

Využití laserinterferometru Renishaw při polohování výrobních zařízení s využitím norem řady ČSN ISO 230

Bc. Miroslav Elfmark

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav Elfmark**

Osobní číslo: **T12590**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Využití laserinterferometru Renishaw při polohování výrobních zařízení s využitím norem řady ČSN ISO 230**

Zásady pro vypracování:

Teoretická část

1) Popište vlastnosti a možnosti využití laserinterferometru Renishaw XL-80 pro stanovení parametrů daných normou ČSN ISO 230-2.

2) Stanovte vhodný statistický postup pro vyhodnocení přesnosti za daného stroje (s využitím ČSN ISO 230-1).

3) Rozeberte z matematického hlediska nejistoty, které mohou při měření dle ČSN ISO 230-1 až 8 vzniknout.

Praktická část

1) Pro daný stroj zvolte vhodné měřicí polohy a odpovídající způsob upnutí jednotlivých optických elementů. (Zaměřte se na minimalizaci vibrací).

2) Proveďte polohování stroje s příslušným měřením za definovaných podmínek opakovatelnosti.

3) Naměřené hodnoty matematicky vyhodnoťte s využitím doplňkových statistických metod.

4) Vyvodte závěry a navrhněte praktické aplikace.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Vladimír Pata
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby^[1];
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3^[2];
- beru na vědomí, že podle § 60^[3] odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60^[3] odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, 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 12.5.2014



^[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 obhájených prací.

[1] Vysoké školy nevydělčně zveřejňují disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledků obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Žádost zveřejnění stanoví učební předpis vysoké školy.

[2] Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odváděné uhradením k obhajobě musí být též napsány při pracovních dnech před koncem obhajoby zveřejněny k nahlédnutí veřejnosti a musí učitelské kolegium předložit vysoké škole nebo jejímu tak určeno, z místa pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce požádat na své náklady výpisy, copy nebo rozmnožování.

[3] Platí, že odváděním 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 rozsahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, učitel nebo jiná za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obecněobčanského prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě díla vybrané díkny nebo studentem ke zpřístupnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školské dílo).

¹⁰ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem duševním a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školské dílo:

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

(2) Nemá-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užívat či poskytnout jinému licence, není-li to v rozporu s esprtem výjimečného užití školního nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je zjištění pracovní přesnosti univerzální frézky FHW-50PD při jejím polohování ve dvou osách dle normy řady ČSN ISO 230. Teoretická část popisuje principy měření laserinterferometru, lineárního měření a ISO norem 230-1 a 2, které se zaměřují na měření přesnosti výrobních zařízení a vyhodnocování výsledků.

V praktické části se řeší polohování a měření laserinterferometrem Renishaw XL výrobního stroje a vyhodnocení naměřených dat. Dále obsahuje posouzení přesnosti frézky a její praktické použití.

Klíčová slova: laserinterferometr, univerzální frézka, přesnost, opakovatelnost, lineární snímání.

ABSTRACT

The aim of the thesis is to detect the working precision universals milling machine FHW-50PD during its positioning in two axes according to the standards CSN ISO 230. Theoretical part describes the principles of laser interferometer measurement, linear measurement and standards and ISO 230-1 and 2, which focus on the measurement precision manufacturing equipment and their evaluation.

The practical part deal with the positioning and measuring laser interferometer Renishaw XL manufacturing machines and data evaluation. It also includes an assessment of precision milling machine and its practical use.

Keywords: laser interferometer, universal milling machine, positioning accuracy, repeatability, linear measurement.

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za jeho ochotu, cenné připomínky a rady. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinovi Řezníčkovi, za technickou podporu při ustavení a polohování univerzální frézky.

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

Ve Zlíně 12. 5. 2014

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 MĚŘENÍ VÝROBNÍCH STROJŮ	11
1.1 PRACOVNÍ PŘESNOST.....	11
1.2 GEOMETRICKÁ PŘESNOST.....	11
1.3 GEOMETRICKÉ ZKOUŠKY PŘÍMOSTI	12
2 LASERINTERFEROMETR RENISHAW XL-80	14
2.1 KOMPENZAČNÍ JEDNOTKA XC-80	14
2.2 MĚŘÍCÍ OPTIKA.....	15
2.3 PRINCIP INTERFEROMETRIE	17
2.4 MICHELSONŮV INTERFEROMETR	18
2.5 VLIV PROSTŘEDÍ NA INTERFEROMETRICKÁ MĚŘENÍ.....	19
3 POSTUP MĚŘENÍ DLE ČSN ISO 230-1; 230-2	21
3.1 METODY ZAMĚŘENÉ NA MĚŘENÍ DÉLEK	21
3.1.1 Přímočarý pohyb	21
3.1.2 Měření laserinterferometrem ČSN ISO	22
3.2 PŘÍPRAVA MĚŘIDLA A PODMÍNEK OKOLÍ – ENVIRONMENT.....	22
3.2.1 Zkoušený stroj	22
3.2.2 Zkoušky v lineárních osách do 2000mm	23
3.2.3 Vyhodnocení výsledků dle ČSN ISO-230	24
4 CHYBY MĚŘENÍ A POUŽITÉ STATISTICKÉ A MATEMATICKÉ METODY	30
4.1.1 Cosinova chyba	30
4.1.2 Abbeho princip.....	30
4.1.3 Mrtvá dráha	30
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
5 MĚŘENÍ VÝROBNÍHO ZAŘÍZENÍ	37
5.1 UNIVERZÁLNÍ FRÉZKA FHV-50PD	37
6 MĚŘENÍ A POLOHOVÁNÍ LASERINTERFEROMETRU RENISHAW	39
6.1 ZAMĚŘENÍ NA VIBRACE OKOLÍ	45
7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	46
7.1 VÝPOČET NEJISTOT MĚŘENÍ PRO LINEÁRNÍ POLOHOVÁNÍ	52
8 ZÁVĚR	58
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61
SEZNAM OBRÁZKŮ	63
SEZNAM TABULEK	65
SEZNAM ROVNIC	66
SEZNAM PŘÍLOH	68

ÚVOD

Laserové interferometry nabízejí maximální přesnost, opakovatelnost a návaznost měření díky přesně umístěným optickým součástem a laseru (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), který si můžeme vyjádřit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření.

Po celém světě se používají dva laserové interferometrické systémy společnosti Renishaw, XL-80 (ve výrobě od roku 2007) a jím nahrazený systém ML10 (1988 - 2007). Tyto systémy se používají ke komplexnímu přesnému posuzování obráběcích strojů, souřadnicových měřicích strojů a dalších pohybových systémů.

Právě tento laserinterferometr XL-80 byl použit pro zjištění přesnosti polohování univerzální frézky FHV-50PD, která je umístěna na dílně UVI Univerzity Tomáše Bati, neboť kolísání přesnosti obrobků je přímou informací o výrobní přesnosti stroje.

Doporučené postupy pro zjištění přesnosti a opakovatelnosti výrobních či měřicích zařízení jsou uvedeny z normy ČSN ISO 230-2 stejně jako nejistoty, které vypovídají o přesnosti polohování v měřených osách.

Cílem diplomové práce bude zjištění přesnosti polohování univerzální frézky, a její praktické využití.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MĚŘENÍ VÝROBNÍCH STROJŮ

Pracovní přesnost výrobních strojů je ovlivněna chybami polohování, chybami přímosti, pravoúhlosti, úhlovými chybami a chybami vyplývajícími z poddajnosti strojů, nástrojů a obrobků. V každé ose existuje 6 chyb. Jsou to 3 lineární chyby (chyba polohování na dané ose, chyba přímosti osy horizontální a vertikální). Dále jsou to sklon nebo úklon osy, vybočení či odklon a rotace či natočení osy. Na tříosém obráběcím stroji naměříme 18 chyb plus 3 chyby pravoúhlosti, celkem tedy 21 chyb. [19]

1.1 Pracovní přesnost

Hodnotí se na etalonovém výrobku, vyrobeném za definovaných podmínek

1.2 Geometrická přesnost

Provádí se bez zatížení stroje a vyhodnocují se úchytky drah pohybů jednotlivých strojních částí současně s úchytkami tvaru důležitých funkčních ploch.

Tato kontrola se provádí na každém výrobním stroji, který je dodáván uživateli. Ať se jedná o nový výrobek, stroj po opravě nebo přestavbě. Tato kontrola se provádí při výstupní kontrole i při periodických kontrolách v průběhu provozu. Provádí se dle příslušných norem ČSN ISO, což je nezbytný předpoklad pro úspěšný vývoz strojů a jejich uvádění do provozu na našich, evropských i světových trzích. K výrobě obráběcích strojů daného typu dochází po schválení prototypu ke splnění zkoušek, jako například (Tab. 1). [17][14]

Tab. 1 Dlouhodobé zkoušky podle ČSN ISO [17]

Název normy	Označení
Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení	ČSN ISO 230-1
Zkoušky přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách	ČSN ISO 230-2
Určení teplotních vlivů	ČSN ISO 230-3
Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů	ČSN ISO 230-4

Účelem geometrické přesnosti stroje je zajistit celkovou geometrii obráběcího výrobního stroje neboli přesnost tvarů, vzájemných poloh a pohybů funkčních částí, které mohou

ovlivňovat výrobní přesnost. Používané zkoušky jsou například: Přímost, rovinnost, rovnoběžnost shodnosti vzdálenosti, shodnosti os, kolmosti, otláčení.

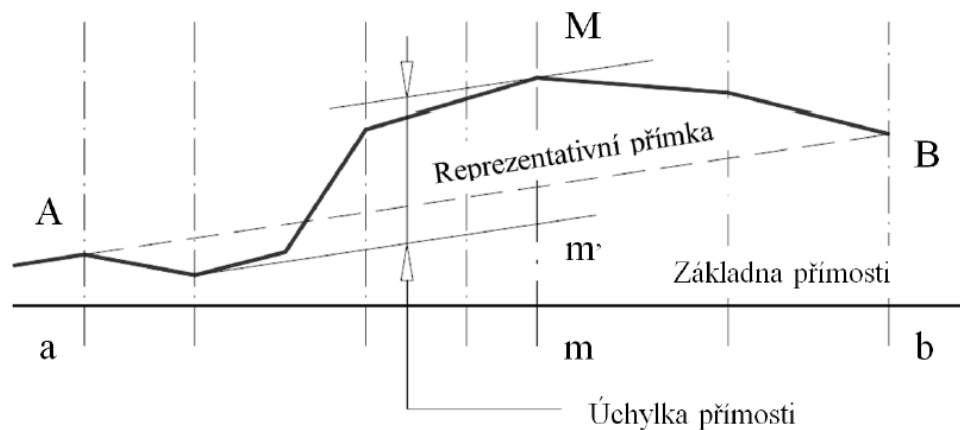
Geometrická přesnost strojů je ovlivněna různými vlivy, jako je například teplotní vliv, tlaku, vibrací a vlhkosti.

1.3 Geometrické zkoušky přímosti

Geometrické zkoušky přímosti se v praxi aplikují jako zkoušky přímosti čáry v rovině, zkoušky přímosti pohybu a zkoušky přímosti součástí. Tyto zkoušky se v praxi provádějí nejen proto, aby se zjistilo, zda stroj bude vyrábět přímé nebo rovinné výrobky, ale také proto, že na přímočarém pohybu je závislá přesnost polohy bodu obrobku.

Přímost čáry v rovině

Čára, která leží v rovině, je považována za přímou v určené délce, pokud všechny její body leží mezi dvěma přímkami, které jsou rovnoběžné s hlavním směrem čáry, jejichž vzdálenost je rovna toleranci (Obr. 1).



Obr. 1 Přímost čáry v rovině [6]

Princip zkoušky: hlavní směr čáry neboli reprezentativní přímky, musí být určen tak, aby byla minimalizována úchylka přímosti. Tato přímka může být určena dvěma metodami, a to buď výpočtem ze zaznamenaných bodů – metodou nejmenších čtverců, nebo dvěma mody vhodně zvolenými blízko konců měřené čáry.

V praxi se používají dvě metody k měření a vyhodnocení přímosti. Jedná se o metody založené na měření délek a druhá na metodě měření úhlů. Praktická základna přímosti může být hmotná jako například pravítko, struna, nebo nehmotná v podobě základních přímek daných libelou nebo laserovým paprskem.

Laserinterferometrická metoda je vysoce progresivní moderní metoda, která ovšem klade vyšší nároky na přístrojové vybavení. Laserinterferometr spolu se speciální optickou výbavou se používá pro zjištění změn polohy ohniska vůči ose symetrie dvouzrcátkového odražeče. Přímost je měřena pomocí detekce změn optické dráhy z relativního laterálního posuvu mezi interferometrem a odražečem.

2 LASERINTERFEROMETR RENISHAW XL-80

Laserová interferometrie je známá metoda měření vzdálenosti s vysokou přesností, laser XL-80 vytváří stabilní svazek laserového záření, jehož vlnová délka odpovídá národním a mezinárodním normám. Stabilita frekvence vlnové délky má hodnotu $\pm 0,05$ ppm za 1 rok, za hodinu je tato hodnota $\pm 0,02$ ppm. Těchto hodnot lze dosáhnout teplotní stabilizací délky laserové trubice v řádu několika nanometrů. Aplikace laserového interferometru Renishaw jsou velmi rozmanité. Tyto laserové systémy jsou široce používány pro komplexní vyhodnocení přesnosti obráběcích a měřících souřadnicových strojů, ale také našli mnoho dalších aplikací uplatnění při výzkumných činnostech a při hodnocení polohy u pohybových systémů. Je využit všude tam, kde je potřeba maximální přesnost, opakovatelnost a návaznost měření. [2][13]



Obr. 2 Laser XL-80 [1]

Přesnost lineárního měření odpovídá $\pm 5 \mu\text{m/m}$ v celém rozsahu podmínek prostředí. To znamená při teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$ až $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 650 mbar až 1150 mbar. Laserový systém čte hodnoty s frekvencí 50 kHz i při použití maximální rychlosti lineárního měření 4 m/s. Lineární rozlišitelnost 1 nm je zachována v celém rozsahu rychlosti měření v případě, je-li použita kompenzační jednotka XC-80, která je součástí příslušenství systému. [13]

2.1 Kompenzační jednotka XC-80

Jednotka XC-80 je klíčem k přesnosti měření systému XL-80. Díky přesnému měření a sledování okolních podmínek dokáže kompenzovat vlnovou délku laserového paprsku

s ohledem na změnu teploty, vlhkosti vzduchu a tlaku. Následně odstraňuje chyby měření plynoucí z těchto změn.

Hodnoty, které jsou zjištěny snímači kompenzační jednotky XC-80 jsou použity ke kompenzaci laserových měření v tom případě, pokud se jedná o režim lineárního měření. Jestliže není tato kompenzace provedena, mohou změny indexu lomu vést ke značným chybám měření. Kompenzace je prováděna automaticky a je aktualizována každých 7 sekund.



Obr. 3 Kompenzátor XC-80 [1]

Kompenzátor XC je způsobilý přijímat vstupní údaje až od tří snímačů materiálu, měřící teplotu stroje, nebo měřeného materiálu. Jestliže je do softwaru Laser XLTM zadán koeficient tepelné roztažnosti, software přepočítá teplotu stroje nebo materiálu na 20 °C. [16]

2.2 Měřící optika

Spolehlivost lineárního polohového měření závisí na přesnosti vlnové délky laserového paprsku. Vlnová délka je ovlivněna kvalitou stabilizace laserového paprsku a parametry okolního prostředí, například hodnoty teploty, relativní vlhkosti vzduchu a tlaku ovlivňují vlnovou délku laserového paprsku. [16]

Pokud zkombinujeme dělič paprsku a lineární odražeč, dostaneme lineární interferometr. Měřící optiku je nutné na měřený přístroj připevnit. K tomu slouží universální sada příslu-

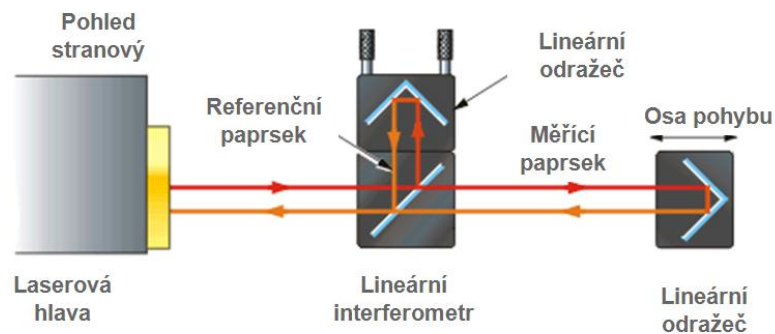
šenství, která je součástí měřicího systému. Jsou to především magnetické držáky, montážní sloupky a pomocné a upínací kostky.



Obr. 4 Možnosti měření laserového systému XL-80 [1]

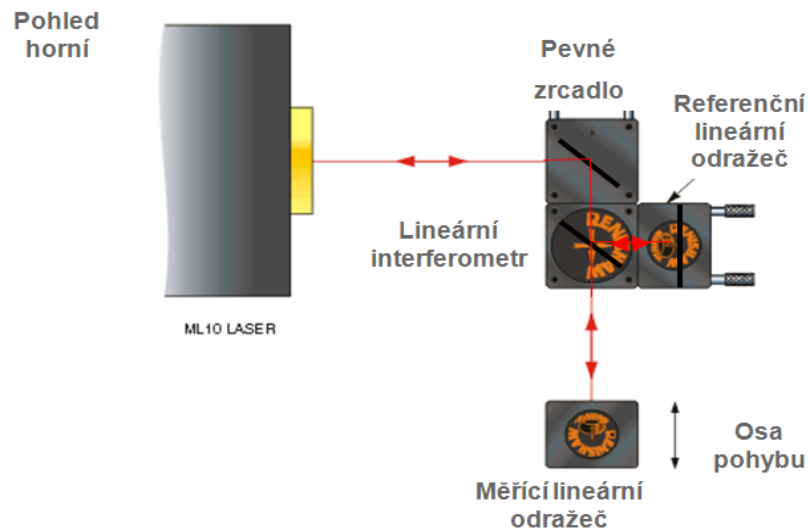
U lineárního měření je odražeč připevněn k děliči světla a tvoří referenční rameno interferometru s pevnou délkou. Jiný lineární odražeč je přemístěn vzhledem k děliči světla a tvoří měřící rameno s nestálou délkou. Laser je použit ke sledování změny v rozestupu mezi odražečem měřicího ramena a děličem světla. Při lineárním měření, kdy laserová hlava je umístěna ve směru osy měření rozeznáváme dvě základní konfigurace. [14]

- Kinematický lineární dělič a stacionární odražeč
- Stacionární lineární dělič a kinematický odražeč

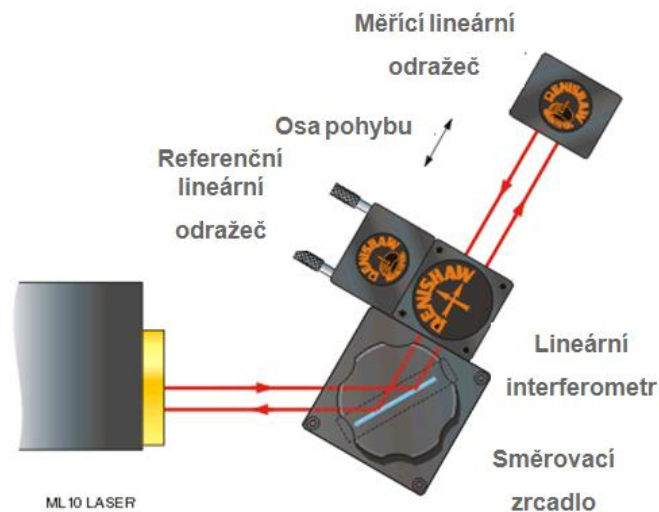


Obr. 5 Laserová hlava je umístěna ve směru osy měření [1]

Laserová hlava je natočena v pravém úhlu vzhledem k ose měření



Obr. 6 Princip lineárních měření pomocí laserového interferometru [1]



Obr. 7 Laserová hlava je natočena v obecném úhlu vzhledem k ose měření [1]

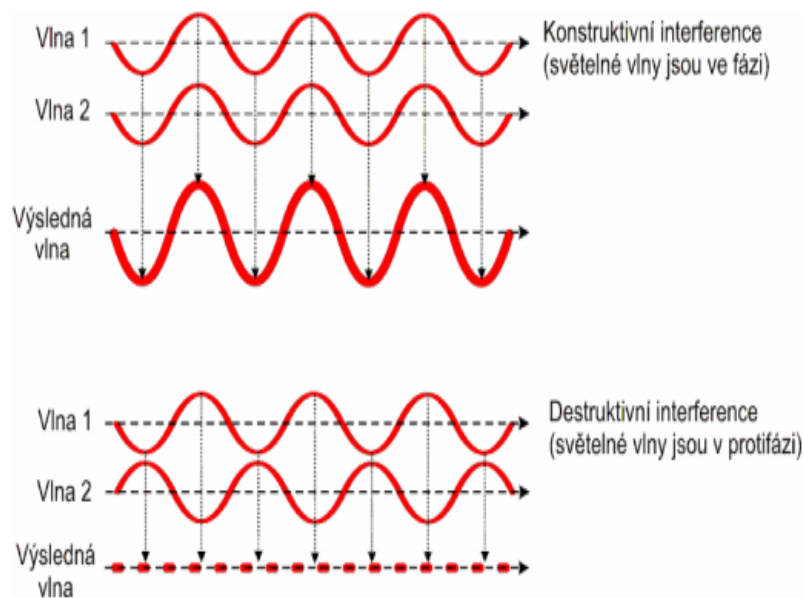
2.3 Princip interferometrie

Interferometrie je měřicí a kontrolní metoda využívající interferenci optických vln k porovnání dvou nebo více optických vlnoploch. Z hlediska počtu interferujících vln rozeznáváme interferenci dvousvazkovou a interferenci mnohosvazkovou. Interferometry jsou optické přístroje, které využívají interferenci světla k zjišťování vzdálenosti, tvarů nezná-

mých předmětů, rovinnosti ploch, přímočarosti vedení. Pro toto měření se využívají komparátory, kde je nejvhodnější k použití Michelsonův komparátor. Interferenční refraktometry jsou využity k měření indexu lomu u plynů a kapalin. Dále interferenční spektroskopy jsou využity k určení jemné struktury spektrálních čar.

Interference je superpozice dvou nebo více světelných svazků. Aby tento jev mohl vzniknout, musí být zajištěny tyto podmínky: [2]

- Interferující světelné svazky mají stejný směr.
- Interferující světelné svazky mají stejnou polarizaci.
- Interferující světelné svazky stejnou vlnovou délku (frekvenci).

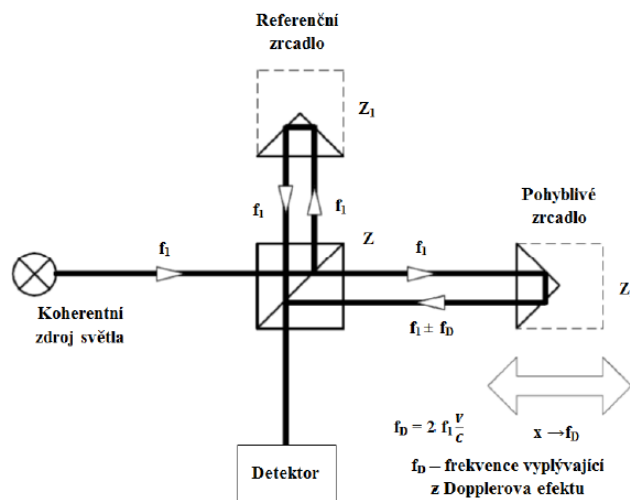


Obr. 8 Popis jevu dvousvazkové interference [2]

2.4 Michelsonův interferometr

Tento interferometr zkonstruoval v roce 1880 americký fyzik Albert Abraham Michelson, který s tímto zařízením dostal v roce 1907 Nobelovu cenu za přesné optické, spektroskopické a metrologické výzkumy.

Měřicí systém je založen na vycházejícím paprsku monochromatického světla ze zdroje, které dopadá na slabě postříbřenou polopropustnou destičku, která je nastavená pod úhlem 45° ke směru paprsku. Paprsek, který dopadne na destičku, se rozdělí na dva navzájem kolmé paprsky.



Obr. 9 Michelsonův interferometr [2]

Paprsek prošlý destičkou dopadá na zrcadlo Z2, které je pohyblivé a paprsek, který se odrazí od nakloněné polopropustné destičky, dopadá na zrcadlo Z1, které je pevné. Po odrazu na zrcadlech se oba paprsky vrátí na polopropustnou destičku, kde se opět rozdělí. Část paprsku se vrací do zdroje a část paprsku postupuje směrem k detektoru s fotocitlivými prvky, kde se detekuje interference paprsku. Posunem pohyblivého zrcadla Z2 na poloviční vzdálenost od polopropustné destičky, se změní dráhový rozdíl. Tomuto posunutí odpovídá jeden proužek interferogramu. Počet interferenčních proužků, které projdou přes štěrbinu fotodetektoru, je mírou změny délky. [14]

2.5 Vliv prostředí na interferometrická měření

Vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu, závisí na indexu lomu vzduchu. Index lomu vzduchu je funkcí teploty, tlaku, vlhkosti a složení vzduchu (CO₂ a další příměsi mají také malý vliv). Nejistotu měření ovlivňuje také znečištění optické cesty mezi laserem, interferometrem a koutovým odražečem a dále skutečná teplota měřeného předmětu.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (0.1)$$

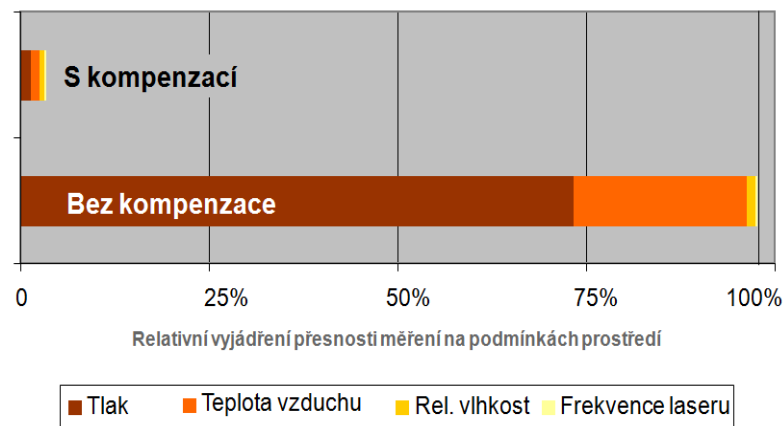
λ – Vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu.

λ_0 – Vlnová délka laserového paprsku ve vakuu.

n – Index lomu vzduchu.

Nejistotu měření ovlivňuje také znečištění optické cesty mezi laserem, interferometrem a koutovým odražečem a dále skutečná teplota měřeného předmětu. Vlnová délka laserového záření vzroste o $1\mu\text{m}$ těmito změnami atmosferických podmínek.

Má-li interferometrické měření prováděné ve vzduchu poskytnout přesné výsledky, je nezbytné kompenzovat změnu indexu lomu vzduchu. [15]



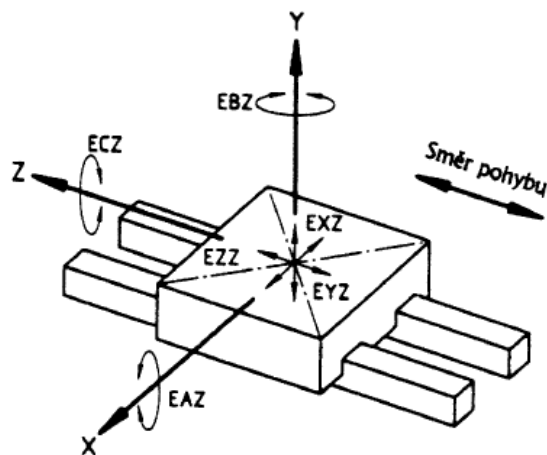
Obr. 10 Měření s použitím kompenzace prostředí [15]

3 POSTUP MĚŘENÍ DLE ČSN ISO 230-1; 230-2

3.1 Metody zaměřené na měření délek

3.1.1 Přímočarý pohyb

Měření přímočarého pohybu části obráběcího výrobního stroje jsou požadována nejen proto, aby se zjistilo, zda stroj bude produkovat přímé nebo rovinné obrobky, ale také proto, že na přímočarém pohybu je závislá přesnost polohy obrobku.



Obr. 11 Přímočarý pohyb [6]

Úchylky při pohybu ve směru Z:

EXZ: Lineární úchylka

EAZ: Úhlová úchylka klopení

EYZ: Lineární úchylka

EBZ: Úhlová úchylka natáčení

EZZ: Úchylka polohy

ECZ: Úhlová úchylka naklánění

Přímočarý pohyb části, která se pohybuje, zahrnuje vždy šest složek úchylek:

- Jednu polohy ve směru pohybu.
- Dvě lineární úchylky dráhy bodu na pohybující se části.
- Tři úhlové úchylky pohybující se části.

3.1.2 Měření laserinterferometrem ČSN ISO

Vývoj laserinterferometru zajistil pro průmyslu obráběcích strojů vysoce přesné normály, které jsou použitelné pro všechny typy a rozměry obráběcích strojů. Laserinterferometr je schopen měřit pět ze šesti stupňů volnosti (lineární nastavení polohy, vodorovnou přímost, svislou přímost, klopení, natáčení a kolmost dvou os.

3.2 Příprava měřidla a podmínek okolí – environment

Je doporučeno, aby dodavatel nebo výrobce přiložil pokyny, které se týkají charakteru teplotního prostředí, jež je akceptovatelný pro plnění požadované přesnosti stroje. Všeobecné pokyny by měly zahrnovat specifikace průměrné teploty místnosti, dále pak největší rozsah velikosti a frekvence odchylek od této průměrné teploty a environmentální teplotní gradienty. Odpovědnost uživatele je zajistit teplotní environment pro provoz stroje a jeho zkoušky v místě instalace a měření, které jsou akceptovatelné. Jestli uživatel splní pokyny předložené výrobcem, předchází odpovědnosti za splnění vlastnosti stroje podle specifikace výrobce. Ideálně se všechna měření rozměrů provádějí za podmínek, kdy jak měřicí přístroj a měřený výrobní stroj jsou umístěny v prostředí s teplotou 20°C. Je-li měření prováděno při jiných podmínkách než 20°C, je nutné provést pro opravu výsledku korekce na teplotu 20°C.

3.2.1 Zkoušený stroj

Celý stroj musí být celkově smontován a plně funkční. Před samotným začátkem měření přesnosti a opakovatelnosti musí být dokončeno nutné vyrovnaní stroje na základě geometrické zkoušky.

Je-li při zkušebním cyklu použit kompenzační program, musí být tato informace uvedena ve zkušebním protokolu. Všechna měření, která se provádí, musí být provedena na nezátženém stroji – bez obrobku.

Polohy pohyblivých součástí stroje v osách, ve kterých se měří, musí být uvedeny ve zkušebním protokolu.

Aby byl výrobní stroj měřen za normálních pracovních podmínek, musí se před měřením zvolit vhodný ohřívací postup, který je specifikovaný dodavatelem nebo výrobcem stroje.

Pokud nejsou podmínky specifikovány, ohřívací postup může mít omezené „přídavné pohyby“ pouze takové, které jsou nezbytné pro seřízení měřícího zařízení. Ohřívací postup musí být zohledněn ve zkušebním protokolu.

Nestabilní teplotní podmínky se projeví jako řízený nárůst úchylek mezi následným najetím do zadané polohy. Tyto trendy nestabilních podmínek by měl být ohřátím stroje minimalizovány.

3.2.2 Zkoušky v lineárních osách do 2000mm

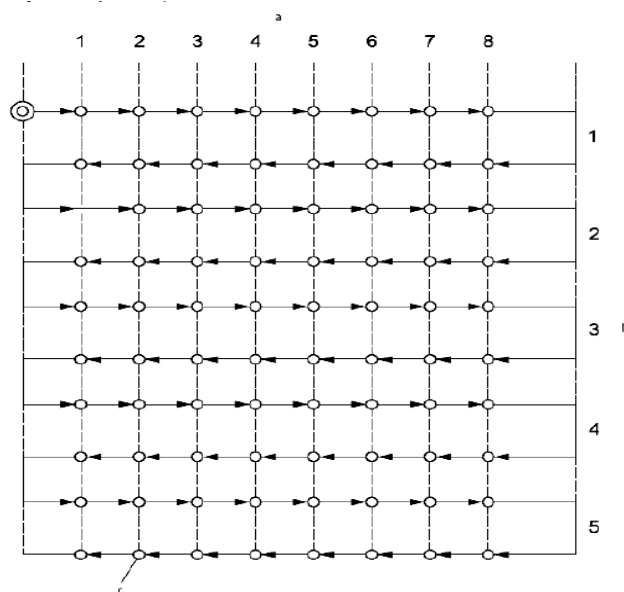
V případech, kdy souřadnice každé polohy může být libovolně zvolena, musí se použít všeobecný vzorec pro volbu zadané polohy P_i .

$$P_i = (i - 1)p + r \quad (0.2)$$

i - číslo uvažované zadané poloh

p - jmenovitý interval, který zajišťuje rovnoměrné rozložení zadaných poloh v měřeném rozsahu.

r - náhodné číslo $v \pm$ amplitudě možné periodické chyby (například chybou způsobené stoupání kuličkového šroubu nebo roztečí rysek lineárních nebo kruhových měřitek), což umožňuje, aby opakované chyby byly dostačujícím způsobem indikovány. Jestliže žádná informace o možné periodické chybě není dostupná, poté bude r v rozmezí $\pm 30\%$ hodnoty p . [7]



Obr. 12 Běžný zkušební cyklus [7]

- A Poloha i (m-8)
- B Nastavení j (n=5)
- C Zadané polohy

Každé měření musí být provedeno ve všech zadaných polohách při použití normálního zkušební cyklu. Do každé zadané měřené polohy musí být v obou směrech pohybu najeto pětkrát. [7]

3.2.3 Vyhodnocení výsledků dle ČSN ISO-230

U lineární osy do 2000 mm a rotační osy do 360° pro každou zadanou polohu P_i a pro pět nastavených poloh (n=5) v každém směru, se vyhodnotí následující parametry a vypočtou hranice úchylek.

$$\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow \text{ a } \bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow \quad (0.3)$$

$$\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow \text{ a } \bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow \quad (0.4)$$

↑ Parametr, který je odvozený z měření při nastavování polohy v kladném směru.

↓ Parametr, který se vztahuje k sérii měření prováděných při nastavování polohy v záporném směru například X_{ij} nebo X_{ij} . [7]

- **Rozsah dráhy v ose**

Jedná se o největší dráhu buď lineární, nebo úhlovou, v jejímž rozsahu se může pohyblivá část pomocí číslicového řízení stroje přestavovat.

- **Měřený rozsah dráhy**

Část rozsahu dráhy, jež je použita pro měření a zvolena tak, aby jak do první, tak do poslední zadané polohy bylo možné najet ve dvou směrech viz (Obr. 7).

- **Zadaná poloha**

Je poloha, do které je programován pohyb pohybující se části stroje.

$$P_i=(i= 1 \text{ až } m) \quad (0.5)$$

- **Skutečná poloha**

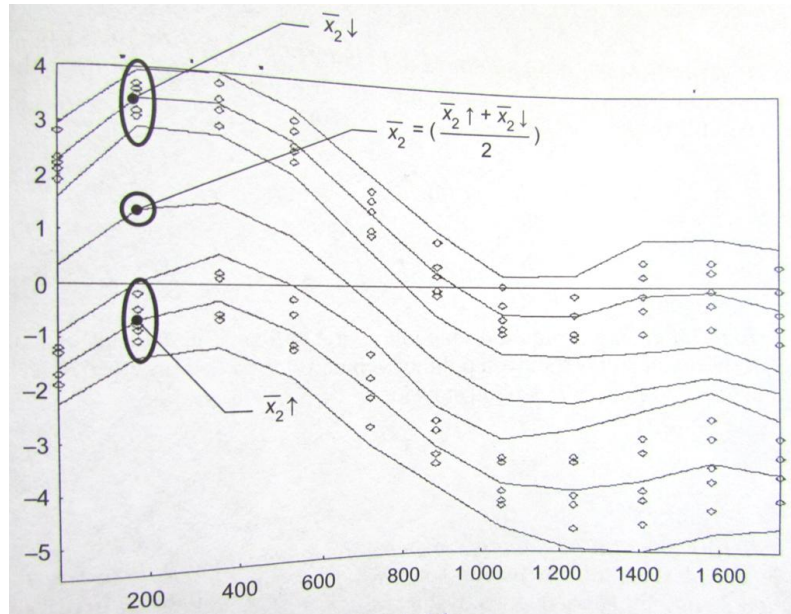
Měřená poloha, která je dosažena nastavovanou částí při j-tém nastavení do i-té zadané polohy. [7]

$$P_s = (i = 1 \text{ až } m; j = 1 \text{ až } n) \quad (0.6)$$

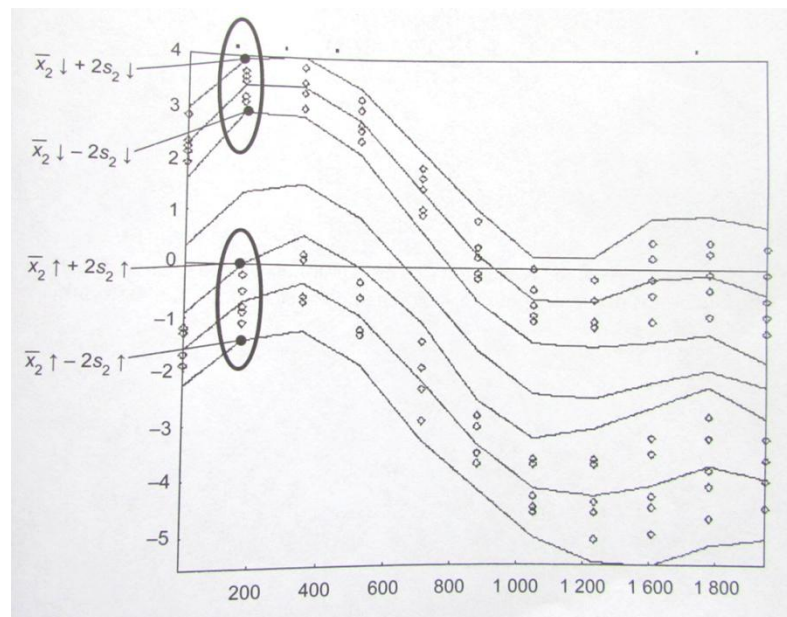
- **Úchylka polohy; polohová úchylka**

Je rozdíl mezi skutečnou polohou, dosaženou nastavovanou částí a zadanou polohou.

$$X_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (0.7)$$



Obr. 13 Určení hranice úchylek [17]



Obr. 14 Příklad měření polohových úchylek [17]

- **Jednosměrný**

Tento výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose a vykonává se vždy ve stejném směru pohybu.

- **Dvousměrný**

Tento výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykonává buď ve směru, nebo okolo osy.

- **Rozšířená nejistota**

Je veličina určující interval výsledků měření, o kterém lze předpokládat, že bude zahrnovat velkou část rozložení hodnot.

- **Koeficient rozšíření**

Číselný koeficient, který se používá jako násobitel běžné nejistoty pro zjištění rozšířené nejistoty měření.

- **Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze**

$$\bar{X} \uparrow \text{nebo } \bar{X} \downarrow \quad (0.7)$$

Aritmetický průměr polohových úchylek, které se zjišťují při sérii n najetí do polohy P_i v jednom směru.

$$\bar{X} \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \uparrow \quad (0.9)$$

$$\bar{X} \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \downarrow \quad (1.0)$$

- **Průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze**

Aritmetický průměr průměrných jednosměrných polohových úchylek $\bar{X}_i \uparrow$ a $\bar{X}_i \downarrow$ zjištěných při najíždění do polohy P_i .

$$\bar{X}_i = \frac{\bar{X}_i \uparrow + \bar{X}_i \downarrow}{2} \quad (1.1)$$

- **Necitlivost v poloze B_i**

Je hodnota rozdílu mezi průměrnými jednosměrnými polohovými úchylkami zjištěnými při najíždění do polohy P_i v obou směrech. [7]

$$B_i = \bar{X}_i \uparrow - \bar{X}_i \downarrow \quad (1.2)$$

- **Necitlivost v ose B**

Jedná se o největší z absolutních hodnot necitlivostí $|B_i|$ ze všech zadaných poloh podél nebo okolo osy

$$B = \max. [|B_i|] \quad (1.3)$$

- **Průměrná necitlivost v ose \bar{B}**

Aritmetický průměr hodnot necitlivostí B_i ze všech zadaných poloh v dané ose.

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i \quad (1.4)$$

- **Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze**

Odhad běžné nejistoty polohových úchylek zjištěných při sérii n najetí do polohy P_i v jednom směru.

$$S_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} \uparrow - \bar{X}_i \uparrow)^2} \quad (1.5)$$

$$S_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} \downarrow - \bar{X}_i \downarrow)^2} \quad (1.6)$$

- **Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_i \uparrow$ nebo $R_i \downarrow$**

Jedná se o rozsah, který je odvozený z odhadu jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze P_i při použití koeficientu rozšíření 2.

$$R_i \uparrow = 4S_i \uparrow \quad (1.7)$$

$$R_i \downarrow = 4S_i \downarrow \quad (1.8)$$

- **Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze**

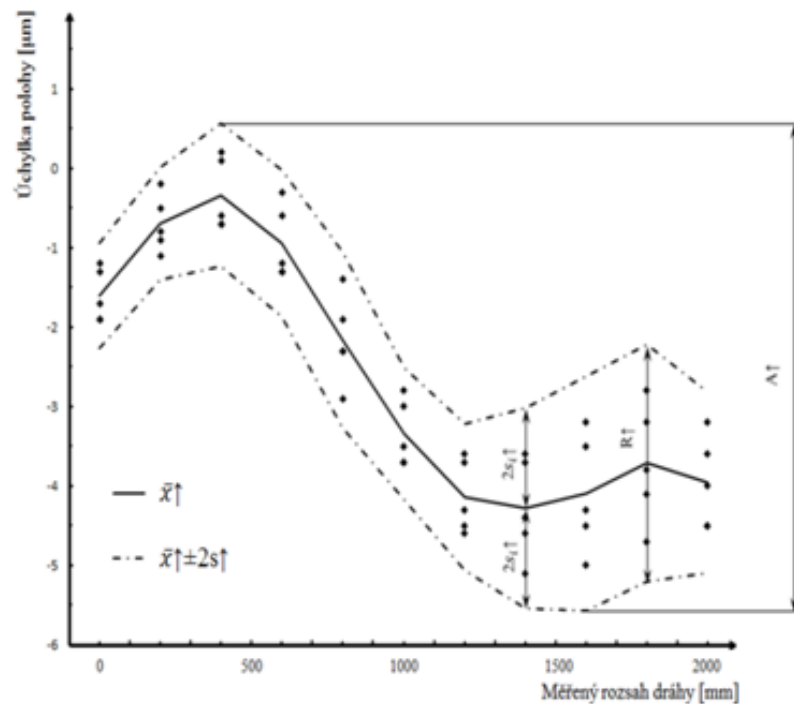
$$R_i = \max. [2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + B_i; R_i \uparrow; S_i \downarrow] \quad (1.9)$$

- **Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose $R \uparrow$ nebo $R \downarrow$**

Je největší hodnota z opakovatelnosti nastavení polohy v kterékoliv poloze P_i podél, nebo okolo dané osy. [7]

$$R \uparrow = \max. [R_i \uparrow] \quad (2.0)$$

$$R \downarrow = \max. [R_i \downarrow] \quad (2.1)$$



Obr. 15 Jednosměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [7]

- **Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose**

$$R = \max. [R_i] \quad (2.2)$$

- **Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose**

Jedná se o rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednosměrných polohových úchylek při nastavování polohy v jednom směru $\bar{x}_i \uparrow$ nebo $\bar{x}_i \downarrow$ v jakékoli poloze P_i , které byly zjištěny v kterékoliv poloze podél nebo okolo dané osy.

$$E \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow] \quad (2.3)$$

$$E \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow] \quad (2.4)$$

- **Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose E**

Tato chyba je rozdílem mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednosměrných polohových úchylek při nastavení polohy v obou směrech $\bar{x}_i \uparrow$ nebo $\bar{x}_i \downarrow$, které jsou zjištěny v kterékoliv poloze P_i podél, nebo okolo dané osy. [7]

$$E = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (2.5)$$

- **Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose M**

Znamená rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných dvousměrných polohových úchylek \bar{x}_i , které byly zjištěny v kterékoliv poloze P_i podél nebo okolo dané osy.

$$M = \max. [\bar{x}_i] - \min. [\bar{x}_i] \quad (2.6)$$

- **Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose**

$A \uparrow$ nebo $A \downarrow$ rozsah odvozený ze spojení jednosměrných systematických úchylek a odhadu pro opakovatelnost při jednosměrném nastavení polohy při použití koeficientu rozšíření 2.

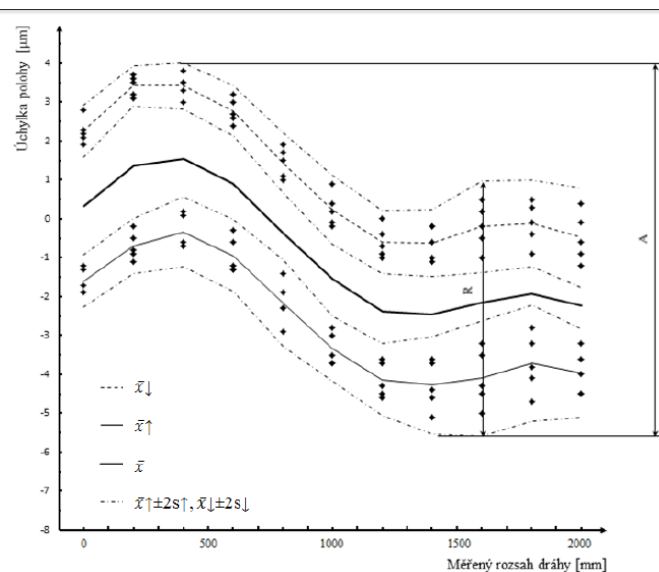
$$A \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \quad (2.7)$$

$$A \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (2.8)$$

- **Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose A**

Popisuje rozsah odvozený ze spojení dvousměrných systematických úchylek a odhadu pro opakovatelnost při dvousměrném nastavení polohy za použití koeficientu rozšíření 2. [7]

$$A = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] \quad (2.9)$$



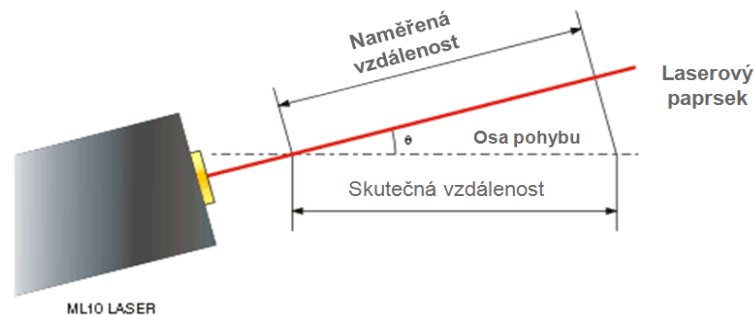
Obr. 16 Dvousměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy v ose A [7]

4 CHYBY MĚŘENÍ A POUŽITÉ STATISTICKÉ A MATEMATICKÉ METODY

4.1.1 Cosinova chyba

Cosinova chyba vzniká špatným nastavením směru laserového paprsku. Odklonem o určitý úhel od osy měření, která znamená skutečnou vzdálenost, dochází k nežádoucí odchylce.

Jedná se o chybu 2. řádu.



Obr. 17 Cosinova chyba [15]

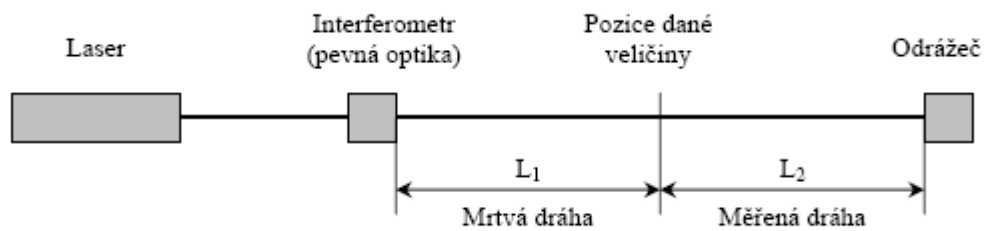
4.1.2 Abbeho princip

Měřicí přístroj má být uspořádán tak, aby osa měření byla přímým pokračováním měřítka přístroje. Měřítka a měřený rozměr musí ležet v jedné přímce. Při nedodržení Abbeho principu vznikají chyby 1. řádu, které jsou úměrné klopení.

4.1.3 Mrtvá dráha

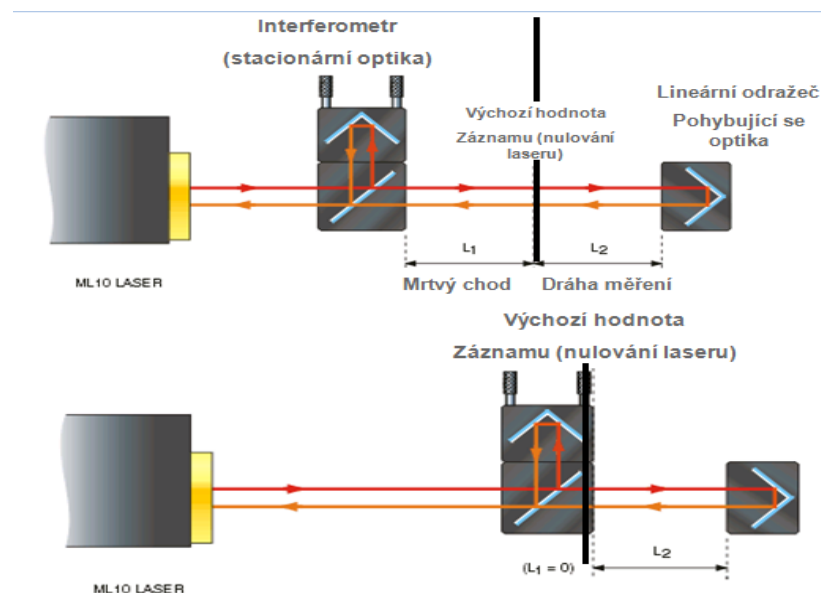
Chyba mrtvé dráhy je chyba přidružená ke změnám prostředí, které nastanou během lineárního měření. Za normálních podmínek je chyba mrtvé dráhy bezvýznamná.

Chyba mrtvé dráhy u laserového měření vzdálenosti L_2 je závislá na vzdálenosti mezi dvěma optickými prvky při nulování systému. Pokud nedochází k pohybu mezi interferometrem a reflektorem a mění se podmínky prostředí v okolí laserového paprsku, potom se vlnová délka ve vzduchu bude měnit podél celé dráhy ($L_1 + L_2$), ale laserový měřicí systém ji bude kompenzovat pouze podél dráhy L_2 . Tím chyba mrtvé dráhy zavedena do paprsku na dráze L_1 nebude kompenzována. [15]



Obr. 18 Mrva dráha [15]

Tato chyba je zanedbatelná, pokud se stacionární a pohyblivá optika dotýká v době, kdy se provádí nulování. [15]



Obr. 19 Mrtvá dráha [15]

- **Nejistota vlivem měřícího zařízení U_{DEVICE}**

Doporučuje se použití kalibrovaného přístroje. Jestli protokol o kalibraci uvádí maximální nejistotu v mikrometrech, je použita rovnice (29). Kalibrační list také může obsahovat maximální nejistotu ($\mu\text{m}/\text{m}$) nebo v (ppm), je použita rovnice (30). Mezi faktory, které přispívají k nejistotě měření, jsou přesazení měřícího zařízení k ose zkoušeného stroje, nejistota vlivem kompenzace teploty stroje a okolí. Jestliže není dostupný žádný kalibrační certifikát, může být nejistota kontrolována vztahem (31). [7]

$$U_{DEVICE} = U_{CALIBRATION} \quad (3.0)$$

$$U_{DEVICE} = U_{CALIBRATION} \times L \quad (3.1)$$

$$U_{DEVICE} = 0,6 \times R_{DEVICE} \times L \quad (3.2)$$

U_{DEVICE} - nejistota způsobená měřícím zařízením (μm)

$U_{\text{CALIBRATION}}$ - nejistota kalibrace dle kalibračního certifikátu (μm nebo ppm) s faktorem krytí $k=2$

R_{DEVICE} – rozsah chyby určen výrobcem zařízení ($\mu\text{m}/\text{m}$ nebo ppm)

L – měřená délka (m)

k – faktor měření pro výpočet odhad nejistoty

- **Nejistota vlivem přesazení měřícího zařízení k ose zkoušejícího stroje**

Měřící zařízení musí být ustaveno rovnoběžně s osou zkoušeného stroje, jinak je zatíženo chybou. S optickým měřícím zařízením jako je laserinterferometr bude přesazení v mezích 1mm, jestliže pohyb odraženého paprsku je dle doporučení výrobce.

$$U_{\text{MISALIGNMENT}} = 0,3 \times \frac{R_{\text{MISALIGNMENT}}^2}{L} \quad (3.3)$$

$U_{\text{MISALIGNMENT}}$ - nejistota měření vlivem přesazení (μm)

$R_{\text{MISALIGNMENT}}$ – přesazení (mm)

L – měřená délka (m)

Tab. 2 Nejistota měření vlivem přesazení měřícího zařízení

$U_{\text{MISALIGNMENT}}$ [7]

Měřená délka (mm)	$U_{\text{MISALIGNMENT}} (\mu\text{m})$					
	Přesazení (mm)					
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
200	0	1	3	6	13	23
300	0	1	2	4	9	15
500	0	0	1	2	5	9
800	0	0	1	1	3	6
1000	0	0	1	1	3	5
1500	0	0	0	1	2	3
2000	0	0	0	1	1	2

- **Nejistota vlivem kompenzace teploty stroje**

Jestliže je měření prováděno při teplotách jiných než 20 °C, pak relativní tažnost mezi strojem nebo obrobkem a měřícím zařízením musí být kompenzována. Tato operace je ve většině případů je tento úkon často skrytý, neboť měřící zařízení je kompenzováno automaticky. Měření teploty potřebné pro kompenzaci má nejistotu měření, která se počítá k celkové nejistotě měření.

- **Nejistota vlivem měření teploty stroje**

Velmi důležitým vlivem pro měření teploty je určení měřícího bodu, které musí být reprezentativní pro teplotu stroje nebo obrobku. Nejistota měření vlivem měření teploty stroje je hlavním faktorem nejistoty měření délky. Většina užívaných snímačů teploty mají rozsah odchylky cca 0,7°C ±0,35°C. Nejistota měření vlivem měření může být odhadnuta pro stroj $U_{M,MACHINE}$ a pro měřící zařízení $U_{M,DEVICE}$.

$$U_{M,MACHINE\ TOOL} = 0,6 \times \alpha \times L \times R(\theta) \quad (3.4)$$

$$U_{M,DEVICE} = 0,6 \times \alpha \times L \times R(\theta) \quad (3.5)$$

$U_{M,MACHINE\ TOOL}$ – nejistota měření při měření teploty stroje (μm)

$U_{M,DEVICE}$ – nejistota měření při měření teploty měřícího zařízení (μm), která může být nastavena na nulu, pokud jsou známé vyjádřené nejistoty kompenzace teploty nebo pokud měřící zařízení přijímá teplotu stroje či obrobku

α – koeficient roztažnosti [$\mu\text{m}/(\text{m} \times ^\circ\text{C})$]

L - měřená délka (m)

$R(\theta)$ - měřený rozsah teploty vlivem nejistoty měření, nebo teplotní rozdíl mezi upínacím zařízením obrobku stroje a měřícím zařízením ($^\circ\text{C}$)

- **Nejistota vlivem koeficientu roztažnosti**

Nejistota vzniklá vlivem možné chyby v koeficientu roztažnosti stroje nebo obrobku $U_{E,DEVICE}$ a nejistota vlivem možné chyby koeficientu roztažnosti $U_{E,DEVICE}$ musí být vyhodnoceny. Pokud nejistota pro měřící zařízení zahrnuje nejistotu kompenzace měření při teplotě 20°C, pak $U_{E,DEVICE}$ může být nastaveno na nulu. [7]

$$U_{E,MACHINE\ TOOL} = 0,6 \times \Delta T \times L \times R(\alpha) \quad (3.6)$$

$$U_{E,DEVICE} = 0,6 \times \Delta T \times L \times R(\alpha) \quad (3.7)$$

$U_{E,MACHINE\ TOOL}$ – nejistota měření vlivem možné chyby koeficientu teplotní roztažnosti stroje nebo obrobku [$\mu\text{m}/(\text{m}\times^{\circ}\text{C})$]

$U_{E,DEVICE}$ – nejistota vlivem možné chyby v koeficientu teplotní roztažnosti délky měřícího zařízení (μm)

ΔT – rozdíl na 20°C $\Delta T=T-20^{\circ}\text{C}$

T – Teplota měřícího zařízení ($^{\circ}\text{C}$)

L – měřená délka (m)

$R(\alpha)$ – rozsah chyby koeficientu roztažnosti měřícího zařízení [$\mu\text{m}/(\text{m}\times^{\circ}\text{C})$]

- **Nejistota vlivem kolísání chyby environmentu E_{VE}**

Během měření mohou být pozorovány teplotní změny, které ovlivňují stroj a měřící zařízení. Tyto jevy musí být minimalizovány.

Zkouška driftu: Před zahájením měřené délky se pohybuje s osou stroje do extrémně vzdálené polohy stroje v jeho rozsahu. Během času, jenž je zapotřebí pro měření délky, se zaznamená aktuální hodnota odečtena na měřícím zařízení.

$$U_{EVE} = 0,6 \times E_{VE} \quad (3.8)$$

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

E_{VE} – rozsah zjištěný při zkoušce driftu (μm)

- **Odhad nejistoty parametrů $A, A\uparrow, A\downarrow, E, E\uparrow, E\downarrow, R, R\uparrow, R\downarrow, B$**

V úvahu bereme faktory k nejistotě měření jako: přesazení zařízení vzhledem k ose stroje, kterou zkoušíme. Dále měřící zařízení, koeficient teplotní roztažnosti stroje a měřícího zařízení a kolísání chyby environmentu (EVE). [7]

- **Odhad nejistoty pro jednosměrnou opakovatelnost $U (R\uparrow, R\downarrow)$ pro osy do 2000mm**

$$U(R\uparrow, R\downarrow) = 2 \times U_{EVE} \quad (3.9)$$

$U(R\uparrow, R\downarrow)$ - nejistota jednosměrné opakovatelnosti $k=2$ pro pět měřících zdvihů (μm)

- **Odhad nejistoty pro necitlivost U (B) pro osy do 2000mm**

$$U(B) = 0,9 \times U_{EVE} \quad (4.0)$$

U(B) - nejistota měření necitlivosti k=2 pro pět měřících zdvihů (μm)

- **Nejistota dvousměrné opakovatelnosti U (R) pro osy do 2000mm**

$$U(R) = 0,2 \times U_{EVE} \quad (4.1)$$

U(R) - nejistota měření dvousměrné opakovatelnosti k=2 pro pět měřících zdvihů (μm)

- **Nejistoty systematických úchylek U (M, E, E↑, E↓) pro osy do 2000mm**

$U(E, E \uparrow, E \downarrow) =$

$$\sqrt{U_{DEVICE}^2 + U_{MISALIGNMENT}^2 + U_{M,MACHINE\ TOOL}^2 + U_{M,DEVICE}^2 + U_{E,MACHINE\ TOOL}^2 + U_{EDEVICE}^2 + \frac{1}{2}U_{EVE}^2} \quad (4.2)$$

$U(M) =$

$$\sqrt{U_{DEVICE}^2 + U_{MISALIGNMENT}^2 + U_{M,MACHINE\ TOOL}^2 + U_{M,DEVICE}^2 + U_{E,MACHINE\ TOOL}^2 + U_{EDEVICE}^2 + \frac{1}{10}U_{EVE}^2} \quad (4.3)$$

U(E,E↑,E↓) – nejistota měření systematických úchylek k=2 pro pět měřících zdvihů (μm)

U(M) – nejistota měření pro průměrnou úchylku polohy M, k=2 pro pět měřících zdvihů (μm)

- **Nejistota přesnosti polohování U (A, A↑, A↓)**

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow) = \sqrt{U(E)^2 + U(R \uparrow, R \downarrow)^2} \quad (4.4)$$

U(A,A↑,A↓) – nejistota měření přesnosti polohování k=2 pro pět měřících zdvihů (μm) [7]

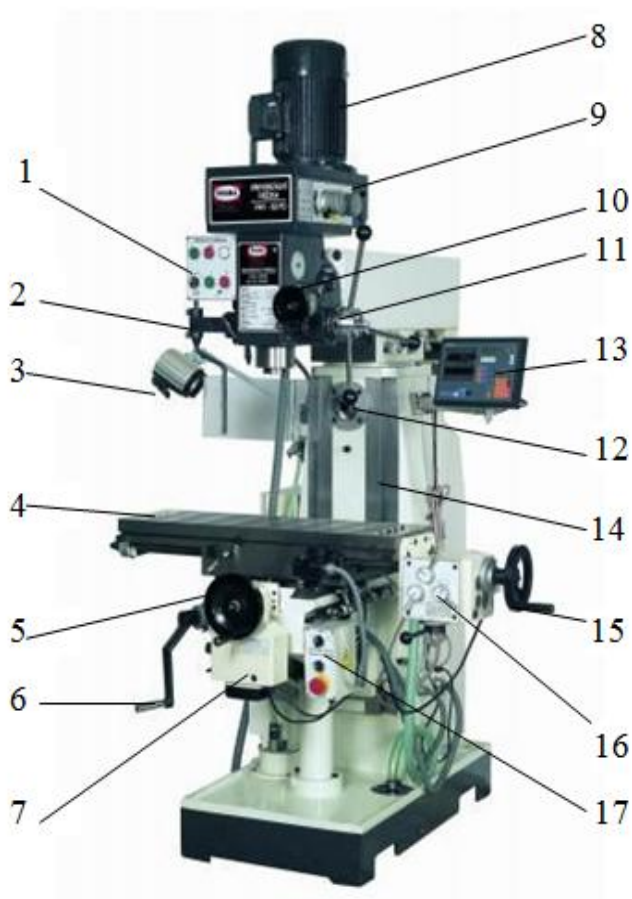
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 MĚŘENÍ VÝROBNÍHO ZAŘÍZENÍ

Jednou z hlavních vlastností při kontrole výrobních strojů je jejich přesnost. Samotná přesnost výrobních strojů se může definovat jako velikost odchylky skutečné polohy nástroje od požadované hodnoty. Přesnost výrobních strojů vyhodnocujeme jako přesnost pracovní a geometrickou. [17]

5.1 Univerzální frézka FHV-50PD

Univerzální frézka se používá pro obrábění kovových i nekovových dílců. Stroj je určen pro všechny důležité funkce vrtání a frézování, které lze provádět ve vertikální, horizontální a úhlové poloze. Posuv je řízený ručně nebo strojně. Frézku lze využít v nástrojářských dílnách, údržbách, malých a středních výrobních provozech.



Obr. 20 Univerzální frézka FHV-50PD [18]

Tab. 3 Popis stroje FHV-50PD [18]

1	Ovládání vertikálního vřetene	10	Ruční kolo mikroposuvu vřetene
2	Páka aretace vřetene	11	Ruční páka posuvu vřetene
3	Osvětlení	12	Horizontální vřeteník
4	Stůl univerzální frézky	13	Systém digitálního odměřování
5	Ruční kolo příčného posuvu	14	Sloup frézky s prizmatickým vedením
6	Ruční páka nastavení výšky stolu	15	Ruční kolo podélného posuvu
7	Strojní příčný posuv	16	Strojní podélný posuv
8	Motor	17	Ovládání horizontálního vřetene
9	Řadící páky otáček vřetene		

Tab. 4 Technické parametry univerzální frézky VHF-50PD [18]

Příkon dvourychlostního horizont. motoru	0,85/1,5 kW / 400 V
Příkon vertikálního motoru	1,5 kW / 400V
Příkon motoru podélného posuvu	350 W
Příkon motoru příčného posuvu	170 W
Příkon motoru čerpadla	40 W
Max. průměr vrtání	50 mm
Max. průměr horizont. frézování	100 mm
Max. průměr vertikál. frézování	25 mm
Max. hmotnost obrobku	100 kg
Kužel vřetene	Mk IV
Otáčky horizont. vřetene	60-1350 ot./min.
Otáčky vertikál. vřetene	115-1750 ot./min.
Vzdálenost vertikál. vřetene od sloupu	200-700 mm
Vzdálenost vertikál. vřetene od stolu	100-480 mm
Vzdálenost vertikál. vřetene od podlahy	1240 mm
Vzdálenost horizont. vřetene od sloupu	30-210 mm
Průměr vřetene 100 mm	100 mm
Posuv strojní podélný (rozsah rychlosti posuvu)	18-300 mm/min. (6st.)
Podélný posuv stolu	400 mm
Příčný posuv stolu	250 mm
Rozměr stolu	800 x 240 mm
Hmotnost stroje	700 kg

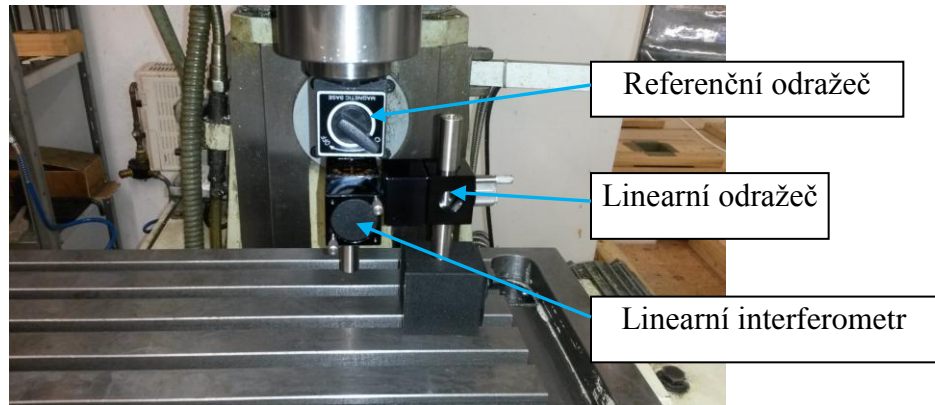
6 MĚŘENÍ A POLOHOVÁNÍ LASERINTERFEROMETRU RENISHAW

Měřicí systém Renishaw, který tvoří sestavu z mnoha částí je nutné před samotným měřením poskládat, vyrovnat, seřídít a zkalibrovat. Měřicí zařízení je složeno ze sestavy měřicí optiky v tomto případě sestavenou pro lineární měření a XL laseru, jež musí být postaven na pevném základu a stejně tak jako měřená frézka vyrovnána do rovinné polohy tak, aby nedocházelo ke vzniku možných chyb při měření. K vyrovnání laseru XL slouží nastavitelné nohy stativu s polohovatelným podstavcem měřicího zařízení. Stativ byl nastaven do takové výšky, aby po připevnění laseru XL zasahoval měřicí optiku. Polohovatelný podstavec slouží pro úhlové nastavení laseru XL. K ověření rovnovážné polohy měřené frézky a laseru byla použita vodováha.



Obr. 21 Vyrovnání laseru vodováhou

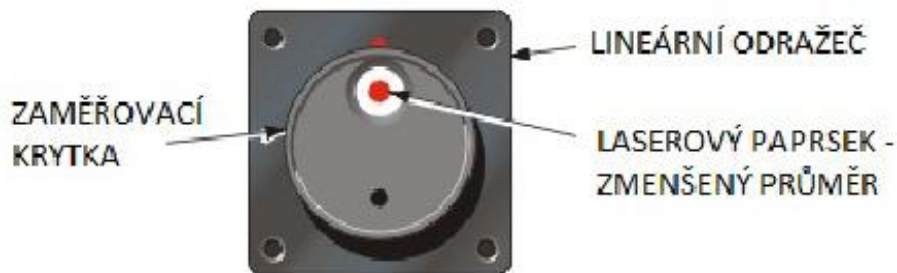
Části optické soustavy musí být v jedné rovině a aby nedocházelo k chybě mrtvé dráhy, byl nastaven lineární interferometr a lineární odražeč co nejblíže k sobě a vůči sobě rovnoběžně. Optická soustava je složena z pohyblivé a nepohyblivé části. Pohyblivá část, která je položena na pracovním stole frézky FHV-50PD obsahuje magnetický držák na který je připojen lineární odražeč. Pevná část optické soustavy je sestavena z interferometru a referenčního odražeče, který je připevněn na frézku.



Obr. 22 Sestavená měřicí optika

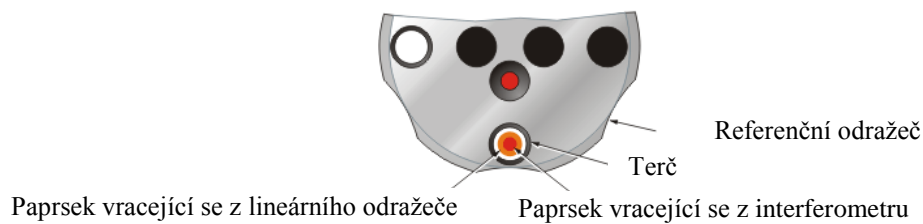
Po sestavení měřicí optiky je nutné celou sestavu seřídít pro lineární měření. Světelný paprsek laseru jež po zapnutí vychází z měřícího zařízení musí dopadat na vyrovnávací terčík, který byl připenněn na měřící optiku pouze pro seřízení. Toto seřízení je postupně ručně provedeno v celém rozsahu měřené délky tak, aby v jakékoliv poloze interferometru stále dopadal laser na terčík.

Jestliže tato podmínka není splněna, dochází při měření k nepřesnostem a v krajním případě k přerušení paprsku během měření. Maximální vybočení, naklopení nebo vytočení lineárního interferometru by nemělo přesáhnout 2° , čehož lze dosáhnout seřízením od oka.

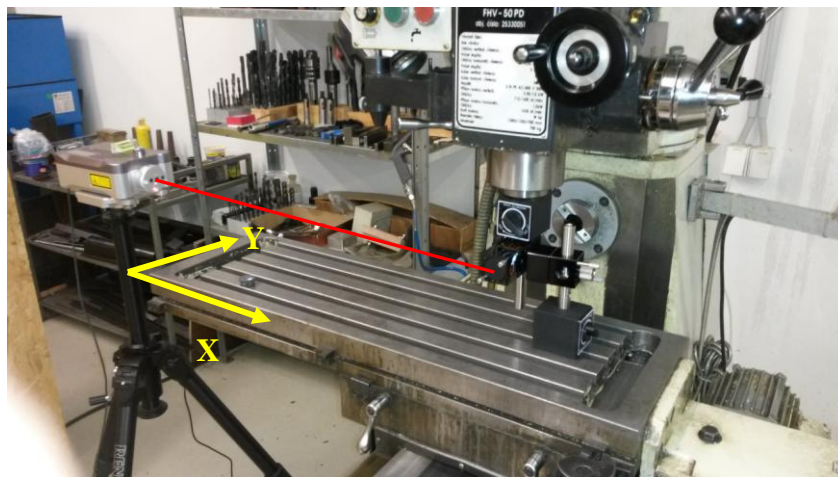


Obr. 23 Dopad laserového paprsku na vyrovnávací terč

Pokud je světelný paprsek seřízen v celé měřené dráze, po vyjmutí terče z interferometru by se měl paprsek odrazit zpět z interferometru a dopadnou do středu clony laseru XL. Jestliže tomu tak není, je nutné měřící optiku v horizontální nebo vertikální poloze znovu seřídít.

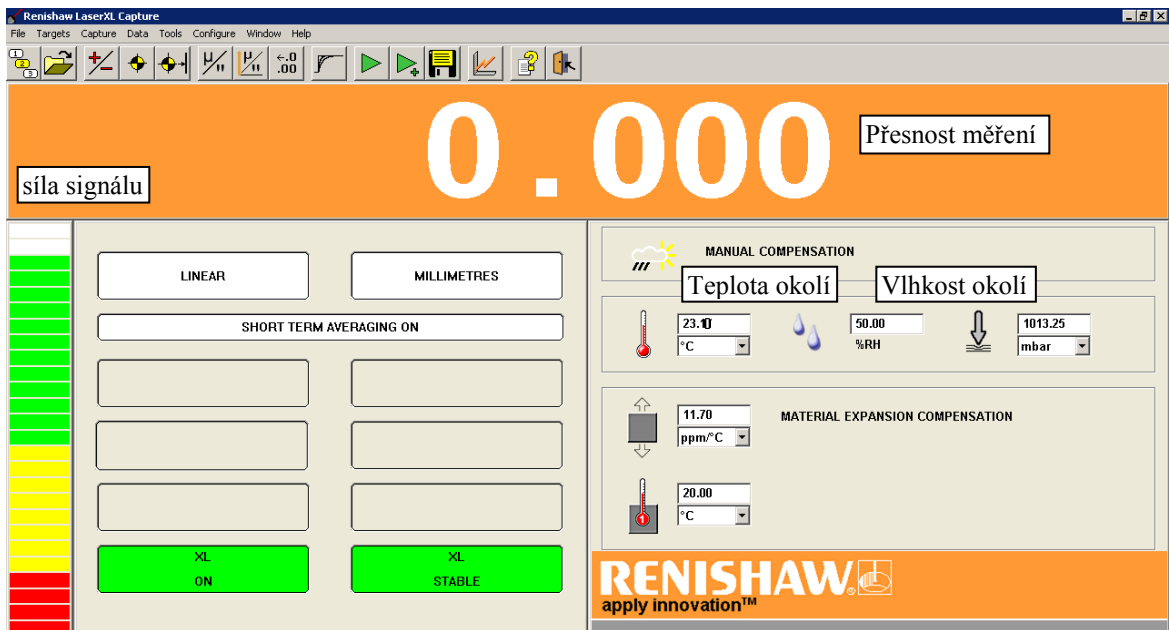


Obr. 24 poloha vycházejícího a dopadajícího paprsku laseru XL



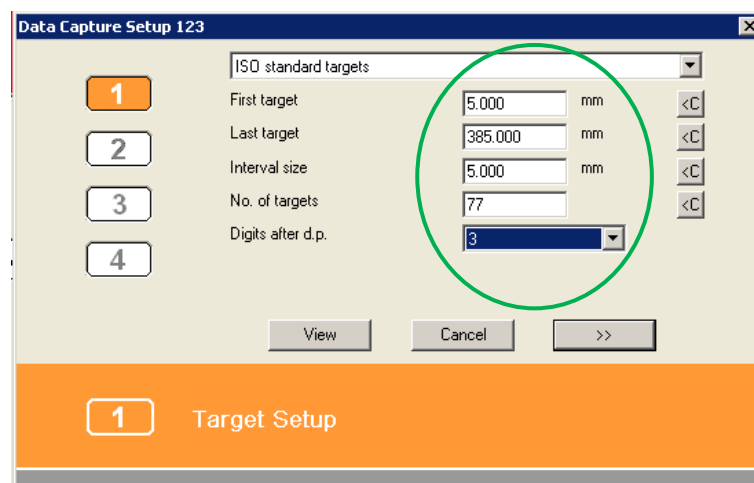
Obr. 25 Pohled na frézku měřenou v ose x

Po seřízení Laseru a optické soustavy byla pootočená clona laseru XL do měřicí polohy pro zjištění síly signálu, který se zjistí připojením laseru k počítači a spuštěním softwaru Renishaw Laser XL capture pro lineární měření. Po připojení přes USB rozhraní se měřící zařízení Laser XL vytemperuje a kalibruje. Temperace probíhá hned po připojení a je signalizována 5ti LED diodami na vrchní straně laseru. Laser je připraven k měření, když LED diody změni barvu z oranžové na zelenou.



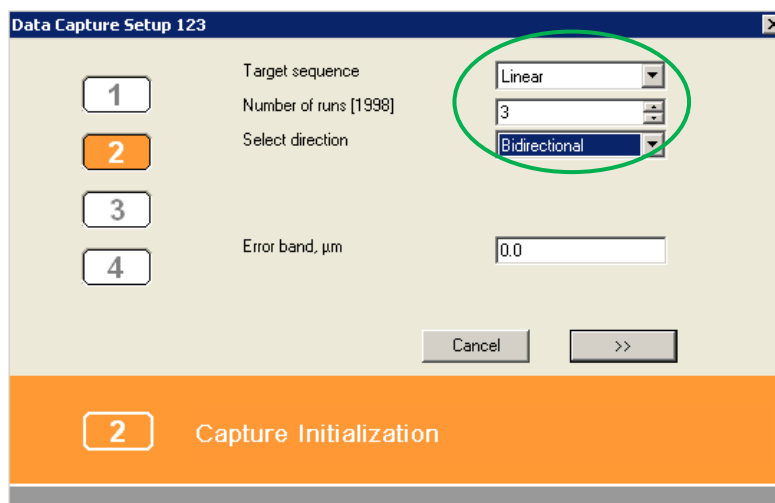
Obr. 26 Kalibrace lineárního interferometru a ověření síla signálu

Před samotným měřením je nutné nastavit stůl frézky do nulové polohy a nastavit parametry měření v několika krocích, na které uživatele navádí software Renishaw. V prvním kroku se jedná o způsob vyhodnocování. V tomto případě jde o lineární měření dle ISO 230, kde první měřená hodnota je ve vzdálenosti 5mm a poslední měřená hodnota v 385mm. Jestliže měřená frézka má celkový posuv v ose x 400mm měříme jí téměř v celém rozsahu podélného posuvu stolu. Celkový počet snímaní při posuvech po pěti milimetrech v ose x nám vyšlo 77. V ose Y byl počet snímaných poloh $P_i=41$.



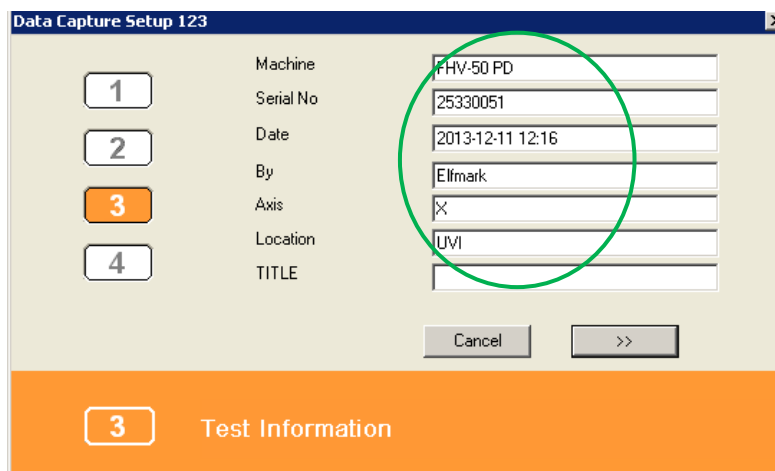
Obr. 27 Nastavení parametrů snímání

V druhém kroku byl nastaven způsob měření – lineární. Počet běhů nastaven na 3 při použití bidirekcionálního snímání.



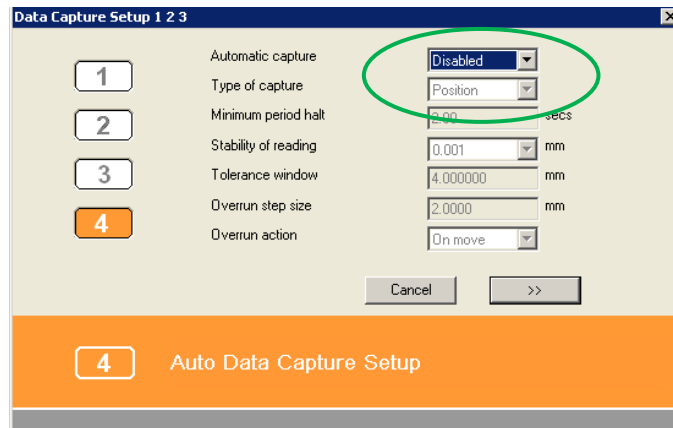
Obr. 28 Nastavení metody snímání

Ve třetím kroku byly nastaveny informace o stroji a data, která se projevila v hlavičce výstupního grafického protokolu



Obr. 29 Charakteristika stroje a metrologa

V posledním kroku nastavení parametrů a informací snímání bylo vybráno manuální snímání dat.

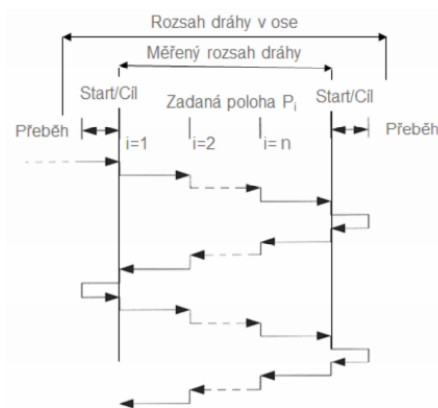


Obr. 30 Nastavení ručního režimu snímání

Po vyrovnaní a nastavení způsobu snímání byla jako první měřena pro přesnost výrobního stroje osa X v rozsahu 0mm až 385mm. Poloha posuvného stolu byla přesunuta na okraj pohyblivého stolu frézky, který je ovládaný ručním kolem a nastavena na nulu. Ovládání stroje probíhalo manuálně v intervalu po pěti milimetrech. Po najetí stroje do požadované měřené polohy a ustálení hodnoty bylo v softwaru zmáčknuto tlačítko capture, které zaznamenal údaj polohy měřené frézky lineárním bidirekčním cyklem.

Tento cyklus zaznamenává hodnoty ve dvou směrech při jednom měření. Směr kladný, když se přibližuje k hodnotě zadané polohy a následně při cestě zpět záporný směr.

Hodnota přeběhu v obou osách x, y byla v obou směrech zvolena na 5mm.



Obr. 31 Bidirekční cyklus snímání

V průběhu měření byla použita ruční kompenzace teploty a vlhkosti, kdy byly vlivy prostředí průběžně aktualizovány do softwaru Renishaw Capture. Na začátku měření byla teplota 22,1°C a na konci byla zaznamenána teplota 23,2°C.

6.1 Zaměření na vibrace okolí

Dílna UVI je vybavena několika stroji pro nekonvenční a konvenční obrábění kovů, kompozitů a polymerů. V okolí měřené frézky FHV-50PD byly během měření všechny stroje vypnuté a také přesnost samotné frézky FHV byla měřena při vypnutém režimu. Tudiž bylo zamezeno potenciálním možným vibracím a maximální hrozba vibrací hrozila od samotného metrologa.

Veškerá data byla snímána po dobu $\frac{1}{4}s$, které byly následně zprůměrovány. Těchto 256 údajů se projevilo jako jedna naměřená hodnota – průměrná polohová odchylka v poloze.

7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Vyhodnocování výsledků je dle postupu normy ČSN ISO 230-2; 2010 pro výrobní stroje v rozsahu do 2000mm.

- **Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose** (2.9)

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

$$A_{osa X} = 134,388 - (-20,8) = 155,218 \mu m$$

$$A_{osa Y} = 111 - (-174,830) = 285,83 \mu m$$

- **Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose ve směru \uparrow** (2.7)

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

$$A \uparrow_{osa X} = 132,952 - (-20,830) = 153,782 \mu m$$

$$A \uparrow_{osa Y} = 101,388 - 174,830 = 276,218 \mu m$$

- **Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose ve směru \downarrow** (2.8)

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

$$A \downarrow_{osa X} = 179,033 - (-20,830) = 199,863 \mu m$$

$$A \downarrow_{osa Y} = 111 - 151,976 = 262,976 \mu m$$

- **Dvousměrná systematická polohová úchylnka v ose E** (2.5)

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

$$E_{osa X} = 131,333 - (-17,333) = 148,667 \mu m$$

$$E_{osa Y} = 109 - (-170,667) = 279,667 \mu m$$

- **Jednosměrná systematická polohová úchylnka v ose ve směru \uparrow** (2.3)

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

$$E \uparrow_{osa X} = 128,333 - 17,333 = 145,667 \mu m$$

$$E \uparrow_{osa Y} = 109 - (-149,667) = 258,667 \mu m$$

- **Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose ve směru ↓** (2.4)

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

$$E \downarrow_{osa X} = 131,333 - 12,667 = 144 \mu m$$

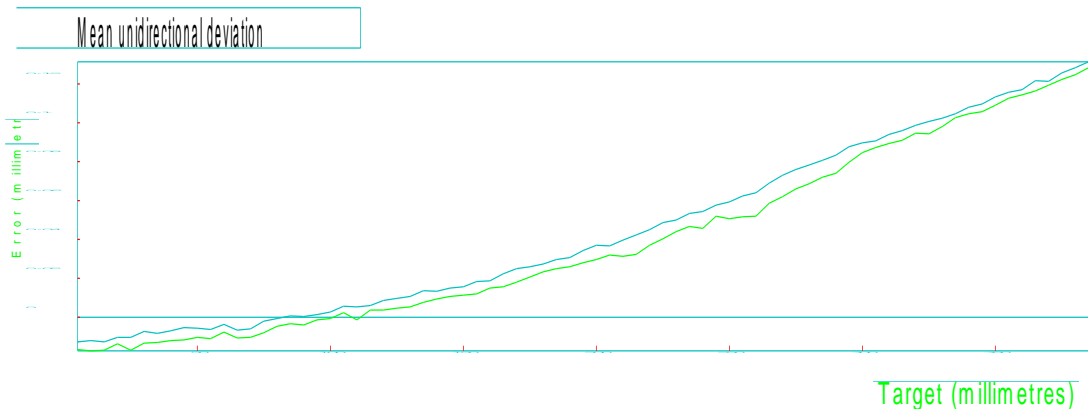
$$E \downarrow_{osa Y} = 98,333 - (-170,667) = 269 \mu m$$

- **Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose M** (2.6)

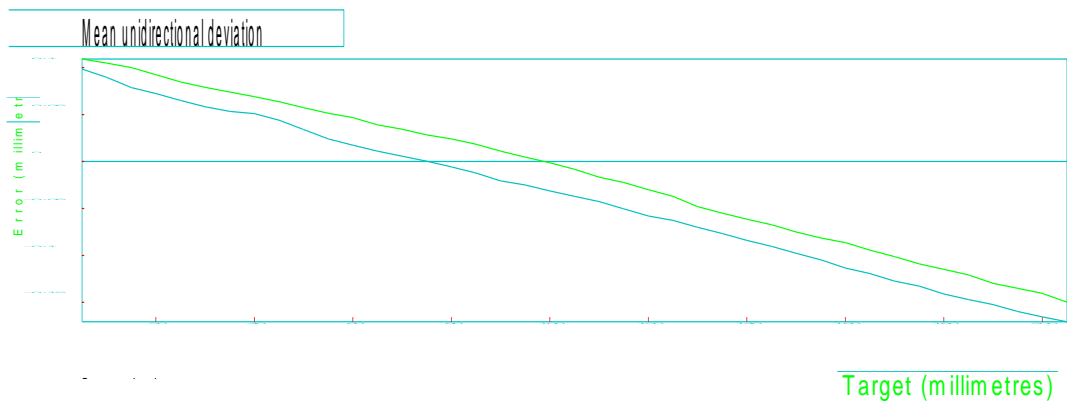
$$M = \max. [\bar{x}_i] - \min. [\bar{x}_i]$$

$$M_{osa x} = 129,834 - (14,833) = 144,667 \mu m$$

$$M_{osa y} = 103,667 - (-160,166) = 263,833 \mu m$$



Obr. 32 Graf Průměrné dvousměrné polohové úchylky v ose X



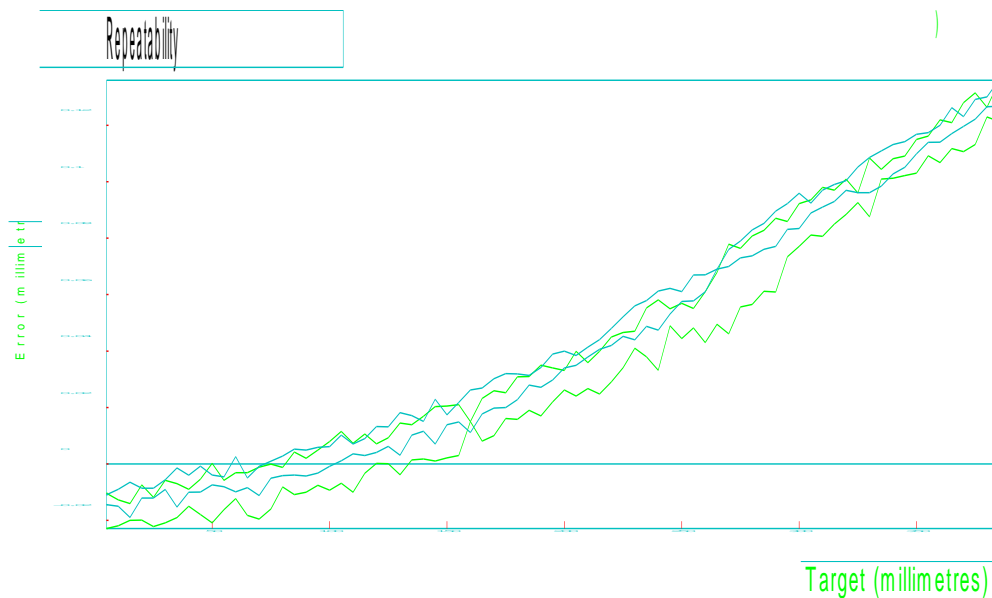
Obr. 33 Graf průměrné dvousměrné polohové úchylky v ose Y

- Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose (2.2)

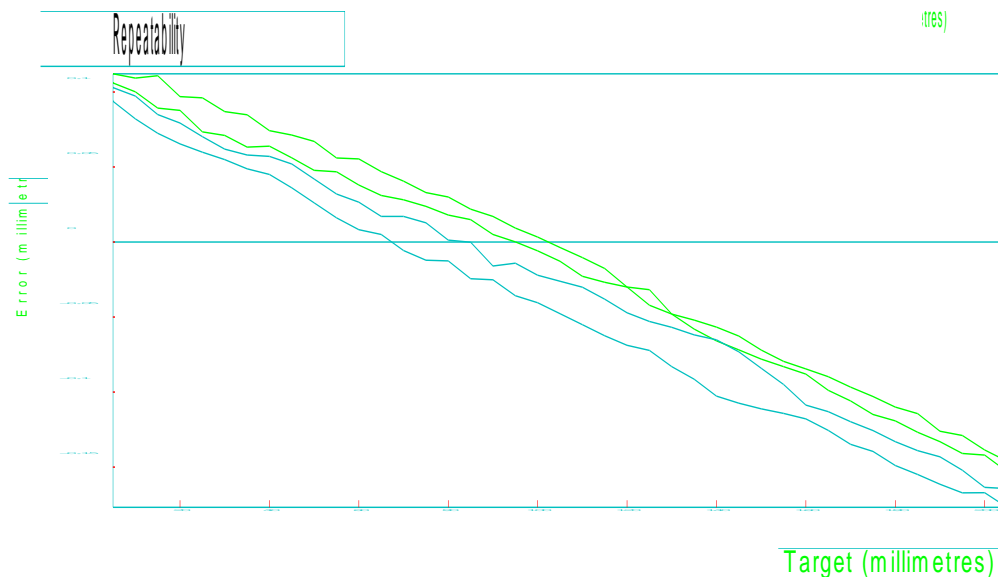
$$R = \max. [R_i]$$

$$R_{osa X} = 23,583 \mu m \quad (P_i = 54)$$

$$R_{osa Y} = 41,217 \mu m \quad (P_1 = 12)$$



Obr. 34 Graf dvousměrné opakovatelnosti v ose X



Obr. 35 Graf dvousměrné opakovatelnosti v ose Y

- Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose R↑ (2.0)

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

$$R \uparrow_{osa X} = 21,166 \mu m \quad (P_i = 54)$$

$$R \uparrow_{osa Y} = 15,144 \mu m \quad (P_1 = 5)$$

- **Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose R↓ (2.1)**

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

$$R \downarrow_{osa X} = 10,583 \mu m \quad (P_i = 29)$$

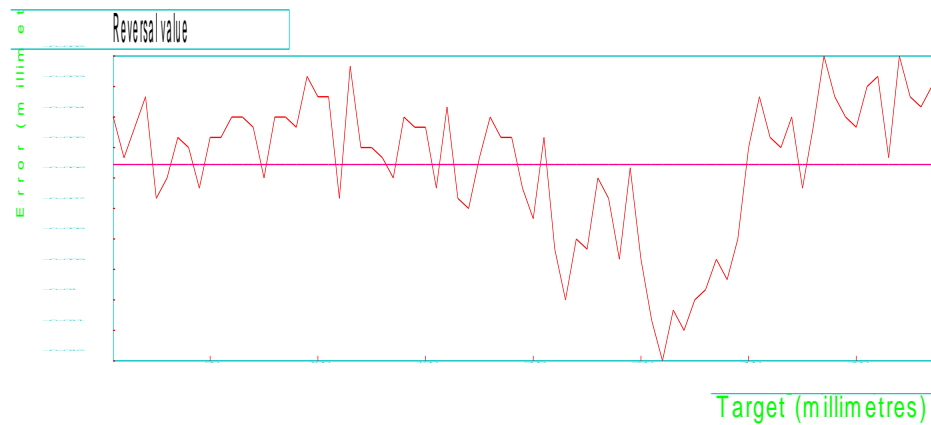
$$R \downarrow_{osa Y} = 24,980 \mu m \quad (P_1 = 28)$$

- **Necitlivost v ose B (1.3)**

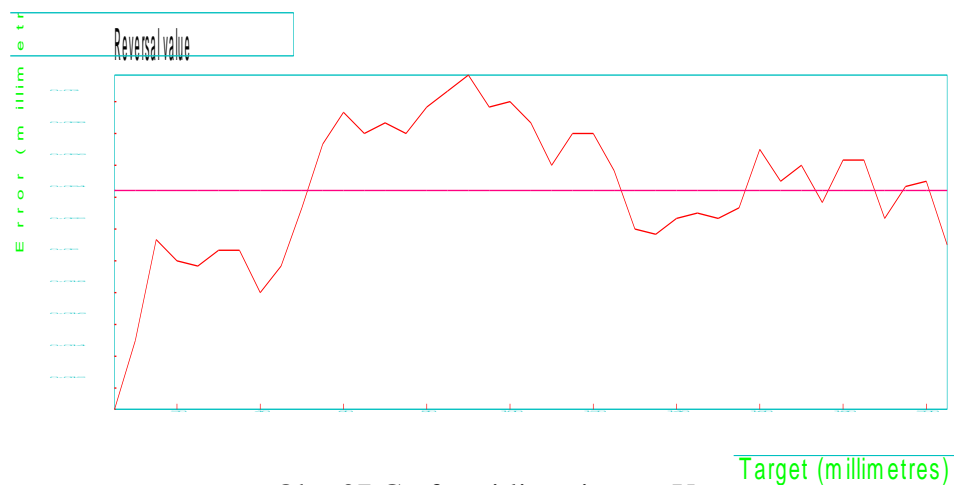
$$B = \max. [|B_i|]$$

$$B_{osa X} = 12 \mu m \quad (P_i = 52)$$

$$B_{osa Y} = 31,667 \mu m \quad (p_i = 18)$$



Obr. 36 Graf necitlivosti v ose X



Obr. 37 Graf necitlivosti v ose Y

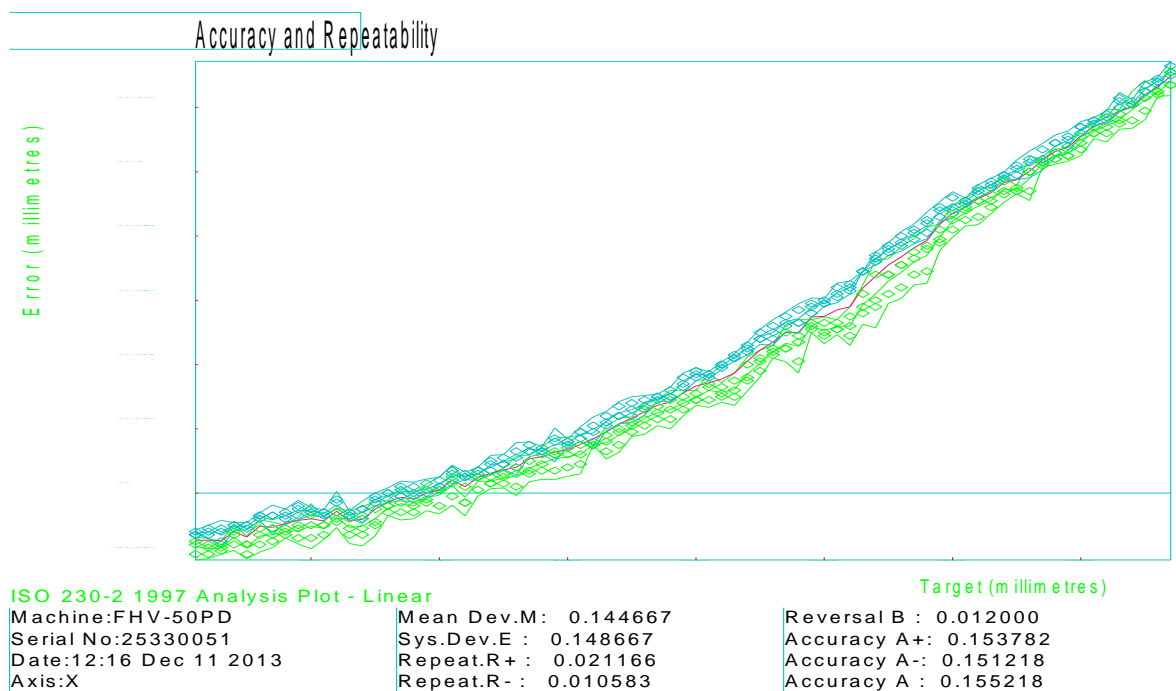
- Průměrná necitlivost v ose \bar{B} (1.4)

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

$$B_{osa X} = -\frac{428}{77} = -5,558 \mu m$$

$$B_{osa Y} = \frac{998,033}{41} = 24,423 \mu m$$

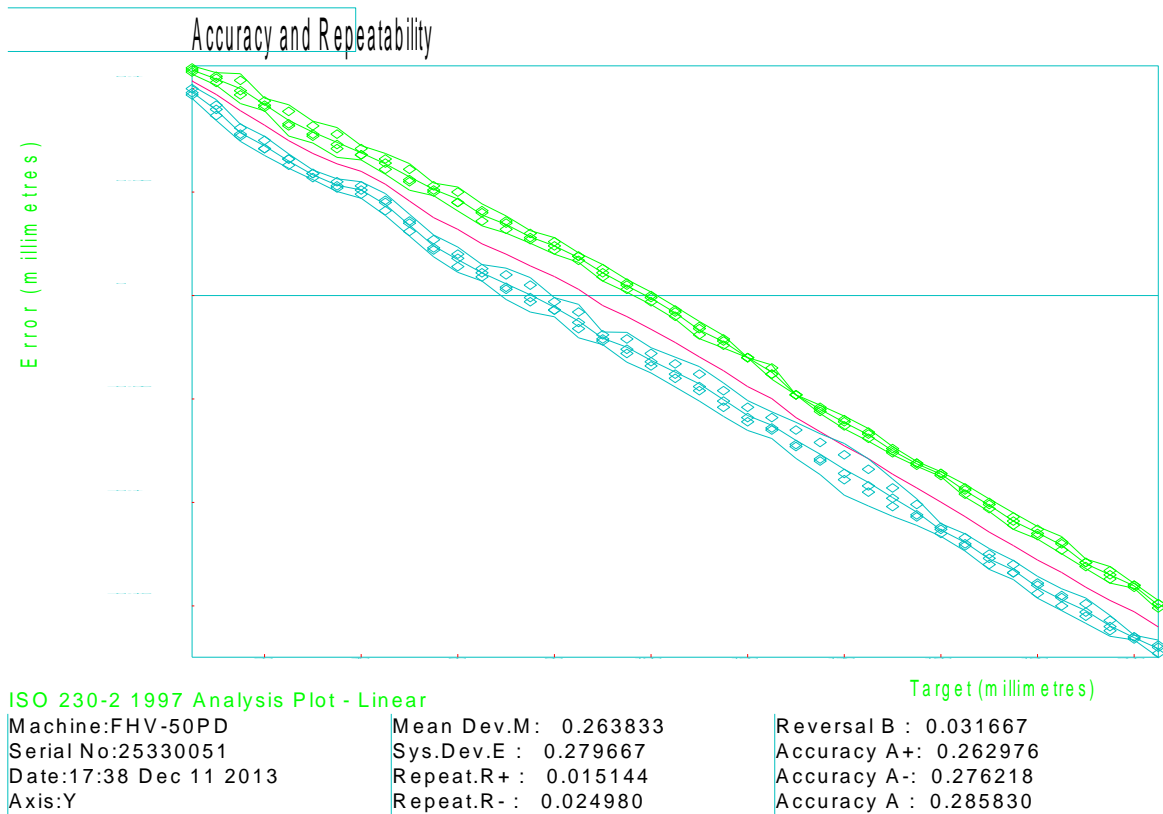
Software Renishow nabízí výstup naměřených hodnot v několika normách. V tomto případě jsou všechny výpočty z kapitoly vyhodnocení výsledků měření počítány podle normy ISO 230 a jsou k porovnání se statistickou analýzou softwaru Renishow viz obr. 40 v ose X a obr. 42 v ose Y. Vypočítané hodnoty jsou převedeny na mikrometry a počítány na tři desetinná místa.



Obr. 38 Graf polohování osy X dle normy ISO 230-2

---Statistics---			
Axis Deviation (millimetres)	Unidirectional (-)	Unidirectional (+)	Bidirectional
Reversal B	Not applicable	Not applicable	0.012000 (at i=52)
Mean Reversal \bar{B}	Not applicable	Not applicable	-0.005558
Mean Dev.M	Not applicable	Not applicable	0.144667
Sys.Dev.E	0.144000	0.145667	0.148667
Repeatability R	0.010583 (at i=29)	0.021166 (at i=54)	0.023583 (at i=54)
Accuracy A	0.151218	0.153782	0.155218

Obr. 39 Vyhodnocení polohování osy X dle normy ISO 230-2



Obr. 40 Graf polohování osy Y dle normy ISO 230-2

---Statistics---

Axis Deviation (millimetres)	Unidirectional (-)	Unidirectional (+)	Bidirectional
Reversal B	Not applicable	Not applicable	0.031667 (at i=18)
Mean Reversal \bar{B}	Not applicable	Not applicable	0.024423
Mean Dev.M	Not applicable	Not applicable	0.263833
Sys.Dev.E	0.269000	0.258667	0.279667
Repeatability R	0.024980 (at i=28)	0.015144 (at i= 5)	0.041217 (at i=12)
Accuracy A	0.276218	0.262976	0.285830

Obr. 41 Vyhodnocení polohování osy Y dle normy ISO 230-2

Na Obr. 39 a 41 je graficky znázorněna přesnost polohování frézky. Kde v ose x chyba přesnosti se zvětšujícím rozsahem roste. Průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze v největším měřeném rozsahu osy $x=129\mu\text{m}$ a u osy $y=160\mu\text{m}$.

7.1 Výpočet nejistot měření pro lineární polohování

Nejistoty měření jsou vyhodnoceny dle normy ČSN ISO 230-2 a faktory, které k nejistotám přispívají, jsou způsobeny měřicím zařízením, přesazením měřeného stroje k ose měřicího zařízení a kolísání chyby, které jsou způsobeny environmentem.

- **Nejistota vlivem měřicího zařízení U_{DEVICE}** (3.2)

$$U_{DEVICE} = 0,6 \times R_{DEVICE} \times L$$

$$U_{DEVICE \text{ osa } X} = 0,6 \times 0,5 \times 0,385 = 0,1155 \mu m$$

$$U_{DEVICE \text{ osa } Y} = 0,6 \times 0,5 \times 0,205 = 0,0615 \mu m$$

- **Nejistota vlivem přesazení měřicího zařízení k ose zkoušejícího stroje** (3.3)

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

$$U_{MISALIGNMENT \text{ osa } X} = 0,3 \times \frac{2^2}{0,385} = 3,116 \mu m$$

$$U_{MISALIGNMENT \text{ osa } Y} = 0,3 \times \frac{2^2}{0,205} = 5,853 \mu m$$

- **Nejistota vlivem měření teploty stroje** (3.4)

$$U_{M,MACHINE TOOL} = 0,6 \times \alpha \times L \times R(\theta)$$

$$U_{M,MACHINE TOOL \text{ osa } X} = 0,6 \times 11,7 \times 0,385 \times 0,35 = 0,945 \mu m$$

$$U_{M,MACHINE TOOL \text{ osa } Y} = 0,6 \times 11,7 \times 0,205 \times 0,35 = 0,503 \mu m$$

α - koeficient roztažnosti stroje

$R(\theta)$ - rozsah teploty stroje, který je ovlivněn nejistotou měření [$^{\circ}C$]. Užívané snímače mají v teplotním rozsahu odchylku $0,7^{\circ}C$, čemuž odpovídá $0,35^{\circ}C$.

- **Nejistota měření teploty měřicího zařízení** (3.5)

$$U_{M,DEVICE} = 0,6 \times \alpha \times L \times R(\theta)$$

$U_{M,DEVICE \text{ osa } X,Y} = 0 \mu m$ (kompenzace měřicího zařízení byla provedena ručně)

- **Nejistota vlivem koeficientu roztažnosti** (3.6)

$$U_{E,MACHINE TOOL} = 0,6 \times \Delta T \times L \times R(\alpha)$$

$$U_{E,MACHINE\ TOOL\ osa\ X} = 0,6 \times 1 \times 0,385 \times 1 = 0,231\mu m$$

$$U_{E,MACHINE\ TOOL\ osa\ Y} = 0,6 \times 1 \times 0,205 \times 1 = 0,123\mu m$$

- **Nejistota vlivem možné chyby koeficientu teplotní roztažnosti zařízení (3.6)**

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

ΔT – rozdíl teploty měřicího zařízení na 20 °C

$R(\alpha)$ - rozsah chyby koeficientu roztažnosti měřicího zařízení

$U_{M,DEVICE\ osa\ X;Y} = 0\mu m$ (kompenzace měřicího zařízení byla provedena ručně)

- **Nejistota vlivem kolísání chyby environmentu E_{VE} (3.8)**

$$U_{EVE} = 0,6 \times E_{VE}$$

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

$$U_{EVE\ osa\ Y} = 0,6 \times 2 = 1,2\mu m$$

- **Odhad nejistoty pro jednosměrnou opakovatelnost $U(R\uparrow, R\downarrow)$ pro osy do 2000mm (3.9)**

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

$$U(R\uparrow, R\downarrow)osaX = 2 \times 1,2 = 2,4\mu m$$

$$U(R\uparrow, R\downarrow)osaY = 2 \times 1,2 = 2,4\mu m$$

- **Odhad nejistoty pro necitlivost $U(B)$ pro osy do 2000mm (4.0)**

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

$$U(B)osaX = 0,9 \times 1,2 = 1,08\mu m$$

$$U(B)osaY = 0,9 \times 1,2 = 1,08\mu m$$

- **Nejistota dvousměrné opakovatelnosti $U(R)$ pro osy do 2000mm (4.1)**

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

$$U(R)osaX = 2,2 \times 1,2 = 2,64\mu m$$

$$U(R)osaY = 2,2 \times 1,2 = 2,64\mu m$$

- **Nejistoty systematických úchylek U (M , E , $E\uparrow$, $E\downarrow$) pro osy do 2000mm (4.2)**

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow) = \sqrt{U_{DEVICE}^2 + U_{MISALIGNMENT}^2 + U_{M, MACHINE TOOL}^2 + U_{M, DEVICE}^2 + U_{E, MACHINE TOOL}^2 + U_{E, DEVICE}^2 + \frac{1}{5} U_{EVE}^2}$$

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow)_{osa X} = \sqrt{10,957} = 3,310 \mu m$$

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow)_{osa Y} = \sqrt{34,817} = 5,900 \mu m$$

- **Nejistota měření pro průměrnou polohovou odchylku (4.3)**

$$U(M) = \sqrt{U_{DEVICE}^2 + U_{MISALIGNMENT}^2 + U_{M, MACHINE TOOL}^2 + U_{M, DEVICE}^2 + U_{E, MACHINE TOOL}^2 + U_{E, DEVICE}^2 + \frac{1}{10} U_{EVE}^2}$$

$$U(M)_{osa X} = \sqrt{10,689} = 3,269 \mu m$$

$$U(M)_{osa Y} = \sqrt{34,550} = 5,877 \mu m$$

- **Nejistota přesnosti polohování U (A , $A\uparrow$, $A\downarrow$) (4.4)**

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

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow)_{osa X} = \sqrt{10,597 + 5,76} = 4,044 \mu m$$

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow)_{osa Y} = \sqrt{34,81 + 5,76} = 6,369 \mu m$$

K nejistotám měření jsou brány v úvahu tyto faktory: přesazení měřicího zařízení vzhledem k měřené ose stroje, měřicí zařízení, koeficient teplotní roztažnosti stroje a měřicího zařízení, kolísání chyby environmentem. [7]

Tab. 5 Odhad nejistoty měření polohování v ose X dle normy ISO 230-2

Přispívající faktory	Parametr	Nejistota [μm]	Rovnice
měřicí zařízení			
měřená délka	385mm		
rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U(DEVICE)		0,1155	(3.2)
vyrovnání			
vyrovnání paprsku			
předpokládané vyrovnání	2mm		
měřená délka	385mm		
U(MISALIGNMENT)		3,116	(3.3)
kompensace teploty obrobku			
měřená délka	385mm		
koeficient teplotní roztažnosti	11,7 $\mu\text{m}/\text{m}(\text{m}^\circ\text{C})$		
rozdíl na 20°C, maximální	1°C		
měření teploty			
maximální úchylka	0,7°C		
U(M,MACHINE TOOL)		0,945	(3.4)
U(M,DEVICE)	Manuální kompenzace		
nejistota koeficientu roztažnosti	2 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
U(E,MACHINE TOOL)		0,231	(3.6)
U(E,DEVICE)	manuální kompenzace		
EVE, kolísání environmentu			
EVE	2 μm		
U(EVE)		1,2	(3.8)
U(R\uparrow,R\downarrow)		2,4	(3.9)
U(B)		1,08	(4.0)
U(R)		2,64	(4.1)
U(E,E\uparrow,E\downarrow)		3,310	(4.2)
U(M)		3,269	(4.3)
U(A,A\uparrow,A\downarrow)		4,044	(4.4)

Tab. 6 Odhad nejistoty měření polohování v ose Y dle normy ISO 230-2

Přispívající faktory	Parametr	Nejistota [μm]	Rovnice
měřicí zařízení			
měřená délka	205mm		
rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U(DEVICE)		0,0615	(3.2)
Vyrovnání			
vyrovnání paprsku			
předpokládané vyrovnání			
měřená délka	205mm		
U(MISALIGNMENT)		5,853	(3.3)
kompensace teploty obrobku			
měřená délka	205mm		
koeficient teplotní roztažnosti	11,7 $\mu\text{m}/\text{m}(\text{m}^\circ\text{C})$		
rozdíl na 20°C, maximální	1°C		
měření teploty			
maximální úchylka	0,7°		
U(M,MACHINE TOOL)		0,503	(3.4)
U(M,DEVICE)	manuální kompenzace		
nejistota koeficientu roztažnosti	2 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
U(E,MACHINE TOOL)		0,123	(3.6)
U(E,DEVICE)	manuální kompenzace		
EVE, kolísání environmentu			
EVE	2 μm		
U(EVE)		1,2	(3.8)
U(R\uparrow,R\downarrow)		2,4	(3.9)
U(B)		1,08	(4.0)
U(R)		2,64	(4.1)
U(E,E\uparrow,E\downarrow)		5,900	(4.2)
U(M)		5,887	(4.3)
U(A,A\uparrow,A\downarrow)		6,369	(4.4)

Tab. 7 Parametry polohování dle ISO 230-2

ISO 230-2	Osa X [μm]	Osa Y [μm]	Rovnice
A	155,218	285,83	(2.9)
A\uparrow	153,782	276,218	(2.7)
A\downarrow	199,863	276,218	(2.8)
E	148,667	279,667	(2.5)
E\uparrow	145,667	258,667	(2.3)
E\downarrow	144	269	(2.4)
M	144,667	263,833	(2.6)
R	23,583	41,217	(2.2)
R\uparrow	21,166	15,144	(2.0)
R\downarrow	10,583	24,980	(2.1)
B	5,558	24,423	(1.3)
\bar{B}	5,558	24,426	(1.4)

Tabulka (Tab. 7) přehledně obsahuje souhrnné informace o parametrech polohování v měřených osách dle normy ČSN ISO 230-2. Nejistoty měření a zařízení pro tyto parametry jsou uvedeny v (Tab. 5 Tab. 6). Výsledky jsou vypočítány a prezentovány pro přehlednost v μm .

8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjištění polohovací přesnosti univerzální frézky FHV-50PD dle normy ČSN ISO 230. Při práci s vysoce přesným výrobním zařízením dosahujeme ke snížení nákladů na nástroj, jeho opotřebení a přesnost umožňuje obrábět v užších tolerancích. Vzhledem k tomu, že průměrná polohová úchylka v poloze osy x a y frézky VHF 50-PD na dílně UVI se přibližuje v maximálním rozsahu k chybě polohy až ke dvěma desetinám milimetru, proto není doporučeno klást velké požadavky na přesnost frézky.

Tyto naměřené hodnoty polohových úchylek byly měřeny při vypnutém režimu frézky. Tím byly zamezeny veškeré vibrace výrobního stroje a byla měřena poloha ve dvou osách pomocí měřicího systému Renishaw. Z toho vyplývá, že při zatížení stroje v zapnutém režimu se polohová úchylka v osách bude zvětšovat a výrobní přesnost nemusí odpovídat požadavkům obsluhy. Proto je tato univerzální frézka doporučena spíše pro hobby frézování než přesné měření.

Při polohování bylo zjištěno, že osu x ovlivňuje motor pro strojní polohování, který je připevněný na konci pracovní polohové desky. Kdy se zvětšujícím se rozsahem v poloze svojí vlastní vahou působí na okraj desky stroje.

V diplomové práci jsou uvedeny výpočty dle normy ISO 230. V této normě není žádné grafické znázornění necitlivosti v ose a dalších statistických vyhodnocení. Proto lze považovat tuto diplomovou práci jako doplnění přehlednosti normy ČSN ISO 230-2.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Renishaw laser calibration system user guide: XL laser measurement system manual* [online]. 2007. Dostupné z: www.renishaw.com
- [2] ČÍP, Ondřej a Zdeněk BUCHTA. Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie. 2011. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf
- [3] YOSHIKAWA, Tořu. *Handbook of optical metrology: principles and applications*. Boca Raton: CRC Press, c2009, xiii, 730 p. ISBN 08-493-3760-7.
- [4] MELOUN, Milan. *Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-1008-4.
- [5] GÅSVIK, Kjell J. *Optical metrology: principles and applications*. 3rd ed. Chichester: John Wiley, 2003, 360 s. ISBN 04-708-4300-4.
- [6] ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Geometrické přesnosti strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [7] ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Stanovení přesnosti opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [8] ČSN ISO 230-3. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Určení tepelných vlivů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [9] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [10] ČSN ISO 230-5. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Určení emise hluku*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [11] ČSN ISO 230-6. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn*. Praha: Český normalizační institut, 2003.

- [12] ČSN ISO 230-6. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Geometrická přesnost os rotace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [13] MAREŠ, Adam. *Kalibrace dílenského mikroskopu Zeiss bezkontaktním způsobem s využitím laserinterferometru Renishaw*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
- [14] BRAVENEČ, Libor. *Polohování CNC frézky dle normy ISO 230-2*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012.
- [15] PATA, Vladimír. *Úvod do laserové interferometrie*. prezentace
- [16] *XL-80 laser system brochure: portable laser measurement and calibration* [online]. United Kingdom, 2011.
- [17] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2009, 206 s. ISBN 978-80-7333-072-9
- [18] *Univerzální frézka s digitálním odměřováním FHV-50PD: Návod k obsluze*. PROMA CZ. Dobruška, 2004.
- [19] BACH, Pavel. *Chyby strojů je třeba kvantifikovat*. [online]. 14. 4. 2003, s. 1. Dostupné z: <http://technik.ihned.cz/c1-12627740-chyby-stroju-je-treba-kvantifikovat>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
λ	Vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu
λ_0	Vlnová délka laserového paprsku ve vakuu
n	Index lomu vzduchu
i	Číslo uvažované zadané polohy
p	Jmenovitý interval
P_i	Zadaná poloha
P_s	Skutečná poloha
$\bar{X}_i\uparrow, \bar{X}_i\downarrow$	Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze
\bar{X}_i	Průměrná dvousměrná polohová úchylka
B_i	Necitlivost v poloze
B	Necitlivost v ose
\bar{B}	Průměrná necitlivost v ose
$\bar{S}_i\uparrow, \bar{S}_i\downarrow$	Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze
$R_i\uparrow, R_i\downarrow$	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze
R_i	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze
$R\uparrow, R\downarrow$	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose
R	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose
$E\uparrow, E\downarrow$	Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose
E	Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose
M	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose
$A\uparrow, A\downarrow$	Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose
A	Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose
U_{DEVICE}	Nejistota vlivem měřicího zařízení
$U_{\text{MISALIGNMENT}}$	Nejistota vlivem přesazení měřicího zařízení k ose stroje

$U_{M,DEVICE}$	Nejistota vlivem měření teploty měřícího zařízení
$U_{M,MACHINE TOOL}$	Nejistota měření při měření teploty stroje
$U_{E,DEVICE}$	Nejistota vlivem chyby v koeficientu teplotní roztažnosti měřícího zařízení
$U_{M,MACHINE TOOL}$	Nejistota vlivem chyby v koeficientu teplotní roztažnosti stroje
U_{EVE}	Nejistota měření vlivem kolísání environmentu
E_{VE}	Rozsah zjištěný při zkoušce driftu
$U(R\uparrow,R\downarrow)$	Odhad nejistoty pro jednosměrnou opakovatelnost
$U(B)$	Odhad nejistoty pro necitlivost pro osy do 2000mm
$U(R)$	Nejistota dvousměrné opakovatelnosti pro osy do 2000mm
$U(E,E\uparrow,E\downarrow)$	Nejistota měření systematických úchylek pro pět měřících zdvihů
$U(M)$	Nejistota měření pro průměrnou úchylku polohy M
$U(A,A,A)$	Nejistota měření pro průměrnou úchylku pro pět měřících zdvihů

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Přímota čáry v rovině [6]	12
Obr. 2 Laser XL-80 [1]	14
Obr. 3 Kompenzátor XC-80 [1]	15
Obr. 4 Možnosti měření laserového systému XL-80 [1]	16
Obr. 5 Laserová hlava je umístěna ve směru osy měření [1]	16
Obr. 6 Princip lineárních měření pomocí laserového interferometru [1]	17
Obr. 7 Laserová hlava je natočena v obecném úhlu vzhledem k ose měření [1]	17
Obr. 8 Popis jevu dvousvazkové interference [2]	18
Obr. 9 Michelsonův interferometr [2]	19
Obr. 10 Měření s použitím kompenzace prostředí [15]	20
Obr. 11 Přímotačarý pohyb [6]	21
Obr. 12 Běžný zkušební cyklus [7]	23
Obr. 13 Určení hranice úchylek [17]	25
Obr. 14 Příklad měření polohových úchylek [17]	25
Obr. 15 Jednosměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [7]	28
Obr. 16 Dvousměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy v ose A [7]	29
Obr. 17 Cosinova chyba [15]	30
Obr. 18 Mrva dráha [15]	31
Obr. 19 Mrtvá dráha [15]	31
Obr. 20 Univerzální frézka FHV-50PD [18]	37
Obr. 21 Vyrovnání laseru vodováhou	39
Obr. 22 Sestavená měřicí optika	40
Obr. 24 Dopad laserového paprsku na vyrovnávací terč	40
Obr. 25 poloha vycházejícího a dopadajícího paprsku laseru XL	41
Obr. 26 Pohled na frézku měřenou v ose x	41
Obr. 27 Kalibrace lineárního interferometru a ověření síla signálu	42
Obr. 28 Nastavení parametrů snímání	42
Obr. 29 Nastavení metody snímání	43
Obr. 30 Charakteristika stroje a metrologa	43
Obr. 31 Nastavení ručního režimu snímání	44
Obr. 32 Bidirekcionální cyklus snímání	44
Obr. 33 Graf Průměrné dvousměrné polohové úchylky v ose X	47

Obr. 34 Graf průměrné dvousměrné polohové úchytky v ose Y	47
Obr. 35 Graf dvousměrné opakovatelnosti v ose X.....	48
Obr. 36 Graf dvousměrné opakovatelnosti v ose Y.....	48
Obr. 37 Graf necitlivosti v ose X.....	49
Obr. 38 Graf necitlivosti v ose Y	49
Obr. 39 Graf polohování osy X dle normy ISO 230-2	50
Obr. 40 Vyhodnocení polohování osy X dle normy ISO 230-2	50
Obr. 41 Graf polohování osy Y dle normy ISO 230-2	51
Obr. 42 Vyhodnocení polohování osy Y dle normy ISO 230-2	51

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Dlouhodobé zkoušky podle ČSN ISO [17]	11
Tab. 2 Nejistota měření vlivem přesazení měřicího zařízení $U_{\text{MISALIGNMENT}}$ [7]	32
Tab. 3 Popis stroje FHV-50PD [18]	38
Tab. 4 Technické parametry univerzální frézky VHF-50PD [18]	38
Tab. 5 Odhad nejistoty měření polohování v ose X dle normy ISO 230-2	55
Tab. 6 Odhad nejistoty měření polohování v ose Y dle normy ISO 230-2	56
Tab. 7 Parametry polohování dle ISO 230-2	57

SEZNAM ROVNIC

(0.1)	Vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu.....	19
(0.2)	Volba zadané polohy P_i	23
(0.3)	Hranice úchylek v poloze $\bar{X}_i \uparrow$	24
(0.4)	Hranice úchylek v poloze $\bar{X}_i \downarrow$	24
(0.5)	Zadaná poloha P_i	24
(0.6)	Skutečná poloha P_s	25
(0.7)	Úchylka polohy; polohová úchylka.....	25
(0.8)	Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze.....	26
(0.9)	Aritmetický průměr polohových úchylek ve směru $\bar{X} \uparrow$	26
(1.0)	Aritmetický průměr polohových úchylek ve směru $\bar{X} \downarrow$	26
(1.1)	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze.....	26
(1.2)	Necitlivost v poloze B_i	26
(1.3)	Necitlivost v ose B	27
(1.4)	Průměrná necitlivost v ose \bar{B}	27
(1.5)	Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze $S_i \uparrow$	27
(1.6)	Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze $S_i \downarrow$	27
(1.7)	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_i \uparrow$	27
(1.8)	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_i \downarrow$	27
(1.9)	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze.....	27
(2.0)	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose $R \uparrow$	27
(2.1)	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose $R \downarrow$	27
(2.2)	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose.....	28
(2.3)	Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose $E \uparrow$	28
(2.4)	Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose $E \downarrow$	28
(2.5)	Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose E	28
(2.6)	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose M	29
(2.7)	Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose $A \uparrow$	29
(2.8)	Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose $A \downarrow$	29
(2.9)	Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose A	29
(3.0)	Nejistota vlivem měřícího zařízení $U_{\text{DEVICE}} 1$	31
(3.1)	Nejistota vlivem měřícího zařízení $U_{\text{DEVICE}} 2$	31
(3.2)	Nejistota vlivem měřícího zařízení $U_{\text{DEVICE}} 3$	31

(3.3)	Nejistota vlivem přesazení měřícího zařízení k ose zkoušejícího stroje.....	32
(3.4)	Nejistota vlivem měření teploty pro stroj $U_{M,MACHINE}$	33
(3.5)	Nejistota vlivem měření teploty pro měřící zařízení $U_{M,DEVICE}$	33
(3.6)	Nejistota vlivem koeficientu roztažnosti pro $U_{E,MACHINETOOL}$	33
(3.7)	Nejistota vlivem koeficientu roztažnosti pro $U_{E,DEVICE}$	33
(3.8)	Nejistota vlivem kolísání chyby environmentu E_{VE}	34
(3.9)	Odhad nejistoty pro jednosměrnou opakovatelnost $U (R\uparrow, R\downarrow)$ pro osy do 2000 mm	34
(4.0)	Odhad nejistoty pro necitlivost $U (B)$ pro osy do 2000mm.....	34
(4.1)	Nejistota dvousměrné opakovatelnosti $U (R)$ pro osy do 2000mm.....	35
(4.2)	Nejistoty systematických úchylek $U (E, E\uparrow, E\downarrow)$ pro osy do 2000mm.....	35
(4.3)	Nejistoty systematických úchylek $U (M)$ pro osy do 2000mm.....	35
(4.4)	Nejistota přesnosti polohování $U (A, A\uparrow, A\downarrow)$	35

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X – LIST 1

PŘÍLOHA P II: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X – LIST 2

PŘÍLOHA P III: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X – LIST 3

PŘÍLOHA P IV: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X – LIST 4

PŘÍLOHA P V: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X – LIST 5

PŘÍLOHA P VI: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X – LIST 6

PŘÍLOHA P VII: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X – LIST 7

PŘÍLOHA P VIII: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X – LIST 8

PŘÍLOHA P VIII: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X – LIST 8

PŘÍLOHA P IX: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE Y – LIST 1

PŘÍLOHA P X: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE Y – LIST 2

PŘÍLOHA P XI: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE Y – LIST 3

PŘÍLOHA P XII: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE Y – LIST 4

PŘÍLOHA P I: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X - LIST 1

Pi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pi ↑ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
xi 1 ↑ [μm]	-19	-19	-18	-16	-19	-16	-15	-13	-14	-14
xi 2 ↑ [μm]	-15	-17	-17	-13	-16	-13	-13	-12	-11	-10
xi 3 ↑ [μm]	-16	-16	-16	-12	-16	-11	-11	-11	-10	-7
\bar{x}_i ↑ [μm] (0.9)	-16,667	-17,333	-17,000	-13,667	-17,000	-13,333	-13,000	-12,000	-11,667	-10,333
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	2,082	1,528	1,000	2,082	1,732	2,517	2,000	1,000	2,082	3,512
Pi ↓ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
xi 1 ↓ [μm]	-13	-13	-15	-10	-11	-8	-11	-8	-7	-6
xi 2 ↓ [μm]	-12	-11	-12	-10	-10	-7	-7	-6	-5	-6
xi 3 ↓ [μm]	-13	-12	-11	-11	-10	-7	-7	-7	-4	-5
\bar{x}_i ↓ [μm] (1.0)	-12,667	-12,000	-12,667	-10,333	-10,333	-7,333	-8,333	-7,000	-5,333	-5,667
\bar{x}_i [μm] (1.1)	-14,667	-14,667	-14,833	-12,000	-13,667	-10,333	-10,667	-9,500	-8,500	-8,000
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	0,577	1,000	2,082	0,577	0,577	0,577	2,309	1,000	1,528	0,577
Si ↑ [μm] (1.5)	2,082	1,528	1,000	2,082	1,732	2,517	2,000	1,000	2,082	3,512
Si ↓ [μm] (1.6)	0,577	1,000	2,082	0,577	0,577	0,577	2,309	1,000	1,528	0,577
\bar{x}_i ↑ +2Si ↑	-12,503	-14,278	-15,000	-9,503	-13,536	-8,300	-9,000	-10,000	-7,503	-3,310
\bar{x}_i ↑ -2Si ↑	-20,830	-20,388	-19,000	-17,830	-20,464	-18,367	-17,000	-14,000	-15,830	-17,357
\bar{x}_i ↓ +2Si ↓	-11,512	-10,000	-8,503	-9,179	-9,179	-6,179	-3,715	-5,000	-2,278	-4,512
\bar{x}_i ↓ -2Si ↓	-13,821	-14,000	-16,830	-11,488	-11,488	-8,488	-12,952	-9,000	-8,388	-6,821
Ri ↑ [μm] (1.7)	8,327	6,110	4,000	8,327	6,928	10,066	8,000	4,000	8,327	14,048
Ri ↓ [μm] (1.8)	2,309	4,000	8,327	2,309	2,309	2,309	9,238	4,000	6,110	2,309
Bi [μm] (1.2)	-4,000	-5,333	-4,333	-3,333	-6,667	-6,000	-4,667	-5,000	-6,333	-4,667
Ri [μm] (1.9)	9,318	10,388	10,497	8,651	11,285	12,188	13,285	9,000	13,552	12,845

PŘÍLOHA P II: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X - LIST 2

Pi	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Pi ↑ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
xi 1 ↑ [μm]	-13	-9	-13	-13	-10	-6	-6	-6	-2	-4
xi 2 ↑ [μm]	-10	-8	-11	-11	-9	-4	-3	-4	-3	1
xi 3 ↑ [μm]	-10	-6	-8	-7	-5	-4	-1	-2	1	1
\bar{x}_i ↑ [μm] (0.9)	-11,000	-7,667	-10,667	-10,333	-8,000	-4,667	-3,333	-4,000	-1,333	-0,667
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	1,732	1,528	2,517	3,055	2,646	1,155	2,517	2,000	2,082	2,887
Pi ↓ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
xi 1 ↓ [μm]	-7	-6	-7	-8	-3	-2	1	-1	1	2
xi 2 ↓ [μm]	-6	-3	-6	-5	-2	0	2	0	3	2
xi 3 ↓ [μm]	-6	-2	-7	-5	-1	0	-1	2	0	4
\bar{x}_i ↓ [μm] (1.0)	-6,333	-3,667	-6,667	-6,000	-2,000	-0,667	0,667	0,333	1,333	2,667
\bar{x}_i [μm] (1.1)	-8,667	-5,667	-8,667	-8,167	-5,000	-2,667	-1,333	-1,833	0,000	1,000
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	0,577	2,082	0,577	1,732	1,000	1,155	1,528	1,528	1,528	1,155
Si ↑ [μm] (1.5)	1,732	1,528	2,517	3,055	2,646	1,155	2,517	2,000	2,082	2,887
Si ↓ [μm] (1.6)	0,577	2,082	0,577	1,732	1,000	1,155	1,528	1,528	1,528	1,155
\bar{x}_i ↑ +2Si ↑	-7,536	-4,612	-5,633	-4,223	-2,708	-2,357	1,700	0,000	2,830	5,107
\bar{x}_i ↑ -2Si ↑	-14,464	-10,722	-15,700	-16,443	-13,292	-6,976	-8,367	-8,000	-5,497	-6,440
\bar{x}_i ↓ +2Si ↓	-5,179	0,497	-5,512	-2,536	0,000	1,643	3,722	3,388	4,388	4,976
\bar{x}_i ↓ -2Si ↓	-7,488	-7,830	-7,821	-9,464	-4,000	-2,976	-2,388	-2,722	-1,722	0,357
Ri ↑ [μm] (1.7)	6,928	6,110	10,066	12,220	10,583	4,619	10,066	8,000	8,327	11,547
Ri ↓ [μm] (1.8)	2,309	8,327	2,309	6,928	4,000	4,619	6,110	6,110	6,110	4,619
Bi [μm] (1.2)	-4,667	-4,000	-4,000	-4,333	-6,000	-4,000	-4,000	-4,333	-2,667	-3,333
Ri [μm] (1.9)	9,285	11,218	10,188	13,908	13,292	8,619	12,088	11,388	9,885	11,416

PŘÍLOHA P III: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X - LIST 3

Pi	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Pi ↑ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
xi 1 ↑ [μm]	-1	-3	1	3	3	2	6	7	7	8
xi 2 ↑ [μm]	3	-3	5	3	5	8	7	9	12	14
xi 3 ↑ [μm]	5	2	5	5	6	6	10	12	13	12
\bar{x}_i ↑ [μm] (0.9)	2,333	-1,333	3,667	3,667	4,667	5,333	7,667	9,333	10,667	11,333
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	3,055	2,887	2,309	1,155	1,528	3,055	2,082	2,517	3,215	3,055
Pi ↓ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
xi 1 ↓ [μm]	6	5	5	7	9	8	13	13	12	16
xi 2 ↓ [μm]	4	6	7	10	11	11	15	13	16	16
xi 3 ↓ [μm]	7	5	6	9	9	13	13	14	17	15
\bar{x}_i ↓ [μm] (1.0)	5,667	5,333	6,000	8,667	9,667	10,667	13,667	13,333	15,000	15,667
\bar{x}_i [μm] (1.1)	4,000	2,000	4,833	6,167	7,167	8,000	10,667	11,333	12,833	13,500
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	1,528	0,577	1,000	1,528	1,155	2,517	1,155	0,577	2,646	0,577
Si ↑ [μm] (1.5)	3,055	2,887	2,309	1,155	1,528	3,055	2,082	2,517	3,215	3,055
Si ↓ [μm] (1.6)	1,528	0,577	1,000	1,528	1,155	2,517	1,155	0,577	2,646	0,577
\bar{x}_i ↑ +2Si ↑	8,443	4,440	8,285	5,976	7,722	11,443	11,830	14,367	17,096	17,443
\bar{x}_i ↑ -2Si ↑	-3,777	-7,107	-0,952	1,357	1,612	-0,777	3,503	4,300	4,238	5,223
\bar{x}_i ↓ +2Si ↓	8,722	6,488	8,000	11,722	11,976	15,700	15,976	14,488	20,292	16,821
\bar{x}_i ↓ -2Si ↓	2,612	4,179	4,000	5,612	7,357	5,633	11,357	12,179	9,708	14,512
Ri ↑ [μm] (1.7)	12,220	11,547	9,238	4,619	6,110	12,220	8,327	10,066	12,858	12,220
Ri ↓ [μm] (1.8)	6,110	2,309	4,000	6,110	4,619	10,066	4,619	2,309	10,583	2,309
Bi [μm] (1.2)	-3,333	-6,667	-2,333	-5,000	-5,000	-5,333	-6,000	-4,000	-4,333	-4,333
Ri [μm] (1.9)	12,498	13,595	8,952	10,364	10,364	16,477	12,473	10,188	16,054	11,598

PŘÍLOHA P IV: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X - LIST 4

Pi	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Pi ↑ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
xi 1 ↑ [μm]	9	15	13	15	19	21	23	23	26	29
xi 2 ↑ [μm]	12	15	16	19	22	23	25	26	30	29
xi 3 ↑ [μm]	15	15	18	20	21	26	27	29	28	31
\bar{x}_i ↑ [μm] (0.9)	12,000	15,000	15,667	18,000	20,667	23,333	25,000	26,000	28,000	29,667
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	3,000	0,000	2,517	2,646	1,528	2,517	2,000	3,000	2,000	1,155
Pi ↓ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
xi 1 ↓ [μm]	17	16	21	24	24	26	29	30	34	36
xi 2 ↓ [μm]	19	21	22	27	28	27	30	32	36	38
xi 3 ↓ [μm]	19	19	24	24	26	29	30	30	33	37
\bar{x}_i ↓ [μm] (1.0)	18,333	18,667	22,333	25,000	26,000	27,333	29,667	30,667	34,333	37,000
\bar{x}_i [μm] (1.1)	15,167	16,833	19,000	21,500	23,333	25,333	27,333	28,333	31,167	33,333
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	1,155	2,517	1,528	1,732	2,000	1,528	0,577	1,155	1,528	1,000
Si ↑ [μm] (1.5)	3,000	0,000	2,517	2,646	1,528	2,517	2,000	3,000	2,000	1,155
Si ↓ [μm] (1.6)	1,155	2,517	1,528	1,732	2,000	1,528	0,577	1,155	1,528	1,000
\bar{x}_i ↑ +2Si ↑	18,000	15,000	20,700	23,292	23,722	28,367	29,000	32,000	32,000	31,976
\bar{x}_i ↑ -2Si ↑	6,000	15,000	10,633	12,708	17,612	18,300	21,000	20,000	24,000	27,357
\bar{x}_i ↓ +2Si ↓	20,643	23,700	25,388	28,464	30,000	30,388	30,821	32,976	37,388	39,000
\bar{x}_i ↓ -2Si ↓	16,024	13,633	19,278	21,536	22,000	24,278	28,512	28,357	31,278	35,000
Ri ↑ [μm] (1.7)	12,000	0,000	10,066	10,583	6,110	10,066	8,000	12,000	8,000	4,619
Ri ↓ [μm] (1.8)	4,619	10,066	6,110	6,928	8,000	6,110	2,309	4,619	6,110	4,000
Bi [μm] (1.2)	-6,333	-3,667	-6,667	-7,000	-5,333	-4,000	-4,667	-4,667	-6,333	-7,333
Ri [μm] (1.9)	14,643	8,700	14,755	15,756	12,388	12,088	9,821	12,976	13,388	11,643

PŘÍLOHA P V: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X - LIST 5

Pi	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Pi ↑ [mm]	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250
xi 1 ↑ [μm]	29	30	30	35	38	44	45	41	53	49
xi 2 ↑ [μm]	33	31	32	36	41	45	45	47	51	53
xi 3 ↑ [μm]	34	33	35	40	42	43	50	49	52	50
\bar{x}_i ↑ [μm] (0.9)	32,000	31,333	32,333	37,000	40,333	44,000	46,667	45,667	52,000	50,667
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	2,646	1,528	2,517	2,646	2,082	1,000	2,887	4,163	1,000	2,082
Pi ↓ [mm]	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250
xi 1 ↓ [μm]	37	39	42	45	48	48	52	53	59	59
xi 2 ↓ [μm]	37	40	42	44	48	50	55	53	58	59
xi 3 ↓ [μm]	36	40	43	46	50	52	53	57	56	60
\bar{x}_i ↓ [μm] (1.0)	36,667	39,667	42,333	45,000	48,667	50,000	53,333	54,333	57,667	59,333
\bar{x}_i [μm] (1.1)	34,333	35,500	37,333	41,000	44,500	47,000	50,000	50,000	54,833	55,000
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	0,577	0,577	0,577	1,000	1,155	2,000	1,528	2,309	1,528	0,577
Si ↑ [μm] (1.5)	2,646	1,528	2,517	2,646	2,082	1,000	2,887	4,163	1,000	2,082
Si ↓ [μm] (1.6)	0,577	0,577	0,577	1,000	1,155	2,000	1,528	2,309	1,528	0,577
\bar{x}_i ↑ +2Si ↑	37,292	34,388	37,367	42,292	44,497	46,000	52,440	53,993	54,000	54,830
\bar{x}_i ↑ -2Si ↑	26,708	28,278	27,300	31,708	36,170	42,000	40,893	37,340	50,000	46,503
\bar{x}_i ↓ +2Si ↓	37,821	40,821	43,488	47,000	50,976	54,000	56,388	58,952	60,722	60,488
\bar{x}_i ↓ -2Si ↓	35,512	38,512	41,179	43,000	46,357	46,000	50,278	49,715	54,612	58,179
Ri ↑ [μm] (1.7)	10,583	6,110	10,066	10,583	8,327	4,000	11,547	16,653	4,000	8,327
Ri ↓ [μm] (1.8)	2,309	2,309	2,309	4,000	4,619	8,000	6,110	9,238	6,110	2,309
Bi [μm] (1.2)	-4,667	-8,333	-10,000	-8,000	-8,333	-6,000	-6,667	-8,667	-5,667	-8,667
Ri [μm] (1.9)	11,113	12,543	16,188	15,292	14,806	12,000	15,495	21,612	10,722	13,985

PŘÍLOHA P VI: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X - LIST 6

Pi	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Pi ↑ [mm]	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300
xi 1 ↑ [μm]	51	49	56	58	62	64	68	69	78	82
xi 2 ↑ [μm]	53	52	58	60	68	71	73	77	82	85
xi 3 ↑ [μm]	51	55	62	68	68	71	75	76	79	87
\bar{x}_i ↑ [μm] (0.9)	51,667	52,000	58,667	62,000	66,000	68,667	72,000	74,000	79,667	84,667
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	1,155	3,000	3,055	5,292	3,464	4,041	3,606	4,359	2,082	2,517
Pi ↓ [mm]	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300
xi 1 ↓ [μm]	61	63	69	72	76	77	79	81	86	88
xi 2 ↓ [μm]	62	65	69	74	75	78	82	85	88	89
xi 3 ↓ [μm]	64	64	69	73	77	80	81	84	89	92
\bar{x}_i ↓ [μm] (1.0)	62,333	64,000	69,000	73,000	76,000	78,333	80,667	83,333	87,667	89,667
\bar{x}_i [μm] (1.1)	57,000	58,000	63,833	67,500	71,000	73,500	76,333	78,667	83,667	87,167
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	1,528	1,000	0,000	1,000	1,000	1,528	1,528	2,082	1,528	2,082
Si ↑ [μm] (1.5)	1,155	3,000	3,055	5,292	3,464	4,041	3,606	4,359	2,082	2,517
Si ↓ [μm] (1.6)	1,528	1,000	0,000	1,000	1,000	1,528	1,528	2,082	1,528	2,082
\bar{x}_i ↑ +2Si ↑	53,976	58,000	64,777	72,583	72,928	76,750	79,211	82,718	83,830	89,700
\bar{x}_i ↑ -2Si ↑	49,357	46,000	52,557	51,417	59,072	60,584	64,789	65,282	75,503	79,633
\bar{x}_i ↓ +2Si ↓	65,388	66,000	69,000	75,000	78,000	81,388	83,722	87,497	90,722	93,830
\bar{x}_i ↓ -2Si ↓	59,278	62,000	69,000	71,000	74,000	75,278	77,612	79,170	84,612	85,503
Ri ↑ [μm] (1.7)	4,619	12,000	12,220	21,166	13,856	16,166	14,422	17,436	8,327	10,066
Ri ↓ [μm] (1.8)	6,110	4,000	0,000	4,000	4,000	6,110	6,110	8,327	6,110	8,327
Bi [μm] (1.2)	-10,667	-12,000	-10,333	-11,000	-10,000	-9,667	-8,667	-9,333	-8,000	-5,000
Ri [μm] (1.9)	16,031	20,000	16,443	23,583	18,928	20,805	18,933	22,214	15,218	14,197

PŘÍLOHA P VII: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X - LIST 7

Pi	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Pi ↑ [mm]	305	310	315	320	325	330	335	340	345	350
xi 1 ↑ [μm]	85	86	89	93	94	94	102	104	105	107
xi 2 ↑ [μm]	89	91	91	94	94	100	103	104	105	109
xi 3 ↑ [μm]	88	91	93	97	95	100	103	106	107	111
\bar{x}_i ↑ [μm] (0.9)	87,333	89,333	91,000	94,667	94,333	98,000	102,667	104,667	105,667	109,000
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	2,082	2,887	2,000	2,082	0,577	3,464	0,577	1,155	1,155	2,000
Pi ↓ [mm]	305	310	315	320	325	330	335	340	345	350
xi 1 ↓ [μm]	91	93	95	98	99	100	104	106	108	112
xi 2 ↓ [μm]	90	95	97	99	101	103	103	109	111	114
xi 3 ↓ [μm]	91	94	96	99	102	104	107	109	110	114
\bar{x}_i ↓ [μm] (1.0)	90,667	94,000	96,000	98,667	100,667	102,333	104,667	108,000	109,667	113,333
\bar{x}_i [μm] (1.1)	89,000	91,667	93,500	96,667	97,500	100,167	103,667	106,333	107,667	111,167
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	0,577	1,000	1,000	0,577	1,528	2,082	2,082	1,732	1,528	1,155
Si ↑ [μm] (1.5)	2,082	2,887	2,000	2,082	0,577	3,464	0,577	1,155	1,155	2,000
Si ↓ [μm] (1.6)	0,577	1,000	1,000	0,577	1,528	2,082	2,082	1,732	1,528	1,155
\bar{x}_i ↑ +2Si ↑	91,497	95,107	95,000	98,830	95,488	104,928	103,821	106,976	107,976	113,000
\bar{x}_i ↑ -2Si ↑	83,170	83,560	87,000	90,503	93,179	91,072	101,512	102,357	103,357	105,000
\bar{x}_i ↓ +2Si ↓	91,821	96,000	98,000	99,821	103,722	106,497	108,830	111,464	112,722	115,643
\bar{x}_i ↓ -2Si ↓	89,512	92,000	94,000	97,512	97,612	98,170	100,503	104,536	106,612	111,024
Ri ↑ [μm] (1.7)	8,327	11,547	8,000	8,327	2,309	13,856	2,309	4,619	4,619	8,000
Ri ↓ [μm] (1.8)	2,309	4,000	4,000	2,309	6,110	8,327	8,327	6,928	6,110	4,619
Bi [μm] (1.2)	-3,333	-4,667	-5,000	-4,000	-6,333	-4,333	-2,000	-3,333	-4,000	-4,333
Ri [μm] (1.9)	8,651	12,440	11,000	9,318	10,543	15,425	7,318	9,107	9,364	10,643

PŘÍLOHA P VIII: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE X - LIST 8

Pi		71	72	73	74	75	76	77
Pi ↑ [mm]		355	360	365	370	375	380	385
xi 1 ↑ [μm]		112	112	115	116	119	125	127
xi 2 ↑ [μm]		112	114	116	121	123	125	127
xi 3 ↑ [μm]		114	117	118	121	125	124	131
\bar{x}_i ↑ [μm]	(0.9)	112,667	114,333	116,333	119,333	122,333	124,667	128,333
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]		1,155	2,517	1,528	2,887	3,055	0,577	2,309
Pi ↓ [mm]		355	360	365	370	375	380	385
xi 1 ↓ [μm]		116	117	120	121	125	128	130
xi 2 ↓ [μm]		115	116	122	121	127	129	131
xi 3 ↓ [μm]		116	118	123	122	125	128	133
\bar{x}_i ↓ [μm]	(1.0)	115,667	117,000	121,667	121,333	125,667	128,333	131,333
\bar{x}_i [μm]	(1.1)	114,167	115,667	119,000	120,333	124,000	126,500	129,833
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]		0,577	1,000	1,528	0,577	1,155	0,577	1,528
Si ↑ [μm]	(1.5)	1,155	2,517	1,528	2,887	3,055	0,577	2,309
Si ↓ [μm]	(1.6)	0,577	1,000	1,528	0,577	1,155	0,577	1,528
\bar{x}_i ↑ +2Si ↑		114,976	119,367	119,388	125,107	128,443	125,821	132,952
\bar{x}_i ↑ -2Si ↑		110,357	109,300	113,278	113,560	116,223	123,512	123,715
\bar{x}_i ↓ +2Si ↓		116,821	119,000	124,722	122,488	127,976	129,488	134,388
\bar{x}_i ↓ -2Si ↓		114,512	115,000	118,612	120,179	123,357	127,179	128,278
Ri ↑ [μm]	(1.7)	4,619	10,066	6,110	11,547	12,220	2,309	9,238
Ri ↓ [μm]	(1.8)	2,309	4,000	6,110	2,309	4,619	2,309	6,110
Bi [μm]	(1.2)	-3,000	-2,667	-5,333	-2,000	-3,333	-3,667	-3,000
Ri [μm]	(1.9)	6,464	9,700	11,443	8,928	11,753	5,976	10,674

PŘÍLOHA P IX: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE Y - LIST 1

Pi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pi ↑ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
yi 1 ↑ [μm]	98	87	77	71	63	57	53	51	46	36
yi 2 ↑ [μm]	100	90	78	71	66	59	55	53	45	35
yi 3 ↑ [μm]	97	92	81	75	66	59	52	49	41	31
\bar{y}_i ↑ [μm] (0.9)	98,333	89,667	78,667	72,333	65,000	58,333	53,333	51,000	44,000	34,000
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	1,528	2,517	2,082	2,309	1,732	1,155	1,528	2,000	2,646	2,646
Pi ↓ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
yi 1 ↓ [μm]	109	105	97	92	82	78	73	68	64	56
yi 2 ↓ [μm]	108	103	99	91	83	77	71	68	61	55
yi 3 ↓ [μm]	110	106	104	94	89	82	78	71	66	61
\bar{y}_i ↓ [μm] (1.0)	109,000	104,667	100,000	92,333	84,667	79,000	74,000	69,000	63,667	57,333
\bar{y}_i [μm] (1.1)	103,667	97,167	89,333	82,333	74,833	68,667	63,667	60,000	53,833	45,667
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	1,000	1,528	3,606	1,528	3,786	2,646	3,606	1,732	2,517	3,215
Si ↑ [μm] (1.5)	1,528	2,517	2,082	2,309	1,732	1,155	1,528	2,000	2,646	2,646
Si ↓ [μm] (1.6)	1,000	1,528	3,606	1,528	3,786	2,646	3,606	1,732	2,517	3,215
\bar{y}_i ↑ +2Si ↑	101,388	94,700	82,830	76,952	68,464	60,643	56,388	55,000	49,292	39,292
\bar{y}_i ↑ -2Si ↑	95,278	84,633	74,503	67,715	61,536	56,024	50,278	47,000	38,708	28,708
\bar{y}_i ↓ +2Si ↓	111,000	107,722	107,211	95,388	92,239	84,292	81,211	72,464	68,700	63,762
\bar{y}_i ↓ -2Si ↓	107,000	101,612	92,789	89,278	77,095	73,708	66,789	65,536	58,633	50,904
Ri ↑ [μm] (1.7)	6,110	10,066	8,327	9,238	6,928	4,619	6,110	8,000	10,583	10,583
Ri ↓ [μm] (1.8)	4,000	6,110	14,422	6,110	15,144	10,583	14,422	6,928	10,066	12,858
Bi [μm] (1.2)	-10,667	-15,000	-21,333	-20,000	-19,667	-20,667	-20,667	-18,000	-19,667	-23,333
Ri [μm] (1.9)	15,722	23,088	32,708	27,674	30,703	28,268	30,933	25,464	29,991	35,054

PŘÍLOHA P X: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE Y - LIST 2

Pi	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Pi ↑ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
yi 1 ↑ [μm]	27	20	13	10	5	-3	-8	-19	-21	-28
yi 2 ↑ [μm]	23	14	11	4	-1	-7	-13	-22	-28	-34
yi 3 ↑ [μm]	22	18	9	3	-3	-7	-16	-21	-26	-32
\bar{y}_i ↑ [μm] (0.9)	24,000	17,333	11,000	5,667	0,333	-5,667	-12,333	-20,667	-25,000	-31,333
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	2,646	3,055	2,000	3,786	4,163	2,309	4,041	1,528	3,606	3,055
Pi ↓ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
yi 1 ↓ [μm]	51	45	40	35	27	24	17	9	3	-3
yi 2 ↓ [μm]	50	45	36	32	28	22	19	11	6	-1
yi 3 ↓ [μm]	53	50	41	36	30	26	19	13	5	0
\bar{y}_i ↓ [μm] (1.0)	51,333	46,667	39,000	34,333	28,333	24,000	18,333	11,000	1,367	-1,333
\bar{y}_i [μm] (1.1)	37,667	32,000	25,000	20,000	14,333	9,167	3,000	-4,833	-11,817	-16,333
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	1,528	2,887	2,646	2,082	1,528	2,000	1,155	2,000	1,415	1,528
Si ↑ [μm] (1.5)	2,646	3,055	2,000	3,786	4,163	2,309	4,041	1,528	3,606	3,055
Si ↓ [μm] (1.6)	1,528	2,887	2,646	2,082	1,528	2,000	1,155	2,000	1,415	1,528
\bar{y}_i ↑ +2Si ↑	29,292	23,443	15,000	13,239	8,660	-1,048	-4,250	-17,612	-17,789	-25,223
\bar{y}_i ↑ -2Si ↑	18,708	11,223	7,000	-1,905	-7,993	-10,285	-20,416	-23,722	-32,211	-37,443
\bar{y}_i ↓ +2Si ↓	54,388	52,440	44,292	38,497	31,388	28,000	20,643	15,000	4,197	1,722
\bar{y}_i ↓ -2Si ↓	48,278	40,893	33,708	30,170	25,278	20,000	16,024	7,000	-1,464	-4,388
Ri ↑ [μm] (1.7)	10,583	12,220	8,000	15,144	16,653	9,238	16,166	6,110	14,422	12,220
Ri ↓ [μm] (1.8)	6,110	11,547	10,583	8,327	6,110	8,000	4,619	8,000	5,662	6,110
Bi [μm] (1.2)	-27,333	-29,333	-28,000	-28,667	-28,000	-29,667	-30,667	-31,667	-26,367	-30,000
Ri [μm] (1.9)	35,680	41,217	37,292	40,402	39,382	38,285	41,059	38,722	36,409	39,165

PŘÍLOHA P XI: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE Y - LIST 3

Pi	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Pi ↑ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
yi 1 ↑ [μm]	-33	-38	-46	-54	-59	-65	-71	-77	-84	-93
yi 2 ↑ [μm]	-40	-46	-54	-59	-65	-73	-80	-86	-92	-98
yi 3 ↑ [μm]	-38	-44	-51	-61	-64	-72	-79	-89	-95	-102
\bar{y}_i ↑ [μm] (0.9)	-37,000	-42,667	-50,333	-58,000	-62,667	-70,000	-76,667	-84,000	-90,333	-97,667
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	3,606	4,163	4,041	3,606	3,215	4,359	4,933	6,245	5,686	4,509
Pi ↓ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
yi 1 ↓ [μm]	-10	-19	-22	-30	-38	-48	-55	-61	-66	-74
yi 2 ↓ [μm]	-8	-16	-24	-30	-38	-48	-54	-60	-67	-76
yi 3 ↓ [μm]	-7	-15	-21	-30	-35	-48	-56	-63	-69	-75
\bar{y}_i ↓ [μm] (1.0)	-8,333	-16,667	-22,333	-30,000	-37,000	-48,000	-55,000	-61,333	-67,333	-75,000
\bar{y}_i [μm] 1.1)	-22,667	-29,667	-36,333	-44,000	-49,833	-59,000	-65,833	-72,667	-78,833	-86,333
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	1,528	2,082	1,528	0,000	1,732	0,000	1,000	1,528	1,528	1,000
Si ↑ [μm] (1.5)	3,606	4,163	4,041	3,606	3,215	4,359	4,933	6,245	5,686	4,509
Si ↓ [μm] (1.6)	1,528	2,082	1,528	0,000	1,732	0,000	1,000	1,528	1,528	1,000
\bar{y}_i ↑ +2Si ↑	-29,789	-34,340	-42,250	-50,789	-56,238	-61,282	-66,801	-71,510	-78,961	-88,648
\bar{y}_i ↑ -2Si ↑	-44,211	-50,993	-58,416	-65,211	-69,096	-78,718	-86,532	-96,490	-101,706	-106,685
\bar{y}_i ↓ +2Si ↓	-5,278	-12,503	-19,278	-30,000	-33,536	-48,000	-53,000	-58,278	-64,278	-73,000
\bar{y}_i ↓ -2Si ↓	-11,388	-20,830	-25,388	-30,000	-40,464	-48,000	-57,000	-64,388	-70,388	-77,000
Ri ↑ [μm] (1.7)	14,422	16,653	16,166	14,422	12,858	17,436	19,732	24,980	22,745	18,037
Ri ↓ [μm] (1.8)	6,110	8,327	6,110	0,000	6,928	0,000	4,000	6,110	6,110	4,000
Bi [μm] (1.2)	-28,667	-26,000	-28,000	-28,000	-25,667	-22,000	-21,667	-22,667	-23,000	-22,667
Ri [μm] (1.9)	38,933	38,490	39,138	35,211	35,560	30,718	33,532	38,212	37,428	33,685

PŘÍLOHA P XII: LINEÁRNÍ MĚŘENÍ V OSE Y - LIST 4

Pi	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Pi ↑ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205
yi 1 ↑ [μm]	-101	-113	-120	-125	-130	-139	-145	-149	-157	-165	-173
yi 2 ↑ [μm]	-107	-112	-117	-127	-134	-140	-146	-155	-162	-166	-170
yi 3 ↑ [μm]	-106	-115	-121	-130	-134	-144	-150	-153	-160	-165	-169
\bar{y}_i ↑ [μm] (0.9)	-104,667	-113,333	-119,333	-127,333	-132,667	-141,000	-147,000	-152,333	-159,667	-165,333	-170,667
sm odch. \bar{x}_i ↑ [μm]	3,215	1,528	2,082	2,517	2,309	2,646	2,646	3,055	2,517	0,577	2,082
Pi ↓ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	200
yi 1 ↓ [μm]	-81	-86	-94	-101	-109	-115	-120	-129	-133	-140	-149
yi 2 ↓ [μm]	-82	-87	-96	-103	-111	-116	-123	-131	-137	-141	-151
yi 3 ↓ [μm]	-81	-86	-93	-100	-107	-113	-119	-129	-135	-140	-149
\bar{y}_i ↓ [μm] (1.0)	-81,333	-86,333	-94,333	-101,333	-109,000	-114,667	-120,667	-129,667	-135,000	-140,333	-149,667
\bar{y}_i [μm] (1.1)	-93,000	-99,833	-106,833	-114,333	-120,833	-127,833	-133,833	-141,000	-147,333	-152,833	-160,167
sm odch. \bar{x}_i ↓ [μm]	0,577	0,577	1,528	1,528	2,000	1,528	2,082	1,155	2,000	0,577	1,155
Si ↑ [μm] (1.5)	3,215	1,528	2,082	2,517	2,309	2,646	2,646	3,055	2,517	0,577	2,082
Si ↓ [μm] (1.6)	0,577	0,577	1,528	1,528	2,000	1,528	2,082	1,155	2,000	0,577	1,155
\bar{y}_i ↑ +2Si ↑	-98,238	-110,278	-115,170	-122,300	-128,048	-135,708	-141,708	-146,223	-154,633	-164,179	-166,503
\bar{y}_i ↑ -2Si ↑	-111,096	-116,388	-123,497	-132,367	-137,285	-146,292	-152,292	-158,443	-164,700	-166,488	-174,830
\bar{y}_i ↓ +2Si ↓	-80,179	-85,179	-91,278	-98,278	-105,000	-111,612	-116,503	-127,357	-131,000	-139,179	-147,357
\bar{y}_i ↓ -2Si ↓	-82,488	-87,488	-97,388	-104,388	-113,000	-117,722	-124,830	-131,976	-139,000	-141,488	-151,976
Ri ↑ [μm] (1.7)	12,858	6,110	8,327	10,066	9,238	10,583	10,583	12,220	10,066	2,309	8,327
Ri ↓ [μm] (1.8)	2,309	2,309	6,110	6,110	8,000	6,110	8,327	4,619	8,000	2,309	4,619
Bi [μm] (1.2)	-23,333	-27,000	-25,000	-26,000	-23,667	-26,333	-26,333	-22,667	-24,667	-25,000	-21,000
Ri [μm] (1.9)	30,917	31,210	32,218	34,088	32,285	34,680	35,788	31,086	33,700	27,309	27,473