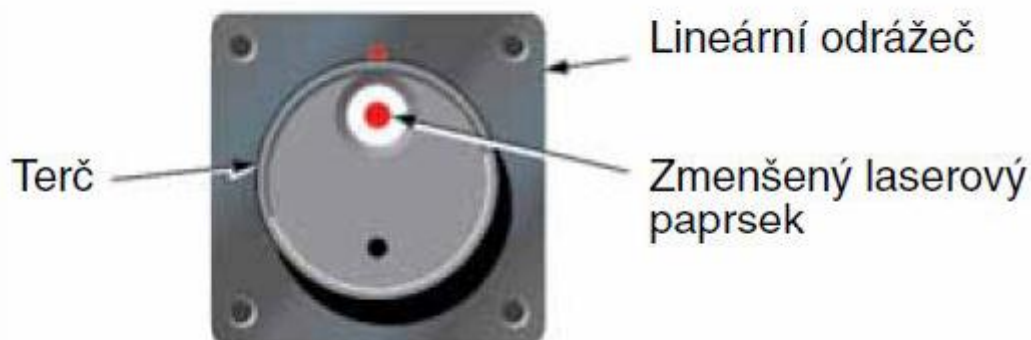
Aby byl přijímací signál dostatečně silný, bylo zapotřebí se vyvarovat Kosinovy chyby. Čehož bylo dosaženo zajištěním rovnoběžnosti laserového paprsku s osou měření.

Clona na laserové hlavě byla nastavena do polohy, ve které je vyzařován paprsek menšího průměru. Menší průměr umožní přesnější vyrovnání.



Obr. 23. Clona s nastavením na otvoru pro menší paprsek (ilustrace) [18]

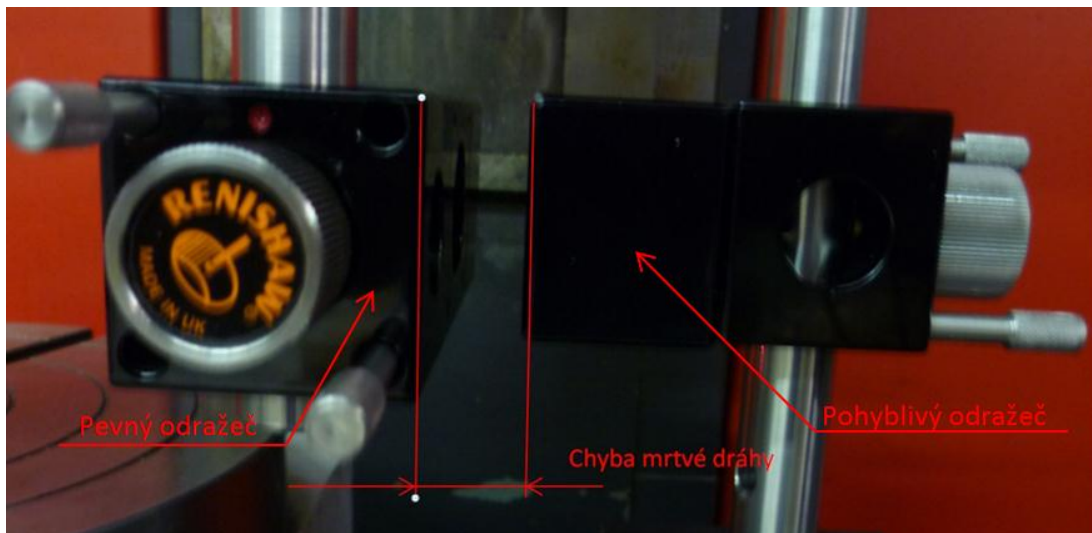
Nastavení laserové hlavy bylo nastaveno tak, aby paprsek dopadl na bílou tečku na terči, který byl umístěn na pevném odražeči.



Obr. 24. Zmenšený paprsek na terči umístěn na lineárním odražeči (ilustrace) [18]

Po odstranění terče bylo zkontrolováno, zda se paprsek odráží zpět z lineárního pohyblivého odražeče a dopadá na střed terče na cloně laserové hlavy. Pro odstranění odchylek bylo použito jemné nastavení laserové hlavy. Následně bylo ve směru měřené osy najeto do druhé krajní polohy a zkontrolováno, zda paprsek dopadá na střed terče na cloně laserové hlavy. Pro korekci odchylek bylo opět použito jemné nastavení laserové hlavy. Paprsek musí dopadat na střed terče v celé měřené délce. Paprsek se skládá ze dvou paprsků, a to je odraz paprsku z pevného odražeče (referenční odražeč) a z pohyblivého odražeče (lineární odražeč).

Čelní plochy pevného a pohyblivého odražeče byly umístěny co nejbližěji k sobě, aby bylo zamezeno chybě mrtvé dráhy znázorněné na obrázku 22. V této poloze proběhlo vynulování numerického displeje.



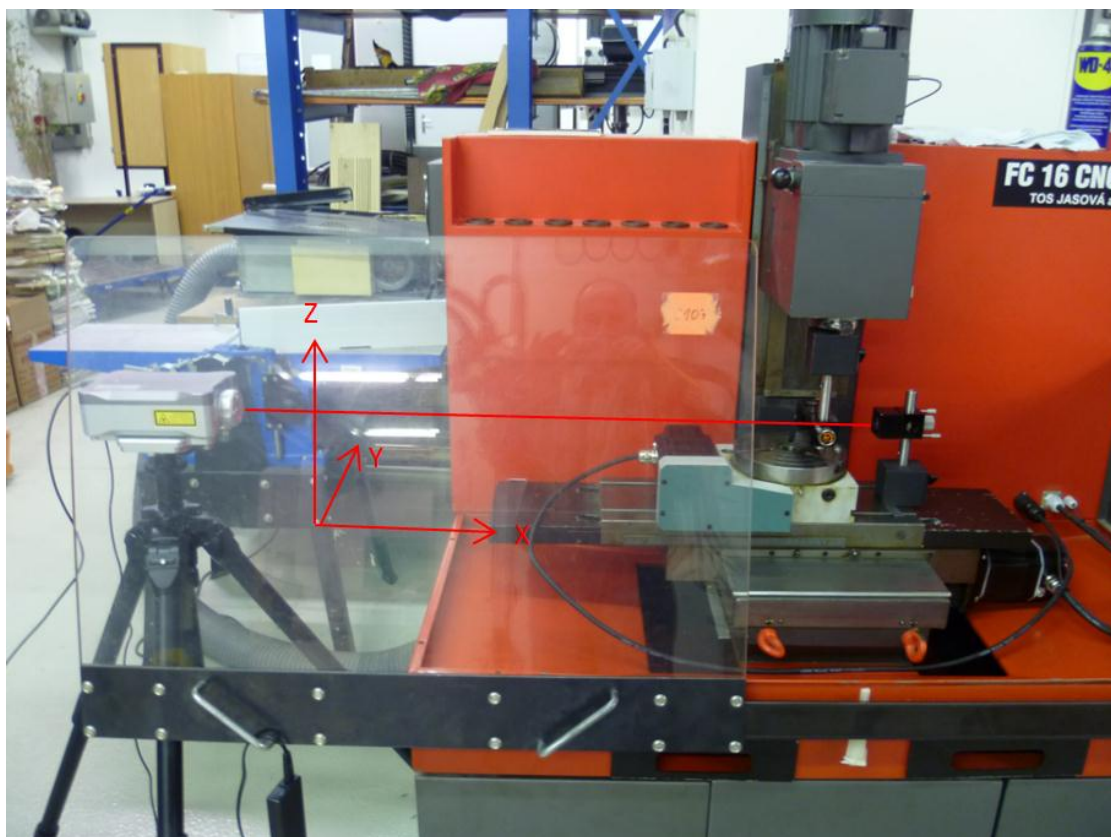
Obr. 25. Chyba mrtvé dráhy

Konečné ustavení laserového interferometru pro měření polohování v ose x je znázorněno na obrázku 27 včetně znázornění jednotlivých os polohování.

Pro osy y a z došlo k opětovnému nastavení laserového interferometru dle výše popsaného postupu.



Obr. 26. Schéma nastavení laserového interferometru při měření polohy [18]



Obr. 27. Pohled na měřenou frézku FC 16 CNC s vyznačenými osami a paprskem

6.2.2 Měření dat

Zjištění naměřených hodnot se uskutečnilo pomocí softwaru Laser XL Capture, nainstalovaném v notebooku. Propojení s laserovým interferometrem bylo provedeno přes USB rozhraní. Při měření byla použita manuální kompenzace vlivu prostředí. (obr. 28.) V místě měření byla pomocí meteorologické stanice zjištěna teplota okolí, relativní vlhkost a atmosférický tlak. Během měření byly tyto údaje průběžně kontrolovány a aktualizovány. Teplota materiálu stroje byla naměřena digitálním teploměrem s odporovým snímačem.

The screenshot shows the 'MANUAL COMPENSATION' screen. It features three input fields for environmental conditions: ambient temperature (24.00 °C), relative humidity (75.00 %RH), and atmospheric pressure (1013.25 mbar). Below these, there is a 'MATERIAL EXPANSION COMPENSATION' section with a material expansion coefficient (11.70 ppm/°C) and a machine material temperature (24.00 °C). The Renishaw logo and 'apply innovation™' tagline are visible at the bottom.

Parameter	Value	Unit
Počáteční teplota okolí	24.00	°C
Počáteční vlhkost	75.00	%RH
Počáteční atmosférický tlak	1013.25	mbar
Materiálová expanze	11.70	ppm/°C
Počáteční teplota materiálu stroje	24.00	°C

Obr. 28. Manuální kompenzace vlivu prostředí na počátku měření

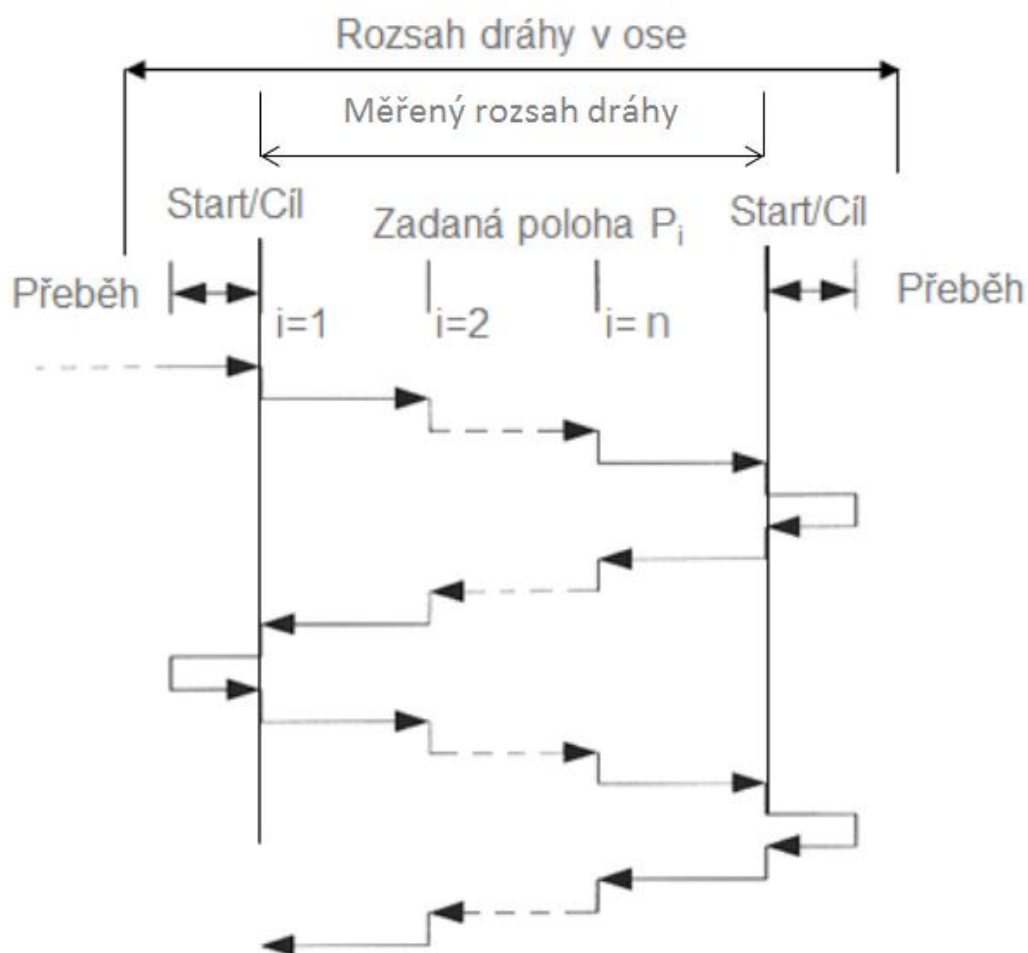
The screenshot shows the 'MANUAL COMPENSATION' screen at the end of a measurement. The environmental conditions have changed: ambient temperature is now 23.50 °C, relative humidity is 75.00 %RH, and atmospheric pressure is 1015.25 mbar. The material expansion coefficient remains 11.70 ppm/°C, and the machine material temperature is now 23.80 °C. The Renishaw logo and 'apply innovation™' tagline are visible at the bottom.

Parameter	Value	Unit
Počáteční teplota okolí	23.50	°C
Počáteční vlhkost	75.00	%RH
Počáteční atmosférický tlak	1015.25	mbar
Materiálová expanze	11.70	ppm/°C
Počáteční teplota materiálu stroje	23.80	°C

Obr. 29. Manuální kompenzace vlivu prostředí na konci měření

Pro stroje s rozsahem v osách do 2000 mm musí být dle normy ISO 230-2 zvoleno minimálně pět poloh na metr a minimálně pět poloh celkově. Měření musí být provedeno ve všech zadaných polohách při použití lineárního bidirekcionálního pětichodého cyklu. Do každé zadané polohy musí být v obou směrech pohybu najeto pětkrát.

Následovalo nastavení jednotlivých cílů měření. Viz obr. 30. Rozsah dráhy o ose x byl 300 mm, rozsah měřené dráhy 295 mm, první cíl byl nastaven na 5 mm, poslední na 295 mm, interval byl zvolen na 5 mm a přeběh byl zvolen na 2,5 mm.



Obr. 30. Schéma jednotlivých cílů

Přesnost měření byla nastavena na 3 desetiny. Program pak automaticky dopočítal počet cílů na 59.

The screenshot shows the 'Data Capture Setup 123' dialog box. On the left, there are four numbered buttons (1, 2, 3, 4). Button 1 is highlighted in orange. The main area contains the following settings:

ISO standard targets	▼		
First target	5.000	mm	<C
Last target	295.000	mm	<C
Interval size	5.000	mm	<C
No. of targets	59		<C
Digits after d.p.	3		▼

At the bottom, there are three buttons: 'View', 'Cancel', and '>>'. Below the dialog box, there is an orange bar with a white box containing the number '1' and the text 'Target Setup'.

Obr. 31. Nastavení cílů a intervalu v ose x

V následujícím kroku byla nastavena posloupnost lineární, počet cyklů byl nastaven na 5 obousměrně (bidirekcionálně), a měřená osa.

The screenshot shows the 'Data Capture Setup 123' dialog box. On the left, there are four numbered buttons (1, 2, 3, 4). Button 2 is highlighted in orange. The main area contains the following settings:

Target sequence	Linear	▼
Number of runs [1998]	5	▲▼
Select direction	Bidirectional	▼
Axis of travel	x	
Error band, μm	0.0	

At the bottom, there are two buttons: 'Cancel' and '>>'. Below the dialog box, there is an orange bar with a white box containing the number '2' and the text 'Capture Initialization'.

Obr. 32. Nastavení posloupnosti cílů

Do třetího okna byl zadán typ stroje, sériové číslo, jméno osoby provádějící měření, lokalizace umístění stroje a název měření.

1	Machine	CNC FC 16
2	Serial No	002
3	Date	18:43 Mar 10 2015
4	By	Miroslav Raška
	Axis	x
	Location	UTB 5U
	TITLE	Kalibrace

Buttons: Cancel, >>

Footer: 3 Test Information

Obr. 33. Identifikace měření

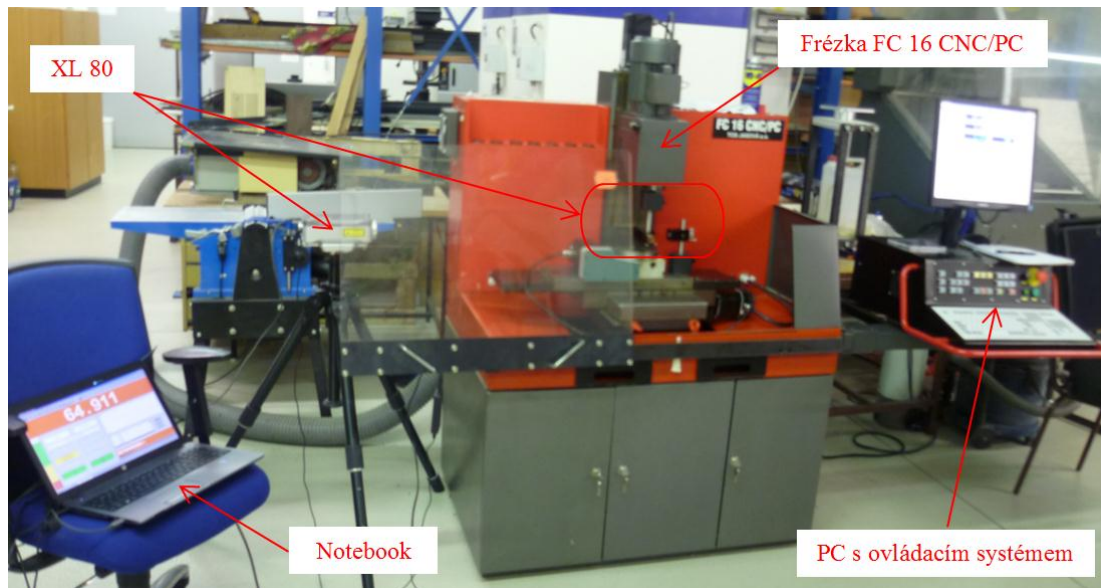
V posledním dialogovém okně bylo nastaveno manuální potvrzování dat.

1	Automatic capture	Disabled
2	Type of capture	Position
3	Minimum period halt	2.00 secs
4	Stability of reading	0.001 mm
	Tolerance window	4.000000 mm
	Overrun step size	2.0000 mm
	Overrun action	On move

Buttons: Cancel, >>

Footer: 4 Auto Data Capture Setup

Obr. 34. Způsob snímání dat



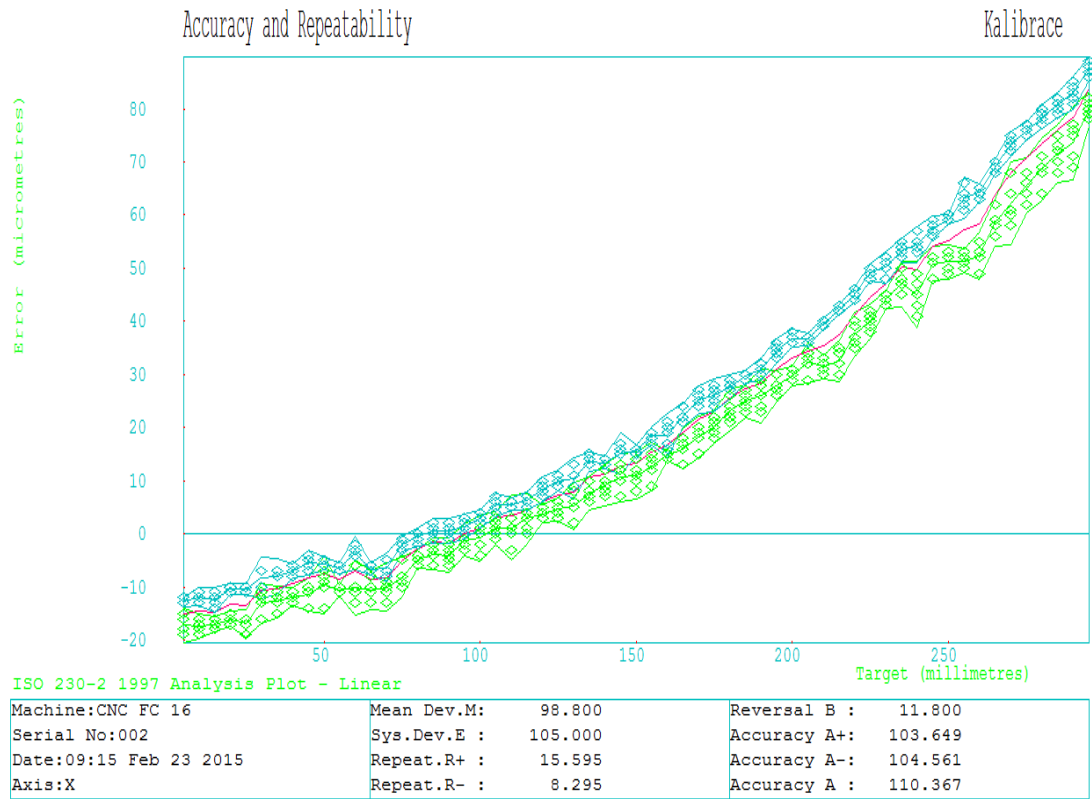
Obr. 35. Měření dat v ose X

Výše uvedený postup se týká osy X. U zbývajících os Y a Z bylo postupováno dle výše uvedeného postupu jen s těmito rozdíly:

- Nové nastavení laser interferometru pro směr osy Y a Z
- Rozsah osy Y byl 160 mm a rozsah osy Z byl 250 mm
- Měření pobíhalo dle programovacích cyklů pro jednotlivé osy (obr. 18, 19)

6.2.3 Vyhodnocení polohování softwarem Renishaw Laser XL Capture

Ze zaznamenaných a uložených dat v softwaru Renishaw Laser XL Capture lze v menu analýzy vyvolat různé analýzy dle norem. Vybrána byla analýza dle ISO 230-2.

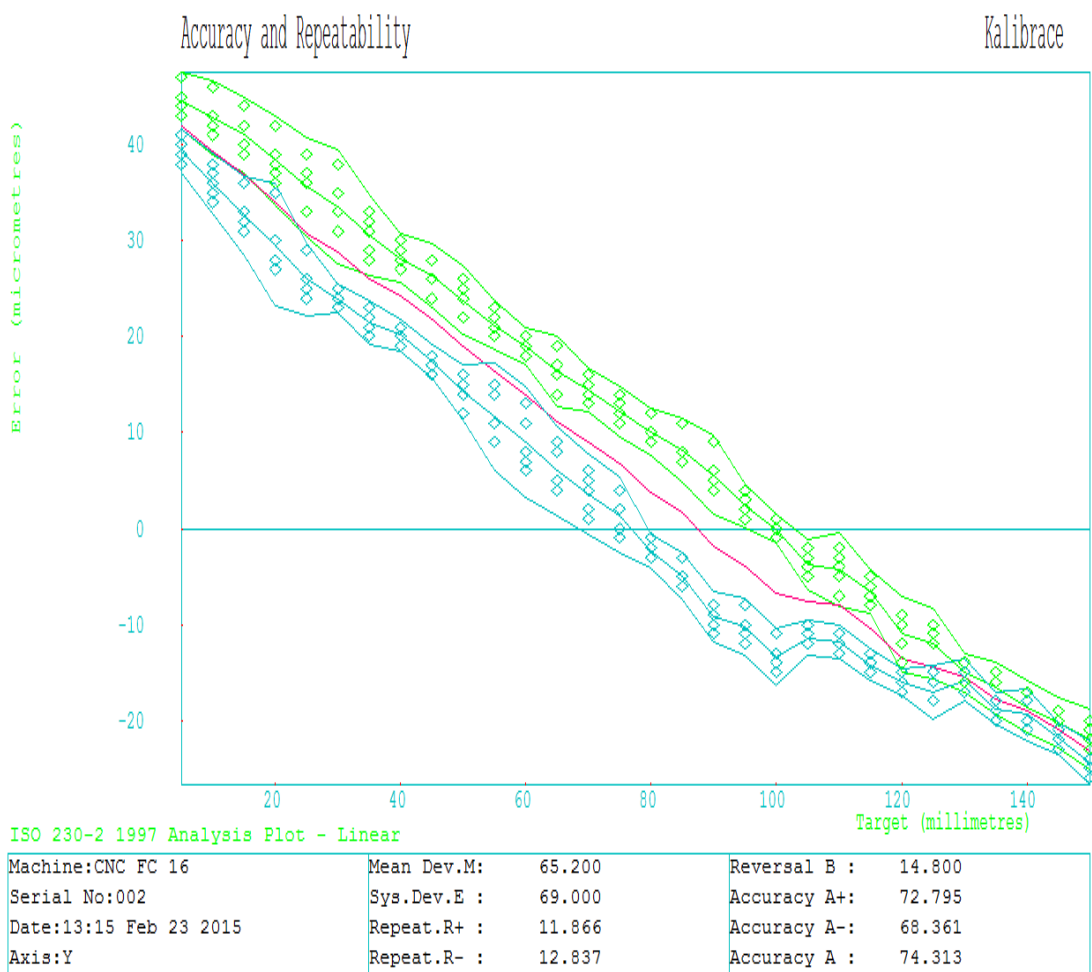


Obr. 36. Graf polohování dle normy ISO 230-2 pro osu X

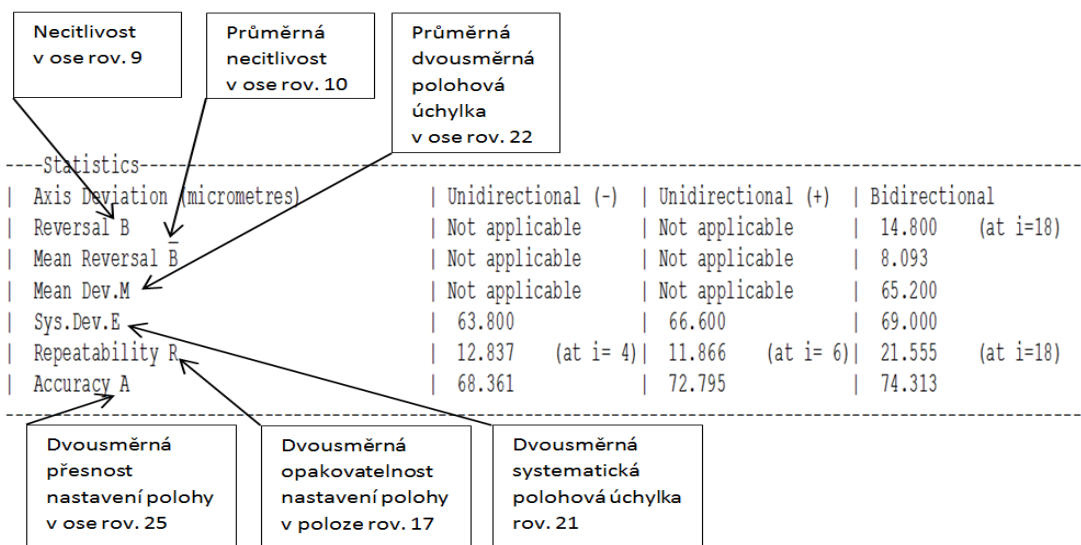
Statistics	Unidirectional (-)	Unidirectional (+)	Bidirectional
Axis Deviation (micrometres)			
Reversal B	Not applicable	Not applicable	11.800 (at i=51)
Mean Reversal B	Not applicable	Not applicable	-6.186
Mean Dev.M	Not applicable	Not applicable	98.800
Sys.Dev.E	100.400	97.400	105.000
Repeatability R	8.295 (at i=32)	15.595 (at i=54)	21.278 (at i=54)
Accuracy A	104.561	103.649	110.367

Necitlivost v ose rov. 9	Průměrná necitlivost v ose rov. 10	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose rov. 22
Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose rov. 25	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze rov. 17	Dvousměrná systematická polohová úchylka rov. 21

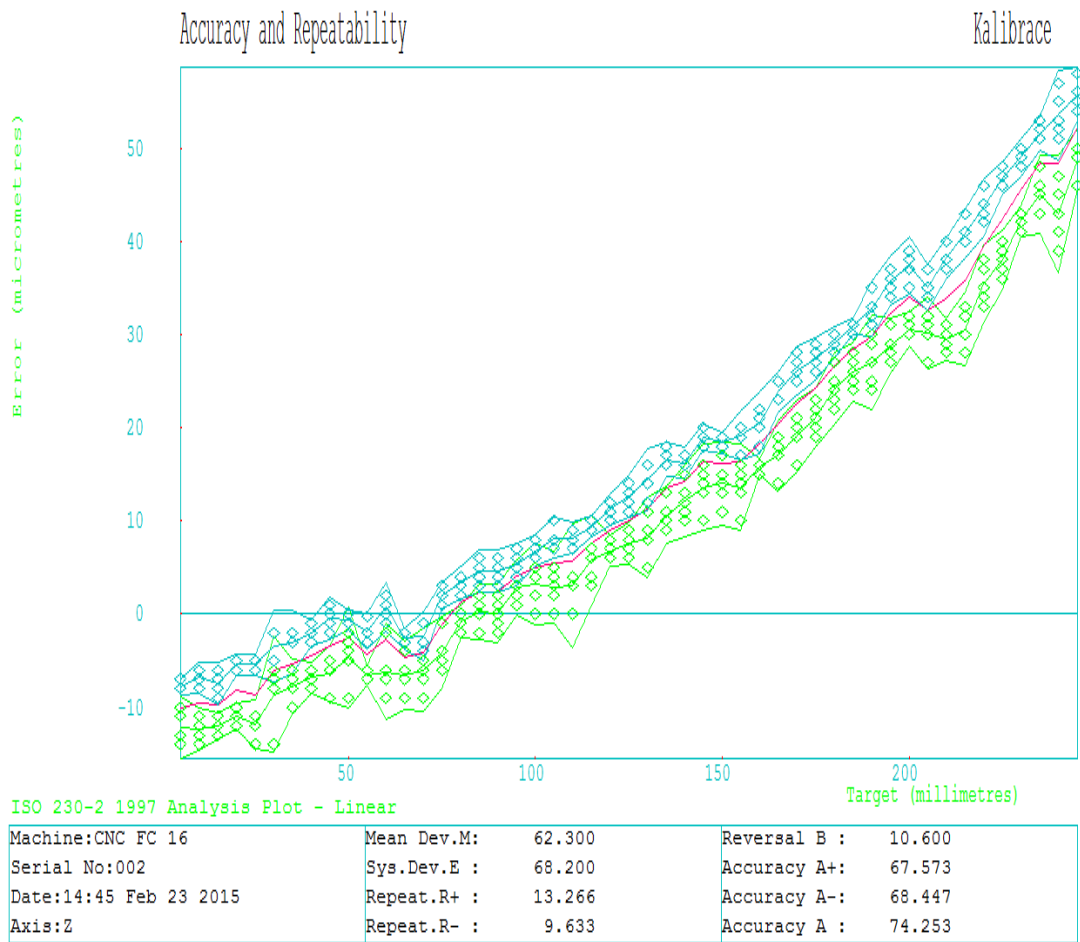
Obr. 37 Vyhodnocení polohování dle normy ISO 230-2 pro osu X



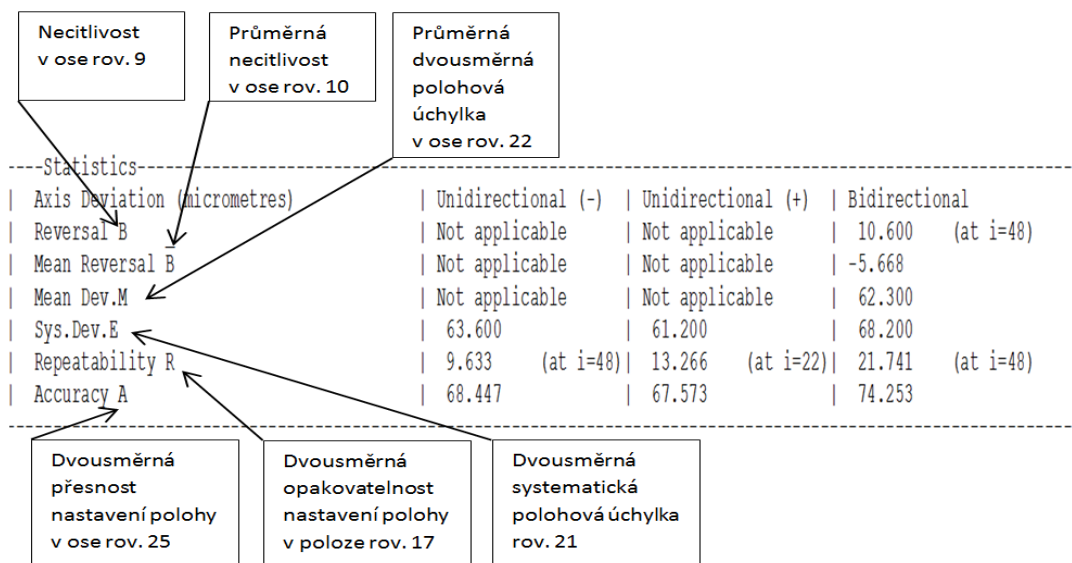
Obr. 38. Graf polohování dle normy ISO 230-2 pro osu Y



Obr. 39. Vyhodnocení polohování dle normy ISO 230-2 pro osu Y



Obr. 40. Graf polohování dle normy ISO 230-2 pro osu Z



Obr. 41. Vyhodnocení polohování dle normy ISO 230-2 pro osu Z

7 NUMERICKÉ VÝPOČTY

Z naměřených dat byly provedeny numerické výpočty dle ČSN ISO 230-2:2010 za účelem ověření získaných dat pomocí softwaru Renishaw Laser XL Capture. Veškeré numerické výpočty byly provedeny za pomoci programu Excel s využitím naprogramovaných funkcí. Podrobné tabulky s naměřenými hodnotami a výsledky jsou v příloze P.

7.1 Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose A (rov. 25)

$$A = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow]$$

$$A_{osa X} = \max. [89,881] - \min. [-20,487] = 110,367 \mu\text{m}$$

$$A_{osa Y} = \max. [47,634] - \min. [-26,680] = 74,314 \mu\text{m}$$

$$A_{osa Z} = \max. [58,767] - \min. [-15,486] = 74,253 \mu\text{m}$$

7.2 Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose A \uparrow (rov. 23)

$$A \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow]$$

$$A \uparrow_{osa X} = \max. [83,162] - \min. [-20,486] = 103,648 \mu\text{m}$$

$$A \uparrow_{osa Y} = \max. [47,633] - \min. [-25,162] = 72,795 \mu\text{m}$$

$$A \uparrow_{osa Z} = \max. [52,086] - \min. [-15,486] = 67,572 \mu\text{m}$$

7.3 Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose A \downarrow (rov. 24)

$$A \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow]$$

$$A \downarrow_{osa X} = \max. [89,880] - \min. [-14,680] = 104,560 \mu\text{m}$$

$$A \downarrow_{osa Y} = \max. [41,680] - \min. [-26,680] = 68,360 \mu\text{m}$$

$$A \downarrow_{osa Z} = \max. [58,766] - \min. [-9,680] = 68,446 \mu\text{m}$$

7.4 Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose E (rov. 21)

$$E = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow]$$

$$E_{osa X} = \max. [87,600] - \min. [-17,400] = 105,000 \mu\text{m}$$

$$E_{osa Y} = \max. [44,600] - \min. [-24,600] = 69,000 \mu\text{m}$$

$$E_{osa Z} = \max. [55,800] - \min. [-12,400] = 68,200 \mu\text{m}$$

7.5 Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose $E \uparrow$ (rov. 19)

$$E \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow]$$

$$E \uparrow_{osa X} = \max. [80,000] - \min. [-17,400] = 97,400 \mu\text{m}$$

$$E \uparrow_{osa Y} = \max. [44,600] - \min. [-22,000] = 66,600 \mu\text{m}$$

$$E \uparrow_{osa Z} = \max. [48,800] - \min. [-12,400] = 61,200 \mu\text{m}$$

7.6 Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose $E \downarrow$ (rov. 20)

$$E \downarrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow]$$

$$E \downarrow_{osa X} = \max. [87,600] - \min. [-12,800] = 100,400 \mu\text{m}$$

$$E \downarrow_{osa Y} = \max. [39,400] - \min. [-24,400] = 63,800 \mu\text{m}$$

$$E \downarrow_{osa Z} = \max. [55,800] - \min. [-7,800] = 63,600 \mu\text{m}$$

7.7 Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose M (rov. 22)

$$M = \max. [\bar{x}_i] - \min. [\bar{x}_i]$$

$$M_{osa X} = \max. [83,800] - \min. [-15,00] = 98,800 \mu\text{m}$$

$$M_{osa Y} = \max. [42,000] - \min. [-23,200] = 65,200 \mu\text{m}$$

$$M_{osa Z} = \max. [52,300] - \min. [-10,000] = 62,300 \mu\text{m}$$

7.8 Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze R_i (rov. 17)

$$R_i = \max. [2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow]$$

$$R_{osa X} = 21,278 \mu\text{m} (P_i = 59)$$

$$R_{osa Y} = 21,555 \mu\text{m} (P_i = 30)$$

$$R_{osa Z} = 21,741 \mu\text{m} (P_i = 49)$$

7.9 Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose $R \uparrow$. (r. 15)

$$R \uparrow = \max. [R_i \uparrow]$$

$$R_{osa X} \uparrow = 15,595 \mu\text{m} (P_i = 59)$$

$$R_{osa Y} \uparrow = 11,866 \mu\text{m} (P_i = 30)$$

$$R_{osa Z} \uparrow = 13,266 \mu\text{m} (P_i = 49)$$

7.10 Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose $R \downarrow$ (r. 16)

$$R \downarrow = \max. [R_i \downarrow]$$

$$R_{osa X} \downarrow = 8,295 \mu\text{m} (P_i = 59)$$

$$R_{osa Y} \downarrow = 12,837 \mu\text{m} (P_i = 30)$$

$$R_{osa Z} \downarrow = 9,633 \mu\text{m} (P_i = 49)$$

7.11 Průměrná necitlivost v ose \bar{B} (rov. 10)

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n B_i$$

$$\bar{B}_{osa X} = \frac{-365}{59} = -6,186 \mu\text{m}$$

$$\bar{B}_{osa Y} = \frac{243}{30} = 8,100 \mu\text{m}$$

$$\bar{B}_{osa Z} = \frac{-227,732}{49} = -5,668 \mu\text{m}$$

7.12 Necitlivost v ose B (rov. 9)

$$B = \max |B_i|$$

$$B_{osa X} = 11,800 \mu\text{m} (P_i = 59)$$

$$B_{osa Y} = 8,100 \mu\text{m} (P_i = 30)$$

$$B_{osa Z} = 10,600 \mu\text{m} (P_i = 49)$$

Numerické výpočty jsou zaokrouhleny na 3 desetinná místa, aby bylo možné porovnání s hodnotami získanými pomocí analýzy softwaru Renishaw Laser XL Capture.

8 VÝPOČET ODHADU NEJISTOT MĚŘENÍ LINEÁRNÍHO POLOHOVÁNÍ

Mezi faktory ovlivňující nejistoty měření patří měřicí zařízení, přesazení měřicího zařízení k ose zkoušeného stroje, nejistota vlivem kompenzace teploty stroje, pokud se měří při teplotách jiných než 20 °C, a kolísání chyby vlivem environmentu. [3]

8.1 Nejistota měření vlivem měřicího zařízení (rov. 40)

$$U_{DEVIACE} = 0,6 * R_{DEVIZE} * L$$

L je měřená délka v metrech (m)

R_{DEVIZE} je rozsah chyby určené výrobcem zařízení v dílech na milion v (ppm) nebo v mikrometrech na metr (0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$)

$$U_{DEVIACE,osa X} = 0,6 * 0,5 * 0,295 = 0,089 \mu\text{m}$$

$$U_{DEVIACE,osa Y} = 0,6 * 0,5 * 0,150 = 0,045 \mu\text{m}$$

$$U_{DEVIACE,osa Z} = 0,6 * 0,5 * 0,245 = 0,074 \mu\text{m}$$

8.2 Nejistota měření vlivem přesazení měřicího zařízení k ose zkoušeného stroje (rov. 41)

$$U_{MISALIGNMENT} = \frac{0,3 * R_{MISALIGNMENT}^2}{L}$$

$R_{MISALIGNMENT}$ je přesazení v milimetrech (1 mm)

L je měřená délka v metrech (m) [3]

$$U_{MISALIGNMENT,osa X} = \frac{0,3 * 1^2}{0,295} = 1,017 \mu\text{m}$$

$$U_{MISALIGNMENT,osa Y} = \frac{0,3 * 1^2}{0,150} = 2,000 \mu\text{m}$$

$$U_{MISALIGNMENT,osa Z} = \frac{0,3 * 1^2}{0,245} = 1,224 \mu\text{m}$$

8.3 Nejistota měření vlivem měření teploty měřicího zařízení (rov. 40)

$$U_{M,DEVIACE,osa X,Y,Z} = 0,6 * \alpha * L * R(\theta) = 0 \mu\text{m}$$

Protože byla použita manuální kompenzace měřicího zařízení.

8.4 Nejistota měření vlivem měření teploty stroje (rov. 42)

$$U_{M,MASCHINE TOLL} = 0,6 * \alpha * L * R(\theta)$$

α je koeficient roztažnosti stroje [$11,7 \mu\text{m}/(\text{m} * ^\circ\text{C})$]

L je měřená délka v metrech (m)

$R(\theta)$ je možný rozsah teploty vlivem nejistoty měření. Rozsah odchylek u použitého snímače je $0,7 ^\circ\text{C}$, což odpovídá $0,35 ^\circ\text{C}$

$$U_{M,MASCHINE TOLL,osa X} = 0,6 * 11,7 * 0,295 * 0,35 = 0,725 \mu\text{m}$$

$$U_{M,MASCHINE TOLL,osa Y} = 0,6 * 11,7 * 0,150 * 0,35 = 0,369 \mu\text{m}$$

$$U_{M,MASCHINE TOLL,osa Z} = 0,6 * 11,7 * 0,245 * 0,35 = 0,602 \mu\text{m}$$

8.5 Nejistota měření vlivem koeficientu roztažnosti měřicího zařízení (rov. 44)

$$U_{E,DEVICE,osa X,Y,Z} = 0,6 * \Delta T * L * R(\alpha) = 0 \mu\text{m}$$

Protože byla použita manuální kompenzace měřicího zařízení.

8.6 Nejistota měření vlivem koeficientu roztažnosti stroje (rov. 43)

$$U_{E,MASCHINE TOLL} = 0,6 * \Delta T * L * R(\alpha)$$

ΔT je max. rozdíl skutečné teploty T od teploty $20 ^\circ\text{C}$ ($4 ^\circ\text{C}$)

L je měřená délka v metrech (m)

$R(\alpha)$ je rozsah chyby koeficientu roztažnosti stroje ($1 \frac{\mu\text{m}}{\text{m} * ^\circ\text{C}}$)

$$U_{E,MASCHINE TOLL,osa X} = 0,6 * 4 * 0,295 * 1 = 0,708 \mu\text{m}$$

$$U_{E,MASCHINE TOLL,osa Y} = 0,6 * 4 * 0,150 * 1 = 0,360 \mu\text{m}$$

$$U_{E,MASCHINE\ TOLL,osa\ Z} = 0,6 * 4 * 0,245 * 1 = 0,588\ \mu\text{m}$$

8.7 Nejistota měření vlivem kolísání chyby environmentu (rov. 45)

$$U_{EVE} = 0,6 * E_{EV}$$

U_{EV} je rozsah zjištěný při zkoušce driftu v (osa X=2 μm , Y=1 μm , Z=2 μm)

$$U_{EVE,osa\ X} = 0,6 * 2 = 1,2\ \mu\text{m}$$

$$U_{EVE,osa\ Y} = 0,6 * 1 = 0,6\ \mu\text{m}$$

$$U_{EVE,osa\ Z} = 0,6 * 2 = 1,2\ \mu\text{m}$$

8.8 Odhad nejistoty parametrů

Pro lineární osy do rozsahu 2 000 mm se předpokládá pět posuvů nahoru a pět posuvů dolů. V úvahu se berou následující faktory k nejistotě měření: měřicí zařízení, přesazení měřicího zařízení vzhledem ke zkoušené ose stroje, kolísání environmentu, teplota a koeficient teplotní roztažnosti měření stroje a měřicího zařízení. [3]

8.9 Odhad nejistoty pro jednosměrnou opakovatelnost (rov. 46)

$$U(R\ \uparrow, R\ \downarrow) = 2 * U_{EVE}$$

U_{EVE} je nejistota měření vlivem kolísání environmentu v (μm)

$$U(R\ \uparrow, R\ \downarrow)_{osa\ X} = 2 * 1,2 = 2,4\ \mu\text{m}$$

$$U(R\ \uparrow, R\ \downarrow)_{osa\ Y} = 2 * 0,6 = 1,2\ \mu\text{m}$$

$$U(R\ \uparrow, R\ \downarrow)_{osa\ Z} = 2 * 1,2 = 2,4\ \mu\text{m}$$

8.10 Odhad nejistoty pro necitlivost (rov. 47)

Pro osy do 2 000 mm.

$$U(B) = 0,9 * U_{EVE}$$

U_{EVE} je nejistota měření vlivem kolísání environmentu v (μm)

$$U(B)_{osa\ X} = 0,9 * 1,2 = 1,08\ \mu\text{m}$$

$$U(B)_{osa\ Y} = 0,9 * 0,6 = 0,54\ \mu\text{m}$$

$$U(B)_{osa\ Z} = 0,9 * 1,2 = 1,08\ \mu\text{m}$$

8.11 Nejistota dvousměrné opakovatelnosti (rov. 48)

$$U(R) = 2,2 * U_{EVE}$$

U_{EVE} je nejistota měření vlivem kolísání environmentu v (μm)

$$U(R)_{osa X} = 2,2 * 1,2 = 2,640 \mu\text{m}$$

$$U(R)_{osa Y} = 2,2 * 0,6 = 1,320 \mu\text{m}$$

$$U(R)_{osa Z} = 2,2 * 1,2 = 2,640 \mu\text{m}$$

8.12 Nejistota systematických úchylek (rov. 49)

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow) = \sqrt{U_{D.+}^2 + U_{MIS.+}^2 + U_{M.M.T.+}^2 + U_{M.D.+}^2 + U_{E.M.T.+}^2 + U_{E.D.+}^2 + \frac{1}{5} U_{EVE}^2}$$

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow)_{osa X} = \sqrt{0,089^2 + 1,017^2 + 0,725^2 + 0,708^2 + \frac{1}{5} * 1,2^2} = 1,535 \mu\text{m}$$

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow)_{osa Y} = \sqrt{0,045^2 + 2,00^2 + 0,369^2 + 0,360^2 + \frac{1}{5} * 0,6^2} = 2,083 \mu\text{m}$$

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow)_{osa Z} = \sqrt{0,074^2 + 1,224^2 + 0,602^2 + 0,588^2 + \frac{1}{5} * 1,2^2} = 1,581 \mu\text{m}$$

8.13 Nejistota průměrných systematických úchylek (rov. 50)

$$U(M)$$

$$= \sqrt{U_{D.+}^2 + U_{MIS.+}^2 + U_{M.M.T.+}^2 + U_{M.D.+}^2 + U_{E.M.T.+}^2 + U_{E.D.+}^2 + \frac{1}{10} U_{EVE}^2}$$

$$U(M)_{osa X} = \sqrt{0,089^2 + 1,017^2 + 0,725^2 + 0,708^2 + \frac{1}{10} * 1,2^2} = 1,488 \mu\text{m}$$

$$U(M)_{osa Y} = \sqrt{0,045^2 + 2,000^2 + 0,369^2 + 0,360^2 + \frac{1}{10} * 0,6^2} = 2,075 \mu\text{m}$$

$$U(M)_{osa Z} = \sqrt{0,074^2 + 1,224^2 + 0,602^2 + 0,588^2 + \frac{1}{10} * 1,2^2} = 1,535 \mu\text{m}$$

8.14 Nejistota přesnosti polohování (rov. 51)

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow) = \sqrt{U(E)^2 + U(R \uparrow, R \downarrow)^2}$$

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow)_{osa X} = \sqrt{1,535^2 + 2,640^2} = 3,054 \mu\text{m}$$

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow)_{osa Y} = \sqrt{2,083^2 + 1,320^2} = 2,466 \mu\text{m}$$

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow)_{osa Z} = \sqrt{1,581^2 + 2,640^2} = 3,077 \mu\text{m}$$

8.15 Přehled odhadu nejistot měření lineárního polohování

Tab. 1. Odhad nejistoty měření polohování pro osu X

Nejistoty měření pro osu X		Parametr	Nejistota [μm]	Rovnice
Měřicí zaříze- ní	Měřená délka	295 mm		
	Rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U_{DEVIACE}			0,089	40
Vyrovnání	Předpokládané vyrovnání	1 mm		
	Měřená délka	295 mm		
$U_{\text{MISALIGNMENT}}$			1,017	41
Kompenzace teploty ob- robku	Měřená délka	295 mm		
	Koeficient teplotní roztlačnosti	11,7 $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$		
	Rozdíl na 20 $^\circ\text{C}$ maximál- ně	4 $^\circ\text{C}$		
	Maximální úchylka	0,7 $^\circ\text{C}$		
$U_{\text{MACHINE TOLL}}$			0,725	42
$U_{\text{M,DEVICE}}$	nula, protože byla použita manuální kompenzace			
$U_{\text{E,MACHINE TOLL}}$			0,708	
	Nejistota koeficientu roz- tlačnosti stroje	1 $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$		
$U_{\text{E,DEVICE}}$	nula, protože byla použita manuální kompenzace			
U_{EVE}			1,200	45
$U_{\text{R}\uparrow,\text{R}\downarrow}$			2,400	46
U_{B}			1,080	47
U_{R}			2,640	48
$U_{\text{E,E}\uparrow,\text{E}\downarrow}$			1,535	49
U_{M}			1,488	50
$U_{\text{A,A}\uparrow,\text{A}\downarrow}$			3,054	51

Tab. 2. Odhad nejistoty měření polohování pro osu Y

Nejistoty měření pro osu Y		Parametr	Nejistota [μm]	Rovnice
Měřicí zaříze- ní	Měřená délka	150 mm		
	Rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U_{DEVIACE}			0,045	40
Vyrovnání	Předpokládané vyrovnání	1 mm		
	Měřená délka	150 mm		
$U_{\text{MISALIGNMENT}}$			2,000	41
Kompenzace teploty ob- robku	Měřená délka	150 mm		
	Koeficient teplotní roztlačnosti	11,7 $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$		
	Rozdíl na 20 $^\circ\text{C}$ maximál- ně	4 $^\circ\text{C}$		
	Maximální úchylka	0,7 $^\circ\text{C}$		
$U_{\text{MACHINE TOLL}}$			0,369	42
$U_{\text{M,DEVICE}}$	nula, protože byla použita manuální kompenzace			
$U_{\text{E,MACHINE TOLL}}$			0,360	
	Nejistota koeficientu roz- tlačnosti stroje	1 $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$		
$U_{\text{E,DEVICE}}$	nula, protože byla použita manuální kompenzace			
U_{EVE}			0,600	45
$U_{\text{R}\uparrow,\text{R}\downarrow}$			1,200	46
U_{B}			0,540	47
U_{R}			1,320	48
$U_{\text{E,E}\uparrow,\text{E}\downarrow}$			2,083	49
U_{M}			2,075	50
$U_{\text{A,A}\uparrow,\text{A}\downarrow}$			2,466	51

Tab. 3. Odhad nejistoty měření polohování pro osu Z

Nejistoty měření pro osu Z		Parametr	Nejistota [μm]	Rovnice
Měřicí zaříze- ní	Měřená délka	245 mm		
	Rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U_{DEVIACE}			0,074	40
Vyrovnání	Předpokládané vyrovnání	1 mm		
	Měřená délka	245 mm		
$U_{\text{MISALIGNMENT}}$			1,224	41
Kompenzace teploty ob- robku	Měřená délka	245 mm		
	Koeficient teplotní roztlačnosti	11,7 $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$		
	Rozdíl na 20 $^\circ\text{C}$ maximál- ně	4 $^\circ\text{C}$		
	Maximální úchylka	0,7 $^\circ\text{C}$		
$U_{\text{MACHINE TOLL}}$			0,602	42
$U_{\text{M,DEVICE}}$	nula, protože byla použita manuální kompenzace			
$U_{\text{E,MACHINE TOLL}}$			0,588	
	Nejistota koeficientu roz- tlačnosti stroje	1 $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$		
$U_{\text{E,DEVICE}}$	nula, protože byla použita manuální kompenzace			
U_{EVE}			1,200	45
$U_{\text{R}\uparrow,\text{R}\downarrow}$			2,400	46
U_{B}			1,080	47
U_{R}			2,640	48
$U_{\text{E,E}\uparrow,\text{E}\downarrow}$			1,581	49
U_{M}			1,535	50
$U_{\text{A,A}\uparrow,\text{A}\downarrow}$			3,077	51

9 VYHODNOCENÍ KALIBRACE POLOHOVÁNÍ DLE NORMY ČSN 230-2

Hodnoty parametrů polohování jednotlivých měřených os jsou uvedeny v tabulce 4. Vyhodnocení je provedeno dle normy ČSN 230-2, 2010 včetně odhadu jednotlivých nejistot. Výsledky jsou zaokrouhleny na 1 μm , protože i rozlišení interferometru bylo nastaveno na tuto hodnotu.

Tab. 4. Parametry kalibrace polohování dle ČSN 230-2: 2010

Parametry dle ISO 230-2, 2010	Osa X [μm]	Osa Y [μm]	Osa Z [μm]	Rovnice
A	110 \pm 3	74 \pm 2	74 \pm 3	25, 51
A \uparrow	104 \pm 3	73 \pm 2	68 \pm 3	23, 52
A \downarrow	105 \pm 3	68 \pm 2	68 \pm 3	24, 51
E	105 \pm 2	69 \pm 2	68 \pm 2	21, 49
E \uparrow	97 \pm 2	67 \pm 2	61 \pm 2	19, 49
E \downarrow	100 \pm 2	n64 \pm 2	64 \pm 2	20, 49
M	99 \pm 2	65 \pm 1	62 \pm 1	22, 50
R	21 \pm 3	22 \pm 1	22 \pm 3	17, 48
R \uparrow	16 \pm 2	12 \pm 1	13 \pm 2	15, 46
R \downarrow	8 \pm 2	13 \pm 1	10 \pm 2	16, 46
\bar{B}	-6 \pm 1	8 \pm 1	-6 \pm 1	10, 47
B	12 \pm 1	15 \pm 1	11 \pm 1	9, 47

10 KALIBRAČNÍ POSTUP

Tento kalibrační postup se vztahuje na kalibraci CNC frézky FC 16 CNC/PC, ale je ho možno použít i na jiné typy CNC strojů. Kalibrace popsaná v tomto kalibračním postupu se vztahuje jak na první kalibraci (např. při vstupní kontrole CNC stroje), tak i na následné kalibrace během používání CNC stroje. Kalibrace je prováděna pomocí laser interferometru Laser XL-80.

10.1 Související normy

Kalibrace je prováděna dle ČSN 230-2:2010 - Zásady zkoušek obráběcích strojů: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách.

10.2 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kalibraci mohou provádět osoby, které mají dostatečné znalosti teoretické i praktické z oblasti kalibrace CNC strojů, jsou seznámeni s tímto dokumentem a prokázali dokladovatelným způsobem schopnost aplikovat tento dokument.

Doporučuje se prokázat odbornou způsobilost těchto pracovníků vhodným způsobem, například osvědčením o odborné způsobilosti, osobním certifikátem apod.

10.3 Prostředky potřebné pro kalibraci

- Laserový interferometr Laser XL-80
- Notebook + software Renishaw Laser XL Capture
- Teploměr pro zjištění teploty okolního vzduchu s dělením $\leq 0,5$ °C
- Dotykový teploměr pro zjištění teploty CNC stroje s dělením $\leq 0,5$ °C
- Vodováha na předběžné ustavení laserové hlavy a odražečů
- Barometr s dělením 10 mbar
- Čisticí a mazací prostředky (štětec, bezprašné utěrky)
- Další bližší informace viz kapitola 1.5.2

10.4 Definice, rovnice, měřené parametry a nejistoty měření

Viz kapitola 2 (vyhodnocení výsledků) a kapitola 4 (nejistoty a chyby měření)

10.5 Místo kalibrace

Postup předpokládá, že se kalibrace provede v místě používání CNS strojů. Kalibrace se provádí za podmínek obdobných při používání CNC stroje. V tomto případě se předpokládá, že vlivy jako teplota okolí a stroje, atmosférický tlak a vlhkost jsou kompenzovány nebo zahrnuty v jistotě měření.

10.6 Obecné podmínky kalibrace – referenční podmínky

- Teplota okolí 20 °C s maximálním kolísáním 2 až 10%
- Změna teploty za 1 hodinu max. 0,5 °C
- Relativní vlhkost vzduchu max 80 %
- Teplota měřicích prostředků min. 12 hodin na místě měření
- Při manuální kompenzaci se teplota, vlhkost i atmosférický tlak měří na počátku, v průběhu i na konci měření.
- Manuální kompenzaci je možno nahradit Kompenzátorem XC-80 s inteligentními snímači, který zajistí zpracování naměřených hodnot teploty vzduchu, teploty stroje, tlaku vzduchu a relativní vlhkosti a následnou kompenzaci. Tímto způsobem je zajištěna eliminace jakýchkoliv chyb vyplývajících ze změn podmínek prostředí.

10.7 Postup a vyhodnocení kalibrace

Viz kapitola 6.2.

10.8 Určení nejistot měření při vlastní kalibraci

Viz kapitola 8.

10.9 Kalibrační protokol

Kalibrační protokol musí obsahovat:

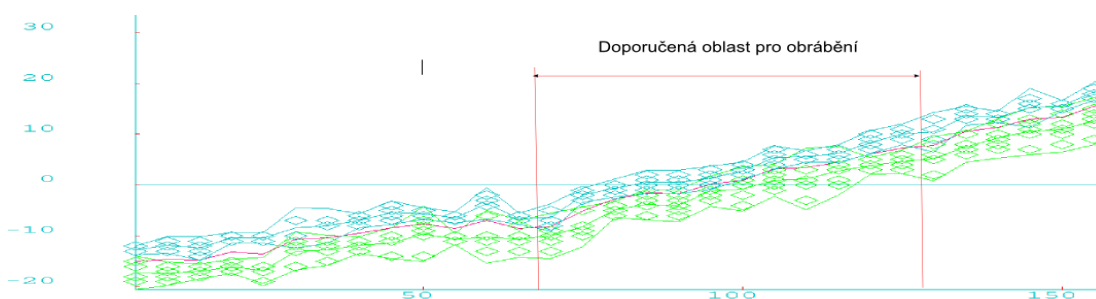
- Zjištěné hodnoty dle ČSN 230-2 včetně nejistot měření
- Polohu měřicích zařízení
- Identifikační údaje měřeného stroje, měřicího zařízení, pracovníka provádějícího kalibraci, datum a čas kalibrace

ZÁVĚR

Účelem diplomové práce bylo zkontrolovat a provést kalibraci frézky FC16 CNP/PC, u které byl kompletně vyměněn operační systém a u které bylo údajně opraveno i polohování.

Zjistil jsem, že jak v ose X, Y i Z, především v ose X dochází jednoznačně k problému tuhosti stroje. Je to ovšem pochopitelné, protože je to dáno charakterem frézky. Pro kontrolu a kalibraci jsem použil profesionální program Renishaw Laser XL Capture, který vyhodnotil a provedl analýzu parametrů dle ČSN 230-2. Vzhledem k tomu, že jsem povinen veškeré výpočty dokladovat, a taky abych vyloučil případné chyby, jsem sestrojil jednoúčelový program v Excelu. Program umožňuje kontrolu vypočtených dat a umožňuje názorné předvedení výpočtů parametrů dle ČSN 230-2.

Vzhledem k tomu, že polohování vlivem tuhosti frézky není dostatečně přesné, doporučuji provádět obrábění v ose X v poloze $100 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$, v ose Y v poloze $90 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$ a v ose Z $70 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$. V tomto rozsahu se pohybuje přesnost polohování $\pm 10 \text{ } \mu\text{m}$. (viz obr. 42)



Obr. 42. Doporučená oblast pro obrábění v ose X

Frézka je určena hlavně pro výukové školní účely a ani sebelepší řídicí program nedokáže odstranit chyby polohování. Navíc na této frézce je vidět, že jsou zde problémy s reverzací (v ose X max. $12 \text{ } \mu\text{m}$, v ose Y max. $15 \text{ } \mu\text{m}$, v ose Z max. $11 \text{ } \mu\text{m}$), což je ovšem dáno věkem stroje a hlavně konstrukčním řešením frézky. Jde o konstrukční pohon pomocí lichoběžníkového šroubu, kde se při polohování se vymezuje vůle mezi závity. Frézka vzhledem k tuhosti není vhodná pro obrábění oceli, ale doporučil bych ji pro obrábění polymerních materiálů nebo nekovových materiálů (např. slitiny hliníku a mědi). Je vhodná hlavně pro modeláře pro výrobu různých modelů z výše uvedených materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAREK, J. a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2. přepr. vyd. Praha: MM publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [2] ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 92 s.
- [3] ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 36 s.
- [4] HINDLS, Richard. *Statistika pro ekonomy*. 8. vyd. Praha: Professional Publishing, 2007. ISBN 978-80-86946-43-6.
- [5] CYHELSKÝ, Lubomír. *Základy statistiky*. Praha: Vysoká škola finanční a správní o.p.s., 2009. ISBN 978-80-7408-013-5.
- [6] Základy statistiky: pro studující veterinární medicíny a farmacie. BEDÁŇOVÁ, I. a V. VEČEREK. [Http://cit.vfu.cz](http://cit.vfu.cz) [online]. Brno, 2007 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Skripta.pdf>
- [7] Parametrické testy - Studentův t-test: Test rozdílu 2 středních hodnot. In: [Http://cit.vfu.cz](http://cit.vfu.cz) [online]. [s.a]. [cit. 2014-11-07]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/stat/FVL/Teorie/Predn3/ttest.htm>
- [8] Parametrické testy: F-test (test rozdílu 2 rozptylů). In: [Http://cit.vfu.cz](http://cit.vfu.cz) [online]. [s.a]. [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/stat/FVL/Teorie/Predn3/ttest.htm>
- [9] SAMEK, K. Využití laserového interferometru Renishaw ML10 pro kalibraci invarových nivelačních latí. In: [Http://www.fce.vutbr.cz](http://www.fce.vutbr.cz) [online]. Ostrava, 2003 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/06_Geodezie%20a%20kartografie/6_01_Prakticke%20aspekty%20geodezie%20a%20kartografie/Samek_Krystyna.pdf
- [10] PATA, Vladimír. *Základní aplikace interferometrů v průmyslu*. [s.l.], 2010. 35 s. Výchovné podklady. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

- [11] Principles of operation. In: *Http://www.feanor.com* [online]. [s.a]. [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: http://www.feanor.com/laser_principles.pdf
- [12] *Maschine & tooling magazine: Special Renishaw 2014* [online]. 3.9.2014 [cit. 2014-10-07]. Dostupné z: <http://www.floowie.com/cs/nahled/mtm-renishaw-2014/#/strana/1/zvacseni/100/>
- [13] *Maschine & tooling magazine: VI ročník 1/2014* [online]. 2014 [cit. 2014-09-15]. Dostupné z: <http://www.floowie.com/cs/cti/mtm-1-2014/undefined#/strana/76/zvacseni/100/>
- [14] Laserový měřicí systém XL 80. *Renishaw: apply inovation* [online]. [s.a]. [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/laserovy-merici-system-xl-80--8267>
- [15] ŘEZANKOVÁ, H. a T. LÖSTER. *Základy statistiky*. Praha: Vysoká škola ekonomická v Praze, 2013. ISBN 978-80-245-1957-9.
- [16] CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín*. 1. vyd. Bratislava: STU, 1999, 689 s. ISBN 80-227-1275-2.
- [17] BUMBÁLEK, Leoš a kol. *Kontrola a měření*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2009, 206 s. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [18] Laserový systém XL-80: Přesný laserový a kalibrační systém. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/cs/details/brozura-laserovy-system-xl-80--15088>
- [19] Ústav výrobního inženýrství: Přístrojové vybavení. ING. LUBOŠ ROKYTA, Ph.D. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně* [online]. Zlín, 2013, 2013-11-08 10:38:27 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.utb.cz/file/40095/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$1-\alpha$	Správné rozhodnutí - spolehlivost
$1-\beta$	Správné rozhodnutí – síla testu
A	Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose
$A \uparrow, A \downarrow$	Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose
α	Hladina významnosti
α	Koeficient roztažnosti stroje
B	Necitlivost v ose
B_i	Necitlivost v poloze
\bar{B}	Průměrná necitlivost v ose
β	Chyba II. druhu
CNC	Computer Numerical Control
ČSN	Česká technická Norma
ΔT	Rozdíl skutečné teploty od teploty 20 °C
E	Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose
$E \uparrow, E \downarrow$	Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose
F	Testovací kritérium u F - testu
F_{krit}	Kritická hodnota u F-testu
H_A	Hypotéza alternativní
H_0	Hypotéza základní
ISO	International Organization for Standardization
L	Délka
L_{LMS}	Délka při Kosinově chybě
L_M	Délka skutečná
m	Počet cyklů v obou směrech

M	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose
max	Maximum
min	Minimum
μ	Aritmetický průměr základního souboru
n	Počet poloh v jednom směru
n	Rozsah výběru
NDE	Diferenciální tepelné roztažení
p	Pravděpodobnost
P_i	Zadaná poloha
P_{ij}	Skutečná poloha
R	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose
R	Přesazení měřicího zařízení
$R(\theta)$	Rozsah teploty vlivem nejistoty měření
$R_{(\alpha)}$	Rozsah chyby koeficientu roztažnosti stroje
$R_{\uparrow}, R_{\downarrow}$	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose
R_i	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze
$R_{i\uparrow}, R_{i\downarrow}$	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze
$S_{i\uparrow}, S_{i\downarrow}$	Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze
σ	Směrodatná odchylka základního souboru
σ^2	Rozptyl základního souboru
t	Testovací kritérium u t-testu
$t_{1-\alpha/2}(v)$	Kritická hodnota u t-testu
T_1	Testovací kritérium u Grubbsových testů
T_{krit}	Kritická hodnota u Grubbsových testů
U (A, A_{\uparrow} , A_{\downarrow})	Nejistota přesnosti polohování

$U(B)$	Odhad nejistoty pro necitlivost
$U_{E, DEVIACE}$	Nejistota měření vlivem koeficientu roztažnosti měřícího zařízení
$U_{E, MASCHINE TOOL}$	Nejistota měření vlivem koeficientu roztažnosti stroje
U_{EV}	Rozsah zjištěný při zkoušce driftu
U_{EVE}	Nejistota měření vlivem kolísání environmentu
$U(E, E \uparrow, E \downarrow)$	Nejistota systematických úchylek
$U(M)$	Nejistota pro průměrnou úchylku polohy
$U_{MISALIGNMENT}$	Nejistota měření vlivem přesazení měřícího zařízení
$U_{M, MASCHINE TOOL}$	Nejistota měření vlivem měření teploty
$U(R)$	Nejistota dvousměrné opakovatelnosti
$U(R \uparrow, R \downarrow)$	Odhad nejistot pro jednosměrnou opakovatelnost
V_x	Variační koeficient
x	Osa X
x_{ij}	Polohová úchylka
\bar{x}_i	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze
$\bar{x}_i \uparrow, \bar{x}_i \downarrow$	Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze
y	Osa y
z	Osa z

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Úhlová a lineární chyba pohybu při pohybu v ose x. [2].....	15
Obr. 2. Princip lineárních měření pomocí laserového interferometru ve směru osy měření. [5].....	16
Obr. 3. Princip lineárních měření pomocí laserového interferometru v kolmém směru.[5]	17
Obr. 4. Běžný zkušební cyklus. [3].....	19
Obr. 5. Jednosměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy. [3]	23
Obr. 6. Dvousměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy. [3].....	23
Obr. 7. Rozdělení statistických znaků. [4]	24
Obr. 8. Rozdělení lišící se variabilitou. [4]	25
Obr. 9. Gaussova křivka pravděpodobností. [6]	27
Obr. 10. Chyby I. a II. druhu a jejich pravděpodobnosti. [6].....	29
Obr. 11. Vzájemný vztah mezi chybou 1. druhu α a chybou 2. druhu β . [6].....	29
Obr. 12. Měření s kompenzací a bez kompenzace. [5]	34
Obr. 13. Chyba mrtvé dráhy. [10]	39
Obr. 14. Kosinova chyba. [11]	40
Obr. 15. Abbého chyba. [11].....	40
Obr. 16. Frézka CNC FC 16 CNC/PC [19].....	42
Obr. 17. Lineární bidirekcionální 5-chodý cyklus pro osu X	43
Obr. 18. Lineární bidirekcionální 5-chodý cyklus pro osu Y	44
Obr. 19. Lineární bidirekcionální 5-chodý cyklus pro osu Z.....	44
Obr. 20. Laserový systém Renishaw XL-80 [18]	45
Obr. 21. Parametry systému Renishaw XL – 80 [18]	46
Obr. 22. Vyrovnání laserové hlavy pomocí vodováhy	47
Obr. 23. Clona s nastavením na otvoru pro menší paprsek (ilustrace) [18].....	48
Obr. 24. Zmenšený paprsek na terči umístěn na lineárním odražeči (ilustrace) [18]	48
Obr. 25. Chyba mrtvé dráhy.....	49
Obr. 26. Schéma nastavení laserového interferometru při měření polohy [18].....	49
Obr. 27. Pohled na měřenou frézku FC 16 CNC s vyznačenými osami a paprskem. 50	
Obr. 28. Manuální kompenzace vlivu prostředí na počátku měření	51
Obr. 29. Manuální kompenzace vlivu prostředí na konci měření	51
Obr. 30. Schéma jednotlivých cílů.....	52

Obr. 31. Nastavení cílů a intervalu v ose x	53
Obr. 32. Nastavení posloupnosti cílů	53
Obr. 33. Identifikace měření	54
Obr. 34. Způsob snímání dat	54
Obr. 35. Měření dat v ose X.....	55
Obr. 36. Graf polohování dle normy ISO 230-2 pro osu X	56
Obr. 37. Vyhodnocení polohování dle normy ISO 230-2 pro osu X	56
Obr. 38. Graf polohování dle normy ISO 230-2 pro osu Y	57
Obr. 39. Vyhodnocení polohování dle normy ISO 230-2 pro osu Y	57
Obr. 40. Graf polohování dle normy ISO 230-2 pro osu Z.....	58
Obr. 41. Vyhodnocení polohování dle normy ISO 230-2 pro osu Z.....	58
Obr. 42. Doporučená oblast pro obrábění v ose X.....	72

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Odhad nejistoty měření polohování pro osu X	66
Tab. 2. Odhad nejistoty měření polohování pro osu Y	67
Tab. 3. Odhad nejistoty měření polohování pro osu Z.....	68
Tab. 4. Parametry kalibrace polohování dle ČSN 230-2: 2010	69

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Naměřené hodnoty osy X – 1 list

Příloha P II: Naměřené hodnoty osy X – 2 list

Příloha P III: Naměřené hodnoty osy X – 3 list

Příloha P IV: Naměřené hodnoty osy X – 4 list

Příloha P V: Naměřené hodnoty osy X – 5 list

Příloha P VI: Naměřené hodnoty osy X – 6 list

Příloha P VII: Naměřené hodnoty osy Y – 1 list

Příloha P VIII: Naměřené hodnoty osy Y – 2 list

Příloha P IX: Naměřené hodnoty osy Y – 3 list

Příloha P X: Naměřené hodnoty osy Z – 1 list

Příloha P XI: Naměřené hodnoty osy Z – 2 list

Příloha P XII: Naměřené hodnoty osy Z – 3 list

Příloha P XIII: Naměřené hodnoty osy Z – 4 list

Příloha P XIV: Naměřené hodnoty osy Z – 5 list

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY X – 1 LIST

Příloha P I: Naměřené hodnoty osy X – 1 list

P_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_i \uparrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	-19	-19	-18	-16	-19	-16	-15	-13	-14	-14
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	-15	-17	-17	-16	-16	-13	-13	-12	-11	-10
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	-16	-16	-16	-15	-16	-11	-11	-11	-10	-7
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	-18	-17	-17	-17	-17	-13	-13	-12	-11	-8
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	-18	-18	-17	-16	-16	-12	-12	-11	-11	-9
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	-17,200	-17,400	-17,000	-16,000	-16,800	-13,000	-12,800	-11,800	-11,400	-9,600
$P_i \downarrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	-13	-13	-14	-10	-11	-11	-11	-8	-7	-6
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	-12	-11	-12	-10	-10	-7	-7	-7	-5	-6
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	-13	-12	-11	-11	-10	-7	-7	-6	-4	-5
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	-13	-12	-12	-11	-11	-10	-8	-7	-6	-6
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	-13	-11	-13	-10	-10	-7	-7	-7	-5	-5
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	-12,800	-11,800	-12,400	-10,400	-10,400	-8,400	-8,000	-7,000	-5,400	-5,600
\bar{X}_i [μm]	-15,000	-14,600	-14,700	-13,200	-13,600	-10,700	-10,400	-9,400	-8,400	-7,600
$S_i \uparrow$ [μm]	1,643	1,140	0,707	0,707	1,304	1,871	1,483	0,837	1,517	2,702
$S_i \downarrow$ [μm]	0,447	0,837	1,140	0,548	0,548	1,949	1,732	0,707	1,140	0,548
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-13,914	-15,120	-15,586	-14,586	-14,192	-9,258	-9,834	-10,127	-8,367	-4,196
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-20,486	-19,680	-18,414	-17,414	-19,408	-16,742	-15,766	-13,473	-14,433	-15,004
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	-11,906	-10,127	-10,120	-9,305	-9,305	-4,501	-4,536	-5,586	-3,120	-4,505
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	-13,694	-13,473	-14,680	-11,495	-11,495	-12,299	-11,464	-8,414	-7,680	-6,695
$R_i \uparrow$ [μm]	6,573	4,561	2,828	2,828	5,215	7,483	5,933	3,347	6,066	10,807
$R_i \downarrow$ [μm]	1,789	3,347	4,561	2,191	2,191	7,797	6,928	2,828	4,561	2,191
B_i [μm]	-4,400	-5,600	-4,600	-5,600	-6,400	-4,600	-4,800	-4,800	-6,000	-4,000
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	8,581	9,554	8,295	8,110	10,103	12,240	11,231	7,888	11,314	10,499
R_i [μm]	8,581	9,554	8,295	8,110	10,103	12,240	11,231	7,888	11,314	10,807

PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY X – 2 LIST

P_i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_i \uparrow$ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	-11	-13	-13	-13	-10	-6	-6	-6	-2	-4
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	-11	-10	-11	-11	-9	-4	-3	-4	-3	1
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	-10	-6	-8	-7	-5	-4	-2	-2	1	1
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	-11	-11	-10	-9	-9	-5	-4	-3	-1	-2
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	-10	-11	-11	-10	-8	-5	-4	-5	-1	0
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	-10,600	-10,200	-10,600	-10,000	-8,200	-4,800	-3,800	-4,000	-1,200	-0,800
$P_i \downarrow$ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	-7	-6	-7	-8	-3	-2	1	-1	1	2
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	-6	-3	-6	-5	-2	0	2	0	3	2
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	-6	-2	-7	-5	-1	0	-1	2	0	4
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	-6	-4	-7	-7	-2	-1	0	1	2	3
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	-7	-3	-6	-7	-2	0	1	1	1	3
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	-6,400	-3,600	-6,600	-6,400	-2,000	-0,600	0,600	0,600	1,400	2,800
\bar{X}_i [μm]	-8,500	-6,900	-8,600	-8,200	-5,100	-2,700	-1,600	-1,700	0,100	1,000
$S_i \uparrow$ [μm]	0,548	2,588	1,817	2,236	1,924	0,837	1,483	1,581	1,483	2,168
$S_i \downarrow$ [μm]	0,548	1,517	0,548	1,342	0,707	0,894	1,140	1,140	1,140	0,837
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-9,505	-5,023	-6,967	-5,528	-4,353	-3,127	-0,834	-0,838	1,766	3,536
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-11,695	-15,377	-14,233	-14,472	-12,047	-6,473	-6,766	-7,162	-4,166	-5,136
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	-5,305	-0,567	-5,505	-3,717	-0,586	1,189	2,880	2,880	3,680	4,473
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	-7,495	-6,633	-7,695	-9,083	-3,414	-2,389	-1,680	-1,680	-0,880	1,127
$R_i \uparrow$ [μm]	2,191	10,354	7,266	8,944	7,694	3,347	5,933	6,325	5,933	8,672
$R_i \downarrow$ [μm]	2,191	6,066	2,191	5,367	2,828	3,578	4,561	4,561	4,561	3,347
B_i [μm]	-4,200	-6,600	-4,000	-3,600	-6,200	-4,200	-4,400	-4,600	-2,600	-3,600
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	6,391	14,810	8,729	10,755	11,461	7,662	9,647	10,043	7,847	9,609
R_i [μm]	6,391	14,810	8,729	10,755	11,461	7,662	9,647	10,043	7,847	9,609

PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY X – 3 LIST

P_i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_i \uparrow$ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	-1	-3	1	3	3	2	6	7	7	8
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	3	3	0	3	5	8	7	9	12	14
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	2	5	6	5	6	6	10	12	13	12
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	0	1	3	4	4	5	7	8	11	10
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	1	0	4	4	5	5	8	10	10	11
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	1,000	1,200	2,800	3,800	4,600	5,200	7,600	9,200	10,600	11,000
$P_i \downarrow$ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	6	5	5	7	9	8	13	13	12	16
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	4	6	7	10	11	11	15	13	16	16
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	7	5	6	9	9	13	13	14	17	15
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	5	6	6	8	10	11	14	14	15	15
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	5	6	7	8	11	9	13	13	16	16
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	5,400	5,600	6,200	8,400	10,000	10,400	13,600	13,400	15,200	15,600
\bar{X}_i [μm]	3,200	3,400	4,500	6,100	7,300	7,800	10,600	11,300	12,900	13,300
$S_i \uparrow$ [μm]	1,581	3,033	2,387	0,837	1,140	2,168	1,517	1,924	2,302	2,236
$S_i \downarrow$ [μm]	1,140	0,548	0,837	1,140	1,000	1,949	0,894	0,548	1,924	0,548
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	4,162	7,266	7,575	5,473	6,880	9,536	10,633	13,047	15,204	15,472
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-2,162	-4,866	-1,975	2,127	2,320	0,864	4,567	5,353	5,996	6,528
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	7,680	6,695	7,873	10,680	12,000	14,299	15,389	14,495	19,047	16,695
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	3,120	4,505	4,527	6,120	8,000	6,501	11,811	12,305	11,353	14,505
$R_i \uparrow$ [μm]	6,325	12,133	9,550	3,347	4,561	8,672	6,066	7,694	9,209	8,944
$R_i \downarrow$ [μm]	4,561	2,191	3,347	4,561	4,000	7,797	3,578	2,191	7,694	2,191
B_i [μm]	-4,400	-4,400	-3,400	-4,600	-5,400	-5,200	-6,000	-4,200	-4,600	-4,600
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	9,843	11,562	9,848	8,554	9,680	13,435	10,822	9,143	13,051	10,168
R_i [μm]	9,843	12,133	9,848	8,554	9,680	13,435	10,822	9,143	13,051	10,168

PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY X – 4 LIST

P_i	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$P_i \uparrow$ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	9	15	13	15	19	21	23	23	26	29
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	12	15	16	19	22	23	25	26	30	29
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	15	15	18	20	21	26	27	29	28	31
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	14	14	17	18	20	22	24	28	28	29
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	13	15	16	19	18	24	26	24	27	30
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	12,600	14,800	16,000	18,200	20,000	23,200	25,000	26,000	27,800	29,600
$P_i \downarrow$ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	17	16	21	24	24	26	29	30	34	36
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	19	21	22	27	28	27	30	32	36	38
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	19	19	24	24	26	29	30	30	33	37
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	18	17	22	25	25	28	30	31	35	37
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	19	20	22	26	27	28	29	32	34	36
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	18,400	18,600	22,200	25,200	26,000	27,600	29,600	31,000	34,400	36,800
\bar{X}_i [μm]	15,500	16,700	19,100	21,700	23,000	25,400	27,300	28,500	31,100	33,200
$S_i \uparrow$ [μm]	2,302	0,447	1,871	1,924	1,581	1,924	1,581	2,550	1,483	0,894
$S_i \downarrow$ [μm]	0,894	2,074	1,095	1,304	1,581	1,140	0,548	1,000	1,140	0,837
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	17,204	15,694	19,742	22,047	23,162	27,047	28,162	31,099	30,766	31,389
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	7,996	13,906	12,258	14,353	16,838	19,353	21,838	20,901	24,834	27,811
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	20,189	22,747	24,391	27,808	29,162	29,880	30,695	33,000	36,680	38,473
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	16,611	14,453	20,009	22,592	22,838	25,320	28,505	29,000	32,120	35,127
$R_i \uparrow$ [μm]	9,209	1,789	7,483	7,694	6,325	7,694	6,325	10,198	5,933	3,578
$R_i \downarrow$ [μm]	3,578	8,295	4,382	5,215	6,325	4,561	2,191	4,000	4,561	3,347
B_i [μm]	-5,800	-3,800	-6,200	-7,000	-6,000	-4,400	-4,600	-5,000	-6,600	-7,200
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	12,193	8,842	12,133	13,455	12,325	10,527	8,858	12,099	11,847	10,662
R_i [μm]	12,193	8,842	12,133	13,455	12,325	10,527	8,858	12,099	11,847	10,662

PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY X – 5 LIST

P_i	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$P_i \uparrow$ [mm]	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	29	30	30	35	38	44	45	41	48	49
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	33	31	32	36	41	45	45	47	51	53
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	34	33	35	40	42	43	50	49	52	50
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	32	31	32	37	39	44	47	43	52	52
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	33	32	34	39	40	45	48	45	51	52
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	32,200	31,400	32,600	37,400	40,000	44,200	47,000	45,000	50,800	51,200
$P_i \downarrow$ [mm]	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	37	39	42	45	48	48	52	53	59	59
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	37	40	42	44	50	50	55	53	58	59
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	36	40	43	46	50	52	53	57	56	60
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	36	40	42	45	49	50	54	54	58	59
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	37	39	42	45	49	51	53	55	57	59
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	36,600	39,600	42,200	45,000	49,200	50,200	53,400	54,400	57,600	59,200
\bar{X}_i [μm]	34,400	35,500	37,400	41,200	44,600	47,200	50,200	49,700	54,200	55,200
$S_i \uparrow$ [μm]	1,924	1,140	1,949	2,074	1,581	0,837	2,121	3,162	1,643	1,643
$S_i \downarrow$ [μm]	0,548	0,548	0,447	0,707	0,837	1,483	1,140	1,673	1,140	0,447
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	36,047	33,680	36,499	41,547	43,162	45,873	51,243	51,325	54,086	54,486
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	28,353	29,120	28,701	33,253	36,838	42,527	42,757	38,675	47,514	47,914
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	37,695	40,695	43,094	46,414	50,873	53,166	55,680	57,747	59,880	60,094
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	35,505	38,505	41,306	43,586	47,527	47,234	51,120	51,053	55,320	58,306
$R_i \uparrow$ [μm]	7,694	4,561	7,797	8,295	6,325	3,347	8,485	12,649	6,573	6,573
$R_i \downarrow$ [μm]	2,191	2,191	1,789	2,828	3,347	5,933	4,561	6,693	4,561	1,789
B_i [μm]	-4,400	-8,200	-9,600	-7,600	-9,200	-6,000	-6,400	-9,400	-6,800	-8,000
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	9,343	11,576	14,393	13,162	14,036	10,640	12,923	19,071	12,367	12,181
R_i [μm]	9,343	11,576	14,393	13,162	14,036	10,640	12,923	19,071	12,367	12,181

PŘÍLOHA P VI: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY X – 6 LIST

P_i	51	52	53	54	55	56	57	58	59
$P_i \uparrow$ [mm]	255	260	265	270	275	280	285	290	295
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	51	49	56	58	62	64	68	69	78
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	53	52	58	60	68	71	73	77	82
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	51	55	62	68	68	71	75	76	79
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	50	53	58	61	64	68	70	71	80
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	52	53	59	64	66	69	72	75	81
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	51,400	52,400	58,600	62,200	65,600	68,600	71,600	73,600	80,000
$P_i \downarrow$ [mm]	255	260	265	270	275	280	285	290	295
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	61	63	69	72	76	77	79	81	86
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	62	65	69	74	75	78	82	85	88
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	64	64	69	73	77	80	81	84	89
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	63	64	70	73	75	79	80	82	87
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	66	65	68	75	76	78	81	83	88
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	63,200	64,200	69,000	73,400	75,800	78,400	80,600	83,000	87,600
\bar{X}_i [μm]	57,300	58,300	63,800	67,800	70,700	73,500	76,100	78,300	83,800
$S_i \uparrow$ [μm]	1,140	2,191	2,191	3,899	2,608	2,881	2,702	3,435	1,581
$S_i \downarrow$ [μm]	1,924	0,837	0,707	1,140	0,837	1,140	1,140	1,581	1,140
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	53,680	56,782	62,982	69,997	70,815	74,362	77,004	80,470	83,162
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	49,120	48,018	54,218	54,403	60,385	62,838	66,196	66,730	76,838
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	67,047	65,873	70,414	75,680	77,473	80,680	82,880	86,162	89,880
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	59,353	62,527	67,586	71,120	74,127	76,120	78,320	79,838	85,320
$R_i \uparrow$ [μm]	4,561	8,764	8,764	15,595	10,431	11,524	10,807	13,740	6,325
$R_i \downarrow$ [μm]	7,694	3,347	2,828	4,561	3,347	4,561	4,561	6,325	4,561
B_i [μm]	-11,800	-11,800	-10,400	-11,200	-10,200	-9,800	-9,000	-9,400	-7,600
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	17,927	17,855	16,196	21,278	17,089	17,842	16,684	19,433	13,043
R_i [μm]	17,927	17,855	16,196	21,278	17,089	17,842	16,684	19,433	13,043

PŘÍLOHA P VII: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY Y – 1 LIST

P_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_i \uparrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	44	42	39	37	33	31	29	27	26	22
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	43	41	40	36	33	31	28	27	24	22
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	44	42	42	38	36	33	31	28	26	24
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	47	46	44	39	37	35	32	30	28	26
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	45	43	40	42	39	38	33	29	28	25
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	44,600	42,800	41,000	38,400	35,600	33,600	30,600	28,200	26,400	23,800
$P_i \downarrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	39	35	31	28	25	23	21	20	18	16
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	40	36	31	28	26	24	22	21	18	14
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	39	37	32	30	26	24	21	20	16	12
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	38	34	33	27	24	24	20	19	18	15
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	41	38	36	35	29	25	23	21	17	14
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	39,400	36,000	32,600	29,600	26,000	24,000	21,400	20,200	17,400	14,200
\bar{X}_i [μm]	42,000	39,400	36,800	34,000	30,800	28,800	26,000	24,200	21,900	19,000
$S_i \uparrow$ [μm]	1,517	1,924	2,000	2,302	2,608	2,966	2,074	1,304	1,673	1,789
$S_i \downarrow$ [μm]	1,140	1,581	2,074	3,209	1,871	0,707	1,140	0,837	0,894	1,483
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	47,633	46,647	45,000	43,004	40,815	39,533	34,747	30,808	29,747	27,378
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	41,567	38,953	37,000	33,796	30,385	27,667	26,453	25,592	23,053	20,222
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	41,680	39,162	36,747	36,019	29,742	25,414	23,680	21,873	19,189	17,166
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	37,120	32,838	28,453	23,181	22,258	22,586	19,120	18,527	15,611	11,234
$R_i \uparrow$ [μm]	6,066	7,694	8,000	9,209	10,431	11,866	8,295	5,215	6,693	7,155
$R_i \downarrow$ [μm]	4,561	6,325	8,295	12,837	7,483	2,828	4,561	3,347	3,578	5,933
B_i [μm]	5,200	6,800	8,400	8,800	9,600	9,600	9,200	8,000	9,000	9,600
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	10,514	13,809	16,547	19,823	18,557	16,947	15,628	12,281	14,135	16,144
R_i [μm]	10,514	13,809	16,547	19,823	18,557	16,947	15,628	12,281	14,135	16,144

PŘÍLOHA P VIII: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY Y – 2 LIST

P_i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_i \uparrow$ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	20	18	16	14	11	10	7	4	1	-1
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	20	18	14	13	11	9	8	4	2	0
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	21	20	16	14	12	10	8	5	2	0
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	22	19	17	15	13	9	7	6	3	1
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	23	20	19	16	14	12	11	9	4	0
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	21,200	19,000	16,400	14,400	12,200	10,000	8,200	5,600	2,400	0,000
$P_i \downarrow$ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	11	8	5	4	2	-1	-3	-8	-8	-11
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	9	6	4	2	0	-3	-5	-9	-11	-14
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	9	7	4	1	-1	-3	-6	-8	-10	-13
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	14	11	9	6	2	-3	-6	-11	-12	-15
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	15	13	8	5	4	-2	-5	-10	-10	-14
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	11,600	9,000	6,000	3,600	1,400	-2,400	-5,000	-9,200	-10,200	-13,400
\bar{X}_i [μm]	16,400	14,000	11,200	9,000	6,800	3,800	1,600	-1,800	-3,900	-6,700
$S_i \uparrow$ [μm]	1,304	1,000	1,817	1,140	1,304	1,225	1,643	2,074	1,140	0,707
$S_i \downarrow$ [μm]	2,793	2,915	2,345	2,074	1,949	0,894	1,225	1,304	1,483	1,517
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	23,808	21,000	20,033	16,680	14,808	12,449	11,486	9,747	4,680	1,414
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	18,592	17,000	12,767	12,120	9,592	7,551	4,914	1,453	0,120	-1,414
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	17,186	14,831	10,690	7,747	5,299	-0,611	-2,551	-6,592	-7,234	-10,367
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	6,014	3,169	1,310	-0,547	-2,499	-4,189	-7,449	-11,808	-13,166	-16,433
$R_i \uparrow$ [μm]	5,215	4,000	7,266	4,561	5,215	4,899	6,573	8,295	4,561	2,828
$R_i \downarrow$ [μm]	11,171	11,662	9,381	8,295	7,797	3,578	4,899	5,215	5,933	6,066
B_i [μm]	9,600	10,000	10,400	10,800	10,800	12,400	13,200	14,800	12,600	13,400
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	17,793	17,831	18,724	17,228	17,306	16,638	18,936	21,555	17,847	17,847
R_i [μm]	17,793	17,831	18,724	17,228	17,306	16,638	18,936	21,555	17,847	17,847

PŘÍLOHA P IX: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY Y – 3 LIST

P_i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_i \uparrow$ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	-2	-5	-7	-12	-10	-14	-18	-20	-22	-24
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	-3	-2	-5	-14	-15	-15	-18	-20	-20	-22
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	-5	-3	-6	-10	-12	-16	-16	-18	-19	-20
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	-5	-4	-7	-9	-11	-14	-15	-17	-19	-21
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	-4	-7	-8	-10	-12	-16	-16	-18	-21	-23
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	-3,800	-4,200	-6,600	-11,000	-12,000	-15,000	-16,600	-18,600	-20,200	-22,000
$P_i \downarrow$ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	-12	-13	-15	-15	-16	-17	-18	-20	-22	-25
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	-12	-11	-15	-16	-18	-15	-19	-18	-21	-24
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	-11	-11	-13	-17	-15	-17	-20	-21	-22	-23
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	-10	-12	-14	-16	-18	-15	-18	-20	-23	-26
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	-12	-12	-14	-16	-18	-15	-19	-18	-21	-24
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	-11,400	-11,800	-14,200	-16,000	-17,000	-15,800	-18,800	-19,400	-21,800	-24,400
\bar{X}_i [μm]	-7,600	-8,000	-10,400	-13,500	-14,500	-15,400	-17,700	-19,000	-21,000	-23,200
$S_i \uparrow$ [μm]	1,304	1,924	1,140	2,000	1,871	1,000	1,342	1,342	1,304	1,581
$S_i \downarrow$ [μm]	0,894	0,837	0,837	0,707	1,414	1,095	0,837	1,342	0,837	1,140
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-1,192	-0,353	-4,320	-7,000	-8,258	-13,000	-13,917	-15,917	-17,592	-18,838
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-6,408	-8,047	-8,880	-15,000	-15,742	-17,000	-19,283	-21,283	-22,808	-25,162
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	-9,611	-10,127	-12,527	-14,586	-14,172	-13,609	-17,127	-16,717	-20,127	-22,120
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	-13,189	-13,473	-15,873	-17,414	-19,828	-17,991	-20,473	-22,083	-23,473	-26,680
$R_i \uparrow$ [μm]	5,215	7,694	4,561	8,000	7,483	4,000	5,367	5,367	5,215	6,325
$R_i \downarrow$ [μm]	3,578	3,347	3,347	2,828	5,657	4,382	3,347	5,367	3,347	4,561
B_i [μm]	7,600	7,600	7,600	5,000	5,000	0,800	2,200	0,800	1,600	2,400
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	11,997	13,120	11,554	10,414	11,570	4,991	6,557	6,167	5,881	7,843
R_i [μm]	11,997	13,120	11,554	10,414	11,570	4,991	6,557	6,167	5,881	7,843

PŘÍLOHA P X: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY Z – 1 LIST

P_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_i \uparrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	-14	-14	-13	-11	-14	-14	-10	-8	-9	-9
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	-10	-12	-12	-11	-11	-8	-8	-7	-6	-5
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	-11	-11	-11	-10	-11	-6	-6	-6	-5	-2
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	-13	-12	-12	-12	-12	-8	-8	-7	-6	-3
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	-13	-13	-12	-11	-11	-7	-7	-6	-6	-4
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	-12,200	-12,400	-12,000	-11,000	-11,800	-8,600	-7,800	-6,800	-6,400	-4,600
$P_i \downarrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	-8	-8	-9	-5	-6	-6	-6	-3	-2	-1
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	-7	-6	-7	-5	-5	-2	-2	-2	0	-1
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	-8	-7	-6	-6	-5	-2	-2	-1	1	0
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	-8	-7	-7	-6	-6	-5	-3	-2	-1	-1
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	-8	-6	-8	-5	-5	-2	-2	-2	0	0
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	-7,800	-6,800	-7,400	-5,400	-5,400	-3,400	-3,000	-2,000	-0,400	-0,600
\bar{X}_i [μm]	-10,000	-9,600	-9,700	-8,200	-8,600	-6,000	-5,400	-4,400	-3,400	-2,600
$S_i \uparrow$ [μm]	1,643	1,140	0,707	0,707	1,304	3,130	1,483	0,837	1,517	2,702
$S_i \downarrow$ [μm]	0,447	0,837	1,140	0,548	0,548	1,949	1,732	0,707	1,140	0,548
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-8,914	-10,120	-10,586	-9,586	-9,192	-2,339	-4,834	-5,127	-3,367	0,804
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-15,486	-14,680	-13,414	-12,414	-14,408	-14,861	-10,766	-8,473	-9,433	-10,004
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	-6,906	-5,127	-5,120	-4,305	-4,305	0,499	0,464	-0,586	1,880	0,495
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	-8,694	-8,473	-9,680	-6,495	-6,495	-7,299	-6,464	-3,414	-2,680	-1,695
$R_i \uparrow$ [μm]	6,573	4,561	2,828	2,828	5,215	12,522	5,933	3,347	6,066	10,807
$R_i \downarrow$ [μm]	1,789	3,347	4,561	2,191	2,191	7,797	6,928	2,828	4,561	2,191
B_i [μm]	-4,400	-5,600	-4,600	-5,600	-6,400	-5,200	-4,800	-4,800	-6,000	-4,000
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	8,581	9,554	8,295	8,110	10,103	15,360	11,231	7,888	11,314	10,499
R_i [μm]	8,581	9,554	8,295	8,110	10,103	15,360	11,231	7,888	11,314	10,807

PŘÍLOHA P XI: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY Z – 2 LIST

P_i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_i \uparrow$ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	-7	-9	-9	-9	-6	-2	-2	-2	2	0
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	-7	-6	-7	-7	-5	0	1	0	1	5
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	-6	-2	-4	-3	-1	0	2	2	5	5
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	-7	-7	-6	-5	-5	-1	0	1	3	2
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	-6	-7	-7	-6	-4	-1	0	-1	3	4
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	-6,600	-6,200	-6,600	-6,000	-4,200	-0,800	0,200	0,000	2,800	3,200
$P_i \downarrow$ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	-0,3	2	-3	-4	1	2	5	3	5	6
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	-2	-1	-2	-1	2	4	6	4	7	6
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	-2	2	-3	-1	3	4	3	6	4	8
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	-2	0	-3	-3	2	3	4	5	6	7
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	-3	1	-2	-3	2	4	5	5	5	7
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	-1,860	0,800	-2,600	-2,400	2,000	3,400	4,600	4,600	5,400	6,800
\bar{X}_i [μm]	-4,230	-2,700	-4,600	-4,200	-1,100	1,300	2,400	2,300	4,100	5,000
$S_i \uparrow$ [μm]	0,548	2,588	1,817	2,236	1,924	0,837	1,483	1,581	1,483	2,168
$S_i \downarrow$ [μm]	0,974	1,304	0,548	1,342	0,707	0,894	1,140	1,140	1,140	0,837
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-5,505	-1,023	-2,967	-1,528	-0,353	0,873	3,166	3,162	5,766	7,536
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-7,695	-11,377	-10,233	-10,472	-8,047	-2,473	-2,766	-3,162	-0,166	-1,136
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	0,087	3,408	-1,505	0,283	3,414	5,189	6,880	6,880	7,680	8,473
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	-3,807	-1,808	-3,695	-5,083	0,586	1,611	2,320	2,320	3,120	5,127
$R_i \uparrow$ [μm]	2,191	10,354	7,266	8,944	7,694	3,347	5,933	6,325	5,933	8,672
$R_i \downarrow$ [μm]	3,895	5,215	2,191	5,367	2,828	3,578	4,561	4,561	4,561	3,347
B_i [μm]	-4,740	-7,000	-4,000	-3,600	-6,200	-4,200	-4,400	-4,600	-2,600	-3,600
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	7,783	14,785	8,729	10,755	11,461	7,662	9,647	10,043	7,847	9,609
R_i [μm]	7,783	14,785	8,729	10,755	11,461	7,662	9,647	10,043	7,847	9,609

PŘÍLOHA P XII: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY Z – 3 LIST

P_i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_i \uparrow$ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	2	0	4	6	6	5	9	10	10	11
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	0	0	3	6	8	11	10	12	15	17
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	5	8	9	8	9	9	13	15	16	15
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	3	4	6	7	7	8	10	11	14	13
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	4	3	7	7	8	8	11	13	13	14
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	2,800	3,000	5,800	6,800	7,600	8,200	10,600	12,200	13,600	14,000
$P_i \downarrow$ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	8	8	10	12	11	16	16	15	19	18
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	7	7	9	10	13	14	18	16	19	19
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	10	8	9	12	12	16	16	17	20	18
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	8	9	9	11	13	14	17	17	18	18
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	8	9	10	11	14	12	16	16	19	19
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	8,200	8,200	9,400	11,200	12,600	14,400	16,600	16,200	19,000	18,400
\bar{X}_i [μm]	5,500	5,600	7,600	9,000	10,100	11,300	13,600	14,200	16,300	16,200
$S_i \uparrow$ [μm]	1,924	3,317	2,387	0,837	1,140	2,168	1,517	1,924	2,302	2,236
$S_i \downarrow$ [μm]	1,095	0,837	0,548	0,837	1,140	1,673	0,894	0,837	0,707	0,548
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	6,647	9,633	10,575	8,473	9,880	12,536	13,633	16,047	18,204	18,472
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-1,047	-3,633	1,025	5,127	5,320	3,864	7,567	8,353	8,996	9,528
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	10,391	9,873	10,495	12,873	14,880	17,747	18,389	17,873	20,414	19,495
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	6,009	6,527	8,305	9,527	10,320	11,053	14,811	14,527	17,586	17,305
$R_i \uparrow$ [μm]	7,694	13,266	9,550	3,347	4,561	8,672	6,066	7,694	9,209	8,944
$R_i \downarrow$ [μm]	4,382	3,347	2,191	3,347	4,561	6,693	3,578	3,347	2,828	2,191
B_i [μm]	-5,400	-5,200	-3,600	-4,400	-5,000	-6,200	-6,000	-4,000	-5,400	-4,400
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	11,438	13,507	9,470	7,747	9,561	13,883	10,822	9,520	11,419	9,968
R_i [μm]	11,438	13,507	9,550	7,747	9,561	13,883	10,822	9,520	11,419	9,968

PŘÍLOHA P XIII: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY Z – 4 LIST

P_i	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$P_i \uparrow$ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
$X_i 1 \uparrow$ [μm]	10	16	14	16	20	22	24	24	27	30
$X_i 2 \uparrow$ [μm]	13	16	17	20	23	24	26	27	31	30
$X_i 3 \uparrow$ [μm]	16	16	19	21	22	27	28	30	29	32
$X_i 4 \uparrow$ [μm]	15	15	18	19	21	23	25	29	29	30
$X_i 5 \uparrow$ [μm]	14	16	17	20	19	25	27	25	28	31
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	13,600	15,800	17,000	19,200	21,000	24,200	26,000	27,000	28,800	30,600
$P_i \downarrow$ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
$X_i 1 \downarrow$ [μm]	17	22	25	25	27	30	31	35	37	35
$X_i 2 \downarrow$ [μm]	20	22	23	28	29	28	31	33	37	39
$X_i 3 \downarrow$ [μm]	20	20	25	25	27	30	31	31	34	38
$X_i 4 \downarrow$ [μm]	19	18	23	26	26	29	31	32	36	38
$X_i 5 \downarrow$ [μm]	20	21	23	27	28	29	30	33	35	37
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	19,200	20,600	23,800	26,200	27,400	29,200	30,800	32,800	35,800	37,400
\bar{X}_i [μm]	16,400	18,200	20,400	22,700	24,200	26,700	28,400	29,900	32,300	34,000
$S_i \uparrow$ [μm]	2,302	0,447	1,871	1,924	1,581	1,924	1,581	2,550	1,483	0,894
$S_i \downarrow$ [μm]	1,304	1,673	1,095	1,304	1,140	0,837	0,447	1,483	1,304	1,517
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	18,204	16,694	20,742	23,047	24,162	28,047	29,162	32,099	31,766	32,389
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	8,996	14,906	13,258	15,353	17,838	20,353	22,838	21,901	25,834	28,811
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	21,808	23,947	25,991	28,808	29,680	30,873	31,694	35,766	38,408	40,433
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	16,592	17,253	21,609	23,592	25,120	27,527	29,906	29,834	33,192	34,367
$R_i \uparrow$ [μm]	9,209	1,789	7,483	7,694	6,325	7,694	6,325	10,198	5,933	3,578
$R_i \downarrow$ [μm]	5,215	6,693	4,382	5,215	4,561	3,347	1,789	5,933	5,215	6,066
B_i [μm]	-5,600	-4,800	-6,800	-7,000	-6,400	-5,000	-4,800	-5,800	-7,000	-6,800
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow$ $+ B_i $ [μm]	12,812	9,041	12,733	13,455	11,843	10,520	8,857	13,865	12,574	11,622
R_i [μm]	12,812	9,041	12,733	13,455	11,843	10,520	8,857	13,865	12,574	11,622

PŘÍLOHA P XIV: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSY Z – 5 LIST

P_i	41	42	43	44	45	46	47	48	49
$P_i \uparrow$ [mm]	205	210	215	220	225	230	235	240	245
$X_i \uparrow 1$ [μm]	27	28	28	33	36	42	43	39	46
$X_i \uparrow 2$ [μm]	31	29	30	34	39	43	43	45	49
$X_i \uparrow 3$ [μm]	32	31	33	38	40	41	48	47	50
$X_i \uparrow 4$ [μm]	30	29	30	35	37	42	45	41	50
$X_i \uparrow 5$ [μm]	31	30	32	37	38	43	46	43	49
$\bar{X}_i \uparrow$ [μm]	30,200	29,400	30,600	35,400	38,000	42,200	45,000	43,000	48,800
$P_i \downarrow$ [mm]	205	210	215	220	225	230	235	240	245
$X_i \downarrow 1$ [μm]	37	40	43	46	46	50	51	57	58
$X_i \downarrow 2$ [μm]	35	38	40	42	46	48	53	51	56
$X_i \downarrow 3$ [μm]	34	38	41	44	48	50	51	55	54
$X_i \downarrow 4$ [μm]	34	38	40	43	47	48	52	52	56
$X_i \downarrow 5$ [μm]	35	37	40	43	47	49	51	53	55
$\bar{X}_i \downarrow$ [μm]	35,000	38,200	40,800	43,600	46,800	49,000	51,600	53,600	55,800
\bar{X}_i [μm]	32,600	33,800	35,700	39,500	42,400	45,600	48,300	48,300	52,300
$S_i \uparrow$ [μm]	1,924	1,140	1,949	2,074	1,581	0,837	2,121	3,162	1,643
$S_i \downarrow$ [μm]	1,225	1,095	1,304	1,517	0,837	1,000	0,894	2,408	1,483
$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	34,047	31,680	34,499	39,547	41,162	43,873	49,243	49,325	52,086
$\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	26,353	27,120	26,701	31,253	34,838	40,527	40,757	36,675	45,514
$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	37,449	40,391	43,408	46,633	48,473	51,000	53,389	58,417	58,766
$\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	32,551	36,009	38,192	40,567	45,127	47,000	49,811	48,783	52,834
$R_i \uparrow$ [μm]	7,694	4,561	7,797	8,295	6,325	3,347	8,485	12,649	6,573
$R_i \downarrow$ [μm]	4,899	4,382	5,215	6,066	3,347	4,000	3,578	9,633	5,933
B_i [μm]	-4,800	-8,800	-10,200	-8,200	-8,800	-6,800	-6,600	-10,600	-7,000
$2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i $ [μm]	11,097	13,271	16,706	15,380	13,636	10,473	12,631	21,741	13,253
R_i [μm]	11,097	13,271	16,706	15,380	13,636	10,473	12,631	21,741	13,253