

Využití laserového interferometru pro testování přesnosti polohování frézky FC 16

Bc. Vladimír Schwarz

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vladimír Schwarz**
Osobní číslo: **T15719**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Využití laserového interferometru pro testování přesnosti polohování frézky FC 16**

Zásady pro vypracování:

1. Popište kontrolu CNC strojů s využitím norem řady ISO 230
2. Popište vhodné doplňkové statistické metody sloužící k hodnocení přesnosti systému CNC
3. Popište a rozeberte výpočty nejistot měření s aplikacemi na CNC stroje
4. Na frézce FC 16 CNC sestavte program pro její kalibraci
5. Provedte kalibraci pomocí laserového interferometru Remishaw
6. Navrhněte vhodný kalibrační postup

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. CHUDÝ,Vladimír. Meranie technických veličín 1. vyd. Bratislava: STU, 1999 ISBN 80-227-1275-2.
2. HINDLS,Richard. Statistika pro ekonomy.8.vyd. Praha: Professional Publishing 2007. ISBN 978-80-86946-43-6
3. BUMBÁLEK, Leoš a kol. Kontrola a měření. vyd.1. Praha: Informatorium, 2009, ISBN 978-80-8333-072-9.
4. ČSN ISO 230-2. Zásady zkoušek obráběcích strojů: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách. Praha: Úřad protechnickou normalizaci, metrologii a státní srušebnictví, 2010

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Vladimír Pata
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

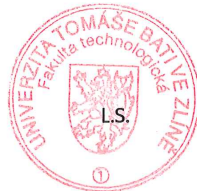
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 27. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cieľom diplomovej práce je meranie polohovania frézy CF 16 CNC. Teoretická časť je venovaná posudzovaniu presnosti obrábacích strojov a normám, ktoré sa presnosťou obrábacích strojov zaoberajú. Ďalej sú v tejto časti popísané základné princípy merania polohovania obrábacích strojov pomocou laserového interferometra a sú popísané základné štatistické nástroje pre vyhodnocovanie presnosti polohovania z nameraných veličín.

Praktická časť je zameraná na samotné meranie presnosti polohovania obrábacieho stroja, na výpočet parametrov vychádzajúcich z normy ISO 230 a na zostrojenie kalibračného protokolu. Je posudzovaný aktuálny stav polohovacieho zariadenia stroja a sú navrhnuté možné aplikácie na zlepšenie.

Kľúčové slová: laserový interferometer, presnosť, polohovanie, lineárne meranie, chyby merania

ABSTRACT

The aim of the thesis is to measure positioning measurement of milling machine FC 16 CNC. The teoretical part focuses on assessing the accuracy of machine tools and introducing standards for accuracy measurement of machine tools. Further on, the section concentrates on describing basic principles of positioning measurement of machine tools and basic statistic tools used for evaluation of positioning accuracy resulting from measured values.

Practical part presents mesurements of positioning accuracy machine tool, mathematical evaluation folowing standard ISO 230 and elaboration of calibration protocol. Current state of positioning instrument is evaluated and possible enhancements of application are proposed.

Keywords: laser interferometer, accuracy, positioning, linear measurement, measurment errors

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. Dr. Vladimírovi Patovi za odborné vedenie a za ochotu pri odborných konzultáciách. Poďakovanie patrí i Ing. Milene Kubišovej, ktorá mi pomohla počas merania.

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že odovzdaná verzia bakalárskej/diplomovej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

Bc. Vladimír Schwarz

.....

OBSAH

ÚVOD	12
I TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1 ZÁKLADY ŠTATISTIKY PRE VYHODNOTENIE PRESNOSTI A OPAKOVATEĽNOSTI POLOHOVANIA OBRÁBACÍCH STROJOV.....	14
1.1 MIERA POLOHY	14
1.2 MIERA VARIABILITY	15
1.3 MIERA RELATÍVNEJ VARIABILITY	15
1.4 TESTOVANIE HYPOTÉZ.....	16
1.4.1 Druhy testov	18
1.5 PRESNOSŤ POLOHOVANIA OBRÁBACÍCH STROJOV	21
1.5.1 Opakovateľnosť	21
1.5.2 Rozlíšiteľnosť.....	21
2 ZÁSADY SKÚŠOK OBRÁBACÍCH STROJOV PODĽA NORMY ČSN ISO 230	22
2.1 ČSN ISO 230-1: GEOMETRICKÁ PRESNOSŤ STROJOV PRACUJÚCICH BEZ ZAŤAŽENIA ALEBO ZA KVÁZISTATICKÝCH PODMIENOK	22
2.2 ČSN ISO 230-2: URČENIE PRESNOSTI A OPAKOVATEĽNOSTI NASTAVENIA POLOHY V ČÍSLICOVO RIADENÝCH OSIACH.....	23
2.3 ČSN ISO 230-3: URČENIE TEPELNÝCH VPLYVOV	23
2.4 ČSN ISO 230-4: SKÚŠKY KRUHOVEJ INTERPOLÁCIE PRI ČÍSLICOVO RIADENÝCH OBRÁBACÍCH STROJOCH.....	24
2.5 ČSN ISO 230-5: URČENIE EMISIE HLUKU.....	24
2.6 ČSN ISO 230-6: URČENIE PRESNOSTI NASTAVENIA POLOHY NA DIAGONÁLACH TELESA A STIEN (SKÚŠKA DIAGONÁLNEHO PRESTAVENIA).....	25
3 MERANIE A POLOHOVANIE POMOCOU LASEROVÉHO INTERFEROMETRA	26
3.1 PRINCÍP LASEROVÉHO INTERFEROMETRA	26
3.2 LINEÁRNE MERANIE POMOCOU LASEROVÉHO INTERFEROMETRA	28
3.2.1 Faktory ovplyvňujúce presnosť pri lineárnom meraní vznikajúce v dôsledku zlého nastavenia interferometra.....	30
3.2.2 Možné chyby vyskytujúce sa pri meraní	33
3.3 LASEROVÝ SYSTÉM RENISHAW XL-80.....	34
3.3.1 Princíp interferometrie.....	34
3.3.2 Príslušenstvo k zostave interferometra Ranishaw XL-80.....	36
3.3.3 Laserový kompenzátor XC-80 a snímače.....	38
4 STANOVENIE PRESNOSTI POLOHOVANIA A OPAKOVATEĽNOSTI PODĽA NORMY ČSN ISO 230-2:2014.....	39

4.1	ENVIRONMENT	45
4.2	TESTOVANÝ STROJ	46
4.3	SKÚŠKY V LINEÁRNYCH OSÁCH DO 2000 MM.....	47
4.4	VOLBA CIELOVEJ POZÍCIE	47
4.5	ZAHRIEVACÍ CYKLUS.....	47
4.6	PRIEBEH SKÚŠKY.....	48
4.7	VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV.....	48
4.8	PREZENTÁCIA VÝSLEDKOV	48
II	PRAKTICKÁ ČÁST	50
5	POPIS MERANEJ CNC FRÉZKY FC 16 CNC/PC.....	51
5.1	TECHNICKÉ PARAMETRE FRÉZKY FC 16 CNC.....	52
6	POUŽITIE LASERINTERFEROMETRU PRE KALIBRÁCIU	53
6.1	POSTUP KALIBRÁCIE	53
6.1.1	Nastavenie laseru a nastavenie optických prvkov	54
6.1.2	Zaznamenávanie dát pomocou softwaru Laser XL Capture.....	58
6.1.3	Vyhodnotenie nameraných hodnôt.....	62
6.2	VÝPOČET PARAMETROV POLOHOVANIA PODĽA NORMY 230-2:2014	62
6.3	VÝPOČET ODHADOV NEISTÔT MERANIA LINEÁRNEHO POLOHOVANIA PODĽA NORMY ISO 230-2:2014	65
6.4	PREHLAD ODHADOV NEISTÔT MERANIA LINEÁRNEHO POLOHOVANIA	70
6.5	VYHODNOTENIE PARAMETROV POLOHOVANIA PODĽA NORMY ISO 230-2.....	72
6.6	PREZENTÁCIA VÝSLEDKOV	73
7	VYHODNOTENIE GRAFICKEJ ČASTI KALIBRAČNÉHO PROTOKOLU A PRAKTIKÉ NÁVRHY.....	75
7.1	ZHODNOTENIE AKTUÁLNEHO STAVU ZARIADENIA	75
7.2	PRAKTICKÉ ZÁVERY	78
	ZÁVER	79
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEKCHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.	
	SEZNAM OBRÁZKŮ	86
	ZOZNAM TABULIEK.....	88
	ZOZNAM PRÍLOH	89

ÚVOD

Rozvojom priemyselnej výroby sú kladené čím ďalej tým väčšie požiadavky na presnosť vyhotovovania požadovaných výrobkov. Aby však bolo možné zmerať, či výrobok spĺňa požadované kritériá, bolo potrebné vyvinúť metódy a postupy na zistenie presnosti výroby, aby bolo možné následne posúdiť výsledky meraní a prijať potrebné nápravné opatrenia na zabezpečenie požadovanej presnosti a kvality. Samotná presnosť tvarov a rozmerov výrobkov vypovedá o presnosti výrobného stroja.

Jedným z kritérií postupov vyhodnocujúcich presnosť výroby je zrozumiteľnosť a kompatibilita v globálnom pojatí. Norma ČSN ISO 230-2: Určenie presnosti a opakovateľnosti nastavenia polohy v číslícovo riadených osách má medzinárodný charakter a je českou verziou normy ISO 230-2:2014: Test code for machining tools; Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes. Určuje postup kalibrácie pre stanovenie presnosti a opakovateľnosti polohy u CNC obrábacích strojov. Účelom merania je stanoviť parametre definujúce presnosť a opakovateľnosť a ich neistoty v jednotlivých osiach x, y, z. Výstupom merania podľa normy ČSN ISO 230-2 je kalibračný protokol.

Úlohou tejto práce je zistiť, v akom stave je meraný stroj, fréza FC 16 CNC. Pre stanovenie presnosti a opakovateľnosti polohovania bude použitý postup uvedený v norme ČSN ISO 230-2.

Tento postup je vysvetlený v teoretickej časti tejto práce. Tá obsahuje aj základné charakteristiky potrebné na štatistické vyhodnotenie nameraných údajov. Taktiež je v nej popísaný princíp merania pomocou laserového interferometra a postup zaznamenávania výsledkov.

V praktickej časti je popísaný postup nastavenia interferometra pre kalibráciu. Praktická časť popisuje postup nastavenia interferometra pre kalibráciu a obsahuje výpočet parametrov pre vyhodnotenie presnosti a opakovateľnosti podľa postupu popísaného v norme 230-2:2014. Záver praktickej časti popisuje aktuálny stav obrábacieho stroja vychádzajúci z nameraných hodnôt a stanovuje návrhy riešení na zlepšenie presnosti stroja.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADY ŠTATISTIKY PRE VYHODNOTENIE PRESNOSTI A OPAKOVATEĽNOSTI POLOHOVANIA OBRÁBACÍCH STROJOV

Štatisticky sa vyhodnocujú hlavne hromadné javy a procesy. Sú to javy vyskytujúce sa vo veľkých množstvách prvkov. Takéto prvky sú nazývané štatistickými jednotkami, ktoré sú elementárnymi časticami štatistického pozorovania. Vlastnosti štatistických jednotiek sú vyjadrované štatistickými znakmi.[7]

Štatistické znaky môžeme deliť podľa určitých kritérií. V prípade, že sa dajú vyjadriť číselne, ide o znaky kvantitatívne. Ak sa číselne vyjadriť nedajú, ale popisujú určitú špecifickú vlastnosť znaku, sú to znaky kvalitatívne. Kvalitatívne znaky sú ďalej delené na znaky nominálne a ordinálne. Nominálne znaky sa nedajú zoradiť podľa žiadneho pravidla. Naopak znaky ordinálne je možné zoradiť podľa určitého kritéria. Kvantitatívne znaky sú delené na znaky nespojité a spojité. Nespojité znaky sú také, ktoré majú len jednu určitú hodnotu. Takéto znaky sú napríklad hodnotami výstupu zaznamenávania vzdialeností pomocou interferometra. Spojité znaky vyjadrujú všetky hodnoty, ktoré sa vyskytli v priebehu pozorovania v určitom časovom okamihu. [7]

Všetky štatistické jednotky, pri ktorých skúmame štatistické znaky, tvoria množinu, ktorá je označovaná ako štatistický súbor. Ak tento súbor obsahuje všetky štatistické jednotky, ktoré môžu byť predmetom určitého pozorovania, nazýva sa základným súborom. Môže byť konečný a nekonečný. Pre meranie je neuskutočniteľné vyhodnotiť všetky jednotky zo základného súboru bez toho, aby neboli porušené zásady dodržania opakovateľnosti. Preto sa pre účely skúmania volí súbor výberový a z neho sa vyvodzujú úsudky o súbore základnom. [7]

1.1 Miera polohy

V prípade, že je snaha porovnať niekoľko štatistických súborov, treba informáciu z údajov obsiahnuť v koncentrovanej podobe formou určitých charakteristík tak, aby s dostatočnou presnosťou charakterizovali rysy skúmaného súboru.

Charakteristikami, ktoré určujú mieru polohy, sú priemer, medián a modus. Najpoužívanejším z nich je priemer aritmetický, ktorý vypočítame z neusporiadaných zistených hodnôt x_1, x_2, \dots, x_n , kde n značí počet premenných ako:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1)$$

Nevýhodou aritmetického priemeru je fakt, že v prípade výskytu odľahlých hodnôt v súbore alebo zošikmením početností bude hodnota aritmetického súboru výrazne ovplyvnená. [7]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2)$$

1.2 Miera variability

Charakteristiky ako aritmetický priemer, modus alebo medián hovoria len o jednej vlastnosti, a to vlastnosti rozdelenia početností, a teda o polohe. Často sa ale stáva, že síce súbor vykazuje rovnakú polohu pri rozdelení početností, ale i tak sa od seba výrazne líšia. Preto je potrebné určiť, ako dobre vypovedá hodnota aritmetického priemeru o vlastnostiach súboru. K tomu nám slúži miera variability, pri ktorej platí, že vypovedacia schopnosť aritmetického priemeru sa zvyšuje znižujúcou sa mierou variability. Jednou z hlavných charakteristík je **miera absolútnej variability**, ktorou je vyjadrená variabilita v rovnakých meraných jednotkách, v akých je vyjadrený sledovaný znak. Druhou významnou charakteristikou je **miera relatívnej variability**, ktorá meria variabilitu v pomere k úrovni sledovaného znaku v súbore. Miera, ktorá meria súčasne variabilitu hodnôt okolo aritmetického priemeru a taktiež variabilitu v zmysle vzájomných odchýlok jednotlivých hodnôt znaku, sa nazýva **rozptyl**. Je označovaný ako s_x^2 a definovaný ako priemer štvorcov odchýlok jednotlivých hodnôt znaku od ich aritmetického priemeru:

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (1.3)$$

Výsledok je umocnením výsledných jednotiek a preto neponúka vhodnú interpretáciu. Odmocnením vzťahu (1.3) tak dostaneme smerodajnú odchýlku s_x . [7]

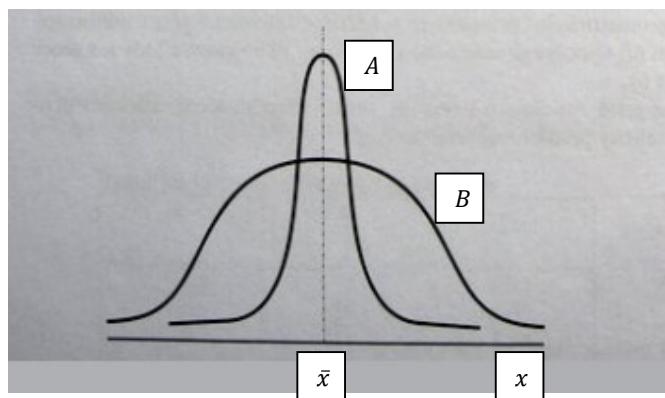
1.3 Miera relatívnej variability

V prípade, že je potrebné merať variabilitu štatistického znaku dvoch alebo viacerých štatistických súborov, ktoré môžu byť vyjadrené v iných jednotkách, používajú sa relatívne miery variability. Tie vylučujú vplyv rozdielnych jednotiek tým, že dávajú do pomeru charakteristiky absolútnej variability prevažne s priemerom, ale v niektorých prípadoch aj s mediánom. Hlavným ukazovateľom miery relatívnej variability je variačný koeficient,

ktorý je definovaný ako pomer smerodajnej odchýlky a aritmetického priemeru. Výsledok je bezrozmerné číslo. Jeho stonásobok je vyjadrením relatívnej variability v percentách.

$$V_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (1.4)$$

Hodnota variačného koeficientu udáva dôveryhodnosť aritmetického priemeru. Hovorí o tom, akú časť z aritmetického priemeru tvorí jeho smerodajná odchýlka. Čím menší je variačný koeficient, tým je hodnota aritmetického priemeru dôveryhodnejšia. [7]



Obr. 1 Rozdelenia líšiace sa variabilitou [7]

1.4 Testovanie hypotéz

Štatistickou hypotézou sa rozumie určitý očakávaný predpoklad o parametroch alebo tvare rozdelenia skúmaného znaku. Predpoklad sa môže vzťahovať napríklad na priemer základného súboru alebo na jeho rozptyl. Pretože prešetrenie základného súboru je z technického hľadiska neuskutočniteľné, testovanie sa uskutočňuje u výberových súborov, ktoré sú len časťou zo základného súboru. Výberový súbor sa použije pri rozhodnutí o tom, či je vyslovená hypotéza správna alebo nesprávna. Predpoklad vyslovený o určitej charakteristike či tvare rozdelenia v základnom súbore môže byť označený ako **nulová hypotéza** označovaná ako H_0 . Proti nulovej hypotéze sa postaví takzvaná **alternatívna hypotéza**, ktorá popiera nulovú hypotézu. Tá je označovaná ako H_A .

Nulová hypotéza o konkrétnej hodnote aritmetického priemeru základného súboru by bola zapísaná ako:

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad (1.5)$$

Ak je alternatívna hypotéza postavená tak, že tvrdí, že hodnota parametru je iná než udáva nulová hypotéza H_0 , takto formulovaná hypotéza sa nazýva dvojstrannou hypotézou a test hypotézy dvojstranným testom.

$$H_A: \mu \neq \mu_0 \quad (1.6)$$

V prípade, že alternatívna hypotéza popiera platnosť nulovej hypotézy H_0 a vymedzuje jednostranne obor hodnôt, a teda tvrdí, že hodnota parametru je buď väčšia, alebo menšia ako hodnota daná hypotézou H_0 , sa táto hypotéza nazýva **jednostranná hypotéza** a test hypotézy **jednostranný test**.

$$H_A: \mu > \mu_0 \quad (1.7)$$

$$H_A: \mu < \mu_0 \quad (1.8)$$

V tom dôsledku, že sa pri stanovení úsudku vychádza z údajov získaných náhodným výberom, môže pri vyhodnocovaní dôjsť k chybnému záveru.

Prvou možnosťou je, že nulová hypotéza H_0 bude zamietnutá, ale v skutočnosti platí. V takom prípade došlo k **chybe prvého druhu** a jej pravdepodobnosť je označovaná ako α .

Druhou možnosťou je, že nulová hypotéza H_0 zamietnutá nebude, avšak v skutočnosti platí alternatívna hypotéza H_A . V takom prípade došlo k **chybe druhého druhu** a jej pravdepodobnosť je označovaná ako β .

Sila testu je určená ako $1-\beta$ a vyjadruje, s akou pravdepodobnosťou je zamietnutá nulová hypotéza H_0 , keď platí alternatívna hypotéza H_A , a teda hovorí, aká je pravdepodobnosť, že nedôjde k chybe druhého druhu.

		Výsledok testu	
		Nezamietame H_0	Zamietame H_0
Skutočnosť	Platí H_0	Správne rozhodnutie Pravdepodobnosť rozhodnutia: $1-\alpha$ (spoľahlivosť)	Chyba I. druhu Pravdepodobnosť rozhodnutia: α (Hladina významnosti)
	Platí H_A	Chyba II. druhu Pravdepodobnosť rozhodnutia: β	Správne rozhodnutie Pravdepodobnosť rozhodnutia: $1-\beta$

Obr.2 Chyby I. a II. druhu [22]

Pri testovaní hypotéz je snaha minimalizovať pravdepodobnosť ako chyby druhého druhu, tak i pravdepodobnosť α , aby sa dosiahla čo najväčšia sila testu pri čo najmenšej hladine významnosti α . Zo štatistického hľadiska je rozhodujúci parameter testu pravdepodobnosť chyby I. druhu a teda hladina významnosti α . Tá býva obvykle volená ako 1% alebo 5%. V špeciálnych prípadoch môže byť vyžadovaná ešte nižšia hodnota, napríklad na lekárske účely. Chyba II. rádu sa dá znížiť zvolením vhodného testu alebo zväčšením rozsahu výberového súboru. [7]

Postup testovania hypotéz

1. Formulovanie nulovej hypotézy
2. Zvolenie hladiny významnosti α , určenie kritickej hodnoty
3. Výpočet testovacieho kritéria
4. Porovnanie výsledku výpočtu testovacieho kritéria s kritickou hodnotou.

Ak je hodnota testovacieho kritéria väčšia alebo menšia než hodnota kritická, nulovú hypotézu nezamietame, respektíve zamietame. [7]

1.4.1 Druhy testov

Poznáme testy o zhode úrovne v dvoch súboroch. Použitie jednotlivých testov závisí na tom, ktorý parameter chceme zrovnávať, a či sú výbery jednotlivých súborov závislé alebo nie.

Nezávislé výberové súbory sú také, kde príslušné dvojice nie sú fyzicky spojené. Preto sa netýkajú rovnakých prvkov.

Závislé výberové súbory sú také, ktoré sa týkajú rovnakých prvkov pozorovaných za rôznych podmienok. [7]

F-test

Porovnávané sú dva výberové súbory za účelom zistenia, či existuje rozdiel medzi populáciami, z ktorých pochádzajú. F-test sa uskutočňuje za predpokladu, že základné súbory majú Gaussovo normálne rozdelenie s parametrami μ a σ^2 . Základnou otázkou je, či sú dva rozptyly dvoch populácií rozdielne, respektíve či sa líšia štatisticky významne alebo nie. Tieto populácie sú označované ako pokusný a kontrolný súbor.

Voľba nulovej a alternatívnej hypotézy:

Pre testovanie zhody rozptylov základných súborov je určenie hypotéz nasledovné:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad (1.9)$$

Určenie hladiny významnosti:

Hladina významnosti je volená štandardne ako $\alpha=5\%$ (prípadne $\alpha=1\%$)

Testovacie kritérium

$$F = \frac{\text{najväčší z rozptylov z } s_1^2, s_2^2}{\text{najmenší z rozptylov } s_1^2, s_2^2} \quad (1.10)$$

Pričom počet stupňov voľnosti pre výbery je určený vzťahom

$$v_1 = n_1 - 1 \text{ (pre } s_1^2) \quad (1.11)$$

$$v_2 = n_2 - 1 \text{ (pre } s_2^2) \quad (1.12)$$

Vypočítanú štatistiku porovnáme s tabuľkou kritických hodnôt $F_{\text{krit.}} = 1-\alpha/2$, kde kritická hodnota je zvolená podľa určenej hladiny významnosti α (obvykle pre $\alpha=5\%$ alebo $\alpha=1\%$) a počet stupňov voľnosti v .

V prípade, že hodnota $F < F_{\text{krit.}}$, nulová hypotéza H_0 nie je zamietnutá v prospech hypotézy alternatívnej. Rozptyly oboch súborov sa líšia štatisticky významne. Výbery pochádzajú z dvoch rozdielnych základných súborov, navyše s rozdielnymi rozptylmi ($p < 0,05$ alebo $p < 0,01$ podľa zvolenej hladiny významnosti α).

V prípade, že hodnota $F > F_{\text{krit.}}$, nulová hypotéza H_0 je zamietnutá v prospech hypotézy alternatívnej. Rozptyly oboch súborov sa nelíšia štatisticky významne. Výbery pochádzajú z toho istého základného súboru ($p > 0,05$).

[16]

Studentov T-test

Porovnávané sú dva výberové súbory z rôznych populácií, ktorých nezávislosť je zaručená tým, že každý obsahuje iné prvky. T-test sa uskutočňuje za predpokladu, že základné súbory majú Gaussovo normálne rozdelenie s parametrami μ a σ^2 . Preto je radený medzi parametrické. Na základe porovnania výberových súborov sa vyvodí úsudok o ich základných súboroch. Pri testovaní sa dodržiava postup uvedený v predošlom bode.

Voľba nulovej a alternatívnej hypotézy:

Pre testovanie zhody stredných hodnôt základných súborov je určenie hypotéz nasledovné:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

V prípade, že \bar{x}_1 je blízko \bar{x}_2 , je zvolená alternatívna hypotéza v tvare

$$H_0: \mu_1 \neq \mu_2$$

V prípade, že \bar{x}_1 je jednoznačne menší, ako \bar{x}_2 je zvolená alternatívna hypotéza v tvare

$$H_0: \mu_1 < \mu_2$$

V prípade, že \bar{x}_1 je jednoznačne väčší, ako \bar{x}_2 je zvolená alternatívna hypotéza v tvare

$$H_0: \mu_1 > \mu_2$$

Určenie hladiny významnosti

Hladina významnosti je volená štandardne ako $\alpha=5\%$ (prípadne $\alpha=1\%$).

Testovacie kritérium

Voľba vhodného testovacieho kritéria je dôležitá pri definovaní, čo vlastne chceme týmto testom zistiť. Na testovanie rozdielu stredných hodnôt je vhodný nepárový T-test pre rôzne rozptyly, ak výsledok F-testu je $F > F_{\text{krit}}$. Bude použitý vzťah

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (1.13)$$

V prípade, že výsledok F-testu je $F < F_{\text{krit}}$, bude použitý vzťah pre nepárový t-test pre zhodné rozptyly.

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2} + \frac{n_1+n_2}{n_1*n_2}}} \quad (1.14)$$

Vypočítanú štatistiku porovnáme s tabuľkou kritických hodnôt $t_{1-\alpha/2}(v)$, kde kritická hodnota je zvolená podľa určenej hladiny významnosti α (obvykle pre $\alpha=5\%$ alebo $\alpha=1\%$)

V prípade, že hodnota $t < t_{1-\alpha/2}(v)$, nulová hypotéza H_0 nie je zamietnutá v prospech hypotézy alternatívnej. Stredná hodnota výberového (pokusného) súboru sa výrazne nelíši od strednej hodnoty kontrolného súboru ($p > 0,05$).

V prípade, že hodnota $t > t_{1-\alpha/2}(v)$, nulová hypotéza H_0 je zamietnutá v prospech hypotézy alternatívnej. Stredná hodnota výberového (pokusného) súboru sa líši významne od strednej hodnoty kontrolného súboru ($p < 0,05$ resp. $p < 0,01$). [16]

1.5 Presnosť polohovania obrábacích strojov

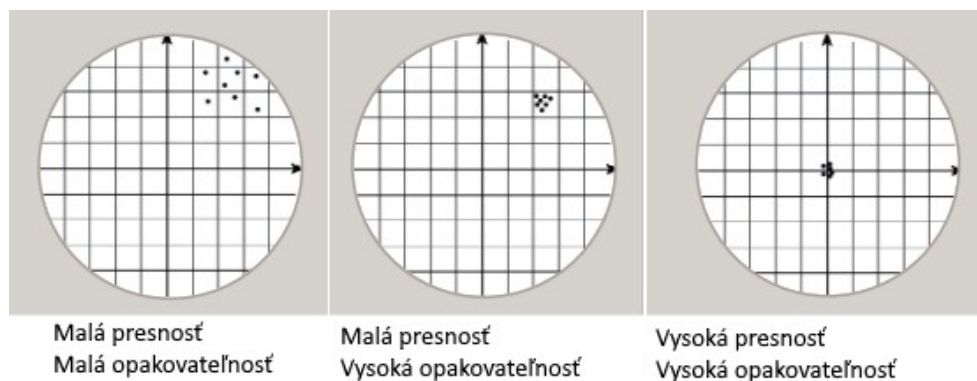
Presnosťou sa rozumie rozdiel medzi požadovanou pozíciou a aktuálnou pozíciou. Môže byť ovplyvnená napríklad zlou spätnou väzbou meracieho zariadenia alebo polohovacou skrutkou. [13]

1.5.1 Opakovateľnosť

Je schopnosť pohybového systému spoľahlivo dosiahnuť zadanú polohu pri mnohých opakovaných pokusoch za rovnakých podmienok. Jednosmerná opakovateľnosť je schopnosť opakovať pohyb iba v jednom smere. Tým ignoruje účinok mŕtveho chodu alebo hysterézie systému. Obojsmerná opakovateľnosť je schopnosť opakovať pohyb z oboch smerov. Meranie opakovateľnosti sa štandardne uskutočňuje nezaťaženým systémom. [14]

1.5.2 Rozlíšiteľnosť

Rozlíšiteľnosť je najmenší možný pohyb systému. Je predurčená snímacím zariadením a možnosťami polohovacieho zariadenia. Býva označovaná aj ako najmenší krok stroja. [13]



Obr.3 Znáznornenie presnosti a opakovateľnosti [13]

2 ZÁSADY SKÚŠOK OBRÁBACÍCH STROJOV PODĽA NORMY ČSN ISO 230

Kontrola geometrickej presnosti, jej kalibrácia a postupy merania sú popísané v norme ČSN ISO 230. Norma je súbor dokumentov zaoberajúcich sa popisom presnosti strojov bez zaťaženia alebo za dokončovacích podmienok obrábania. Vzťahuje sa len na skúšky presnosti a nezaobera sa funkčnými skúškami stroja, ako sú vibrácie, trhavé pohyby častí stroja a iné, pretože tieto skúšky sa uskutočňujú ešte pred samotným meraním presnosti. Ďalej táto norma špecifikuje chyby pri nastavovaní meracích prístrojov a i ich presnosť.

Norma má len odporúčaný charakter a pripúšťa aj využitie iných metód, ktoré by v prípade ich použitia dokázali zabezpečiť porovnateľné alebo lepšie výsledky a presnejšie informácie o stroji, ako keby sa postupovalo podľa normy. Preto si mnohé spoločnosti stanovujú vlastné interné štandardy a normy, ktoré sú vo veľa prípadoch presnejšie než tie normalizované. [1]

2.1 ČSN ISO 230-1: Geometrická presnosť strojov pracujúcich bez zaťaženia alebo za kvázistatických podmienok

Účelom skúšky geometrickej presnosti je zistiť geometrickú štruktúru obrábacích strojov. Znamená to určiť presnosť tvarov, vzájomných polôh a pohybov tých funkčných častí, ktoré môžu ovplyvniť pracovnú presnosť. Pred začatím skúšky geometrickej presnosti musí byť obrábací stroj postavený na nepoddajnom základe vo vodorovnej polohe. Behom skúšok sa táto poloha nesmie meniť. Pred skúškou by mal byť stroj uvedený taktiež do ustáleného tepelného stavu. [17]

Norma je určená pre silovo poháňané stroje obrábajúce kov, drevo alebo iné materiály, pri ktorých dochádza k plastickej deformácii materiálu alebo odberu materiálu prostredníctvom triesok. Nie je určená pre ručné náradie. Norma nie je aplikovateľná na prevádzkové skúšky obrábacích strojov, ako sú vibrácie a ani na kontrolu charakteristík stroja, ako napríklad rýchlosti vretena a posuvy. Norma nahradzuje normu ISO 230-1:1998. [1]

2.2 ČSN ISO 230-2: Určenie presnosti a opakovateľnosti nastavenia polohy v číslicovo riadených osiach

Táto časť normy sa zaoberá metódami skúšok a vyhodnotení presnosti a opakovateľnosti nastavenia polohy v osiach číslicovo riadených strojov priamym meraním v jednotlivých osiach. V prípade merania vo viacerých osiach súčasne sa táto norma pre takýto typ merania nepoužíva. Uplatňuje sa pri typových skúškach, skúškach akceptovateľnosti, periodickej verifikácii alebo ku kompenzácii stroja. Obsahuje dve prílohy. V prílohe A sú uvedené postupy pre výpočet odhadov neistôt merania. Príloha B je poskytujúca a popisuje použitie iného skúšobného cyklu a to cyklu so spätným krokom. Výsledky merania pri použití takéhoto cyklu však nie sú relevantné a pokiaľ neexistuje špeciálna dohoda medzi dodávateľom a používateľom správnym odkazom na túto časť normy ISO 230 je meranie uskutočnené použitím štandardného cyklu. Príloha C obsahuje faktory súvisiace s periodickou chybou nastavenia polohy a príloha D popisuje možnosť vyhodnotenia skúšky s alternatívnymi meracími zariadeniami ako napríklad kalibračné guľôčky a stupňové mierky. [2]

2.3 ČSN ISO 230-3: Určenie tepelných vplyvov

Témou tejto časti sú tepelné vplyvy na nastavenie polohy. Tie sú zapríčinené zväčša rôznymi deformáciami spôsobenými tepelnou nestabilitou. Tú vytvárajú zdroje tepla ako napríklad pohony. Tepelné vplyvy sa vyhodnocujú len v špecifikovaných pracovných podmienkach neberúce do úvahy rôzne iné podmienky pri obrábaní, ktoré môžu podstatne zmeniť tepelné chovanie stroja. Môže to byť napríklad použitie reznej kvapaliny alebo aktívneho odsávania. V prípade, že je tepelný environment iný, ako je predpísaný v norme alebo dohodnutý medzi zákazníkom, musí používateľ počítať so zhorením prevádzkových vlastností stroja alebo so zväčšením neistoty polohovania. Výsledky takejto skúšky by sa mali brať len ako predbežné skúšky na určenie skutočného tepelno-elastického chovania. Zistenie environmentálnych tepelných vplyvov má využitie v ostatných častiach tejto normy pri meraní lineárneho polohovania, jeho presnosti a opakovateľnosti. Skúšky sú navrhnuté tak, aby sa zamerali na relatívny rozdiel zapríčinený tepelnou rozťažnosťou alebo deformáciou častí stroja, a to medzi časťou stroja držiaca obrobok a nástroj. [3]

Predmetom tejto časti normy sú tri skúšky pre určenie tepelných vplyvov na obrábací stroj:

- Skúška na určenie chyby vzniknutej v dôsledku kolísania environmentálnej teploty (ETVE)
- Skúška tepelných deformácií spôsobených otáčaním vretena
- Skúška tepelných deformácií spôsobená pohybom v lineárnych osiach

Tieto skúšky sú použiteľné len pre NC stroje s dĺžkou lineárnych osí do 2000 mm. V prípade, že dĺžka osi presahuje 2000 mm, pre skúšku by mala byť zvolená len časť celkovej vzdialenosti zodpovedajúca takejto dĺžke.[3]

2.4 ČSN ISO 230-4: Skúšky kruhovej interpolácie pri číslicovo riadených obrábacích strojoch

V tejto časti sú popísané metódy skúšok pre vyhodnotenie dvojsmernej odchýlky kruhovitosti, priemernej dvojsmernej radiálnej odchýlky, odchýlky kruhovitosti a radiálnej odchýlky kruhovej dráhy. Účelom tejto časti normy ISO 230 je stanoviť metódy na meranie tvarov vykonaných pohybov pri číslicovo riadených obrábacích strojoch. Základom merania je merací stroj popísaný v inej časti normy ISO 230-1: stanovenie geometrickej presnosti strojov pracujúcich bez zaťaženia alebo za kvázistatických podmienok. [4]

2.5 ČSN ISO 230-5: Určenie emisie hluku

Ďalšia časť normy ISO 230 popisuje metódy merania hluku vznikajúceho pri chode obrábacích alebo tvárniacich strojov v dielenských podmienkach umiestnených priamo na podlahe s využitím pomocných zariadení, ako napríklad dopravníkov triesok, odsávačov olejovej hmly alebo chladiacich zariadení. Emisie hluku môžu byť stanovené pre bežné podmienky pri šírení hluku vzduchom alebo pri stanovených podmienkach prostredia. Popisuje spôsob merania emisií hluku zahŕňajúci podmienky a postupy inštalácie meracieho zariadenia. Určuje jednotlivé polohy umiestnenia mikrofónu pre merania akustického tlaku, ako v miestach obsluhy, tak i na ploche obklopujúcej obrábací, respektíve tvárniaci stroj. Norma obsahuje postupy na vyhodnotenie a výpočet akustického výkonu obrábacieho, respektíve tvárniaceho stroja. Pre nadmerne dlhé výrobné stroje alebo linky môžu byť metódy popísané v tejto norme nepoužiteľné. Namerané hodnoty hladín emisného akustického tlaku a hladiny akustického výkonu sa budú pravdepodobne líšiť od skutočných hodnôt o hodnotu pohybujúcu sa v rozsahu zodpovedajúcich neistôt merania

zapríčinených faktormi spojenými s podmienkami prostredia alebo faktormi spojenými s meracou technikou. [5]

2.6 ČSN ISO 230-6: Určenie presnosti nastavenia polohy na diagonálach telesa a stien (skúška diagonálneho prestavenia)

Táto časť normy ISO 230 stanovuje skúšky diagonálneho prestavenia, ktoré umožňuje odhadnúť volumetrické vlastnosti obrábacieho stroja. Úplné skúšanie volumetrických vlastností obrábacieho stroja je zložitý a časovo náročný proces. Skúšky diagonálneho prestavenia redukujú čas a cenu spojenú so skúškami volumetrických vlastností.

Skúška diagonálneho prestavenia nie je diagnostickou skúškou, aj napriek tomu môžu byť v niektorých prípadoch z výsledkov vyvodzované závery diagnostického charakteru. Obzvlášť ak sú zahrnuté skúšky na diagonálach stien a je umožnené priame meranie kolmosti osí. Skúšky diagonálneho prestavenia na diagonálach telesa môžu byť doplnené o skúšky na diagonálach stien, skúškami na priamkach rovnobežných so súradnicovými osami podľa ISO 230-2. Alebo vyhodnotením kruhových interpolácií v troch súradnicových rovinách, ako je stanovené v časti normy ISO 230-4. [6]

3 MERANIE A POLOHOVANIE POMOCOU LASEROVÉHO INTERFEROMETRA

Meranie dĺžok sa uskutočňuje pomocou interferenčných komparátorov. Prvý komparátor zostavil A. A. Michelsona podľa toho dostal pomenovanie Michelsonov komparátor. Jeho princípom je interferencia monochromatického laserového lúča s konštantnou a stabilnou vlnovou dĺžkou. Princíp interferencie sa taktiež používa v spektroskopii pri určovaní štruktúry spektrálnych čiar alebo refraktroskopii na meranie indexu lomu.[10]

3.1 Princíp laserového interferometra

Albert Michelson ako prvý použil princíp interferencie svetelných lúčov ako nástroj na meranie. Michelsonov interferometer sa radí medzi interferometry s delením amplitúdy a pozostáva zo zdroja monochromatického svetelného lúča, z dvoch polopriepustných zrkadiel takzvaného deliča, dvoch zrkadiel (referenčného a meracieho) a detektora. [15]

Zo svetelného zdroja vychádza laserová vlna, ktorej amplitúda sa na polopriepustných zrkadlách deliča delí tak, že 50 % energie smeruje do referenčnej vetvy Z_1 a 50 % do meracej vetvy Z_2 . Tieto zväzky sa opäť vrátia do deliča, kde sa znova rozdelia 1 : 1. Pri príchode zväzkov do detektora začnú interferovať, pretože pochádzajú z rovnakého zdroja. Referenčné zrkadlo je v tomto procese statické, a preto sa frekvencia zväzku od neho odrazeného nezmení. Meracie zrkadlo sa v priebehu merania pohybuje, a preto sa mení i vzdialenosť, ktorú svetlo urazí. Pohybom dôjde k zmene frekvencie zachytenej v detektore. Posunutím dráhy jedného zväzku oproti druhému vznikne na detektore interferenčný obrazec. Ten je buď kruhový (v prípade, že je použitý kruhový zdroj svetla), alebo v tvare prúžku. Maximum interferencie pritom predstavuje krúžok (prúžok) svetlý a minimum krúžok (prúžok) tmavý. Tento obrazec určuje frekvenčný rozdiel medzi prijatými lúčmi f_D . Počet interferenčných prúžkov prechádzajúcich cez štrbinu detektora reprezentuje mieru zmeny vzdialenosti, o ktorú sa posunulo meracie zrkadlo. Vzdialenosť sa v prístroji vyhodnocuje podľa vzťahu:

$$L = f_D \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.1)$$

N – počet pulzov

λ – vlnová dĺžka

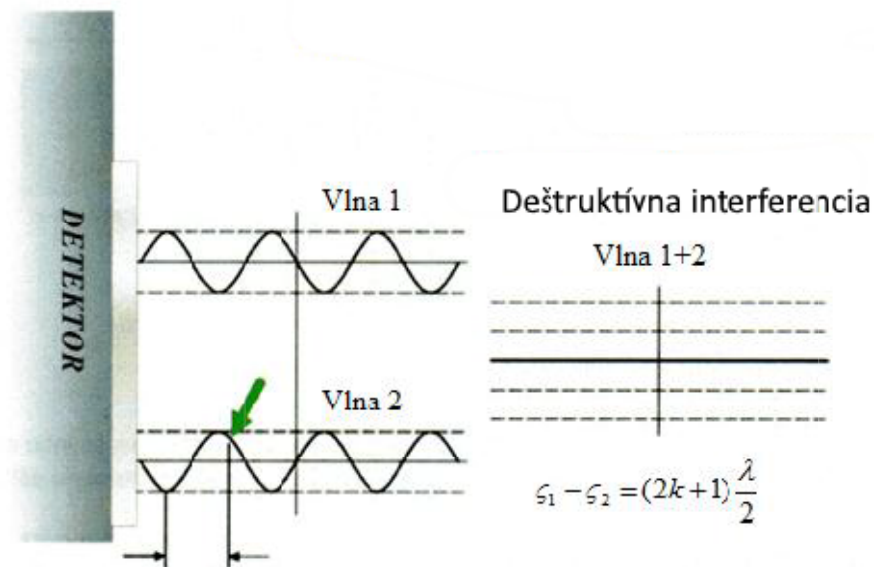
Na to aby, interferencia mohla vzniknúť treba dodržať tieto podmienky:

- Žiarenie musí mať rovnakú vlnovú dĺžku (musí byť monochromatické).
- Žiarenie musí mať nemenný dráhový rozdiel. [15]

Ak sú vyššie uvedené podmienky splnené, je možno označiť takéto svetlo za koherentné. Ak takéto dva svetelné lúče ústia v jednom bode, nastane interferencia (skladanie) vln. Fázový posuv medzi vlnami vyjadríme vzťahom

$$\zeta_1 - \zeta_2 = k\lambda \quad (3.2)$$

Ak je fázový posuv vln $k = 0, 1, 2, \dots, n$, nastane konštruktívna interferencia a dôjde ku skladaniu vln. [10]

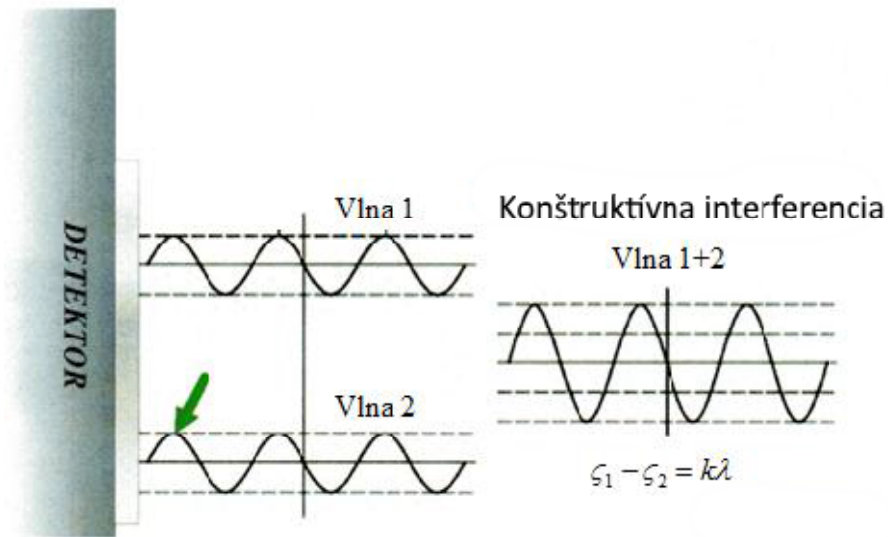


Obr.4 Princíp deštruktívnej interferencie [21]

Ak je fázový posuv posunutý podľa vzťahu

$$\zeta_1 - \zeta_2 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (3.3)$$

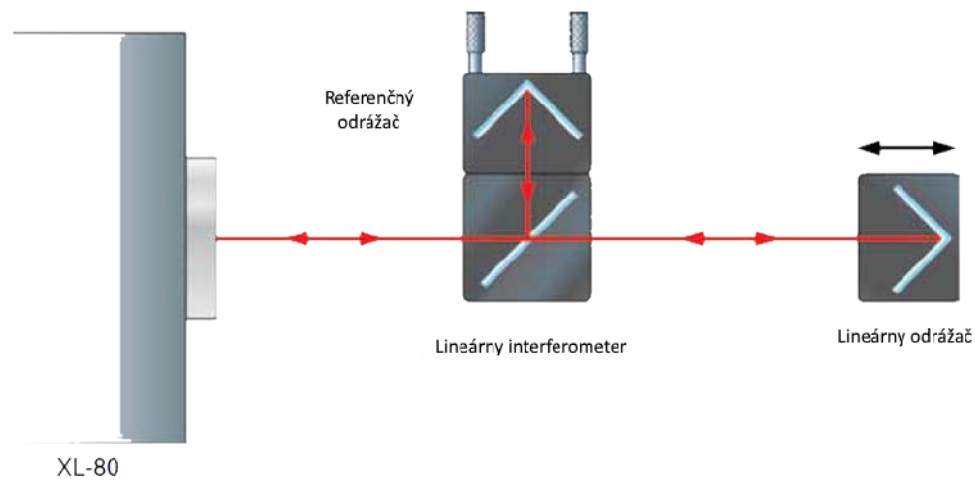
Dôjde k interferencii deštruktívnej. [10]



Obr.5 Princíp konštruktívnej interferencie [21]

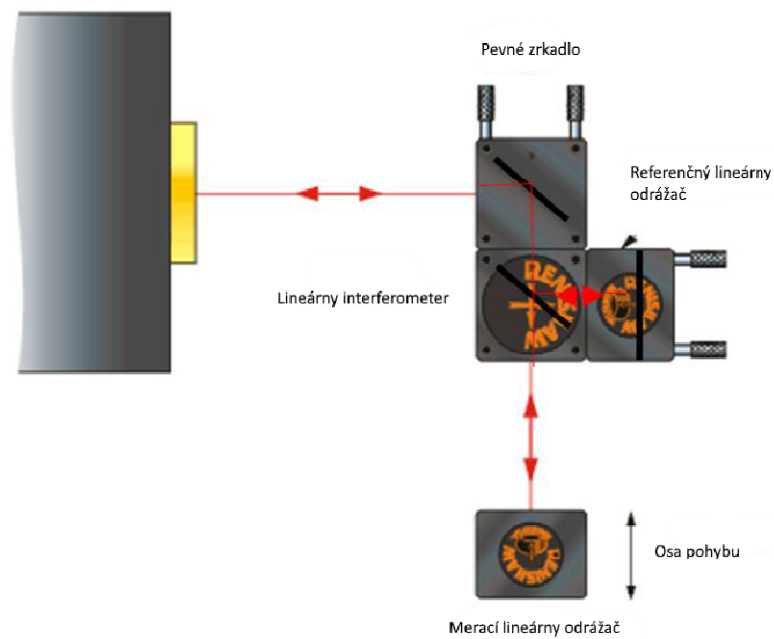
3.2 Lineárne meranie pomocou laserového interferometra

Najtypickejším spôsobom merania je meranie pomocou interferometra. Pri meraní polohovania v osi rovnobežnej s lúčom je možné použiť priame ustavenie interferometra, ale len v prípade, že na stroji nie sú pripevnené prekážky v podobe ochranných krytov alebo inej konštrukcie, ktorá by prekážala konštantnému laserovému lúču vo všetkých meraných polohách. Pri takomto type ustavenia sa delič pripevní priamo na referenčné zrkadlo. Lineárne zrkadlo sa premiestňuje po osi a systém zachytáva zmenu vo vzdialenosti medzi dvoma zrkadlami. Meracie zrkadlo býva umiestnené priamo na držiaku nástroja, upevňuje sa pomocou magnetických úponiek. [21]



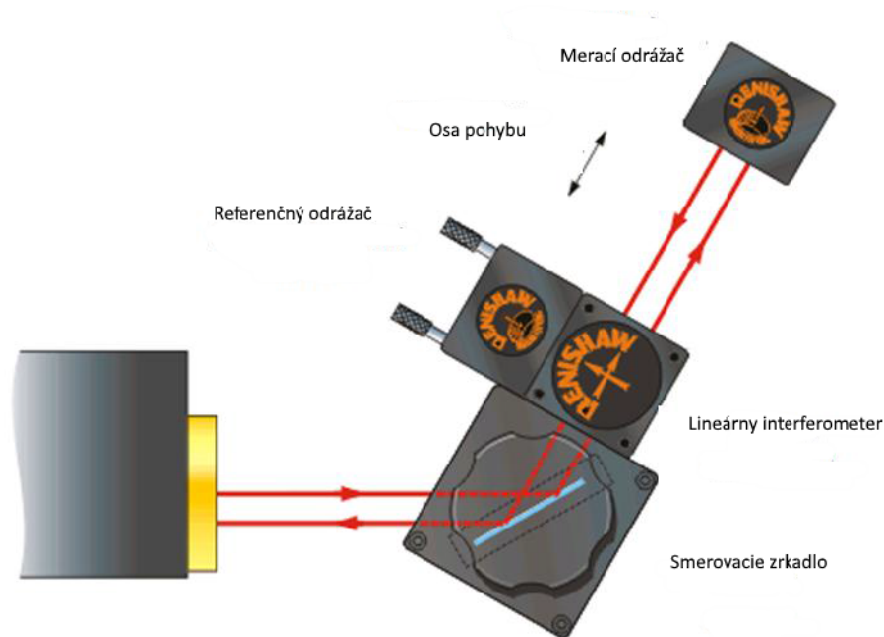
Obr. 6 Zostava optických prvkov pre lineárne meranie [19]

V prípade merania pohybu na osi kolmej k svetelnému lúču, alebo ak sa nedá postaviť zdroj svetelného lúča priamo v osi kvôli prekážke, sa používa kolmé zrkadlo, ktoré sa pripevní na delič a referenčné zrkadlo.



Obr. 7 Zostava optických prvkov pre lineárne meranie v pravom uhle [19]

Na meranie pod iným uhlom, ako je 90° , slúži smerovacie zrkadlo.



Obr. 8 Zostava optických prvkov so smerovacím zrkadlom [19]

3.2.1 Faktory ovplyvňujúce presnosť pri lineárnom meraní vznikajúce v dôsledku zlého nastavenia interferometra

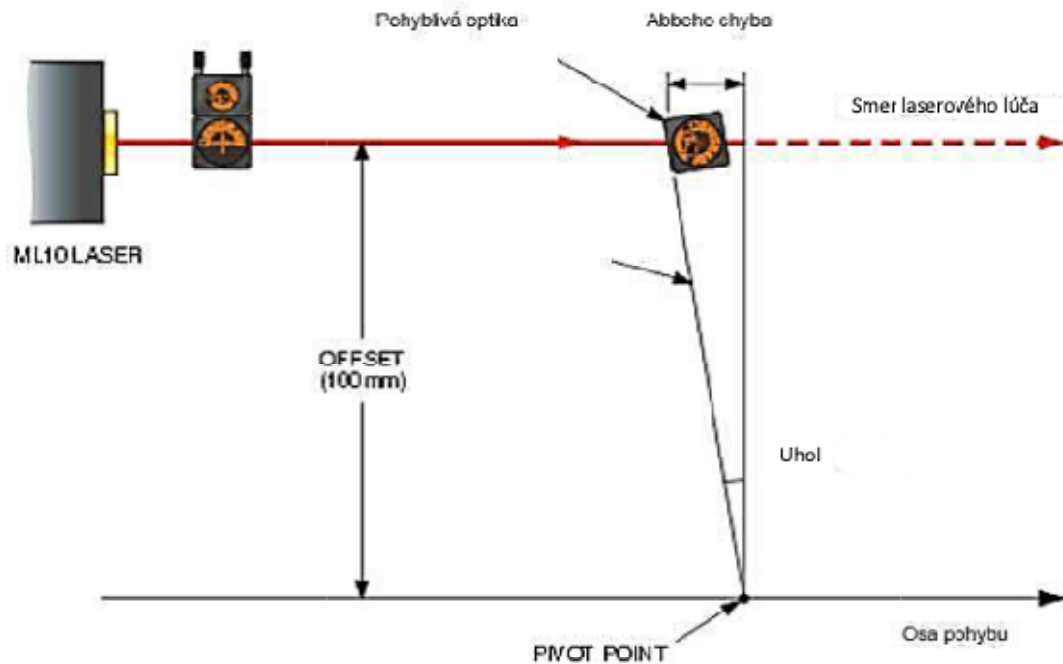
Pri nedodržaní zásad nastavenia interferometra, alebo ak podmienky nedovoľujú ideálne nastavenie vzájomnej polohy lasera voči odražaču upevneného na stroji (stiesnené priestory, nemožnosť upevnenia odražača priamo na vreteno stroja), môžu vzniknúť tieto druhy chýb:

1. Abbeho chyba
2. chyba vznikajúca mŕtvou dráhou
3. Chosinova chyba

Abbeho chyba

Daná chyba sa vyskytuje vtedy, keď merací lúč interferometra neleží v rovnakej osi ako merací stroj. Chyba je zapríčinená natočením odražača proti osi pohybu stroja, alebo keď sa pri meraní pohyblivá časť nepohybuje dokonale priamo. Takéto vyosenie alebo nedokonalý posuv zapríčiní posunutie oproti skutočnému stavu, a to sa zväčšuje vzdialenosťou medzi osou lúča a osou meraného stroja. Táto vzdialenosť je označovaná

ako Abbeho odsadenie (*offset*). Na zamedzenie vzniku takejto chyby by mal byť lúč čo možno totožný, alebo čo možno najviac zhodný s líniou, na ktorej sa meranie uskutočňuje. Pri natočení odražača jednorázovo o konštantný uhol, ktorý ostane po celé meranie konštantný, Abbeho chyba nenastane, pretože pootočením pohyblivej optiky nastane posunutie v smere merania alebo v jeho protismere o konštantnú vzdialenosť. Systém meria rozdiel vo vzdialenosti od nulového bodu, takže vzdialenosť bude vždy rovnaká.[18]

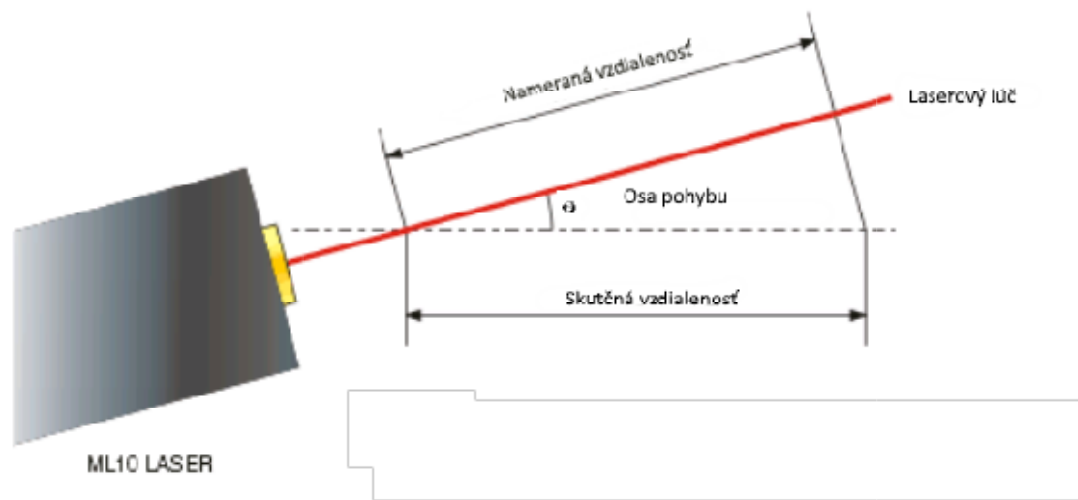


Obr. 9 Grafické znázornenie vzniku Abbeho chyby [21]

Chosinova chyba

V prípade odklonenia lúča od osi merania dôjde k predĺženiu trajektórie lúča, ktorej veľkosť závisí od veľkosti uhlu β , ktorý zvierá os merania a lúč. Čím je uhol vyosenia β väčší, tým je nameraná vzdialenosť väčšia L_{mer} oproti skutočnej vzdialenosti L_{skut} .

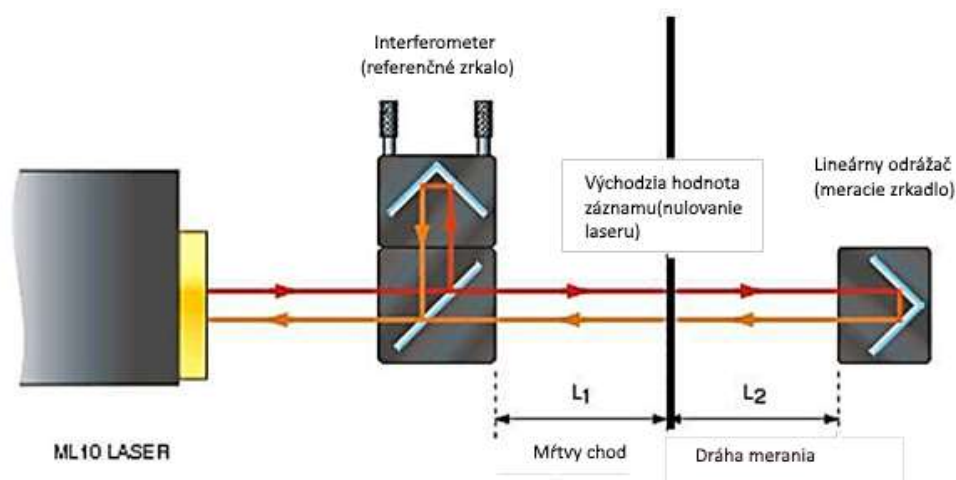
$$L_{\text{mer}} = L_{\text{skut}} \cdot \cos \beta \quad (3.4)$$



Obr. 10 Grafické znázornenie vzniku Chosinovej chyby[11]

Chyba mŕtvej dráhy

Princíp laserového interferometra spočíva v meraní vlnovej dĺžky laserového lúča. Tá sa mení meniacimi sa podmienkami prostredia, a to najmä relatívnou vlhkosťou vzduchu, tlakom a teplotou. Chyba mŕtvej dráhy je preto závislá na vzdialenosti medzi optickými prvkami systému pri jeho nulovaní. Pri zmene podmienok sa vlnová dĺžka bude meniť po celej dráhe lúča medzi interferometrom a odrážačom, pričom laserový merací systém bude kompenzovať iba meranú časť L_2 a nie dráhu lúča medzi interferometrom a nulovou polohou L_1 . Ak však dráha L_1 bude dostatočne malá, chyba zavedená mŕtvou dráhou bude zanedbateľná. Pri samotnom nulovaní systému je vhodné, aby statická časť interferometra a pohyblivý odrážač boli čo možno najbližšie pri sebe, alebo sa dokonca dotýkali. [13]



Obr. 11 Grafické znázornenie vzniku chyby mŕtvej dráhy [21]

3.2.2 Možné chyby vyskytujúce sa pri meraní

Chyby, vyskytujúce sa pri meraní, môžeme rozdeliť do dvoch kategórií. Prvou skupinou sú chyby subjektívneho charakteru, medzi ktoré môžeme zaradiť chyby hrubé a omyly. Druhou skupinou sú chyby objektívneho charakteru, ktoré sa ďalej delia na chyby systematické a chyby náhodné. [11]

Systematická chyba

Je taká chyba, ktorá sa nemení pri väčšom počte meraní, vykonaných pri tých istých podmienkach tej istej hodnoty. Mení sa pri zmene podmienok merania. Môže byť spôsobená opotrebením stroja alebo poškodením niektorej z jeho častí nepresnosťou etalónu. V prípade, že sa na systematickú hodnotu príde, nápravným opatrením môže byť jednoduché odčítanie, respektíve pričítanie jej hodnoty k nameranej hodnote. [12]

Náhodná chyba

Je chyba, ktorá sa mení náhodným spôsobom pri veľkom počte meraní tej istej veličiny pri tých istých podmienkach. Príčiny vzniku náhodných chybe sú neznáme, no príčinami vzniku môže byť kombinácia viacerých faktorov ako napríklad nepravidelné kolísanie teploty. [12]

Hrubá chyba

Môžu vznikajú nepozornosťou obsluhy pri meraní zapísaním nesprávnej hodnoty, Zlyhaním stroja, výrazne odlišnými podmienkami pri meraní. Takáto chyba sa veľmi často dá jednoducho objaviť, lebo nameraná hodnota sa od ostatných hodnôt bude výrazne líšiť. [9]

Absolútna chyba

Je definovaná ako rozdiel medzi nameranou hodnotou a pravou hodnotou. V praxi sa však pravá hodnota nedá presne určiť, a preto je nahradzovaná konvenčne pravou hodnotou reprezentovanou napríklad etalónom. Absolútna hodnota sa vyjadří vzťahom:

kde x_m je nameraná hodnota

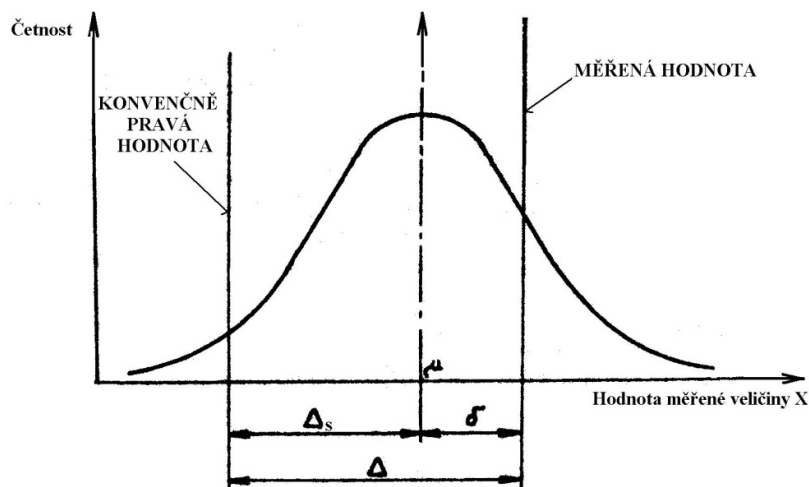
x_p je konvenčne pravá hodnota [11]

Relativná chyba merania

Je to bezrozmerná hodnota, ktorá vyjadruje percentuálnu hodnotu chyby absolútnej. Relatívna chyba je vyjadrená vzťahom:

kde Δ_a je absolútna chyba

S je skutočná hodnota [11]



Obr. 12 Grafické vyjadrenie chyby merania[9]

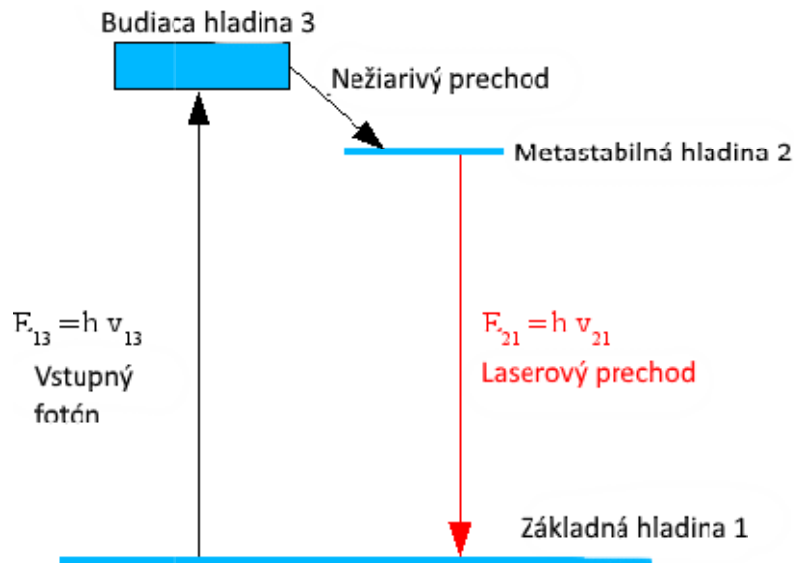
3.3 Laserový systém Renishaw XL-80

Je prenosným laserovým meracím a kalibračným prístrojom obsahujúcim zdroj monochromatického stabilného laserového lúča XL-80, kompenzátor podmienok prostredia XC-80, základnú sadu pre meranie lineárneho polohovania a ďalšie príslušenstvo. [21]

3.3.1 Princíp interferometrie

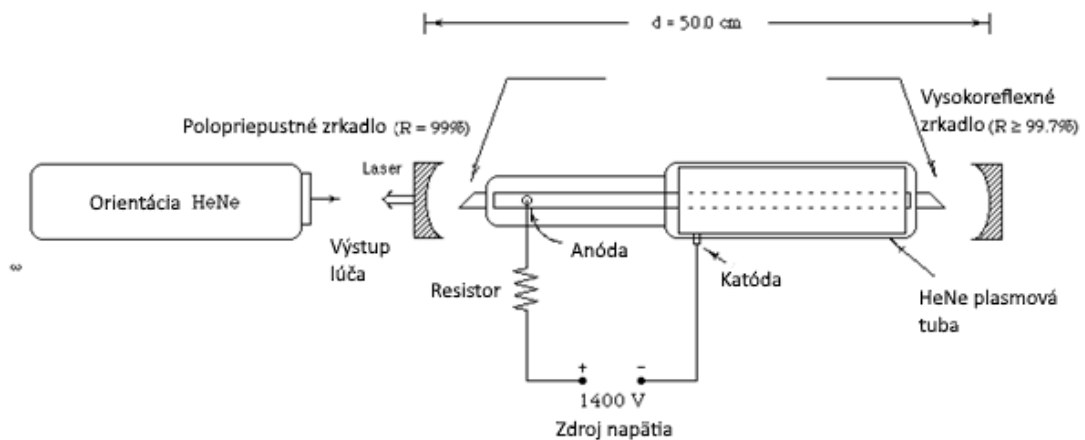
Na správne meranie je potrebný extrémne stabilný laserový lúč s vlnovou dĺžkou dohľadateľnou v národných a medzinárodných normách. Ten sa dosahuje s jednofrekvenčným HeNe laserom. Tento druh lasera je najrozšírenejší druh využívaným v oblasti metrológie.

Laser je tvorený aktívnym prostredím, rezonátorom a výbojkou. V prípade HeNe lasera je aktívne médium zmesou hélia a neónu zmiešaného v pomere 5 : 1 alebo 7 : 1, pričom je umiestnená v sklenenej tube, v ktorej je udržiavaný tlejivý výboj pomocou zdroja striedavého elektrického prúdu 1400V. Z katódy prúdia pod napätím 5mA nabité elektróny na anódu a dochádza ku kolízii s atómami hélia a neónu. Zrážka má za následok produkciu neutrálnych atómov týchto dvoch plynov v excitovanom stave (stav atómu s vyššou energiou). Pri návrate do ich nižšej energetickej hladiny sa môžu vrátiť spontánne späť na pôvodnú hladinu E1, pričom emitujú fotóny ružovo-červenej farby, alebo prejdú do takzvanej metastabilnej hladiny E2, na ktorej majú rádovo vyššiu životnosť ako na E3, avšak pri prechode neemitujú svetlo. Postupne dôjde v dutine rezonátora k inverznej populácii, keď je viac elektrónov v hladine E2 než v hladine E1. Rezonátor zachytáva emitované fotóny medzi dvomi zrkadlami, pričom jedno má odrazivosť 99 %, čo zabezpečí, že 1 % emitovaných fotónov prenikne von vo forme fotónového lúča. [20]



Obr. 13 Excitácia atómov na vyššiu energetickú hladinu

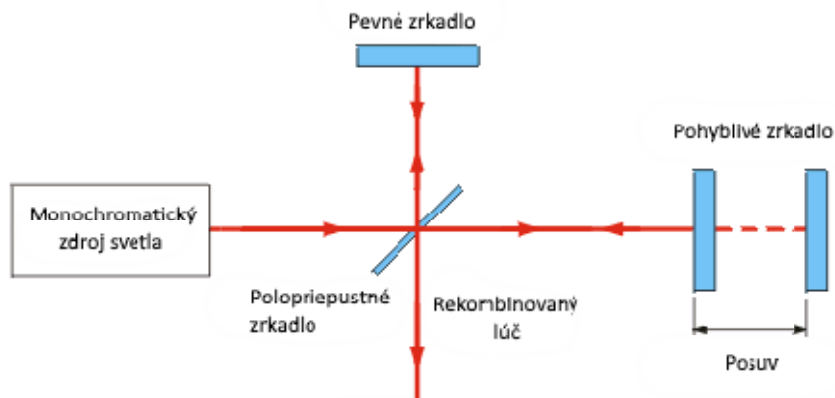
V prípade lasera Renishaw XL-80 má vygenerovaný laserový lúč stabilnú nominálnu frekvenciu $0.633 \mu\text{m}$ pri normálnych teplotných a tlakových podmienkach stanovených na 20°C a 101325Pa . [20]



Obr. 14 Schéma HeNe laseru.[24]

[<http://laser.physics.sunysb.edu/~dli/hnwork.html>]

Systém Renishaw XL-80 zahŕňa optický a elektronický stabilizátor frekvencie laserového lúča, ktorý dokáže interpolovať a počítať množstvo interferencií vyprodukovaných meracou optikou. [21]



Obr. 15 Princíp laserového interferometra

3.3.2 Príslušenstvo k zostave interferometra Ranishaw XL-80

Pre lineárne meranie laserovým interferometrom je potrebné príslušné vybavenie. Základom je generátor jednofrekvenčného, stabilného, monochromatikého laserového lúča Renishaw XL-80. Stabilita a zamedzenie chvenia prístroja je zabezpečená pomocou trojnožky s individuálne nastaviteľnou dĺžkou nôh. Na trojnožku sa pripieňuje platforma,

na ktorú sa dá priskrutkovať k zariadeniu Renishaw XL-80. Platforma je vybavená dvomi polohovacími skrutkami, ktoré prestavujú výšku a sklon zariadenia. Na uistenie, či je laser nasmerovaný správnym smerom v správnom sklone, slúži malá vodováha.

Pre lineárne meranie presnosti a opakovateľnosti nastavenia polohy sa používa optická sada, ktorá pozostáva z:

- rozdeľovač laserového lúča
- 2× lineárny reflektor (odrážač)
- 2× záslepka

Dostatočnú stabilitu a rýchlu schopnosť prispôbiť sa teplote okolitého prostredia zabezpečujú rozdeľovač a odražače vyrobené z ľahkého hliníka. Toto optické vybavenie je vhodné len pre meranie presnosti polohovateľnosti a opakovateľnosti do vzdialenosti 80m. K optickej sade je vhodné použiť magnetické úchytky alebo iný druh úchytiak, ak plocha, ku ktorej prichytávame optiku, nie je feromagnetická. [19]



Obr. 16 Zostava laserového interferometra Renishaw XL-80 [19]

3.3.3 Laserový kompenzátor XC-80 a snímače

Služi na úpravu vlnovej dĺžky laserového lúča a tým zamedzuje vstupu chyby merania vyplývajúcej zo zmeny podmienok prostredia. Pre zachytenie týchto zmien je vybavený inteligentnými snímačmi merajúce teplotu vzduchu, tlak prostredia a relatívnu vlhkosť vzduchu. Snímanie hodnôt je uskutočnené každých 7 sekúnd. Výstup zo snímačov je mapovaný a korigovaný na základe ich kalibrácie. Komunikácia medzi snímačmi a kompenzátorom je znázornená svetelnými diódami na kompenzátore. Spojenie s PC je zabezpečené prostredníctvom USB portu tak ako pri laserovej hlavici XL-80. Funkčnosť a presnosť kompenzátoru je zabezpečená v celom rozsahu prevádzkových podmienok, Tie sú stanovené pre teplotu od 0°C až do 40°C pričom pri lineárnom meraní zachováva presnosť 0,5 μ m/m. [21]



Obr. 17 Kompenzátor XC-80[19]

4 STANOVENIE PRESNOSTI POLOHOVANIA A OPAKOVATEĽNOSTI PODĽA NORMY ČSN ISO 230-2:2014

Skúšky stanovenia presnosti a opakovateľnosti nastavenia polohy sa predovšetkým používajú pri typových skúškach, prijímacích skúškach alebo porovnávacích skúškach. V priebehu skúšky musí byť stroj naprogramovaný tak, aby sa nastavovaná časť pohybovala v danej ose do zadaných polôh, v ktorých zostane určitú dobu, aby mohla byť zaznamenaná a zmeraná skutočná poloha. Pre takýto typ merania sa používa najčastejšie laserový interferometer. [8]

Rozsah dráhy v osi (*axis travel*)

Z hľadiska lineárneho merania je to najväčšia dráha, po ktorej sa môže pohyblivá časť stroja pohybovať. Je limitovaná rozsahom číslicovo riadeného programu. Pre uhlové meranie je to zasa najväčšia uhlová dráha, o ktorú sa môže otočiť.

Meraný rozsah dráhy (*measurement travel*)

Ide o časť rozsahu dráhy, na ktorej sa uskutočňuje meranie. Pri voľbe tejto dráhy je dôležité, aby bola zvolená tak, že sa do prvej a poslednej meranej pozície dá podísť z oboch strán (priložiť obrázok).

Cieľová poloha (*target position*)

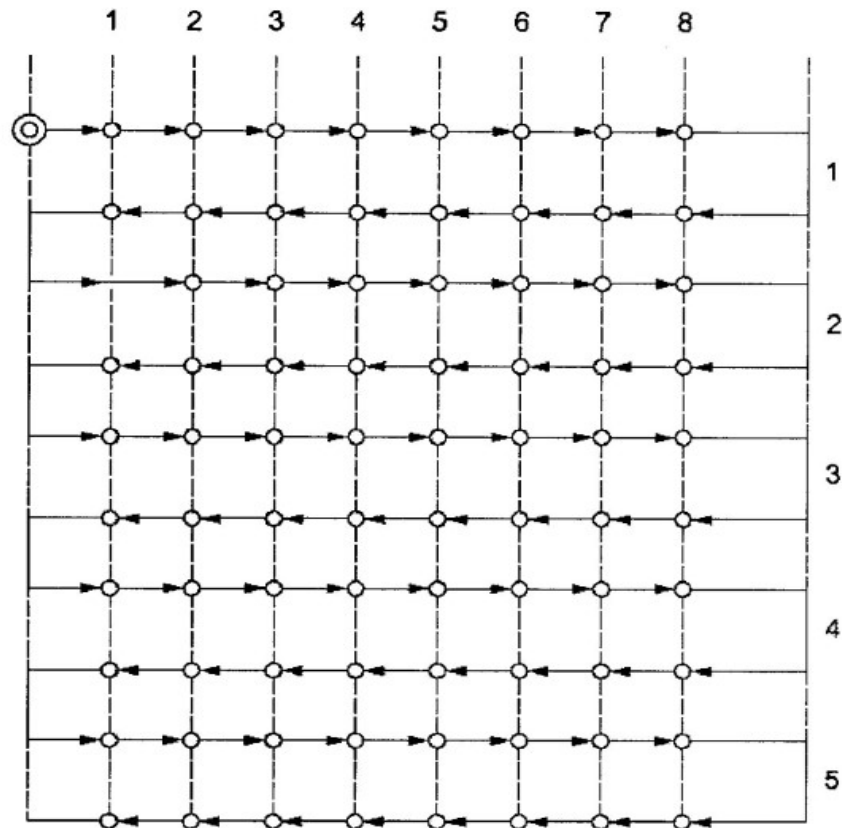
P_i ($i = 1$ až m)

Je to finálna pozícia, do ktorej je naprogramovaná pohybujúca sa časť.

Skutočná poloha (*actual position*)

P_{ij} ($i = 1$ až m ; $j = 1$ až n)

Nameraná pozícia, do ktorej sa posunula pohybujúca sa časť pri j -tom podídení do i -tej cieľovej polohy.



Obr.18 Bežný skúšobný cyklus [2]

Odchýlka polohy; polohová odchýlka (*deviation of position; positional deviation*)

Vyjadrí sa ako rozdiel skutočnej polohy od polohy cieľovej.

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (4.0)$$

Jednosmerný (*unidirectional*)

Výraz značí, že pri meraní v sérii je uskutočnený posuv do cieľovej polohy vždy v rovnakom smere posuvu na osi alebo otočenia okolo osy.

(Značka \uparrow označuje, že pri meraní sa do nastavovanej polohy pristúpilo z kladného smeru.

Značka \downarrow označuje, že pri meraní sa do nastavovanej polohy pristúpilo zo záporného smeru. Napríklad $x_{ij} \uparrow$ alebo $x_{ij} \downarrow$)

Dvojsmerný (*bidirectional*)

Výraz označuje, že pri meraní v sérii je uskutočnený posuv do cieľovej polohy vždy v oboch smeroch posunutia na osi alebo otočenia okolo osy.

Rozšírená neistota (*expanded uncertainty*)

Veličina, ktorá definuje interval výsledkov merania, v ktorom je možné očakávať, že bude zahŕňať prevažnú časť rozloženia hodnôt.

Koeficient rozšírenia (*coverage factor*)

Číselný koeficient používaný ako násobiteľ bežnej neistoty na zistenie rozšírenej neistoty.

Priemerná jednosmerná polohová odchýlka v polohe (*mean unidirectional positional deviation at a position*)

$$x_i^- \uparrow \text{ alebo } x_i^- \downarrow$$

Aritmetický priemer polohových odchýlok zistených pri sérii jednosmerných posuvov do polohy P_i .

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (4.1)$$

a

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (4.2)$$

Priemerná dvojsmerná polohová odchýlka v polohe (*mean bidirectional positional deviation at a position*)

Aritmetický priemer polohových odchýlok zistených pri sérii obojsmerných posuvov $x_i^- \uparrow$ a $x_i^- \downarrow$ do polohy P_i .

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (4.3)$$

Necitlivosť v polohe (*reversal value at a position*)

B_i

kde B_i je hodnota získaná rozdielom medzi priemernými jednosmernými polohovými odchýlkami získanými pri posuve v oboch smeroch do polohy P_i .

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (4.4)$$

Necitlivosť v osi (*reversal value of an axis*)

Najväčšia z absolútnych hodnôt necitlivostí $|B_i|$ zo všetkých zadaných polôh pozdĺž alebo okolo osy.

$$B = \max. |B_i| \quad (4.5)$$

Priemerná necitlivosť v osi (*mean reversal value of an axis*)

Aritmetický priemer hodnôt necitlivostí B_i zo všetkých cieľových polôh pozdĺž osy alebo okolo osy.

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i \quad (4.6)$$

Odhad jednosmernej opakovateľnosti osy nastavenia polohy v polohe (*estimator of the unidirectional axis repeatability of positioning at a position*)

$S_i \uparrow$ alebo $S_i \downarrow$

Odhad bežnej neistoty polohových odchýlok zistených pri sérii n posuvov do polohy P_i v jednom smere. [8]

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\bar{x}_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \quad (4.7)$$

a

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\bar{x}_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2} \quad (4.8)$$

Jednosmerná opakovateľnosť nastavenia polohy v polohe (*unidirectional repeatability of positioning at a position*)

$R_i \uparrow$ alebo $R_i \downarrow$

Rozsah odvodený z odhadu jednosmernej opakovateľnosti osy nastavenia polohy v polohe P_i pri použití koeficientu rozšírenia.

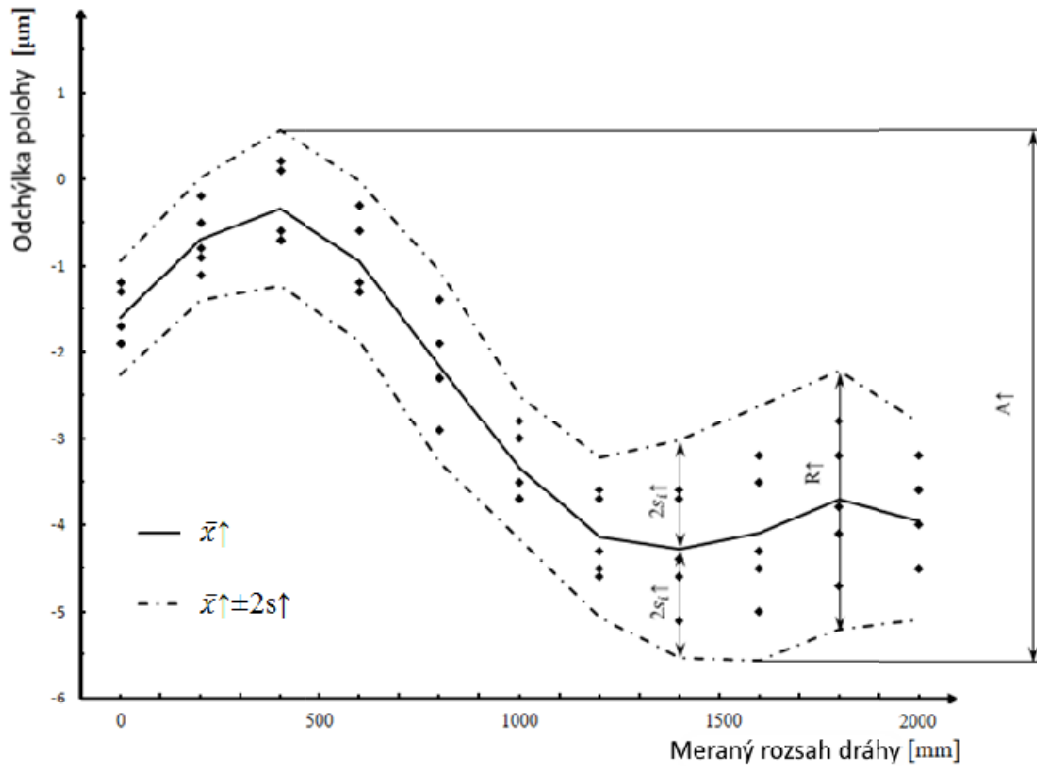
$$R_i \uparrow = 4S_i \uparrow \quad (4.9)$$

a

$$R_i \downarrow = 4S_i \downarrow \quad (4.10)$$

Obojsmerná opakovateľnosť nastavenia polohy v polohe (*bi-directional repeatability of positioning at a position*)

$$R_i = \max. [2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (4.11)$$



Obr.19 Jednosmerná presnosť a opakovateľnosť nastavenia polohy [8]

Jednosmerná opakovateľnosť nastavenia polohy (*unidirectional repeatability of positioning*)

Najväčšia hodnota z opakovateľnosti nastavenia polohy v ktorejkoľvek polohe P_i pozdĺž alebo okolo danej osy.

$$R \uparrow = \max. [R_i \uparrow] \quad (4.12)$$

$$R \downarrow = \max. [R_i \downarrow] \quad (4.13)$$

Dvojsmerná opakovateľnosť nastavenia polohy v polohe (*bidirectional repeatability of positioning at a position*)

$$R_i = \max. [2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (4.14)$$

Dvojsmerná opakovateľnosť nastavenia polohy v osi (*bidirectional repeatability of positioning of an axis*)

Najväčšia hodnota z opakovateľnosti nastavenia polohy v ktorejkoľvek polohe P_i pozdĺž alebo okolo danej osy.

$$R = \max. [R_i] \quad (4.15)$$

Jednosmerná systematická polohová odchýlka v osi (*unidirectional systematic positional deviation of an axis*)

Rozdiel medzi najväčšou a najmenšou algebraickou hodnotou priemerných jednosmerných polohových odchýlok pri nastavovaní polohy v jednom smere $\bar{x}_i \uparrow$ alebo $\bar{x}_i \downarrow$ v akejkoľvek polohe P_i , ktoré boli zistené v ktorejkoľvek polohe pozdĺž alebo okolo danej osy.

$$E \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow] \quad (4.16)$$

$$E \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow] \quad (4.17)$$

Dvojsmerná systematická polohová odchýlka v osi (*bidirectional systematic positional deviation of an axis*)

Rozdiel medzi najväčšou algebraickou hodnotou priemerných jednosmerných polohových odchýlok pri nastavovaní polohy v oboch smeroch $\bar{x}_i \uparrow$ alebo $\bar{x}_i \downarrow$, ktoré boli zistené v ktorejkoľvek polohe P_i pozdĺž alebo okolo danej osy.

$$E = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (4.18)$$

Priemerná dvojsmerná polohová odchýlka v osi (*mean bidirectional positional deviation of an axis*)

Rozdiel medzi najväčšou algebraickou hodnotou priemerných dvojsmerných polohových odchýlok \bar{x}_i , ktoré boli zistené v ktorejkoľvek polohe P_i pozdĺž alebo okolo danej osy.

$$M = \max. [\bar{x}_i] - \min. [\bar{x}_i] \quad (4.19)$$

Jednosmerná presnosť nastavenia polohy v osi (*unidirectional accuracy of positioning of an axis*)

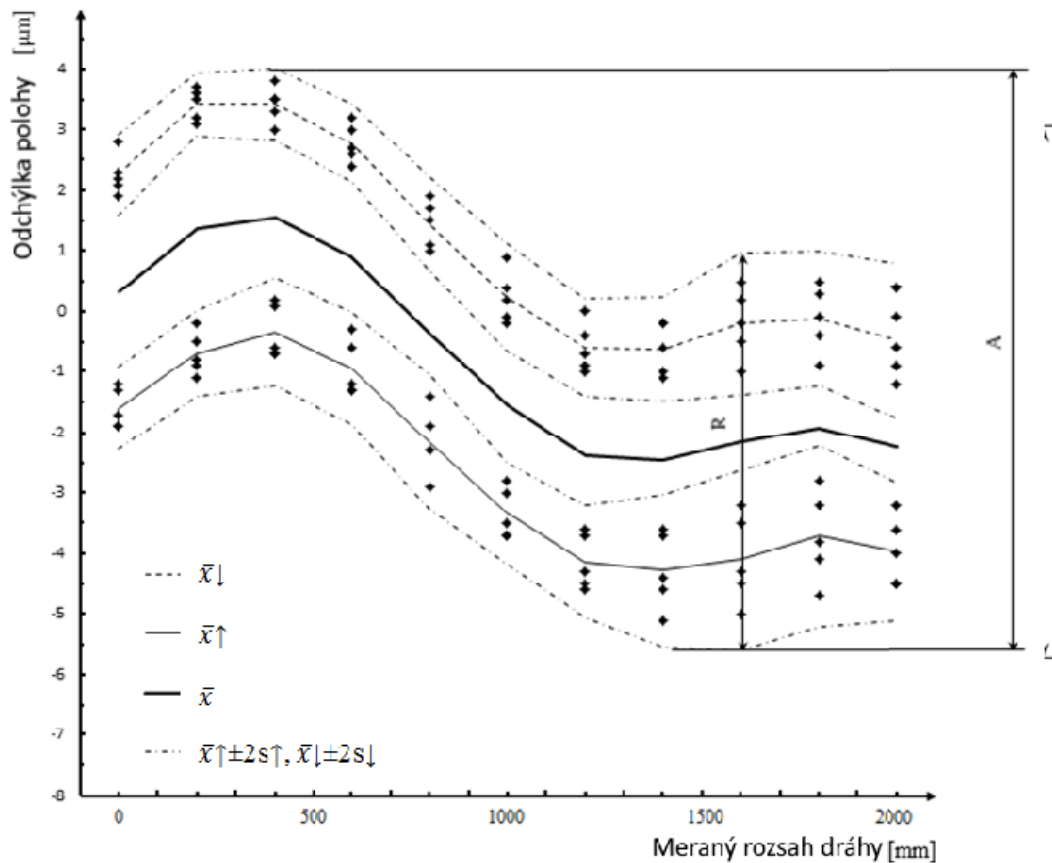
Rozsah odvodený od spojenia jednosmerných systematických odchýlok a odhadu pre opakovateľnosť pri jednosmernom nastavení polohy pri použití koeficientu rozšírenia 2.

$$A = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] \quad (4.20)$$

Dvojsmerná presnosť nastavenia polohy v osi (*bidirectional accuracy of positioning of an axis*)

Rozsah odvodený zo spojenia dvojsmerných systematických odchýlok a odhadu pre opakovateľnosť pri dvojsmernom nastavení polohy pri použití koeficientu rozšírenia 2.

$$A = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (4.21)$$



Obr. 20 Dvojsmerná presnosť a opakovateľnosť nastavenia polohy [8]

4.1 Environment

Podmienky prostredia, v ktorom sa meraný prístroj nachádza, priamo vplyvajú na nameraný výsledok. Ak by neboli vzaté do úvahy a potrebnými korekciami neupravené a neodstránené ich vplyvy, prišlo by k skresleniu výsledku.

Preto sa odporúča, aby postup a podmienky okolia, podľa ktorých sa má uskutočniť meranie, navrhol výrobca alebo distribútor samotného zariadenia. Mali by byť navrhnuté

tak, aby termálne podmienky prostredia zodpovedali podmienkam, pri ktorých funguje stroj so špecifikovanou presnosťou.

Ideálnou podmienkou pre meranie rozmerov je stav, keď sa ako merací prístroj, tak aj meraný objekt nachádzajú v prostredí s teplotou 20°C. V prípade, že sa uskutočňuje meranie v prostredí inom ako 20°C, je nevyhnutné vziať túto zmenu do úvahy a je potrebné zaviesť korekciu menovitej diferenciálnej teplotnej rozťažnosti¹ medzi systémom nastavovania polohy na osi alebo upínacím zariadením stroja tak, aby výsledky zodpovedali podmienkam pri 20°C. V prípade, že merací systém má rovnakú teplotu a koeficient tepelnej rozťažnosti, korekcia NDE sa dosiahne automaticky. No pokiaľ zariadenia nemajú rovnaké vlastnosti na to, aby sa dal určiť NDE správne, bude pravdepodobne potrebné zmerať teplotu individuálne na reprezentatívnej časti stroja, ako aj meracieho príslušenstva, a vniesť matematickú korekciu so zodpovedajúcim koeficientom tepelnej rozťažnosti.

V prípade, že meranie prebehne v inej teplote, ako je 20°C, teplotný odklon môže vniesť neistotu vzťahujúcu sa na koeficient tepelnej rozťažnosti použitý na korekciu. Typický rozsah hodnoty takejto neistoty je 2µm/(m.°C). Aktuálna teplota pri meraní by preto mala byť uvedená aj v skúšobnom protokole. Určenie neistoty je uvedené v prílohe A a C normy ČSN ISO 230-2.

Preto, aby došlo k zamedzeniu takejto korekcie, sa odporúča, aby meraný stroj a meracie zariadenie boli v testovacom prostredí dost' dlho na to, aby dosiahli teplotnú stabilitu pred meraním. Odporúča sa nechať prístroje v tomto prostredí cez noc, aby sa hneď ráno mohlo začať s meraním. Prístroje by mali byť chránené pred externými zdrojmi tepelnej radiácie a tepelnými prúdmi, ako je slnko alebo ohrievače vzduchu.

Dvanásť hodín pred samotným meraním a počas merania by environmentálny teplotný gradient [°C/h] mal mať rozsah v limite dohodnutom medzi dodávateľom a používateľom.

[2]

4.2 Testovaný stroj

Testovaný stroj by mal byť pred meraním plne funkčný, všetky jeho časti namontované. Ak však v prípade, že je nutné odmontovať určitú časť zariadenia, ktorá neovplyvní

¹Z angl. *nominal differential expansion-(NDE)*.

priebeh merania, takýto zásah by mal byť zaznamenaný v skúšobnom protokole. Pred meraním by mali byť na stroji vykonané geometrické skúšky.

Použitie vstavaných kompenzačných programov počas merania by malo byť zaznamenané v skúšobnom protokole. Testovanie presnosti a opakovateľnosti by malo prebiehať na stroji nepodliehajúcim zaťaženiu a bez upevneného obrobku.

V prípade že stroj disponuje aj inými smermi pohybu v osiach, alebo pohyblivými súčiastkami v osiach, v ktorých neprebíha meranie, by mali byť uvedené v skúšobnom protokole. [2]

4.3 Skúšky v lineárnych osiach do 2000 mm

V prípade, že polohovanie na osi stroja dovoľuje posuv maximálne len do vzdialenosti 2000 mm, je volený postup pre tento rozsah špecifický. Pri meraní by mal byť stroj naprogramovaný tak, aby pohyb referenčného bodu bol pozdĺž alebo okolo meranej osy, a aby ho posúval do cieľových pozícií. Na cieľovej pozícii by mal stroj zotrvať tak dlho, aby umožnil dosiahnutie a stabilizáciu aktuálnej polohy, jej nameranie a zaznamenanie. Naprogramovaná rýchlosť posuvu stroja by mala byť vopred dohodnutá a mala by ostať rovnaká po celý čas merania na jednej osy.[2]

4.4 Voľba cieľovej pozície

V prípade, že sa pozícia každej cieľovej pozície dá voľne určiť, malo by toto určenie podliehať určitému všeobecnému pravidlu. Interval, v akom majú byť cieľové body vzdialené od seba, môže byť určený nasledovne,

$$P_i = (i - 1)p + r \quad (4.22)$$

pričom r je náhodné číslo v rozmedzí amplitúdy možných periodických chýb. Ukazovateľ by sa mal pohybovať v rozpätí $\pm 30 P$,

i- Počet aktuálnych cieľových pozícií

4.5 Zahrievací cyklus

V prípade, že sa stroj testuje v normálnych operačných podmienkach, pred samotným testovaním by mal prebehnúť zahrievací cyklus, ktorý zamedzí možným následným teplotným výkyvom v priebehu merania na každej cieľovej pozícii. Zahrievací cyklus

môže prebiehať ako samotný test presnosti a opakovateľnosti s tým rozdielom, že nebudú zaznamenané a vyhodnotené žiadne dáta. Ako zahrievací cyklus sa môže brať aj samotné polohovanie stroja potrebné na správne nastavenie meracieho stroja na test presnosti a opakovateľnosti. Odporúča sa však použiť zahrievací cyklus stanovený výrobcom alebo distribútorom zariadenia. Zvolený spôsob by mal byť zaznamenaný v meracom protokole. [2]

4.6 Priebeh skúšky

Pre skúšky v lineárnych osiach do 2000mm by malo byť zvolených minimálne päť cieľových pozícií na meter a minimálne päť cieľových pozícií podľa zásad voľby cieľovej pozície. Meranie by malo prebehnúť na všetkých cieľových pozíciách podľa štandardu testovacieho cyklu. Každá pozícia sa zmeria a zaznamená päťkrát v každom smere.

Pozícia, keď sa mení smer merania, by mala byť zvolená tak, aby bolo umožnené prirodzené správanie stroja a aby bola dodržaná dohodnutá rýchlosť posuvu. [2]

4.7 Vyhodnotenie výsledkov

Pre každú cieľovú pozíciu P_i a pre všetkých päť posuvov v každom smere sa vyhodnotia všetky parametre z kapitoly 4. Stanovenie presnosti polohovania a opakovateľnosti podľa normy ČSN ISO 230-2:2014.

Ďalej sa vyhodnotia hranice odchýlok, a to nasledovne:

$$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow \text{ a } \bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow \quad (4.23)$$

$$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow \text{ a } \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow \quad (4.24)$$

4.8 Prezentácia výsledkov

Preferovaný spôsob pri vyhodnocovaní meraní je grafické spracovanie zahŕňajúce merací protokol, v ktorom je špecifikované nastavenie zariadení, aké bolo použité pri meraní. Merací protokol by mal byť vyhotovený pre každú meranú os. [2]

V protokole by mali byť uvedené tieto charakteristiky:

Všeobecné charakteristiky:

- Dátum merania
- Meno osoby zodpovednej za vyhotovenie merania

- Názov meraného zariadenia a jeho výrobné číslo
- Zoznam zariadení použitých na testovanie spolu s ich typom a výrobným označením.
- Druh posuvného mechanizmu a mierky spolu s teplotnou rozťažnosťou materiálu uvádzanú dodávateľom zariadenia
- V prípade, že bola použitá kompenzácia teplotnej rozťažnosti pomocou snímania teploty obrábacieho stroja, jeho súčastí a teploty meracieho zariadenia pomocou senzorov, je potrebné uviesť frekvenciu zaznamenávania dát. [2]

Charakteristiky meranej osi:

- Názov osi
- Rýchlosť posuvu a čas zotrvania na cieľovej pozícii a počet cieľových pozícií
- Zadefinovanie prípravnej operácie pred samotným meraním. Môže to byť jeden merací cyklus bez zaznamenávania hodnôt alebo samotné nastavovanie správnej polohy meracieho zariadenia a s tým spojený pohyb v jednotlivých osiach.
- Teplota prostredia, tlak vzduchu a relatívna vlhkosť vzduchu v oblasti zdroju lasera pred a po meraní ak je ich počas merania možné zaznamenávať
- Upozornenie v prípade, že počas merania boli použité kompenzačné programy
- Počet nadídení do polohy a stanovenie jednosmerného alebo obojsmerného merania
- Zoznam parametrov, ktoré boli použité pre vyhodnotenie odhadov neistoty merania [2]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POPIS MERANEJ CNC FRÉZKY FC 16 CNC/PC



Obr. 21 Fréza FC 16 CNC

Ide o vertikálnu a horizontálnu frézku. Jej uplatnenie je hlavne pri výučbe programovania CNC strojov. Fréza je vhodná pre frézovanie a vrtanie základných druhov materiálov, ako je drevo, plast a hliník. Je možná regulácia otáčok v rozmedzí 50 – 3600 ot./min. Rýchlosť posuvu je možné regulovať v rozmedzí 4 – 3000 mm/min. Výmena nástrojov sa vykonáva ručne v rýchloupínači. [22]

Stroj má viacero možností chodu. Môžeme ho rozdeliť na chod blok po bloku, ručné riadenie alebo režim exec – kontinuálne CNC riadenie. Ručným riadením ide stroj ovládať priamo z klávesnice stroja. Šípkami je riadený krok na niektorej z osí. Krokovanie sa dá nastaviť rôzne, a to podľa zostavenia posuvov. Veľkosť posuvov je možné taktiež nastaviť ručne. Veľkosť otáčok na vretene stroja sa dajú prestaviť skokovo po 20 otáčok za sekundu. Červeným tlačidlom sa otáčky zastavujú úplne. [23]

Riadenie po bloku znamená, že stroj vykoná operáciu v jednom bloku, teda riadku, a po ukončení operácie sa pohyb preruší. Klávesom F11 sa pokračuje vo vykonaní nasledujúceho bloku. [23]

Kontinuálne CNC obrábanie zabezpečuje nepretržité obrábanie podľa nahraného kódu. Pred samotným obrábaním dôjde k úplnému nabehnutiu otáčok podľa zvolených parametrov. Klávesom F11 sa spúšťa obrábanie tak, ako pri riadení blok po bloku, avšak fréza sa

nezastavuje pri jednotlivých riadkoch. Kláves F5 slúži na manuálne prerušenie chodu tak ako CENTRAL STOP na panely v prípade, že dôjde k poruche na stroji alebo ku kolízii. [23]

Na meranie bol použitý režim exec, ktorý umožňuje zadať do príkazového riadka príkaz, ktorý je možné spustiť ručne. Ten sa následne vykoná jeden raz. Táto funkcia zabezpečila, že každý posuv bol vykonaný s tými istými parametrami ako rýchlosť posuvu a nábeh v nami učenom tempe. [23]

5.1 Technické parametre frézky FC 16 CNC

Rozmery stolu

- šírka × dĺžka 160×450mm
- upínacie drážky 2
- šírka a rozchod 12 H7×100mm

Pracovný zdvih

- pozdĺžne maximum 300mm
- priečne maximum 160mm
- zvislé maximum 250mm

Rozsah regulácie otáčok

- vreteno 3000m/min

Pohon vretena elektromotoru

- S3 (80%) 600W
- vedenie stroja 170mm
- rozmer kužeľa na vretene ISO30

[[http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST\(SVOC\)/_2013/_sbornik/PapersPdf/Ss/Rodlova_K.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2013/_sbornik/PapersPdf/Ss/Rodlova_K.pdf)]

6 POUŽITIE LASERINTERFEROMETRU PRE KALIBRÁCIU

Na kalibráciu frézky FC 16 CNC sme pri meraní nastavenia presnosti a opakovateľnosti číslicovo riadených os použili súpravu na interferometrické lineárne meranie. Táto súprava obsahuje Laser XL-80, delič laserového lúča, referenčné zrkadlo, meracie zrkadlo, tripod podstavec, sadu magnetických úchytov, sadu hliníkových predlžovacích tyčí, ručnú vodováhu, napájanie a platformu pre laser XL-80.

Pri meraní nebol použitý kompenzátor XC-80 vyhodnocujúci teplotu prostredia, teplotu stroja, tlak prostredia a relatívnu vlhkosť vzduchu. Hodnoty prostredia sa zadávali do softvéru použitého na meranie manuálne na začiatku a na konci merania.

Laser XL-80, použitý na meranie, generuje stabilný laserový lúč vlnovej dĺžky zodpovedajúcej národným a medzinárodným normám s hodnotou 633 μm pri normálnych teplotných a tlakových podmienkach stanovených na 20°C a 101325 Pa. Štandardná konštrukcia zariadenia garantuje stabilitu frekvencie vlnovej dĺžky na $\pm 0,5 \text{ ppm}^2$ za 1 rok, $\pm 3 \text{ ppm}$ a za 3 roky a $\pm 0,2 \text{ ppm}$ za hodinu. Presnosť lineárneho merania $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$ je garantovaná počas doby záruky a odporúčaná rekalibračná perióda je 36 mesiacov. Lineárna rozlíšiteľnosť pri meraní je stanovená na 1 nm v celom rozsahu meracej rýchlosti, ktorej maximum je 4 m/s. Pred meraním je vyžadovaný predhrev, ktorý trvá približne 5 minút. Prístroj dokáže operovať pri teplote 0 – 40°C v bežných tlakových podmienkach atmosférického tlaku (101325 Pa) a pri hodnote relatívnej vlhkosti vzduchu 0,95 % nekondenzujúceho stavu.

6.1 Postup kalibrácie

Pred meraním potrebným na určenie presnosti polohovateľnosti meranej frézy je podľa normy ISO 230-1 potrebné previesť skúšku geometrickej presnosti stroja pracujúceho bez zaťaženia alebo v dokončovacích podmienkach obrábania.

Pred meraním boli dodržané zásady prípravy meraného stroja podľa normy ISO 230. Stroj bol pred meraním umiestnený v stabilizovanom, centrálne vykurovanom priestore minimálne 24 hodín, a teda bol teplotne stabilizovaný. Stroj bol pri meraní umiestnený na pogumovaných drevených hranoloch, ktoré zabraňujú vplyvom vibrácií z okolia spôsobenými inými strojmi v blízkosti alebo vibráciami spôsobenými inými vplyvmi, ako

² Z angl. Parts per million

například vibrácie zapríčinené centrálnou klimatizačnou technikou, mestskou dopravou či počasím.

Meracia zostava Renishaw XL-80 bola pred meraním vystavená teplotnému výkyvu spôsobenému prepravou na miesto merania. Doba prepravy trvala približne 20 minút. Preto sa meranie uskutočnilo až po dvoch hodinách od doby, kedy bola zostava umiestnená do priestoru merania. Za ten čas sa teplota zostavy pre interferometrické meranie vyrovnala s teplotou prostredia.

Kalibrovaná frézka bola zapnutá a po aktivácii riadiaceho systému boli nastavené referenčné hodnoty pre jednotlivé osi. Frézka bola očistená od nečistôt, ktoré vznikli pri predchádzajúcom obrábaní. Aby sme mohli nastaviť optické prvky laser interferometra, musela byť demontovaná časť krytu a manuálne zablokované bezpečnostné prvky pohonu frézky.

Prvky interferometra boli prispôsobené respektíve nastavené tak, aby boli pripravené na meranie polohovania frézky postupne vo všetkých osiach. Použilo sa ustavenie lineárne s použitím deliča a dvoch odrazových zrkadiel (referenčného a meracieho). Podľa postupu stanoveného v manuáli a postupu, ktorý odporúča norma ISO 230-2, bol pred meraním v osi uskutočnený zahrievací cyklus, a to vo forme testu presnosti a opakovateľnosti bez merania hodnôt, ale aj samotným nastavovaním polohy a smeru lasera voči optickým častiam interferometra.

6.1.1 Nastavenie laseru a nastavenie optických prvkov

Na meranie polohovania frézy v osi X bol laser XL-80 pripevnený na platformu a prichytený skrutkou tak, aby sa zabránilo možnému sklúznutiu, alebo náhodnému posunutiu laserovej hlavice zo svojej polohy počas merania. Platforma bola prichytená na tripod stojane a laserová hlavica bola nastavená do približnej výšky tak, aby laserový lúč nebol pretínaný žiadnou časťou stroja frézy na celej dráhe pohybu merania, a tak aby bolo možné vhodne prichytiť odrazové zrkadlá a delič. Aby sa zamedzilo vzniku kosínusovej chyby, bol kladený dôraz na to, aby smer lúča bol rovnobežný s osou pohybu stola. Pomocou vodováhy bol laser nastavený do vodorovnej polohy ako vo vertikálnom, tak v horizontálnom smere.



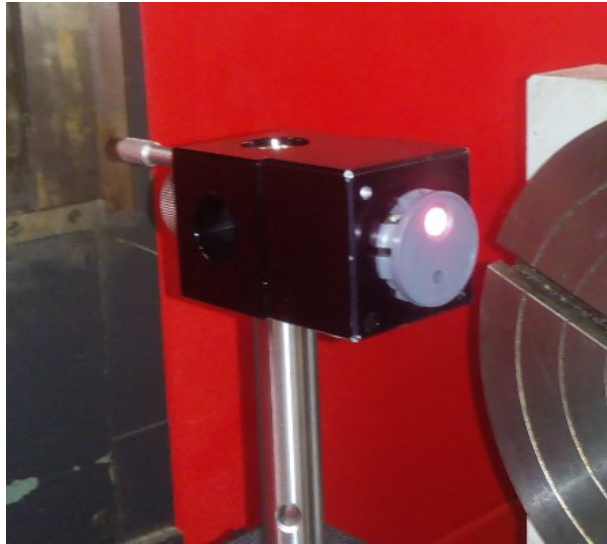
Obr. 22 Kontrola horizontálnej polohy zdroja laserového lúča pomocou vodováhy

Na posuvný stôl frézy bolo prichytené meracie zrkadlo pomocou magnetickej úpinky. Stôl bol nastavený do takmer krajnej polohy tak, aby bolo možné vykonať meranie v čo najväčšom rozsahu. To znamená, že bola ponechaná dráha približne 10 mm na to, aby bolo možné začať meranie zo smeru lúča. Poloha zrkadla bola skontrolovaná vodováhou. Delič s referenčným zrkadlom bol pripevnený na vretene stroja tak, aby bol súbežný vo vodorovnej aj zvislej polohe voči meraciemu zrkadlu. Umiestnenie deliča bolo na osi y , čím bolo zabránené vzniku *Abbeho offsetu*, a teda aj prípadnej chybe uhlového vybočenia (*yawn error*).



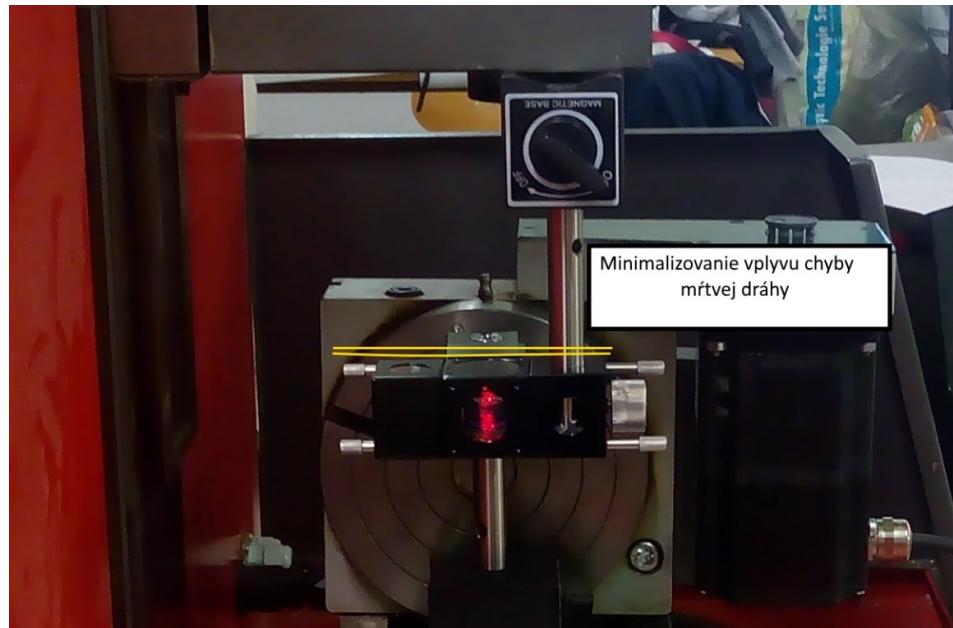
Obr. 23 Nastavenie laserinterferometra v meranej osi x

Na správne vyrovnanie a zosúladenie polohy všetkých komponentov interferometrickej zostavy boli použité clony. Clona na hlavicu lasera bola otočená do takej polohy, aby bol priemer laserového lúča zmenšený. Zmenšený lúč umožňuje jednoduchšiu detekciu nesprávneho nastavenia zariadenia.



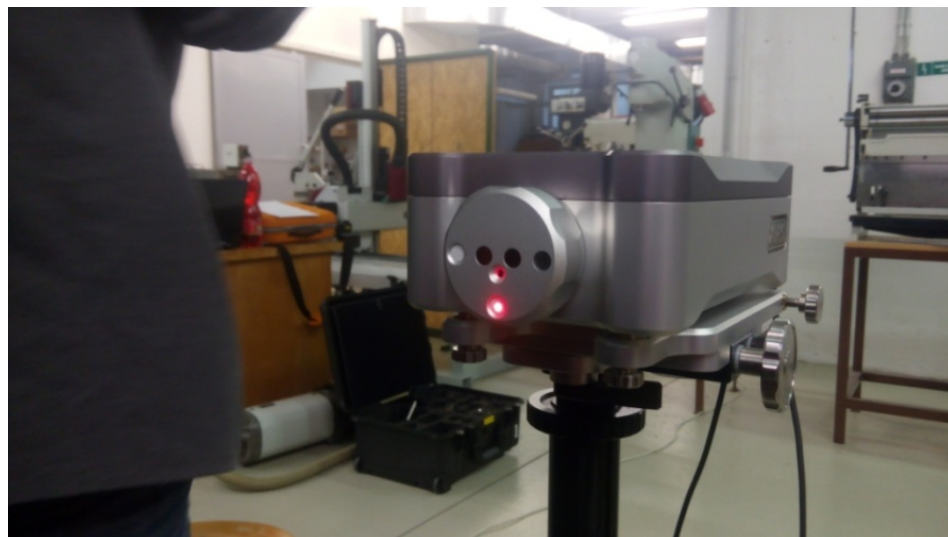
*Obr. 24 Použitie clony pri nastavení
interferometra*

Na delič bola umiestnená clona otočená nahor a zdroj laserového lúča bol nastavený tak, aby lúč dopadal do stredu bielej plochy na terči. Pracovný stôl bol prisunutý tak, aby bola vzdialenosť medzi deličom a meracím zrkadlom čo najmenšia. Tým bol zamedzený vznik chyby mŕtvej dráhy. Opätovne sa preverilo, či je vzájomná poloha deliča voči meraciemu zrkadlu rovnobežná.



Obr. 25 Nastavenia interferometra a odrážača

Po odstránení clony na deliči by mal lúč dopadať na stred clony na laserovej hlavici. Ak bol lúč vychýlený, ladením pomocou polohovacích skrutiek na platforme sa dosiahne správne nasmerovanie lúča.



Obr. 26 Správne nastavenie zostavy – lúč dopadá do stredu snímača

Na zachovanie dostatočného signálu potrebného na meranie musí dopadať lúč do stredu snímača na celej meracej dĺžke. Preto bol pracovný stôl prestavovaný po celej dĺžke meranej dráhy a postupným ladením polohy zdroja laserového lúča bol dosiahnutý stály

signál vo všetkých polohách nachádzajúcich sa v rozsahu merania. Intenzita signálu sa dala zreteľne odpozorovať pomocou meracieho softvéru LaserXL Capture.

Pri meraní na osi y bol celý merací aparát prestavený do vhodnej polohy a celý postup prebehol podobne ako pri nastavení polohy lasera a optických prvkov na osi x. Postupným ladením bola dosiahnutá dostatočná sila signálu v celom rozsahu merania.

Pri nastavovaní meracieho aparátu na osi z bolo použité iné ustavenie ako pri predchádzajúcich osiach. Vychýlenie lúča o 90° bolo dosiahnuté pomocou dodatočného zrkadla v 45-stupňovom sklone. Postup nadstavenia smeru lúča bol však rovnaký ako pri ladení v predchádzajúcich osiach, a to postupným ladením sklonu zdroja laserového lúča v celom rozsahu merania tak, aby bol zachovaný dostatočný signál.

6.1.2 Zaznamenávanie dát pomocou softvéru Laser XL Capture

Na snímanie nameraných dát bol použitý softvér Laser XL Capture nainštalovaný na počítači, prepojený cez USB rozhranie k zdroju laserového lúča, obsahujúci snímací senzor.

Pri meraní bol k dispozícii štandardný teplomer na zmeranie teploty miestnosti. Na meranie boli zvolené štandardné hodnoty atmosférického tlaku na 1013,25 MBar a relatívnej vlhkosti vzduchu 75 % RH. Teplota bola zvolená podľa nameranej hodnoty na 22°C.

The screenshot shows a software interface for manual compensation. It is divided into three main sections:

- MANUAL COMPENSATION:** This section is at the top and contains three input fields:
 - A temperature field with a thermometer icon, a value of 22.00, and a dropdown menu set to °C.
 - A humidity field with a water droplet icon, a value of 75.00, and a dropdown menu set to %RH.
 - A pressure field with a downward arrow icon, a value of 1013.25, and a dropdown menu set to mbar.
- MATERIAL EXPANSION COMPENSATION:** This section is in the middle and contains two input fields:
 - A material expansion coefficient field with a square icon and arrows, a value of 11.70, and a dropdown menu set to ppm/°C.
 - A temperature field with a thermometer icon, a value of 22.00, and a dropdown menu set to °C.
- RENISHAW apply innovation™:** This is the bottom section, featuring the Renishaw logo and tagline on an orange background.

Obr. 27 Nastavenie podmienok pred meraním

Prvým krokom nastavenia merania bolo stanovenie prvej a poslednej meranej polohy a určenie intervalu medzi meranými bodmi. Prvý bod tak ako aj posledný bol stanovený vo vzdialenosti 5 mm od nulovej polohy, aby bolo možné merať prvý, respektíve posledný bod zo smeru, respektíve protismeru lúča. Určením 5-milimetrového intervalu softvér automaticky vypočítal, koľko meracích bodov bude v rámci merania jednotlivkej osi.

Data Capture Setup 123

ISO standard targets

1 First target 5.000 mm <C

2 Last target 165.000 mm <C

3 Interval size 5.000 mm <C

4 No. of targets 33 <C

Digits after d.p. 3

View Cancel >>

1 Target Setup

Obr. 28 Prvé okno nastavenia cieľových bodov

Ďalším krokom bolo nastavenie druhu merania na lineárny. Počet behov bol stanovený na 5 a nastavenie polohy na dvojstranné (bimodulárne).

Data Capture Setup 123

1 Target sequence Linear

2 Number of runs [1998] 5

3 Select direction Bidirectional

4 Error band, μm 0.0

Cancel >>

2 Capture Initialization

Obr. 29 Druhé okno nastavenia merania

V treťom kroku boli zadávané všeobecné údaje potrebné na identifikáciu uskutočneného merania. Bol definovaný typ meraného stroja, jeho sériové číslo, dátum vyhotovenia merania s osobou, ktorá meranie vykonávala, a v neposlednom rade stanovenie osi polohovania stroja a miesto, kde bolo meranie uskutočnené.

Field	Value
Machine	FC 16 CNC
Serial No	
Date	2015-11-12
By	Schwarz
Axis	X
Location	U5/107
TITLE	Ruční kalibrace

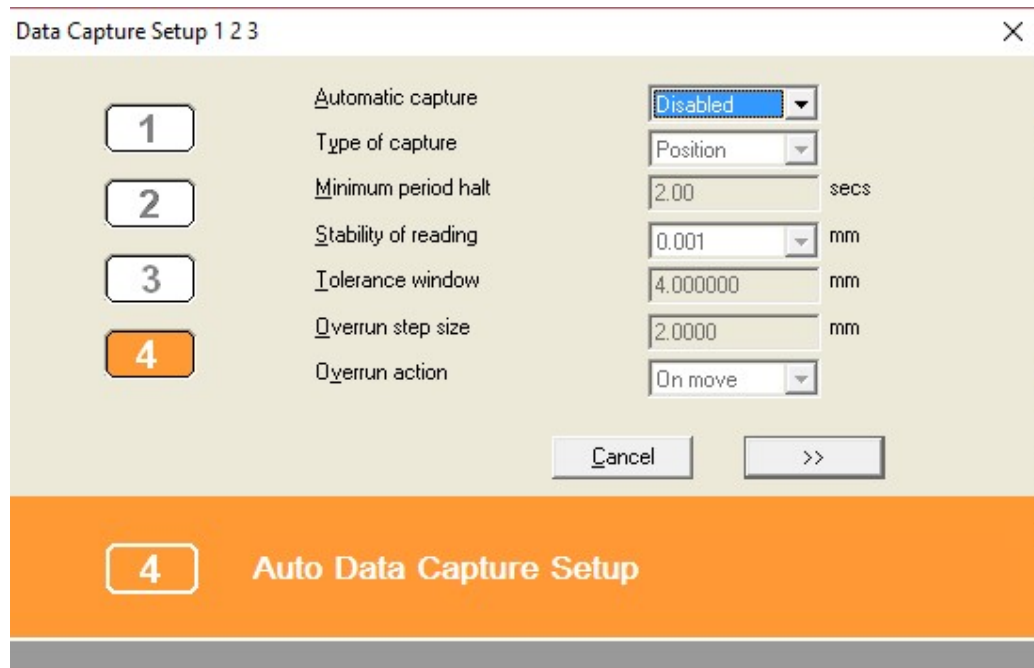
Buttons: 1, 2, 3 (highlighted), 4

Buttons: Cancel, >>

3 Test Information

Obr.30 Tretie okno udania základných údajov o meraní

V poslednom, štvrtom bode je možné vybrať, či bude snímanie prebiehať automaticky alebo ručne. V našom prípade bolo zvolené ručné snímanie a tým pádom nebolo potrebné podrobnejšie definovanie. Podľa nastaveného intervalu posuvu bol pri použití programu riadenia polohovania stroja EXEC zadefinovaný konštantný interval posuvu.



Obr. 31 Tretie okno prepínajúce automatické snímanie dát

6.1.3 Vyhodnotenie nameraných hodnôt

Pre vyhodnotenie nameraných hodnôt vo všetkých troch osiach polohovania stroja bol použitý postup stanovený v norme 230-2:2014. Na výpočet odhadov neistôt meraní lineárneho polohovania bol použitý postup stanovený v prílohe A tejto normy.

6.2 Výpočet parametrov polohovania podľa normy 230-2:2014

Dvojsmerná presnosť nastavenia polohy na osi A (Rov. 4.21)

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

$$A_{os\ x} = \max. [47,619] - \min. [-11,273] = 58,892\mu m$$

$$A_{os\ y} = \max. [18,193] - \min. [-6,099] = 24,292\mu m$$

$$A_{os\ z} = \max. [2,819] - \min. [-7,365] = 10,183\mu m$$

Jednosmerná presnosť nastavenia polohy na osi A \uparrow (Rov. 4.20)

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

$$A_{os\ x\ \uparrow} = \max. [39,57] - \min. [-11,273] = 50,842\mu m$$

$$A_{os\ y\ \uparrow} = \max. [16,565] - \min. [-5,318] = 21,884\mu m$$

$$A_{os_z} \uparrow = \max. [0,558] - \min. [-7,365] = 6,806 \mu m$$

Jednosmerná presnosť nastavenia polohy na osi A↓ (Rov. 4.20)

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

$$A_{os_x} \downarrow = \max. [47,619] - \min. [0,299] = 47,32 \mu m$$

$$A_{os_y} \downarrow = \max. [18,193] - \min. [-6,099] = 24,292 \mu m$$

$$A_{os_z} \downarrow = \max. [2,819] - \min. [-2,769] = 5,588 \mu m$$

Dvojsmerná systematická polohová odchýlka na osi E (Rov. 4.18)

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

$$E_{os_x} = \max. [46,74] - \min. [-8,64] = 55,38 \mu m$$

$$E_{os_y} = \max. [16,64] - \min. [-2,92] = 19,56 \mu m$$

$$E_{os_z} = \max. [2,18] - \min. [-6,98] = 9,16 \mu m$$

Jednosmerná systematická polohová odchýlka na osi E↑ (Rov. 4.16)

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

$$E_{os_x} \uparrow = \max. [38,6] - \min. [-8,64] = 47,24 \mu m$$

$$E_{os_y} \uparrow = \max. [14,78] - \min. [-2,12] = 16,9 \mu m$$

$$E_{os_z} \uparrow = \max. [-1,04] - \min. [-6,98] = 5,94 \mu m$$

Jednosmerná systematická polohová odchýlka na osi E↓ (Rov. 4.17)

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

$$E_{os_x} \downarrow = \max. [46,74] - \min. [1,22] = 45,52 \mu m$$

$$E_{os_y} \downarrow = \max. [16,64] - \min. [-2,92] = 19,56 \mu m$$

$$E_{os_z} \downarrow = \max. [2,18] - \min. [-2,3] = 4,48 \mu m$$

Priemerná dvojsmerná polohová odchýlka na osi (*mean bidirectional positional deviation of an axis*) (Rov. 4.19)

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

$$M_{os_x} = \max. [42,67] - \min. [-3] = 45,67 \mu m$$

$$M_{os_y} = \max. [15,6] - \min. [-2,15] = 17,75 \mu m$$

$$M_{os z} = \max. [0,45] - \min. [-4,28] = 4,73\mu m$$

dvojsmerná opakovateľnosť nastavenia polohy v polohe (*bi-directional repeatability of positioning at a position*) (Rov. 4.14)

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

$$R_{i_{os x}} = 14,513\mu m$$

$$R_{i_{os y}} = 6,546\mu m$$

$$R_{i_{os z}} = 4,444\mu m$$

jednosmerná opakovateľnosť nastavenia polohy na osi R \uparrow (*unidirectional repeatability of positioning*) (Rov. 4.12)

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

$$R_{os x} \uparrow = 5,611\mu m$$

$$R_{os y} \uparrow = 6,421 \mu m$$

$$R_{os z} \uparrow = 1,246\mu m$$

Jednosmerná opakovateľnosť nastavenia polohy na osi R \downarrow (*unidirectional repeatability of positioning*) (Rov. 4.13)

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

$$R_{os x} \downarrow = 1,885\mu m$$

$$R_{os y} \downarrow = 6,696\mu m$$

$$R_{os z} \downarrow = 1,947\mu m$$

Necitlivosť na osi (*reversal value of an axis*) (Rov. 4.5)

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

$$B_{os x} = -5,78\mu m$$

$$B_{os y} = 2,54\mu m$$

$$B_{os z} = -2,12\mu m$$

Priemerná necitlivosť na osi (*mean reversal value of an axis*) (Rov. 4.6)

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

$$\overline{B_{os\ x}} = \frac{-409,02}{32} = -12,782\mu m$$

$$\overline{B_{os\ y}} = \frac{0,12}{24} = 0,005\mu m$$

$$\overline{B_{os\ z}} = \frac{-114,140}{28} = -4,076\mu m$$

6.3 Výpočet odhadov neistôt merania lineárneho polohovania podľa normy ISO 230-2:2014

Neistota merania vplyvom meracieho zariadenia

L je meraná dĺžka udávaná v metroch (m)

$R_{DEVIACE}$ je rozsah chyby určenej výrobcom zariadenia. Je daná buď v dieloch na milión (ppm), alebo v mikrometroch na meter ($\mu m/m$). V prípade nami meraného zariadenia je rozsah stanovený na $0,5 \mu m/m$.

$$U_{device} = 0,6 \times R_{deviácie} \times L \quad (6.1)$$

$$U_{device,os\ x} = 0,6 \times 0,5 \times 0,16 = 0,048\mu m$$

$$U_{device,os\ y} = 0,6 \times 0,5 \times 0,12 = 0,036\mu m$$

$$U_{device,os\ z} = 0,6 \times 0,5 \times 0,14 = 0,042\mu m$$

Neistota merania vplyvom presadenia meracieho zariadenia k osi skúšaného stroja

$$U_{MISALIGNMENT} = \frac{0,3 \times R_{MISALIGNMENT}^2}{L} \quad (6.2)$$

L je meraná dĺžka udávaná v metroch (m)

$R_{MISALIGNMENT}$ je presadenie udávané v milimetroch. V prípade nami meraného zariadenia je presadenie 1 mm .

$$U_{MISALIGNMENT,os\ x} = \frac{0,3 \times 1^2}{0,16} = 1,875\mu m$$

$$U_{MISALIGNMENT,os y} = \frac{0,3 \times 1^2}{0,12} = 2,5\mu\text{m}$$

$$U_{MISALIGNMENT,os z} = \frac{0,3 \times 1^2}{0,14} = 2,148\mu\text{m}$$

Neistota merania pri meraní teploty meracieho zariadenia

kde L je meraná dĺžka udávaná v metroch (m)

$R\theta$ je rozsah teploty vplyvom neistoty merania

$$U_{M,deviácie,os x,y,z} = 0,6 \times L \times R(\theta) = 0\mu\text{m}$$

V prípade, že bola použitá manuálna kompenzácia meracieho zariadenia nastavovaná v meracom softvéri, nedá sa táto neistota vyjadriť

Neistota merania vplyvom merania teploty stroja

$$U_{M,MACHINE TOLL} = 0,6 \times L \times R(\theta) \quad (6.3)$$

kde α je koeficient rozpínania stroja udávaná v $\mu\text{m}/(\text{m}\times^\circ\text{C})$

L je meraná dĺžka udávaná v metroch (m)

$R\theta$ je rozsah teploty vplyvom neistoty merania [$^\circ\text{C}$]. Pre bežne používané meracie zariadenia je vhodné počítat' s rozsahom odchýlky asi $0,6^\circ\text{C}$. Táto hodnota zodpovedá vyjadreniu $0,30^\circ\text{C}$.

$$U_{M,MACHINE TOLL,os x} = 0,6 \times 0,30 \times 11,7 \times 0,16 = 0,337\mu\text{m}$$

$$U_{M,MACHINE TOLL,os y} = 0,6 \times 0,30 \times 11,7 \times 0,12 = 0,253\mu\text{m}$$

$$U_{M,MACHINE TOLL,os z} = 0,6 \times 0,30 \times 11,7 \times 0,14 = 0,295\mu\text{m}$$

Neistota merania vplyvom koeficientu rozťažnosti meracieho zariadenia

$$U_{E,deviácie,os x,y,z} = 0,6 \times L \times R(\theta) = 0\mu\text{m} \quad (6.4)$$

kde L je meraná dĺžka udávaná v metroch (m)

$R\theta$ je rozsah teploty vplyvom neistoty merania

V prípade, že bola použitá manuálna kompenzácia meracieho zariadenia nastavovaná v meracom softvéri, nedá sa táto neistota vyjadriť.

Neistota merania vplyvom koeficientu rozťažnosti stroja

$$U_{E,MACHINE\ TOLL} = 0,6 \times \Delta T \times L \times R(\alpha) \quad (6.5)$$

kde ΔT je maximálny rozdiel skutočnej teploty od teploty 20°C. V našom prípade sú to 2°C.

L meraná dĺžka udávaná v metroch (m).

$R\alpha$ je rozsah chyby koeficientu rozťažnosti stroja ($1(\frac{\mu m}{(m \cdot ^\circ C)})$)

$$U_{E,MACHINE\ TOLL,os\ x} = 0,6 \times 2 \times 0,16 \times 1 = 0,192\mu m$$

$$U_{E,MACHINE\ TOLL,os\ y} = 0,6 \times 2 \times 0,12 \times 1 = 0,144\mu m$$

$$U_{E,MACHINE\ TOLL,os\ z} = 0,6 \times 2 \times 0,14 \times 1 = 0,168\mu m$$

Neistota merania vplyvom kolísania chyby environmentu

$$U_{EVE} = 0,6 \times E_{EV} \quad (6.6)$$

kde E_{EV} je rozsah zistený pri skúške driftu.

$$U_{EVE\ os\ x} = 0,6 \times 3 = 1,8\mu m$$

$$U_{EVE\ os\ y} = 0,6 \times 1 = 0,6\mu m$$

$$U_{EVE\ os\ z} = 0,6 \times 0,6\mu m$$

Odhad neistoty parametrov lineárneho polohovania

Do úvahy sú brané tieto faktory: meracie zariadenie, presadenie meracieho zariadenia ku skúšanej osi, teplota merania pre stroj a meracie zariadenie, koeficient teplotnej rozťažnosti stroja a meracieho zariadenia, kolísanie chyby environmentu (E_{ve}) ISO 230-2.

Odhad neistoty pre jednosmernú opakovateľnosť

$$U(R \uparrow, R \downarrow) = 2 \times U_{EVE} \quad (6.7)$$

U_{EVE} je neistota merania zapríčinená vplyvom kolísania environmentu udávaná v mikrometroch μm

$$U(R \uparrow, R \downarrow)_{os\ x} = 2 \times 1,8 = 3,6\mu m$$

$$U(R \uparrow, R \downarrow)_{os\ y} = 2 \times 0,6 = 1,2\mu m$$

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

Odhad neistoty pre necitlivost'

Na meranie v nepresahujúce vzdialenosť 2000 mm platí

$$U(B) = 0,9 \times U_{EVE} \quad (6.8)$$

U_{EVE} je neistota merania zapríčinená vplyvom kolísania environmentu udávaná v mikrometroch μm

$$U(B)_{osx} = 0,9 \times 1,8 = 1,62\mu\text{m}$$

$$U(B)_{osy} = 0,9 \times 0,6 = 0,54\mu\text{m}$$

$$U(B)_{osz} = 0,9 \times 0,6 = 0,54\mu\text{m}$$

Neistota merania obojsmernej opakovateľnosti

$$U(R) = 2,2 \times U_{EVE} \quad (6.9)$$

U_{EVE} je neistota merania zapríčinená vplyvom kolísania environmentu udávaná v mikrometroch μm

$$U(R)_{osx} = 2,2 \times 1,8 = 3,96\mu\text{m}$$

$$U(R)_{osy} = 2,2 \times 0,6 = 1,32\mu\text{m}$$

$$U(R)_{osz} = 2,2 \times 0,6 = 1,32\mu\text{m}$$

Neistota meranie systematických odchýlok

$$U(E.E \uparrow, E \downarrow) = \sqrt{U_D^2 + U_{MIS}^2 + U_{MMT}^2 + U_{MD}^2 + U_{EMT}^2 + U_{ED}^2 + \frac{1}{5}U_{EVE}^2} \quad (6.10)$$

$$U(E.E \uparrow, E \downarrow)_{osx} = \sqrt{0,048^2 + 1,875^2 + 0,337^2 + 0,192^2 + \frac{1}{5}1,8^2} = 2,078\mu\text{m}$$

$$U(E.E \uparrow, E \downarrow)_{osy} = \sqrt{0,036^2 + 2,5^2 + 0,253^2 + 0,144^2 + \frac{1}{5}1,8^2} = 2,643\mu\text{m}$$

$$U(E.E \uparrow, E \downarrow)_{osz} = \sqrt{0,042^2 + 2,148^2 + 0,295^2 + 0,168^2 + \frac{1}{5}0,6^2} = 2,192\mu\text{m}$$

Neistota merania priemerných systematických odchýlok

$$U(M) = \sqrt{U_D^2 + U_{MIS}^2 + U_{MMT}^2 + U_{MD}^2 + U_{EMT}^2 + U_{ED}^2 + \frac{1}{10} U_{EVE}^2} \quad (6.11)$$

$$U(M)_{os\ x} = \sqrt{0,048^2 + 1,875^2 + 0,337^2 + 0,192^2 + \frac{1}{10} 1,8^2} = 1,998\mu\text{m}$$

$$U(M)_{os\ y} = \sqrt{0,036^2 + 2,5^2 + 0,253^2 + 0,144^2 + \frac{1}{10} 0,6^2} = 2,524\mu\text{m}$$

$$U(M)_{os\ z} = \sqrt{0,042^2 + 2,148^2 + 0,295^2 + 0,168^2 + \frac{1}{10} 0,6^2} = 2,183\mu\text{m}$$

Neistota merania presnosti polohovania

$$U(A, A \uparrow, A \uparrow) = \sqrt{U(E)^2 + U(R \uparrow, R \downarrow)^2} \quad (6.12)$$

$$U(A, A \uparrow, A \uparrow)_{os\ x} = \sqrt{2,078^2 + 3,96^2} = 4,472\mu\text{m}$$

$$U(A, A \uparrow, A \uparrow)_{os\ y} = \sqrt{2,643^2 + 1,32^2} = 2,954\mu\text{m}$$

$$U(A, A \uparrow, A \uparrow)_{os\ z} = \sqrt{2,192^2 + 1,32^2} = 2,559\mu\text{m}$$

6.4 Prehľad odhadov neistôt merania lineárneho polohovania

Tab. 1 Odhad neistoty merania lineárneho polohovania na osi x

Neistoty merania pre os x		Parameter	Neistota[μm]	Rovnica
	Meraná dĺžka	160mm		
	Rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U_{DEVIACE}			0,048	(6.1)
Vyrovnanie	Predpokladané vyrovnanie	1mm		
	Meraná dĺžka	160mm		
$U_{\text{MISALIGNMENT}}$			1,875	(6.2)
Kompenzácia teploty obrobku	Meraná dĺžka	160mm		
	Koeficient teplotnej rozťažnosti	11,7 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
	Rozdiel na 20°C,maximálny	2°C		
	Maximálna odchýlka	0,6°C		
$U_{\text{M,MACHINE TOLL}}$			0,337	(6.3)
$U_{\text{M,DEVICE}}$	0 μm – bola použitá ručná kompenzácia			
$U_{\text{E,DEVICE}}$	0 μm – bola použitá ručná kompenzácia			(6.4)
$U_{\text{E,MACHINE TOLL}}$			0,192	(6.5)
	Neistota koeficientu rozťažnosti stroja	1 $\mu\text{m}/(\text{m}\times^\circ\text{C})$		
U_{EVE}			1,8	(6.6)
$U_{\text{R}\uparrow,\text{R}\downarrow}$			3,6	(6.7)
U_{B}			1,62	(6.8)
U_{R}			3,96	(6.9)
$U_{\text{E,E}\uparrow,\text{E}\downarrow}$			2,078	(6.10)
U_{M}			1,997	(6.11)
$U_{\text{A,A}\uparrow,\text{A}\downarrow}$			4,472	(6.12)

Tab. 2 Odhad neistoty merania lineárneho polohovania na osi y

Neistoty merania pre os y		Parameter	Neistota [μm]	Rovnica
	Meraná dĺžka	160mm		
	Rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U_{DEVICE}			0,036	(6.1)
Vyrovnanie	Predpokladané vyrovnanie	1mm		
	Meraná dĺžka	160mm		
$U_{\text{MISALIGNMENT}}$			2,5	(6.2)
Kompenzácia teploty obrobku	Meraná dĺžka	160mm		
	Koeficient teplotnej rozťažnosti	11,7 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
	Rozdiel na 20°C,maximálny	2°C		
	Maximálna odchýlka	0,6°C		
$U_{\text{M,MACHINE TOLL}}$			0,253	(6.3)
$U_{\text{M,DEVICE}}$	0 μm – bola použitá ručná kompenzácia			
$U_{\text{E,DEVICE}}$	0 μm – bola použitá ručná kompenzácia			(6.4)
$U_{\text{E,MACHINE TOLL}}$			0,144	(6.5)
	Neistota koeficientu rozťažnosti stroja	1 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
U_{EVE}			0,6	(6.6)
$U_{\text{R}\uparrow,\text{R}\downarrow}$			1,2	(6.7)
U_{B}			0,54	(6.8)
U_{R}			1,32	(6.9)
$U_{\text{E,E}\uparrow,\text{E}\downarrow}$			2,643	(6.10)
U_{M}			2,524	(6.11)
$U_{\text{A,A}\uparrow,\text{A}\downarrow}$			2,954	(6.12)

Tab. 3 Odhad neistoty merania lineárneho polohovania na osi z

Neistoty merania pre os z		Parameter	Neistota[μm]	Rovnica
	Meraná dĺžka	160mm		
	Rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U_{DEVIACE}			0,048	(6.1)
Vyrovnanie	Predpokladané vyrovnanie	1mm		
	Meraná dĺžka	160mm		
$U_{\text{MISALIGNMENT}}$			1,875	(6.2)
Kompenzácia teploty obrobku	Meraná dĺžka	160mm		
	Koeficient teplotnej rozťažnosti	11,7 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
	Rozdiel na 20°C,maximálny	2°C		
	Maximálna odchýlka	0,6°C		
$U_{\text{M,MACHINE TOLL}}$			0,295	(6.3)
$U_{\text{M,DEVICE}}$	0 μm - bola použitá ručná kompenzácia			
$U_{\text{E,DEVICE}}$	0 μm - bola použitá ručná kompenzácia			(6.4)
$U_{\text{E,MACHINE TOLL}}$			0,192	(6.5)
	Neistota koeficientu rozťažnosti stroja	1 $\mu\text{m}/(\text{m}\times^\circ\text{C})$		
U_{EVE}			0,6	(6.6)
$U_{\text{R}\uparrow,\text{R}\downarrow}$			1,2	(6.7)
U_{B}			0,54	(6.8)
U_{R}			1,32	(6.9)
$U_{\text{E,E}\uparrow,\text{E}\downarrow}$			2,192	(6.10)
U_{M}			2,183	(6.11)
$U_{\text{A,A}\uparrow,\text{A}\downarrow}$			2,559	(6.12)

6.5 Vyhodnotenie parametrov polohovania podľa normy ISO 230-2

V tabuľke (Tab. 4) sú znázornené výsledky parametrov polohovania jednotlivých osí, ktoré boli vypočítané v súlade s normou ISO230-2. Obsahujú taktiež odhady neistôt, ktoré boli vypočítané podľa prílohy A tej istej normy. Výsledky sú zaokrúhlené na 1 μm , čo zodpovedá zvolenému rozlíšeniu merania použitého interferometra.

Tab.4 Parametre polohovania vyhodnotené podľa
normy ČSN ISO 230-2:2014 a ich neistoty

ISO 230-2	Osa X[μm]	Osa Y[μm]	Osa Z[μm]
A	59 \pm 4	24 \pm 3	10 \pm 3
A \uparrow	51 \pm 4	22 \pm 3	7 \pm 3
A \downarrow	47 \pm 4	24 \pm 3	6 \pm 3
E	55 \pm 2	20 \pm 3	9 \pm 2
E \uparrow	47 \pm 2	17 \pm 3	6 \pm 2
E \downarrow	46 \pm 2	20 \pm 3	4 \pm 2
M	46 \pm 2	18 \pm 3	5 \pm 2
R	15 \pm 4	7 \pm 1	4 \pm 1
R \uparrow	6 \pm 4	6 \pm 1	1 \pm 1
R \downarrow	2 \pm 4	7 \pm 1	2 \pm 1
B	-6 \pm 2	3 \pm 1	-2 \pm 1

6.6 Prezentácia výsledkov

Ako výstup bol vytvorený merací protokol, ktorý obsahuje všetky potrebné údaje zodpovedajúce požiadavkám podľa normy ISO 230-2. Protokol obsahuje aj grafické zobrazenie nameraných hodnôt a parametrov polohovania. Protokol je vytvorený pre každú meranú os.

Tab. 5 Merací protokol

Merací protokol zhotovený podľa normy ISO 230-2 pre os x:

Dátum merania	12.11.2015
Meno a priezvisko	Vladimír Schwarz
Názov meraného stroja	frézka CNC FC 16
Názov meracieho prístroja	Laserinterferometer Renishaw XL-80

Parametre merania:

Testovaná osa	x
Druh posuvného mechanizmu	polohovacia skrutka
Korekcia	manuálna
Koeficient teplotnej rozťažnosti zariadenia	11 $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$
Rýchlosť posuvu	100mm/min
Zotrvanie na cieľovej pozícii	3 s
Použitý kompenzačný program	žiadny

Podmienky prostredia pri meraní použité pre kompenzáciu laserového interferometra (zadávané manuálne):

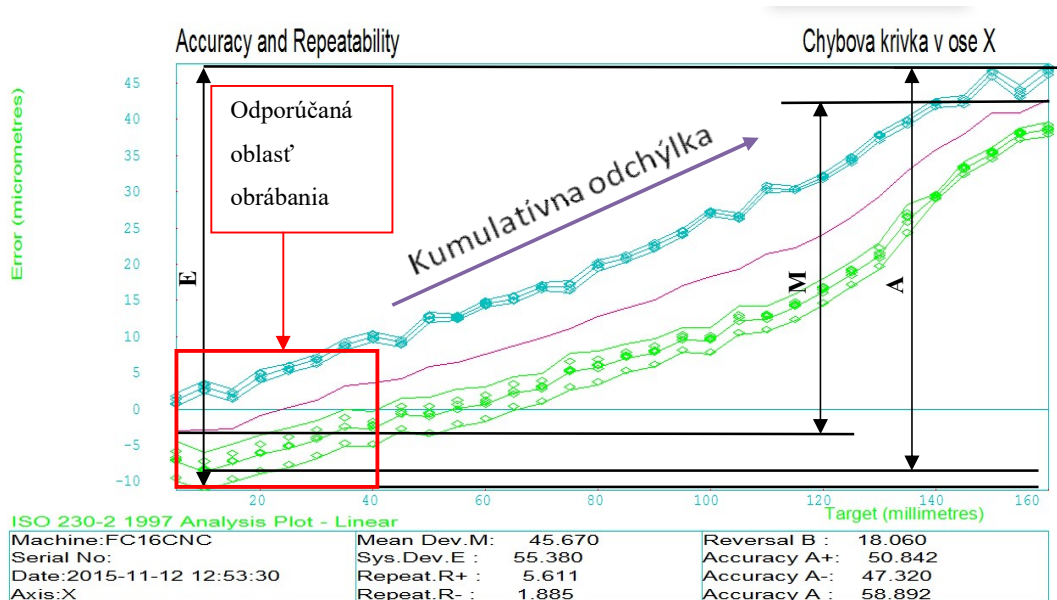
Teplota prostredia	Tstart:22°C	Tend:22°C
Tlak vzduchu	1013,25 mbar	
Relatívna vlhkosť vzduchu	75%RH	

Protokoly pre os y a z sú uvedené v prílohe diplomovej práce.

7 VYHODNOTENIE GRAFICKEJ ČASTI KALIBRAČNÉHO PROTOKOLU A PRAKTIKÉ NÁVRHY

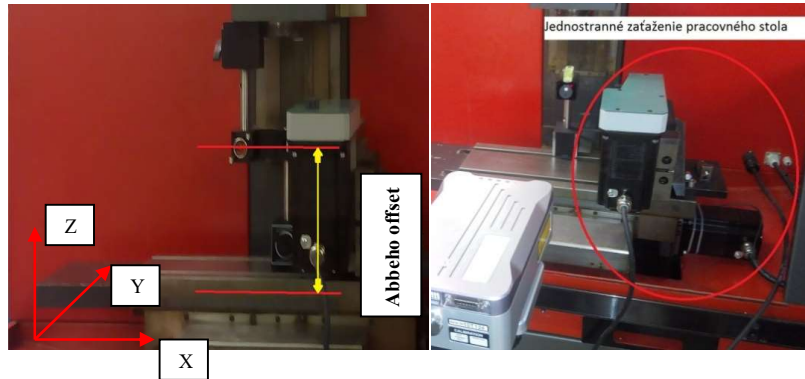
Výpočet parametrov presnosti a opakovateľnosti bol vykonaný pomocou softvéru Ranishaw LaserXL Capture ktorý umožnil aj samotné snímanie nameraných hodnôt. Tento softvér ponúka možnosť vyhodnotiť dáta podľa rôznych noriem príkazom DATA→ANALYSE. V ponuke analýzy je možné nájsť aj analýzu podľa normy ČSN ISO 230-2. Ako vyhodnotenie ponúka možnosť zostrojenia grafu presnosti a opakovateľnosti nameraných hodnôt. Na výpočet a podrobné znázornenie nameraných hodnôt a parametrov potrebných pre kalibračný protokol môže poslúžiť funkcia vytvorenia prehľadnej tabuľky STATS TABLE. Ako graf, tak i tabuľka môže byť súčasťou kalibračného protokolu. Pri každej meranej osi boli dodržiavané zásady, na základe ktorých sa predišlo vzniku systematických chýb, ktoré by mali zásadný vplyv na výsledok merania. Avšak nie vždy bolo pri meraní možné umiestniť prvky interferometra tak, aby bol laserový lúč nasmerovaný rovnobežne s osou polohovacej skrutky, čím vznikol pri meraní Abbeho ofset.

7.1 Zhodnotenie aktuálneho stavu zariadenia



Obr. 32 Graf meranie polohovania na osi x

Z grafu polohovania osi x môžeme usudzovať, že dochádza ku kumulatívne narastaniu odchýlok v kladnom smere. Jednou z hlavných príčin tohto nárastu je technické riešenie pohonu polohovania na osi y pripevneného priamo na posuvnom obrábacom stole spolu s vertikálnym úchopom obrobku. Takéto nesymetrické zaťaženie spôsobuje deformáciu a ohyb stola. Čím je vzdialenosť väčšia, tým väčší je ohyb, a teda aj vzniknutá odchýlka. Zariadenie nemá dostatočne robustný upínací stôl na to, aby odolal takémuto zaťaženiu.

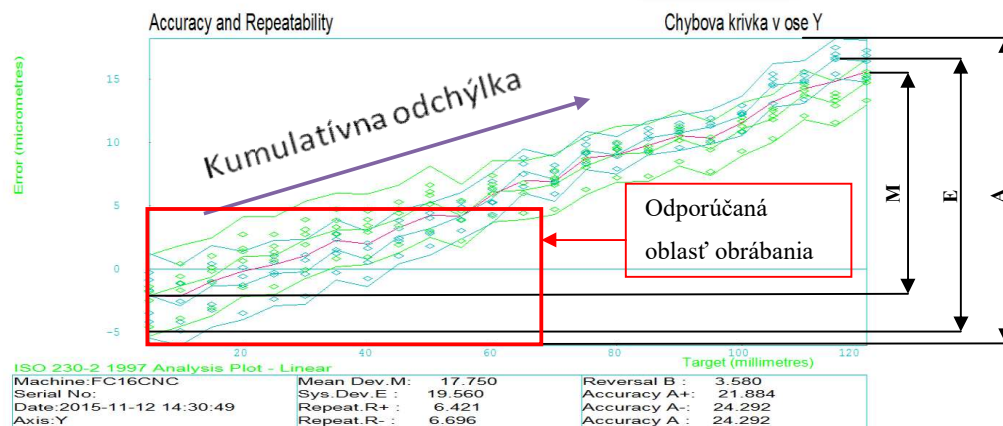


Obr. 33 Nedostatky pri meraní na osi x

Ďalšou príčinou nárastu môže byť vysoký ohrev pohonu a následnej dilatácii, a to ako polohovacej skrutky, tak i samotného upínacieho stola. Teplotný výkyv môže byť dosť výrazný, pretože pohon nie je nijak tepelne izolovaný.

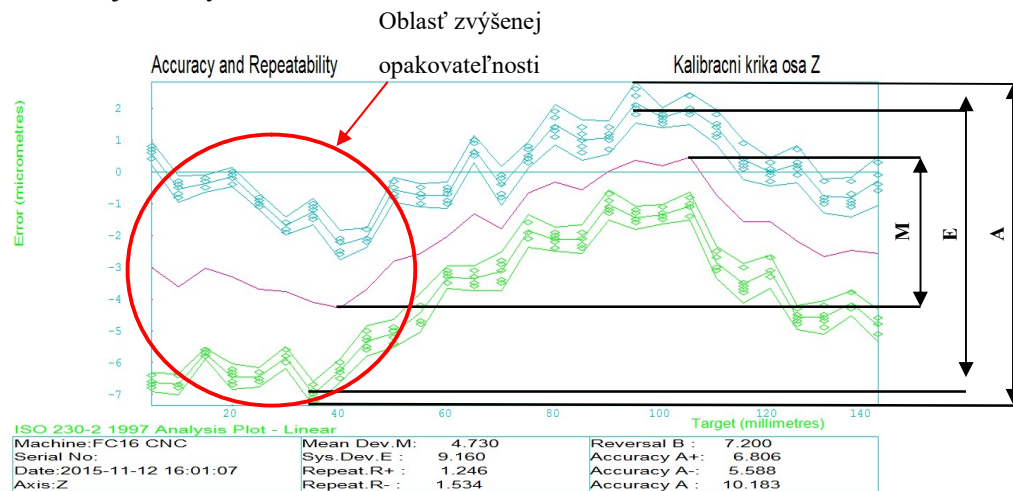
Ďalšou možnou príčinou môže byť:

- Opotrebenie polohovacej skrutky vplyvom prevádzky stroja
- Natiahnutie polohovacej skrutky vplyvom prevádzky stroja



Obr. 34 Graf meranie polohovania v osi y

Podobný vývoj ako pri meraní na osi x malo meranie aj na osi y. Zväčšujúcou sa vzdialenosťou na polohovacej skrutke sa zväčšuje kumulatívna odchýlka v kladnom smere. Avšak na tejto osi meranie vykazuje parameter dvojsmernej presnosti nastavenia polohy A polovičnú hodnotu oproti meraní na osi x. V smere osi y vykazuje zariadenie vyššiu tuhosť a v krajných polohách nie je vo veľkej miere ovplyvnená asymetrickým zaťažením. Na meranie nemala významný vplyv rozťažnosť materiálu, pretože zdroj tepla bol dostatočne vzdialený od posuvnej skrutky. Najväčšia opakovateľnosť je pri prvom bode merania a so vzdialenosťou mierne klesá. Zvýšená opakovateľnosť môže byť zapríčinená nesymetrickým využívaním rozsahu polohovania zariadenia na osi y, ktoré mohlo viesť k nesymetrickému opotrebeniu polohovacej skrutky.



Obr. 35 Graf meranie polohovania na osi z

Meranie na osi z vykazovalo veľmi stabilné hodnoty. Tak ako na osi y pri krajných polohách v dolnej časti posuvu je zvýšená opakovateľnosť, ktorá bola pravdepodobne spôsobená asymetrickým opotrebením polohovacej skrutky nadmernou prevádzkou zariadenia v tejto polohe.

Pri meraní na osi x a y sa nepodarilo úplne eliminovať vznik Abbého chyby značným ofsetom, približne 10 cm, medzi osou polohovacej skrutky a laserovým lúčom. Pri meraní na osi z to bolo asi 5 cm. Pri snahe predísť Chosinovej chybe bol kladený dôraz na správne nastavenie meracích prvkov interferometra pred samotným meraním. V osiach x a y dostatočný priestor pri nastavovaní dovolil začať merať v minimálnej vzdialenosti medzi referenčným a meracím zrkadlom. Tým sa zredukovala možnosť vzniku chyby mŕtvej

dráhy. Na osi z nebolo možné takéto nastavenie uskutočniť, a preto chybu mŕtvej dráhy nemožno vylúčiť.

7.2 Praktické závery

Zariadenie je určené hlavne pre výukové účely, pri ktorých sa obrábajú väčšinou mäkké materiály ako umelé drevo alebo drevo prírodné, plasty a mäkké kovy. Konštrukčné riešenie nezabezpečuje dostatočnú tuhosť, aby bolo možné obrábať kovové materiály. Na zvýšenie tuhosti, ktorá by viedla k presnejšiemu polohovaniu, by bolo nutné zmeniť polohovací systém a upevnenie upínacieho stola. Takáto zmena by však bola vysoko nákladná a v konečnom dôsledku nerentabilná. Na zlepšenie presnosti polohovania by bolo vhodné použiť softvérové riešenie v podobe kompenzácie polohovania nastaviteľného ako kompenzačnú krivku v rámci softvéru. Ako kompenzačná krivka, respektíve kompenzačné hodnoty by sa použili priemerné hodnoty nameraných dát v jednotlivých polohách. To však aktuálny softvér používaný na riadenie prístroja neumožňuje. Preto by takýto krok vyžadoval zmenu riadiaceho softvéru.

V prípade, že by sa žiadne konštrukčné alebo softvérové zmeny nezaviedli, je možno zabezpečiť presnosť polohovania zmenšením dovoleného rozsahu obrábania v jednotlivých osiach. Na dosiahnutie dvojsmernej presnosti nastavenia polohy neprevyšujúcej 10 μm , by sa obrábanie mohlo uskutočniť v polohe osi x $20 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$, v polohe osi y $35 \text{ mm} \pm 35 \text{ mm}$. Na osi z nie je potrebné žiadne obmedzenie.

ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo určiť presnosť polohovania frézky FC 16 CNC pomocou laserového interferometra Renishaw XL-80.

V teoretickej časti boli vysvetlené základy štatistiky potrebnej na vyhodnocovanie nameraných dát, ako aj pojmy presnosti a opakovateľnosti popisujúce charakter nameraných hodnôt.

Keďže merací prístroj funguje na báze interferometrie laserového lúča, v ďalšej časti práce bol opísaný jeho princíp a príslušenstvo potrebné na meranie lineárneho polohovania na osiach.

Ako nástroj na vyhodnotenie presnosti polohovania zodpovedajúci požiadavkám medzinárodných štandardov bola zvolená norma ČSN ISO 230-2:2014. Norma obsahuje výpočty parametrov a navrhuje postup, ako zostrojiť kalibračný protokol pre jednotlivé osi.

Praktická časť obsahuje postup nastavenia meracieho prístroja tak, aby sa čo možno najviac predišlo možným chybám charakteristickým pre takýto typ merania. Vychádzajúc z normy ČSN ISO 230-2 sme vypočítali všetky potrebné parametre, ktoré sme pomocou softvéru Renishaw Laser XL Capture vyhodnotili graficky.

Analýza jednotlivých grafov ukázala, že polohovanie frézky nezodpovedá cieľovým hodnotám merania. K zisteniu potenciálnych kritických miest sme dospeli analýzou variačného koeficientu V_x . Boli navrhnuté riešenia a preventívne opatrenia, pomocou ktorých by bolo zaručené zlepšenie výsledku, pričom by neboli potrebné výrazné finančné prostriedky na repas stroja alebo jeho kalibráciu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN ISO 230-1. Zásady zkoušek obráběcích strojů : Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění. Praha : Český normalizační institut, 1997
- [2] ČSN ISO 230-2:2014. Zásady zkoušek obráběcích strojů : Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 36 s.
- [3] ČSN ISO 230-3. Zásady zkoušek obráběcích strojů : Určení tepelných vlivů. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 44 s.
- [4] 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. 24 s.
- [5] ČSN ISO 230-5. Zkušební předpisy pro obráběcí stroje : Určení emise hluku. Praha : Český normalizační institut, 2001. 32 s.
- [6] ČSN ISO 230-6. Zásady zkoušek obráběcích strojů : Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení). Praha : Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [7] HINDLS, Richard. *Statistika pro ekonomy*. 8. vyd. Praha: Professional Publishing, 2007, 415 s. ISBN 9788086946436.
- [8] BUMBÁLEK, Leoš a kol. *Kontrola a měření*. Vyd.1. Praha: Informatorium, 2009, ISBN 978-80-8333-072-9
- [9] ČECH, Jaroslav, PERNIKAŘ, Jiří, PODANY, Kamil *Strojírenská metrologie*. 4. vyd. Brno: CERM, 2005. 175 s. ISBN 80-214-3070-2
- [10] BRAVENEČ, Libor. *Polohování CNC frézky dle normy ISO 230-2*. Zlín, 2014. Diplomová práce. UTB ve Zlíně. Vedoucí práce Pata Vladimír, doc. Dr. Ing.
- [11] KUBOŠOVÁ, Milena. *Návrh kalibrace a renovace dílenského mikroskopu využitím laseinterferometru*. Zlín, 2014. Diplomová práce. UTB ve Zlíně. Vedoucí práce Pata Vladimír, doc. Dr. Ing.
- [12] *Význam a účel merania, metrológia chyby a presnosť merania* [online]. 2016 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW:

- http://spseke.sk/sb/elm_3/elemerania/vyznam_ucel_merania.htm
- [13] *Resolution, Accuracy and Repeatability* [online]. 2016 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW:https://www.aerotech.com/media/247122/section%201_engineering%20reference_resolution,%20accuracy,%20repeatability.pdf
- [14] *Pohybový systém- definice* [online]. 2016 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW: <<http://www.etel.ch/cz/pohybove-systemy/definice/>>
- [15] *Principles of operation* [online]. 2016 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW: <http://www.feanor.com/laser_principles.pdf>.
- [16] *Parametrické testy-Studentův t-test* [online]. 2016 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW: <http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ttest.htm>
- [17] MAREK, Jiří *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2. Vyd. Česká republika : MM Publishing, 2010. 419 s. ISBN 978-80-254-7980-3
- [18] *Abbe Error/Offset* [online]. 2016 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW: <http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-35950-7_16793-1#page-1>.
- [19] *Přenosný laserový měřicí a kalibrační systém* [online]. 2016 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW: <<http://resources.renishaw.com/cs/details/brozuralaserovy-system-xl-80--15088>>.
- [20] VÉMOLA, Tomáš. *Soustava fabry-Perotova a Michalsonova interferometru pro měření délek s femtosekundovým laserem*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Číp, Ph.D.
- [21] *Renishaw: Laserový systém XL-80* [online]. 2007 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW: <<http://www.renishaw.cz/cs/laserove-interferometricke-systemy--6800>>.
- [22] RAŠKA, Miroslav. *Kalibrace polohovacího systému frézky FC 16 CNC/PC dle normy ISO 230-2*. Zlín, 2015. Diplomová práce. UTB ve Zlíně. Vedoucí práce Pata Vladimír, doc. Dr. Ing.
- [23] *Zásuvková deska SVOČ-FST 2013* [online]. 2016 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW:[http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST\(SVOC\)/_2013/_sbornik/PapersPdf/Ss/Rodlova_K.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2013/_sbornik/PapersPdf/Ss/Rodlova_K.pdf)
- [24] *How the Helium-Neon Laser Works?* [online]. 2016 [cit. 2016-5-8]. Dostupné z WWW: <<http://laser.physics.sunysb.edu/~dli/hnwork.html>>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

$1-\alpha$	Správne rozhodnutie- spoľahlivosť
$1-\beta$	Správne rozhodnutie- sila testu
A	Dvojsmerná presnosť nastavenia polohy na osi
$A\uparrow, A\downarrow$	Jednosmerná presnosť nastavenia polohy na osi
α	Hladina významnosti
α	Koeficient rozťažnosti stroja
B	Necitlivosť na osi
B_i	Necitlivosť v polohe
\bar{B}	Priemerná necitlivosť na osi
β	Chyba II. druhu
CNC	Computer Numerical Control
ČSN	Česká technická norma
ζ	Fázový posuv
Δ_a	Absolútna chyba
ΔT	Rozdiel teploty
E	Dvojsmerná systematická polohová odchýlka na osi
E	Energetická hladina elektrónov
$E\uparrow, E\downarrow$	Jednosmerná systematická polohová odchýlka na osi
F	Testovacie kritérium F- testu
F_{krit}	Kritická hodnota F- testu
H_A	Alternatívna hypotéza
H_0	Nulová(základná) hypotéza
ISO	International Organization for Standardization
λ	Vlnová dĺžka

L	Délka
L_1	Dráha mrtvého chodu
L_2	Dráha merania
L_{mer}	Délka pri Chosinovej chybe
L_{skut}	Skutočná délka
m	Počet cyklov
M	Priemerná dvojsmerná polohová odchýlka na osi
max	Maximum
min	Minimum
μ	Aritmetický priemer základného súboru
n	Počet polôh v jednom smere
n	Rozsah výberu
N	Počet pulzov
NC	Numerical Control
NDE	Diferenciálna tepelná rozťažnosť
p	Pravdepodobnosť
P_i	Cieľová poloha
P_{ij}	Skutočná poloha
R	Dvojsmerná opakovateľnosť nastavenia polohy na osi
R	Presadenie meracieho zariadenia
$R(\theta)$	Rozsah teploty vplyvom neistoty merania
$R(\alpha)$	Rozsah chyby koeficientu rozťažnosti stroja
$R_{\uparrow}, R_{\downarrow}$	Jednosmerná opakovateľnosť nastavenia polohy
R_i	Dvojsmerná opakovateľnosť nastavenia polohy v polohe
$R_{i\uparrow}, R_{i\downarrow}$	Jednosmerná opakovateľnosť nastavenia polohy v polohe
	Skutočná hodnota

S	Odhadne jednosmernej opakovateľnosti osi nastavenia polohy
$S_i \uparrow, S_i \downarrow$	v polohe
σ	Smerodajná odchýlka základného súboru
σ^2	Rozptyl základného súboru
t	Testovacie kritérium t- testu
$t_{1-\alpha/2(v)}$	Kritická hodnota t- testu
U(A, A \uparrow , A \downarrow)	Neistota merania presnosti polohovania
U(B)	Odhad neistoty pre necitlivosť
$U_{E, DEVICE}$	Neistota merania vplyvom meracieho zariadenia
$U_{E, MACHINE TOOL}$	Neistota merania vplyvom kolísania chyby environmentu
U_{EV}	Neistota merania systematických odchýlok
U_{EVE}	Neistota merania priemerných systematických odchýlok
U(E, E \uparrow , E \downarrow)	Neistota merania vplyvom presadenia meracieho zariadenia k osi skúšaného stroja
U(M)	Neistota merania priemerných systematických odchýlok
$U_{MISALIGNMENT}$	Neistota merania vplyvom presadenia meracieho zariadenia
$U_{M, MACHINE TOOL}$	Neistota merania vplyvom merania teploty stroja
U(R)	Neistota merania obojsmernej opakovateľnosti
U(R, R \uparrow , R \downarrow)	Odhad neistoty pre jednosmernú opakovateľnosť
ν	Stupeň voľnosti
V_x	Variačný koeficient
x	Os x
x_{ij}	Polohová odchýlka
\bar{x}_i	Priemerná dvojsmerná polohová odchýlka v polohe
$\bar{x}_i \uparrow, \bar{x}_i \downarrow$	Priemerná jednosmerná polohová odchýlka v polohe
x_m	Nameraná hodnota

x_p	Konvenčně pravá hodnota
y	Os y
z	Os z
Z_1	Referenční větv
Z_2	Meracia větv

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Rozdelenia líšiace sa variabilitou [7]	16
Obr. 2 Chyby I. a II. druhu [22]	17
Obr. 3 Znázornenie presnosti a opakovateľnosti [13]	21
Obr. 4 Princíp deštruktívnej interferencie [21]	27
Obr. 5 Princíp konštruktívnej interferencie [21]	27
Obr. 6 Zostava optických prvkov pre lineárne meranie [19].....	29
Obr. 7 Zostava optických prvkov pre lineárne meranie v pravom uhle [19].....	29
Obr. 8 Zostava optických prvkov so smerovacím zrkadlom [19].....	30
Obr. 9 Grafické znázornenie vzniku chyby zapríčinené Abbeho ofsetom [21].....	31
Obr. 10 Grafické znázornenie vzniku Chosinovej chyby [11].....	32
Obr. 11 Grafické znázornenie vzniku chyby mýtvej dráhy [21].....	32
Obr. 12 Grafické vyjadrenie chyby merania[9].....	34
Obr. 13 Excitácia atómov na vyššiu energetickú hladinu.....	35
Obr. 14 Schéma HeNe laseru.[24].....	36
Obr. 15 Princíp laserového interferometra.....	36
Obr. 16 Zostava laserového interferometra Renishaw XL-80 [19].....	37
Obr. 17 Kompenzátor XC-80[19].....	38
Obr. 18 Bežný skúšobný cyklus [2].....	40
Obr. 19 Jednosmerná presnosť a opakovateľnosť nastavenia polohy [8].....	43
Obr. 20 Dvojsmerná presnosť a opakovateľnosť nastavenia polohy [8].....	45
Obr. 21 Fréza FC 16 CNC.....	51
Obr. 22 Kontrola horizontálnej polohy zdroja laserového lúča pomocou vodováhy.....	55
Obr. 23 Nastavenie laserinterferometra na meranej osi X.....	55
Obr. 24 Použitie clony pri nastavení interferometra.....	56
Obr. 25 Nastavenia interferometra a odrážača.....	57

Obr. 26 Správne nastavenie zostavy- lúč dopadá do stredu snímača.....	58
Obr. 27 Nastavenie podmienok pred meraním.....	59
Obr. 28 Prvé okno nastavenia cieľových bodov.....	60
Obr. 29 Druhé okno nastavenia merania.....	61
Obr. 30 Tretie okno udania základných údajov o meraní.....	61
Obr. 31 Tretie okno prepínajúce automatické snímanie dát.....	62
Obr. 32 Graf meranie polohovania na osi x.....	75
Obr. 33 Nedostatky pri meraní na osi x.....	76
Obr. 34 Graf meranie polohovania na osi y.....	76
Obr. 35 Graf meranie polohovania na osi z.....	77

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Odhad neistoty merania lineárneho polohovania v ose x.....	68
Tab. 2 Odhad neistoty merania lineárneho polohovania v ose y.....	69
Tab. 3 Odhad neistoty merania lineárneho polohovania v ose z.....	70
Tab. 4 Parametre polohovania vyhodnotené podľa normy ČSN ISO 230-2:2014 a ich neistoty	71
Tab. 5 Merací protokol.....	72

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA P I: NAMERANÉ DÁTA NA OSI X- LIST 1

PRÍLOHA P II: NAMERANÉ DÁTA NA OSI X- LIST 2

PRÍLOHA P III: NAMERANÉ DÁTA NA OSI X- LIST 3

PRÍLOHA P IV: NAMERANÉ DÁTA NA OSI X- LIST 4

PRÍLOHA P V: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Y- LIST 1

PRÍLOHA P VI: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Y- LIST 2

PRÍLOHA P VII: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Y- LIST 3

PRÍLOHA P VIII: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Z- LIST 1

PRÍLOHA P IX: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Z- LIST 2

PRÍLOHA P X: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Z- LIST 3

PRÍLOHA P XI: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Z- LIST 4

PRÍLOHA P XII: MERACÍ PROTOKOL PRE OS Y

PRÍLOHA P XIII: MERACÍ PROTOKOL PRE OS Z

PRÍLOHA P I: NAMERANÉ DÁTA NA OSI X- LIST 1

P_i	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_i \uparrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40
$\bar{x}_i \uparrow 1$ [μm]	-9,5	-10,8	-9,7	-8,5	-7,7	-6,4	-4,7	-4,8
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	-6,7	-8,4	-7,2	-6,0	-5,1	-3,9	-2,4	-2,7
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	-5,8	-7,2	-6,2	-4,9	-3,9	-2,9	-1,2	-1,7
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	-7,1	-8,5	-7,2	-6,1	-5,0	-4,1	-2,4	-2,2
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	-7,0	-8,3	-7,1	-6,0	-5,1	-3,9	-2,4	-2,3
$P_i \downarrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	1,4	3,1	2,1	4,5	5,6	6,8	8,7	9,7
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	1,8	3,5	2,4	5,0	6,0	7,2	9,3	10,3
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	1,4	3,3	2,1	4,9	6,0	7,1	9,2	10,4
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	0,7	2,5	1,4	4,0	5,2	6,2	8,3	9,6
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	0,8	2,6	1,6	4,2	5,5	6,7	8,9	10,0
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	-7,220	-8,640	-7,480	-6,300	-5,360	-4,240	-2,620	-2,740
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	1,220	3,000	1,920	4,520	5,660	6,800	8,880	10,000
\bar{x}_i [μm]	-3,000	-2,820	-2,780	-0,890	0,150	1,280	3,130	3,630
$S_i \uparrow$ [μm]	1,374	1,316	1,310	1,325	1,403	1,295	1,274	1,205
$S_i \downarrow$ [μm]	0,460	0,436	0,409	0,432	0,344	0,394	0,402	0,354
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-4,473	-6,007	-4,859	-3,650	-2,554	-1,649	-0,073	-0,329
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-9,967	-11,273	-10,101	-8,950	-8,166	-6,831	-5,167	-5,151
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	2,141	3,872	2,737	5,385	6,347	7,587	9,685	10,707
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	0,299	2,128	1,103	3,655	4,973	6,013	8,075	9,293
$R_i \uparrow$ [μm]	5,495	5,266	5,241	5,299	5,611	5,182	5,094	4,822
$R_i \downarrow$ [μm]	1,842	1,744	1,635	1,730	1,374	1,575	1,610	1,414
B_i [μm]	-8,440	-11,640	-9,400	-10,820	-11,020	-11,040	-11,500	-12,740
$R_{i \max}$ [μm]	5,495	5,266	5,241	5,299	5,611	5,182	5,094	4,822

PRÍLOHA P II: NAMERANÉ DÁTA NA OSI X- LIST 2

P_i	9	10	11	12	13	14	15	16
$P_i \uparrow$ [mm]	45	50	55	60	65	70	75	80
$\bar{x}_i \uparrow 1$ [μm]	-2,7	-3,3	-2,1	-1,3	0,3	1,1	3,1	3,8
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	-0,7	-1,0	0,0	0,6	2,0	2,8	5,1	5,6
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	0,4	0,3	1,2	1,9	3,4	3,9	6,6	6,9
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	-0,6	-0,7	0,7	0,9	2,5	3,0	5,3	6,0
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	-0,3	-0,5	0,7	1,2	2,5	3,2	5,5	6,1
$P_i \downarrow$ [mm]	45	50	55	60	65	70	75	80
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	9,0	12,4	12,5	14,2	14,9	16,5	16,3	19,4
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	9,6	12,9	12,8	14,7	15,6	17,2	17,3	20,3
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	9,5	13,0	12,9	14,9	15,5	17,1	17,2	20,0
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	8,8	12,2	12,4	14,4	15,0	16,7	16,7	19,5
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	9,2	12,8	12,6	14,5	15,1	16,9	17,2	19,8
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	-0,780	-1,040	0,100	0,660	2,140	2,800	5,120	5,680
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	9,220	12,660	12,640	14,540	15,220	16,880	16,940	19,800
\bar{x}_i [μm]	4,220	5,810	6,370	7,600	8,680	9,840	11,030	12,740
$S_i \uparrow$ [μm]	1,156	1,352	1,302	1,197	1,146	1,037	1,270	1,152
$S_i \downarrow$ [μm]	0,335	0,344	0,207	0,270	0,311	0,286	0,428	0,367
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	1,533	1,664	2,704	3,054	4,432	4,874	7,659	7,984
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-3,093	-3,744	-2,504	-1,734	-0,152	0,726	2,581	3,376
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	9,889	13,347	13,055	15,080	15,843	17,453	17,796	20,535
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	8,551	11,973	12,225	14,000	14,597	16,307	16,084	19,065
$R_i \uparrow$ [μm]	4,625	5,408	5,208	4,788	4,583	4,147	5,079	4,608
$R_i \downarrow$ [μm]	1,339	1,374	0,829	1,081	1,246	1,145	1,711	1,470
B_i [μm]	-10,000	-13,700	-12,540	-13,880	-13,080	-14,080	-11,820	-14,120
$R_{i \max}$ [μm]	4,625	5,408	5,208	4,788	4,583	4,147	5,079	4,608

PRÍLOHA P III: NAMERANÉ DÁTA NA OSI X- LIST 3

P_i	17	18	19	20	21	22	23	24
$P_i \uparrow$ [mm]	85	90	95	100	105	110	115	120
$\bar{x}_i \uparrow 1$ [μm]	5,3	6,2	8,1	7,8	10,5	10,9	12,4	14,6
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	7,1	7,8	9,5	9,8	12,6	13,1	14,5	16,5
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	7,9	8,7	10,3	10,1	13,0	12,9	14,8	16,9
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	7,3	8,0	9,9	9,5	12,1	12,4	14,2	16,0
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	7,4	8,1	10,0	9,7	12,7	12,8	14,4	16,8
$P_i \downarrow$ [mm]	85	90	95	100	105	110	115	120
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	20,5	22,1	24,0	26,8	26,2	30,2	30,2	32,0
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	21,2	22,9	24,7	27,3	26,8	30,8	30,5	32,3
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	20,8	22,5	24,5	27,2	26,7	30,5	30,4	32,0
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	20,6	22,3	24,1	27,0	26,3	30,1	30,1	31,7
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	20,9	22,6	24,5	27,4	26,6	30,8	30,5	32,2
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	7,000	7,760	9,560	9,380	12,180	12,420	14,060	16,160
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	20,800	22,480	24,360	27,140	26,520	30,480	30,340	32,040
\bar{x}_i [μm]	13,900	15,120	16,960	18,260	19,350	21,450	22,200	24,100
$S_i \uparrow$ [μm]	0,995	0,934	0,865	0,909	0,993	0,887	0,953	0,940
$S_i \downarrow$ [μm]	0,274	0,303	0,297	0,241	0,259	0,327	0,182	0,230
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	8,990	9,629	11,290	11,199	14,167	14,194	15,966	18,039
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	5,010	5,891	7,830	7,561	10,193	10,646	12,154	14,281
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	21,348	23,087	24,953	27,622	27,038	31,134	30,703	32,500
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	20,252	21,873	23,767	26,658	26,002	29,826	29,977	31,580
$R_i \uparrow$ [μm]	3,980	3,737	3,459	3,638	3,974	3,549	3,812	3,759
$R_i \downarrow$ [μm]	1,095	1,213	1,187	0,963	1,035	1,308	0,727	0,921
B_i [μm]	-13,800	-14,720	-14,800	-17,760	-14,340	-18,060	-16,280	-15,880
$R_{i \max}$ [μm]	3,980	3,737	3,459	3,638	3,974	3,549	3,812	3,759

PRÍLOHA P IV: NAMERANÉ DÁTA NA OSI X- LIST 4

P_i	25	26	27	28	29	30	31	32
$P_i \uparrow$ [mm]	125	130	135	140	145	150	155	160
$\bar{x}_i \uparrow 1$ [μm]	17,2	19,7	24,3	29,1	32,4	34,5	37,2	37,9
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	18,9	21,2	26,6	29,0	33,2	35,3	38,1	38,8
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	19,1	21,5	26,5	29,6	33,6	35,5	38,2	38,7
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	18,4	20,8	25,8	29,2	33,1	35,4	37,9	38,4
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	19,3	22,2	27,1	29,5	33,4	35,6	38,3	39,2
$P_i \downarrow$ [mm]	125	130	135	140	145	150	155	160
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	34,3	37,6	39,8	42,3	42,8	46,4	43,9	47,3
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	34,8	37,8	39,9	42,5	42,8	46,7	44,1	46,9
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	34,7	37,7	39,9	42,3	42,9	46,7	44,1	46,8
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	34,0	37,1	39,2	41,7	42,0	45,9	43,0	46,1
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	34,4	37,9	39,9	42,2	42,6	46,4	43,5	46,6
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	18,580	21,080	26,060	29,280	33,140	35,260	37,940	38,600
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	34,440	37,620	39,740	42,200	42,620	46,420	43,720	46,740
\bar{x}_i [μm]	26,510	29,350	32,900	35,740	37,880	40,840	40,830	42,670
$S_i \uparrow$ [μm]	0,841	0,926	1,088	0,259	0,456	0,439	0,439	0,485
$S_i \downarrow$ [μm]	0,321	0,311	0,305	0,300	0,363	0,327	0,471	0,439
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	20,262	22,931	28,235	29,798	34,052	36,139	38,819	39,570
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	16,898	19,229	23,885	28,762	32,228	34,381	37,061	37,630
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	35,082	38,243	40,350	42,800	43,347	47,074	44,662	47,619
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	33,798	36,997	39,130	41,600	41,893	45,766	42,778	45,861
$R_i \uparrow$ [μm]	3,363	3,703	4,351	1,035	1,824	1,757	1,757	1,939
$R_i \downarrow$ [μm]	1,284	1,246	1,220	1,200	1,453	1,308	1,885	1,757
B_i [μm]	-15,860	-16,540	-13,680	-12,920	-9,480	-11,160	-5,780	-8,140
$R_{i \max}$ [μm]	3,363	3,703	4,351	1,200	1,824	1,757	1,885	1,939

PRÍLOHA P V: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Y- LIST 1

P_i	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_i \uparrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	-0,3	0,4	1	2,7	2,7	3,90	4,7	4,6
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	-1,4	-0,6	0,1	1,6	1,8	3,1	3,8	3,9
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	-1,8	-1,1	-0,2	1,4	1,3	2,7	3,3	3,4
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	-2,5	-1,7	-1,1	0,6	0,7	1,9	2,7	2,9
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	-4,6	-3,9	-3,1	-1,5	-1,4	-0,1	0,8	0,9
$P_i \downarrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	-0,3	-1,2	0,4	0,1	1	1,1	2,8	2
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	-0,9	-1,7	-0,2	-0,6	0,5	0,7	2,3	1,6
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	-1,7	-2,6	-1	-1,3	-0,5	-0,4	1,2	0,5
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	-3,5	-4,2	-2,8	-1,3	-0,3	-0,4	1,5	0,5
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	-4,2	-4,9	-3,3	-3,5	-2,4	-2,2	-0,3	-0,8
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	-2,120	-1,380	-0,660	0,960	1,020	2,300	3,060	3,140
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	-2,120	-2,920	-1,380	-1,320	-0,340	-0,240	1,500	0,760
\bar{x}_i [μm]	-2,120	-2,150	-1,020	-0,180	0,340	1,030	2,280	1,950
$S_i \uparrow$ [μm]	1,599	1,605	1,557	1,566	1,539	1,523	1,460	1,401
$S_i \downarrow$ [μm]	1,674	1,590	1,613	1,350	1,301	1,282	1,190	1,097
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	1,078	1,831	2,453	4,092	4,097	5,346	5,981	5,942
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-5,318	-4,591	-3,773	-2,172	-2,057	-0,746	0,139	0,338
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	1,228	0,259	1,846	1,380	2,262	2,324	3,879	2,954
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	-5,468	-6,099	-4,606	-4,020	-2,942	-2,804	-0,879	-1,434
$R_i \uparrow$ [μm]	6,396	6,421	6,226	6,265	6,154	6,093	5,842	5,604
$R_i \downarrow$ [μm]	6,696	6,359	6,452	5,399	5,205	5,127	4,758	4,387
B_i [μm]	0,000	1,540	0,720	2,280	1,360	2,540	1,560	2,380
$R_{i \max}$ [μm]	6,696	6,421	6,452	6,265	6,154	6,093	5,842	5,604

PRÍLOHA P VI: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Y- LIST 2

P_i	9	10	11	12	13	14	15	16
$P_i \uparrow$ [mm]	45	50	55	60	65	70	75	80
$\bar{x}_i \uparrow$ 1 [μm]	5,3	6,6	5,4	7,4	7,5	7,8	9,3	10
$\bar{x}_i \uparrow$ 2 [μm]	4,7	6,1	4,9	6,7	6,8	7,2	8,7	9,6
$\bar{x}_i \uparrow$ 3 [μm]	4,4	5,8	4,6	6,4	6,5	7,1	8,5	9,5
$\bar{x}_i \uparrow$ 4 [μm]	3,4	5,1	3,8	5,9	6	6,6	8	9
$\bar{x}_i \uparrow$ 5 [μm]	1,9	3	2,2	4,2	4,4	4,7	6,3	7,2
$P_i \downarrow$ [mm]	45	50	55	60	65	70	75	80
$\bar{x}_i \downarrow$ 1 [μm]	3,8	4,4	5,3	6,9	8,8	8,2	10,3	9,9
$\bar{x}_i \downarrow$ 2 [μm]	3,2	4	4,9	6,3	8,3	7,7	9,8	9,4
$\bar{x}_i \downarrow$ 3 [μm]	2,2	2,9	3,9	5,3	7,5	6,8	9,2	8,9
$\bar{x}_i \downarrow$ 4 [μm]	2,4	2,8	3,9	5,2	7,5	6,9	9,1	8,9
$\bar{x}_i \downarrow$ 5 [μm]	1	1,8	3	4,3	6,5	5,9	8,3	7,9
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	3,940	5,320	4,180	6,120	6,240	6,680	8,160	9,060
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	2,520	3,180	4,200	5,600	7,720	7,100	9,340	9,000
\bar{x}_i [μm]	3,230	4,250	4,190	5,860	6,980	6,890	8,750	9,030
$S_i \uparrow$ [μm]	1,332	1,406	1,250	1,203	1,163	1,186	1,139	1,099
$S_i \downarrow$ [μm]	1,064	1,035	0,911	1,015	0,879	0,886	0,757	0,742
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	6,603	8,132	6,680	8,526	8,566	9,052	10,439	11,258
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	1,277	2,508	1,680	3,714	3,914	4,308	5,881	6,862
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	4,648	5,251	6,022	7,630	9,477	8,872	10,854	10,483
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	0,392	1,109	2,378	3,570	5,963	5,328	7,826	7,517
$R_i \uparrow$ [μm]	5,326	5,624	4,999	4,812	4,653	4,745	4,557	4,396
$R_i \downarrow$ [μm]	4,256	4,141	3,644	4,060	3,515	3,544	3,028	2,966
B_i [μm]	1,420	2,140	-0,020	0,520	-1,480	-0,420	-1,180	0,060
$R_{i \max}$ [μm]	5,326	5,624	4,999	4,812	4,653	4,745	4,557	4,396

PRÍLOHA P VII: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Y- LIST 3

P_i	17	18	19	20	21	22	23	24
$P_i \uparrow$ [mm]	85	90	95	100	105	110	115	120
$\bar{x}_i \uparrow 1$ [μm]	10,3	11,3	10,4	12	12,7	14,6	13,9	15,6
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	9,7	11	10	11,7	12,5	14,3	13,6	15,3
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	9,5	10,5	10	11,3	12,1	14,1	13,3	15
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	9,2	10,2	9,4	10,9	11,8	13,7	12,9	14,7
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	7,3	8,5	7,7	9,3	10,3	12,1	11,6	13,3
$P_i \downarrow$ [mm]	85	90	95	100	105	110	115	120
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	11,1	11,5	11,9	12,9	15,4	15,6	17,5	17,3
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	10,7	11,1	11,5	12,4	15	15,3	17	16,9
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	10,3	10,8	11,3	12,3	14,6	14,9	16,7	16,4
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	10,3	10,8	11,3	12,2	14,5	14,8	16,6	16,4
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	9,3	9,6	10,1	10,8	13,1	13,4	15,4	15,1
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	9,200	10,300	9,500	11,040	11,880	13,760	13,060	14,780
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	10,340	10,760	11,220	12,120	14,520	14,800	16,640	16,420
\bar{x}_i [μm]	9,770	10,530	10,360	11,580	13,200	14,280	14,850	15,600
$S_i \uparrow$ [μm]	1,136	1,093	1,068	1,057	0,950	0,984	0,896	0,893
$S_i \downarrow$ [μm]	0,669	0,709	0,672	0,785	0,870	0,846	0,777	0,829
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	11,472	12,486	11,635	13,155	13,779	15,728	14,852	16,565
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	6,928	8,114	7,365	8,925	9,981	11,792	11,268	12,995
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	11,679	12,178	12,565	13,691	16,260	16,491	18,193	18,078
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	9,001	9,342	9,875	10,549	12,780	13,109	15,087	14,762
$R_i \uparrow$ [μm]	4,543	4,373	4,271	4,229	3,799	3,935	3,584	3,571
$R_i \downarrow$ [μm]	2,677	2,837	2,689	3,142	3,480	3,382	3,106	3,315
B_i [μm]	-1,140	-0,460	-1,720	-1,080	-2,640	-1,040	-3,580	-1,640
$R_{i \max}$ [μm]	4,543	4,373	4,271	4,229	3,799	3,935	3,584	3,571

PRÍLOHA P VIII: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Z- LIST 1

P_i	1	2	3	4	5	6	7
$P_i \uparrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	-6,6	-6,7	-5,7	-6,4	-6,3	-6	-6,9
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	-6,8	-6,8	-5,8	-6,7	-6,6	-6	-7,2
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	-6,7	-6,8	-5,8	-6,6	-6,6	-5,8	-7,1
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	-6,4	-6,4	-5,6	-6,2	-6,5	-5,8	-7
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	-6,6	-6,7	-5,7	-6,3	-6,3	-5,6	-6,7
$P_i \downarrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	0,4	-0,8	-0,5	-0,4	-1,1	-1,9	-1,4
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	0,4	-0,7	-0,5	-0,2	-1	-1,8	-1,5
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	0,6	-0,5	-0,3	-0,1	-0,9	-1,6	-1,1
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	0,7	-0,4	-0,2	-0,1	-0,8	-1,6	-1,2
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	0,8	-0,3	-0,3	0	-0,8	-1,6	-1
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	-6,620	-6,680	-5,720	-6,440	-6,460	-5,840	-6,980
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	0,580	-0,540	-0,360	-0,160	-0,920	-1,700	-1,240
\bar{x}_i [μm]	-3,020	-3,610	-3,040	-3,300	-3,690	-3,770	-4,110
$S_i \uparrow$ [μm]	0,148	0,164	0,084	0,207	0,152	0,167	0,192
$S_i \downarrow$ [μm]	0,179	0,207	0,134	0,152	0,130	0,141	0,207
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-6,323	-6,351	-5,553	-6,025	-6,157	-5,505	-6,595
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-6,917	-7,009	-5,887	-6,855	-6,763	-6,175	-7,365
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	0,938	-0,125	-0,092	0,143	-0,659	-1,417	-0,825
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	0,222	-0,955	-0,628	-0,463	-1,181	-1,983	-1,655
$R_i \uparrow$ [μm]	0,593	0,657	0,335	0,829	0,607	0,669	0,769
$R_i \downarrow$ [μm]	0,716	0,829	0,537	0,607	0,522	0,566	0,829
B_i [μm]	-7,200	-6,140	-5,360	-6,280	-5,540	-4,140	-5,740
$R_{i \max}$ [μm]	0,716	0,829	0,537	0,829	0,607	0,669	0,829

PRÍLOHA P IX: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Z- LIST 2

P_i	8	9	10	11	12	13	14
$P_i \uparrow$ [mm]	40	45	50	55	60	65	70
$\bar{x}_i \uparrow 1$ [μm]	-6,3	-5	-4,9	-4,2	-3,3	-3,3	-2,9
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	-6,5	-5,6	-5,4	-4,8	-3,5	-3,6	-3,5
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	-6,3	-5,5	-5,2	-4,7	-3,5	-3,5	-3,4
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	-6,2	-5,3	-5	-4,2	-3,2	-3,3	-3,1
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	-6	-5,2	-4,9	-4,2	-3,1	-3,1	-2,8
$P_i \downarrow$ [mm]	40	45	50	55	60	65	70
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	-2,6	-2,1	-0,7	-1	-0,9	0,6	-0,8
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	-2,5	-2,1	-0,8	-0,8	-1	0,5	-0,7
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	-2,2	-2,1	-0,5	-0,7	-0,6	0,6	0,4
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	-2,1	-2,2	-0,5	-0,7	-0,7	0,9	-0,2
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	-2,1	-1,8	-0,3	-0,5	-0,5	1	-0,1
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	-6,260	-5,320	-5,080	-4,420	-3,320	-3,360	-3,140
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	-2,300	-2,060	-0,560	-0,740	-0,740	0,720	-0,280
\bar{x}_i [μm]	-4,280	-3,690	-2,820	-2,580	-2,030	-1,320	-1,710
$S_i \uparrow$ [μm]	0,182	0,239	0,217	0,303	0,179	0,195	0,305
$S_i \downarrow$ [μm]	0,235	0,152	0,195	0,182	0,207	0,217	0,487
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-5,897	-4,843	-4,646	-3,813	-2,962	-2,970	-2,530
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-6,623	-5,797	-5,514	-5,027	-3,678	-3,750	-3,750
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	-1,831	-1,757	-0,170	-0,377	-0,325	1,154	0,694
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	-2,769	-2,363	-0,950	-1,103	-1,155	0,286	-1,254
$R_i \uparrow$ [μm]	0,727	0,955	0,867	1,213	0,716	0,780	1,220
$R_i \downarrow$ [μm]	0,938	0,607	0,780	0,727	0,829	0,867	1,947
B_i [μm]	-3,960	-3,260	-4,520	-3,680	-2,580	-4,080	-2,860
$R_{i \max}$ [μm]	0,938	0,955	0,867	1,213	0,829	0,867	1,947

PRÍLOHA P X: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Z- LIST 3

P_i	15	16	17	18	19	20	21
$P_i \uparrow$ [mm]	75	80	85	90	95	100	105
$\bar{x}_i \uparrow 1$ [μm]	-1,6	-2	-2,1	-1,1	-1,5	-1,4	-1,1
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	-2,1	-2,4	-2,4	-1,3	-1,6	-1,4	-1,4
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	-2,1	-2,2	-2,3	-1,2	-1,6	-1,5	-1,1
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	-1,9	-2,1	-1,9	-0,9	-1,2	-1,3	-1
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	-1,6	-1,9	-1,9	-0,7	-1,3	-1,1	-0,8
$P_i \downarrow$ [mm]	75	80	85	90	95	100	105
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	0,3	1,1	0,6	0,7	1,8	1,6	1,8
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	0,4	1,3	0,8	1	2	1,5	1,8
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	0,5	1,4	1	1,1	2,1	1,7	1,9
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	0,7	1,7	1,2	1,2	2,4	1,8	2
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	0,8	1,9	1,4	1,4	2,6	1,9	2,4
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	-1,860	-2,120	-2,120	-1,040	-1,440	-1,340	-1,080
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	0,540	1,480	1,000	1,080	2,180	1,700	1,980
\bar{x}_i [μm]	-0,660	-0,320	-0,560	0,020	0,370	0,180	0,450
$S_i \uparrow$ [μm]	0,251	0,192	0,228	0,241	0,182	0,152	0,217
$S_i \downarrow$ [μm]	0,207	0,319	0,316	0,259	0,319	0,158	0,249
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-1,358	-1,735	-1,664	-0,558	-1,077	-1,037	-0,646
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-2,362	-2,505	-2,576	-1,522	-1,803	-1,643	-1,514
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	0,955	2,119	1,632	1,598	2,819	2,016	2,478
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	0,125	0,841	0,368	0,562	1,541	1,384	1,482
$R_i \uparrow$ [μm]	1,004	0,769	0,912	0,963	0,727	0,607	0,867
$R_i \downarrow$ [μm]	0,829	1,277	1,265	1,035	1,277	0,632	0,996
B_i [μm]	-2,400	-3,600	-3,120	-2,120	-3,620	-3,040	-3,060
$R_{i \max}$ [μm]	1,004	1,277	1,265	1,035	1,277	0,632	0,996

PRÍLOHA P XI: NAMERANÉ DÁTA NA OSI Z- LIST 4

P_i	22	23	24	25	26	27	28
$P_i \uparrow$ [mm]	110	115	120	125	130	135	140
$\bar{x}_i \uparrow 1$ [μm]	-3	-3,8	-3,3	-4,5	-4,5	-4,2	-4,8
$\bar{x}_i \uparrow 2$ [μm]	-3,1	-3,7	-3,3	-4,7	-4,7	-4,2	-5,1
$\bar{x}_i \uparrow 3$ [μm]	-3	-3,6	-3,3	-4,8	-4,9	-4,3	-5,1
$\bar{x}_i \uparrow 4$ [μm]	-2,7	-3,5	-3,1	-4,6	-4,6	-4,2	-4,6
$\bar{x}_i \uparrow 5$ [μm]	-2,5	-3	-2,7	-4,3	-4,2	-3,8	-4,6
$P_i \downarrow$ [mm]	110	115	120	125	130	135	140
$\bar{x}_i \downarrow 1$ [μm]	1,1	0,1	-0,3	-0,1	-1	-1	-0,6
$\bar{x}_i \downarrow 2$ [μm]	1,2	0,2	-0,1	0,3	-0,9	-0,9	-0,4
$\bar{x}_i \downarrow 3$ [μm]	1,5	0,4	0,1	0,1	-0,8	-1,1	-0,6
$\bar{x}_i \downarrow 4$ [μm]	1,4	0,3	0	0,2	-0,8	-0,7	-0,1
$\bar{x}_i \downarrow 5$ [μm]	1,8	0,9	0,3	0,7	-0,3	-0,3	0,3
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm]	-2,860	-3,520	-3,140	-4,580	-4,580	-4,140	-4,840
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm]	1,400	0,380	0,000	0,240	-0,760	-0,800	-0,280
\bar{x}_i [μm]	-0,730	-1,570	-1,570	-2,170	-2,670	-2,470	-2,560
$S_i \uparrow$ [μm]	0,251	0,311	0,261	0,192	0,259	0,195	0,251
$S_i \downarrow$ [μm]	0,274	0,311	0,224	0,297	0,270	0,316	0,383
$\bar{x}_i \uparrow + 2S_i \uparrow$ [μm]	-2,358	-2,897	-2,618	-4,195	-4,062	-3,750	-4,338
$\bar{x}_i \uparrow - 2S_i \uparrow$ [μm]	-3,362	-4,143	-3,662	-4,965	-5,098	-4,530	-5,342
$\bar{x}_i \downarrow + 2S_i \downarrow$ [μm]	1,948	1,003	0,447	0,833	-0,220	-0,168	0,487
$\bar{x}_i \downarrow - 2S_i \downarrow$ [μm]	0,852	-0,243	-0,447	-0,353	-1,300	-1,432	-1,047
$R_i \uparrow$ [μm]	1,004	1,246	1,043	0,769	1,035	0,780	1,004
$R_i \downarrow$ [μm]	1,095	1,246	0,894	1,187	1,081	1,265	1,534
B_i [μm]	-4,260	-3,900	-3,140	-4,820	-3,820	-3,340	-4,560
$R_{i \max}$ [μm]	1,095	1,246	1,043	1,187	1,081	1,265	1,534

PRÍLOHA P XII: MERACÍ PROTOKOL PRE OS Y

Merací protokol zhotovený podľa normy ISO 230-2 pre os Y:

Dátum merania	12.11.2015
Meno a priezvisko	Vladimír Schwarz
Názov meraného stroja	frézka CNC FC 16
Názov meracieho prístroja	Laserinterferometer Renishaw XL-80

Parametre merania:

Testovaná osa	Y
Druh posuvného mechanizmu	polohovacia skrutka
Korekcia	manuálna
Koeficient teplotnej rozťažnosti zariadenia	11 $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$
Rýchlosť posuvu	100mm/min
Zotrvanie na cieľovej pozícii	3 s
Použitý kompenzačný program	žiadny

Podmienky prostredia pri meraní použité pre kompenzáciu laserového interferometra:
(zadávané manuálne)

Teplota prostredia	Tstart:22°C	Tend:22°C
Tlak vzduchu	1013,25 mbar	
Relatívna vlhkosť vzduchu	75%RH	

PRÍLOHA P XIII: MERACÍ PROTOKOL PRE OS Z

Merací protokol zhotovený podľa normy ISO 230-2 pre os Z:

Dátum merania	12.11.2015
Meno a priezvisko	Vladimír Schwarz
Názov meraného stroja	frézka CNC FC 16
Názov meracieho prístroja	Laserinterferometer Renishaw XL-80

Parametre merania:

Testovaná osa	Z
Druh posuvného mechanizmu	polohovacia skrutka
Korekcia	manuálna
Koeficient teplotnej rozťažnosti zariadenia	11 $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$
Rýchlosť posuvu	100mm/min
Zotrvanie na cieľovej pozícii	3 s
Použitý kompenzačný program	žiadny

Podmienky prostredia pri meraní použité pre kompenzáciu laserového interferometra:
(zadávané manuálne)

Teplota prostredia	Tstart:22°C	Tend:22°C
Tlak vzduchu	1013,25 mbar	
Relatívna vlhkosť vzduchu	75%RH	
