

KALIBRACE DÍLENSKÉHO MIKROSKOPU ZEISS BEZKONTAKTNÍM ZPŮSOBEM S VYUŽITÍM LASERINTERFEROMETRU RENISHAW

Bc. Adam Mareš

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Adam MAREŠ

Osobní číslo: T09572

Studijní program: N 3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Výrobní inženýrství

**Téma práce: Kalibrace dílenského mikroskopu Zeiss
bezkontaktním způsobem s využitím
laserinterferometru Renishaw**

Zásady pro vypracování:

Teoretická část

Popište základní principy měření délek pomocí He-Ne laserinterferometru

Matematicky popište způsob aplikované kalibrace mikroskopu

Praktická část

**Provedte nastavení a seřízení laserinterferometru Renishaw pro kalibraci osy x a y
dílenského mikroskopu Zeiss**

Určete vhodný měřicí krok a výsledné měření tabulkově zpracujte

Naměřené hodnoty statisticky zpracujte s využitím normy ČSN ISO 230- 2

**Provedte návrh digitalizace dílenského mikroskopu Zeiss včetně ekonomického zhod-
nocení**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Vladimír Pata

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

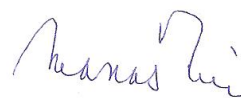
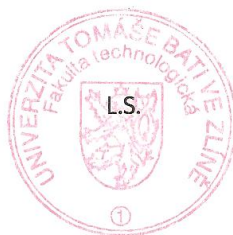
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: MAREŠ ADAM

Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

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 Zlíně12.5.2011


.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením délek pomocí helium-neonového laserinterferometru.

V teoretické části je také popsán matematický způsob aplikované kalibrace mikroskopu a problematika laserové interferometrie.

V praktické části se řeší nastavení a seřízení laserinterferometru Renishaw pro kalibraci osy „X“ a „Y“ dílenského mikroskopu Zeiss. Dále obsahuje návrh digitalizace dílenského mikroskopu Zeiss, včetně ekonomického zhodnocení.

Klíčová slova: měření délek, laserinterferometr, kalibrace os

ABSTRACT

This thesis deals with measuring lengths using helium-neon Laserinterferometers.

The teoretical part describes a mathematical method applied to to the calibration of the microscope and laser interferometry issues.

The practical part is focused to setting up and adjustment Laserinterferometers Renishaw's calibration axis „X“ and „Y“ workshop Zeiss microscope. It also contains digital design workshop Zeiss microscope, including an economic evaluation.

Keywords: lenght measurement, laserinterferometer, axis calibration

Poděkování:

Velmi rád bych touthle cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za odborné vedení, poskytnuté rady a čas, který mi věnoval po dobu vzniku této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat inženýru Šálkovi za pomoc při výrobě ustavovacího přípravku.

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

Ve Zlíně, 12.5.2011

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 LASEROVÉ MĚŘÍCÍ SYSTÉMY.....	12
1.1 ZÁKLADNÍ TYPY LASERŮ.....	12
1.2 PLYNOVÉ LASERY.....	12
2 LASEROVÁ INTERFEROMETRIE.....	14
2.1 PRINCIP MICHELSONOVA INTERFEROMETRU	14
2.2 STANOVENÍ PŘESNOSTI A OPAKOVATELNOSTI NASTAVENÍ POLOHY V ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÝCH OSÁCH	15
2.3 KONFIGURACE LINEÁRNÍCH MĚŘENÍ POMOCÍ LASEROVÉHO INTERFEROMETRU.....	16
2.4 PRINCIP MĚŘENÍ	17
2.4.1 Typy lineárních měřicích cyklů.....	17
2.4.2 Typy pendulárních (kyvadlových) měřicích cyklů.....	19
2.4.3 Základní definice dle ČSN ISO 230-2.....	20
3 CHYBY VZNIKAJÍCÍ BĚHEM MĚŘENÍ.....	29
3.1 ABSOLUTNÍ CHYBA MĚŘENÍ.....	29
3.2 RELATIVNÍ CHYBA MĚŘENÍ.....	29
3.3 NÁHODNÁ CHYBA.....	30
3.4 SYSTEMATICKÁ CHYBA.....	30
3.5 VLIV PROSTŘEDÍ NA INTERFEROMETRICKÁ MĚŘENÍ.....	31
3.6 CHYBY VZNIKAJÍCÍ NEVHODNÝM SEŘÍZENÍM LASER INTERFEROMETRU.....	32
3.6.1 Chyba vznikající tzv. Mrtvou dráhou.....	32
3.6.2 Cosinová chyba.....	33
3.6.3 Chyba způsobena nedodržením tzv. „Abbeho principu“	33
4 NEJISTOTA MĚŘENÍ.....	34
4.1 STANDARTNÍ NEJISTOTA TYPU A.....	34
4.2 STANDARTNÍ NEJISTOTA TYPU B.....	34
4.2.1 Standartní nejistota Typu B – chyba měřidla.....	34
4.2.2 Standartní nejistota Typu B – chyba metrologa.....	35
4.3 KOMBINOVANÁ STANDARTNÍ NEJISTOTA.....	35
4.4 ROZŠÍŘENÁ STANDARTNÍ NEJISTOTA.....	35
4.5 LASER XL-80.....	36
4.6 PŘÍSLUŠENSTVÍ LASEROVÉHO SYSTÉMU.....	37
4.6.1 Kompenzační jednotka XC-80.....	37
4.6.2 Měřicí optika s montáží.....	38
4.6.3 Technické příslušenství laserového systému.....	39
5 DÍLENSKÝ MIKROSKOP ZEISS.....	41

5.1	SEŘÍZENÍ MĚŘICÍ SOUSTAVY.....	43
5.2	PRINCIP MĚŘENÍ POLOHOVÁNÍ MIKROSKOPU.....	44
5.3	ZKALIBROVÁNÍ LINEÁRNÍHO INTERFEROMETRU A ODRAŽEČE	46
5.4	SNÍMÁNÍ DAT.....	50
5.5	NAMĚŘENÁ DATA – OSA X.....	52
5.6	NAMĚŘENÁ DATA – OSA Y.....	57
5.7	NÁVRH DIGITALIZACE MIKROSKOPU.....	61
5.7.1	Využití digitalizovaného mikroskopu v praxi.....	64
5.8	NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO USTAVENÍ KAMERY V OBJÍMCE MIKROSKOPU.....	65
5.9	NÁVRH PŘÍPRAVKU NA ZLEPŠENÍ ODEČÍTÁNÍ HODNOT Z MIKROMETRICKÝCH HLAVIC.....	66
6	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	69
7	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	70
	ZÁVĚR.....	71
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	72
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	75
	SEZNAM TABULEK.....	78
	SEZNAM PŘÍLOH.....	79

ÚVOD

V současné době se v moderním průmyslu klade velký důraz na kvalitu a jakost výrobků, která je vyžadována mezinárodními normami kvality. Těchto vlastností lze dosáhnout pouze pomocí přesných precizně zkalibrovaných výrobních zařízeních. Současně s výrobními zařízeními se vyvíjí také produkty průmyslové metrologie. Na trhu existuje široká nabídka odměřovacích a kalibrovacích systémů. Jedná se například o různé sondy a snímače, které kontrolují a zlepšují statickou a dynamickou přesnost obráběcích strojů, souřadnicových měřicích strojů a dalších pohybových systémů s nároky na přesné polohování. Výrobci těchto zařízení mnohdy dodávají kompletní měřicí systémy dle požadavků zákazníka. Měření prováděné v této diplomové práci se uskuteční pomocí přenosného laserového měřicího a kalibrovacího systému.

Teoretická část diplomové práce bude řešit princip laserové interferometrie a její aplikace při měření délek. Dále bude obsahovat teoretické základy z oblasti matematického popisu aplikované kalibrace zařízení dle ČSN ISO 230-2. Řešena zde bude i problematika možných chyb a nejistot, které mohou ovlivnit výsledky měření.

V praktické části se bude provádět nastavení s seřízením laserového interferometru pro kalibraci osy „X“ a „Y“ dílenského mikroskopu Zeiss. Následovat bude určení vhodného měřicího kroku, cyklu a samotné měření. Výsledné měření bude tabulkově zpracované se statistickým vyhodnocením. Cílem je určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení a polohování os mikroskopu.

Na závěr bude proveden návrh digitalizace dílenského mikroskopu Zeiss včetně ekonomického zhodnocení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASEROVÉ MĚŘÍCÍ SYSTÉMY

Lasery nacházejí v metrologii velmi široké uplatnění. Objekty mohou být vzdálené od měřicího přístroje řádově stovky metrů při zachování vysoké přesnosti měření. Využívají fyzikální principy optických měřidel vzdálenosti, liší se tím, že jako zdroj světla používají frekvenčně stabilizovaný laser. V praxi se prosadily dvě základní řešení: [3]

- snímání vlastností optického signálu,
- interference dvou koherentních paprsků.

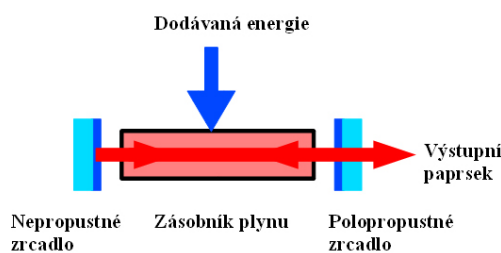
1.1 Základní typy laserů

Lasery můžeme dělit dle různých kritérií. Například podle způsobu čerpání energie, vlnové délky, režimu práce, praktického použití a aktivního prostředí.

- Pevnolátkové: do této skupiny patří lasery využívající rozptýlené ionty v krystalických nebo amorfních látkách, polovodičové lasery a lasery s barevnými centry.
- Kapalinové: pracují s cheláty různých prvků vzácných zemin. Mohou zabírat neomezeně velký objem a jsou dokonale homogenní. Nevýhodou je, že se chemicky rozkládají.
- Plynové: pracují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulsním režimu. Nevýhodou je poměrně malý výkon.

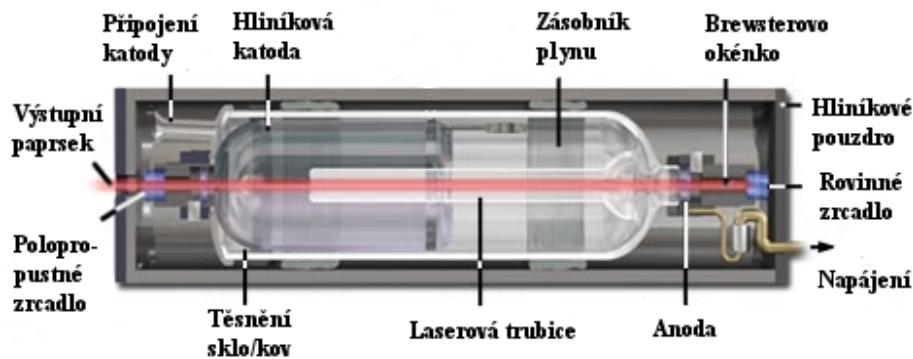
1.2 Plynové lasery

Plynové lasery se ukázaly jako velmi perspektivní a mohutné zdroje infračerveného i ultrafialového záření a našly významné uplatnění v technice a technologii. Je to dáno tím, že objem plynu je možno podle potřeby zvětšovat. Plynulým přítokem jsme schopni dodávat stále nové aktivní prostředí, které můžeme čerpat nejrůznějšími mechanizmy, elektricky, chemicky apod.



Obr. 1. Schema He-Ne laseru

Plynové lasery mají vyšší účinnost, protože přeměna elektrické energie ve výboj je hospodárnější. Proto tyto lasery pracují v nepřetržitém režimu.



Obr. 2. Řez He-Ne laserem [5]

Nejznámější z plynových laserů je helium-neonový laser, který generuje jak červené, tak infračervené záření. Tvoří ho dlouhá skleněná trubice naplněná směsí neonu a helia, v níž se budí elektrický výboj na vysokém kmitočtu, nejčastěji pomocí vnějších elektrod. Konce trubice bývají zkoseny pod Brewsterovým úhlem a celá trubice je umístěna mezi zrcadly vnějšího rezonátoru. Jako aktivní plyn působí neon. Paprsek má vysokou stabilitu kmitočtu a malou rozbíhavost.

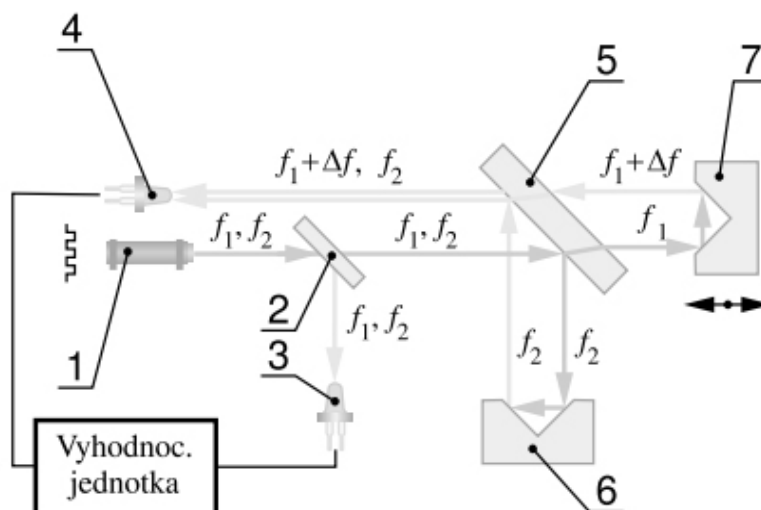
2 LASEROVÁ INTERFEROMETRIE

Princip laserové interferometrie je založen na interferenci světla. Interferometry, které se používají k měření délek se nazývají interferenční komparátory. K měření indexů lomu u plynů a kapalin se pak nazývají interferenční refraktometry. Interferenční spektroskopy se zase používají k určení jemné struktury spektrálních čar. Z interferenčních komparátorů je pro většinu měření nejvhodnější Michelsonův komparátor. Jeho princip popsal poprvé roku 1881 americký vědec Albert Abraham Michelson (1852-1931).

2.1 Princip Michelsonova interferometru

Zdrojem světla bývá většinou dvoufrekvenční plynový helium-neonový laser. Ten emituje světelné paprsky na dvou velmi blízkých frekvencích. Tyto dva paprsky jsou navzájem ortogonálně polarizované, což umožňuje jejich rozdělení pomocí polarizačního filtru. Tím dostaneme referenční a měřicí paprsek, svírající spolu pravý úhel. Referenční paprsky f_1 a f_2 dopadají na fotocitlivý prvek 3, měřicí paprsky pokračují na polopropustné zrcadlo 5. Zde se měřicí paprsky dělí na dvě části. Jedna část s frekvencí f_2 se odráží od koutového odražeče 6 a po odraze od polopropustného zrcadla 5 se vrací na fotocitlivý prvek 4. Druhá část s frekvencí f_1 prochází přes polopropustné zrcadlo a dopadá na koutový odražeč 7, který je upevněn na měřeném objektu. [3]

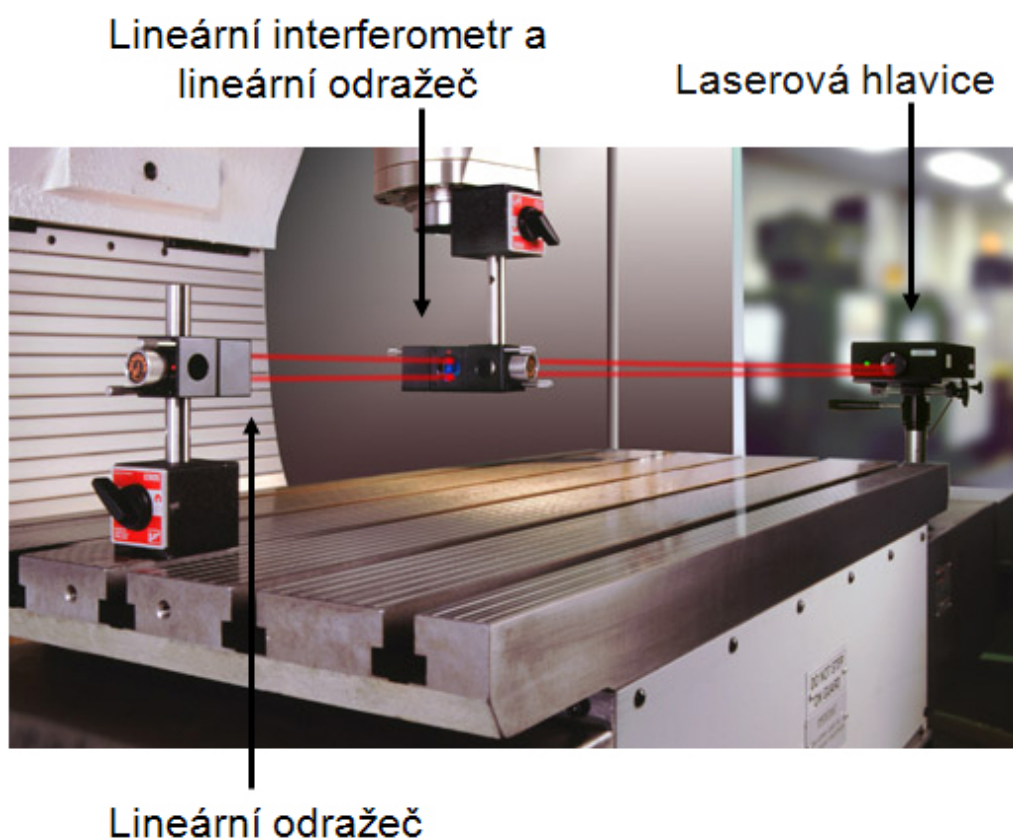
Přitom dochází k frekvenčnímu posuvu tohoto paprsku na hodnotu $f_1 + \Delta f$ a i tento paprsek dopadá na fotocitlivý prvek 4. Na výstupu vyhodnocovací jednotky vzniká výstupní signál, který je přímo úměrný změně frekvence Δf . [3]



Obr. 3. Schema laserového interferometru [3]

2.2 Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách

- Veškerá měření musí být provedena na nezátíženém stroji (tj. bez obrobku).
- Měření musí předcházet vhodný ohřívací postup (specifikovaný, resp. dohodnutý mezi dodavatelem a výrobcem).
- Stroj musí být naprogramován tak, aby se nastavovaná část pohybovala v dané ose (do řady zadaných poloh), v kterých vždy zůstane v klidu dostatečně dlouho, aby mohla být dosažená skutečná poloha změřena a zaznamenána.
- Stroj musí být naprogramován tak, aby se pohyb mezi zadanými polohami vykonával dohodnutou rychlostí. [6]

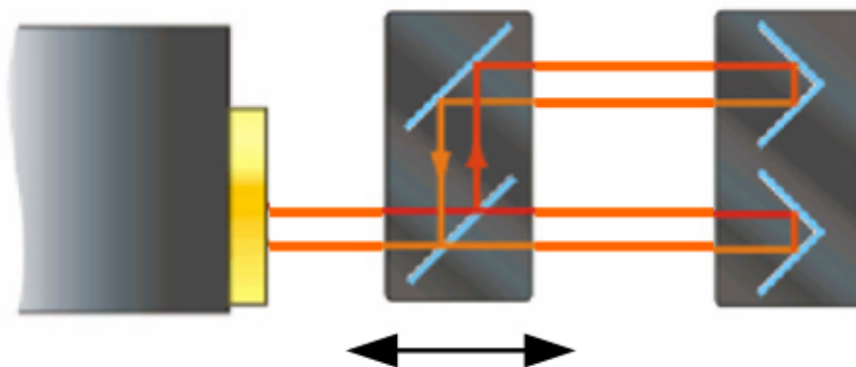


Obr. 4. Způsob rozmístění komponentů

2.3 Konfigurace lineárních měření pomocí laserového interferometru

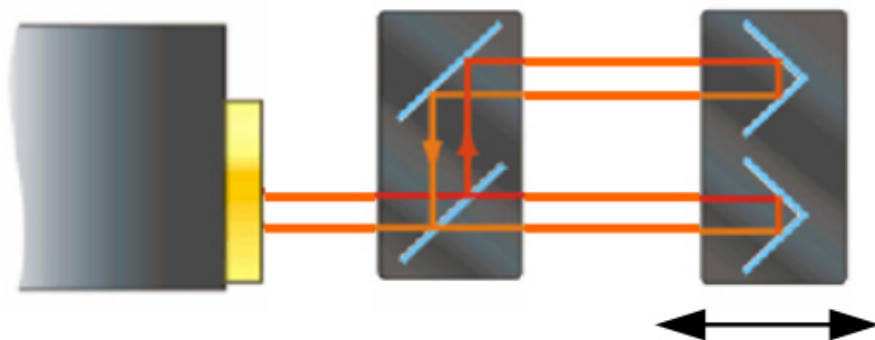
Při lineárních měřeních, kdy laserová hlava je umístěna ve směru osy měření rozeznáváme dvě základní konfigurace.

- Kinematický lineární dělič a stacionární odražeč



Obr. 5. Kinematický lineární dělič a stacionární odražeč

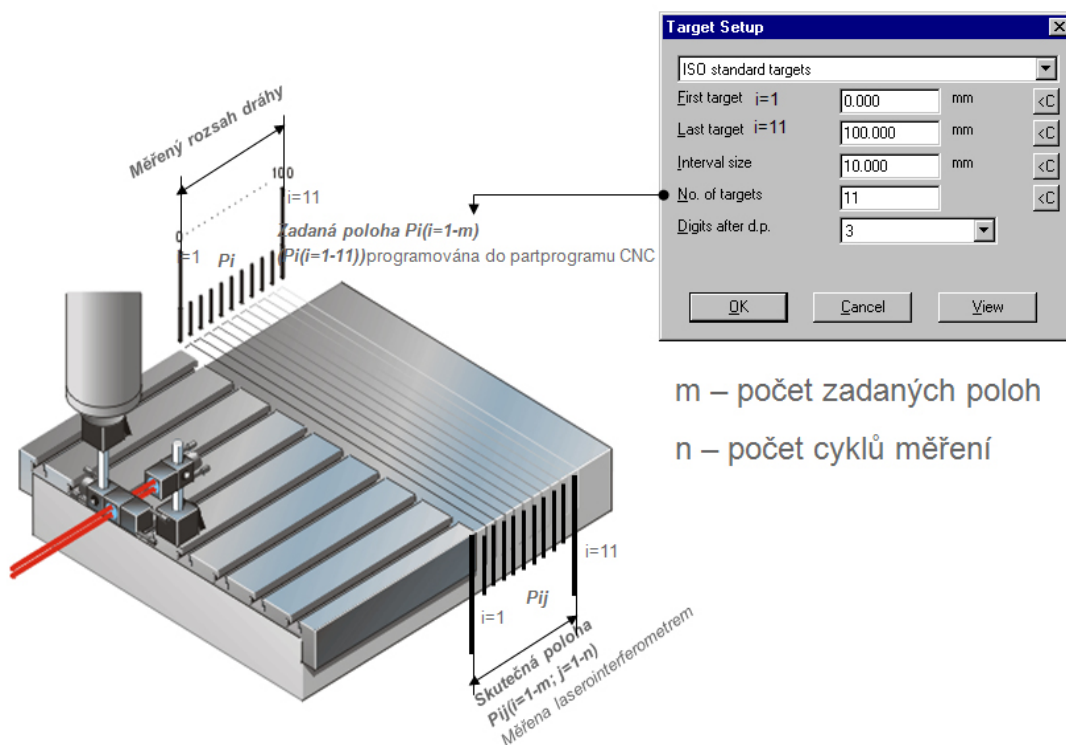
- Stacionární lineární dělič a kinematický odražeč



Obr. 6. Stacionární lineární dělič a kinematický odražeč

2.4 Princip měření

Kalibrováním osy měřeného zařízení rozumíme porovnávání poloh, které jsou naprogramovány (nastaveny) uživatelem, a poloh, které změříme laserinterferometrem. Z těchto hodnot se vytvoří kompenzační hodnota, která polohování zpřesňuje. Pomocí laserinterferometru lze také zjistit, zda měřený stroj pracuje v udávané rozlišitelnosti. Naměřené výsledky pomáhají v rozhodnutí, zda například provádět opravy vodících částí strojů z důvodu nadměrného opotřebení.



Obr. 7. Modelový případ měření (poloha 0-100mm, krok 10mm)

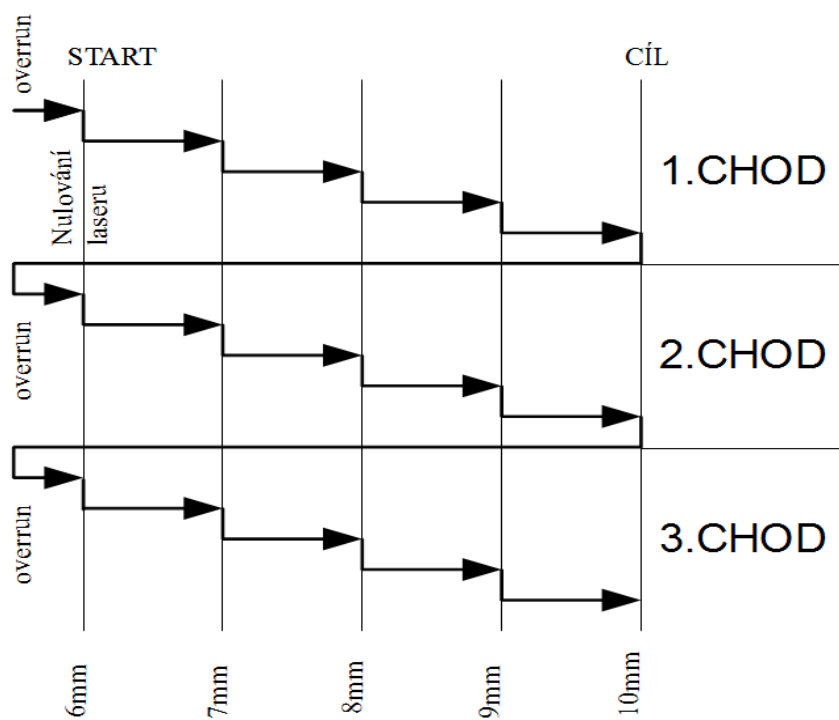
2.4.1 Typy lineárních měřících cyklů

Unidirekcionální (jednosměrné)

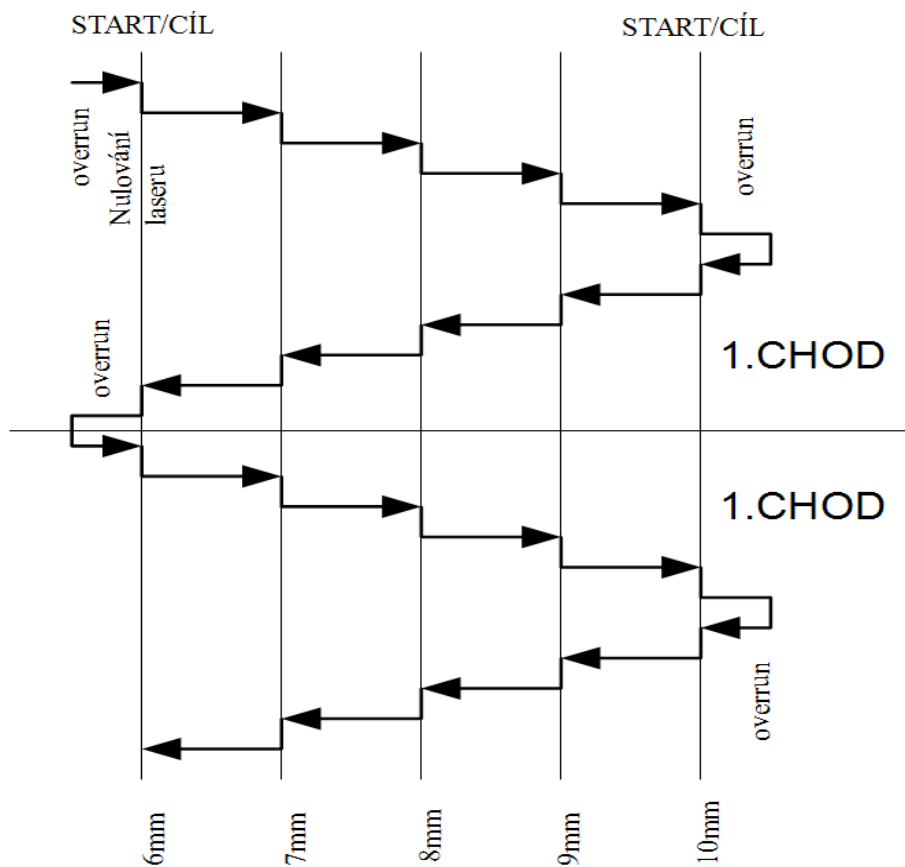
- jednochodý
- vícechodý

Bidirekcionální (obousměrné)

- jednochodý
- vícechodý



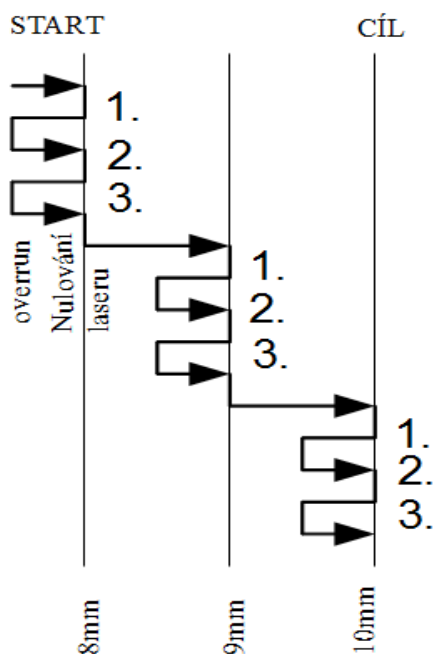
Obr. 8. Lineární trojchodý unidirekcionální cyklus



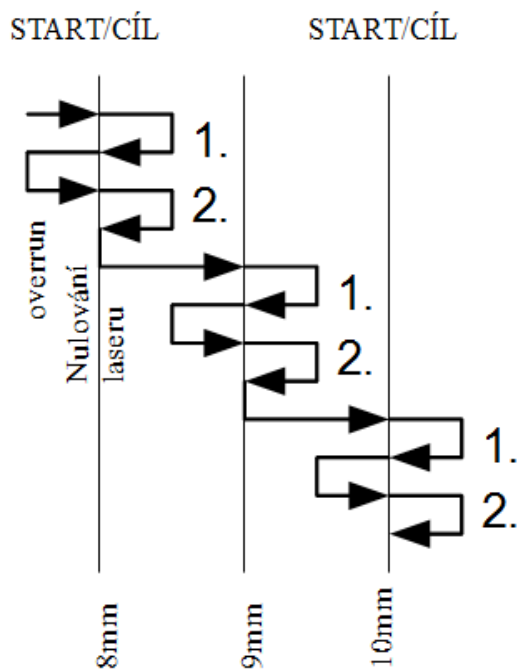
Obr. 9. Lineární dvojchodý bidirekcionální cyklus

2.4.2 Typy pendulárních (kyvadlových) měřících cyklů

Rozdělení měřících cyklů je stejné jako u lineárních měřících cyklů.



Obr. 10. Pendulární trojchodý unidirekcionální cyklus

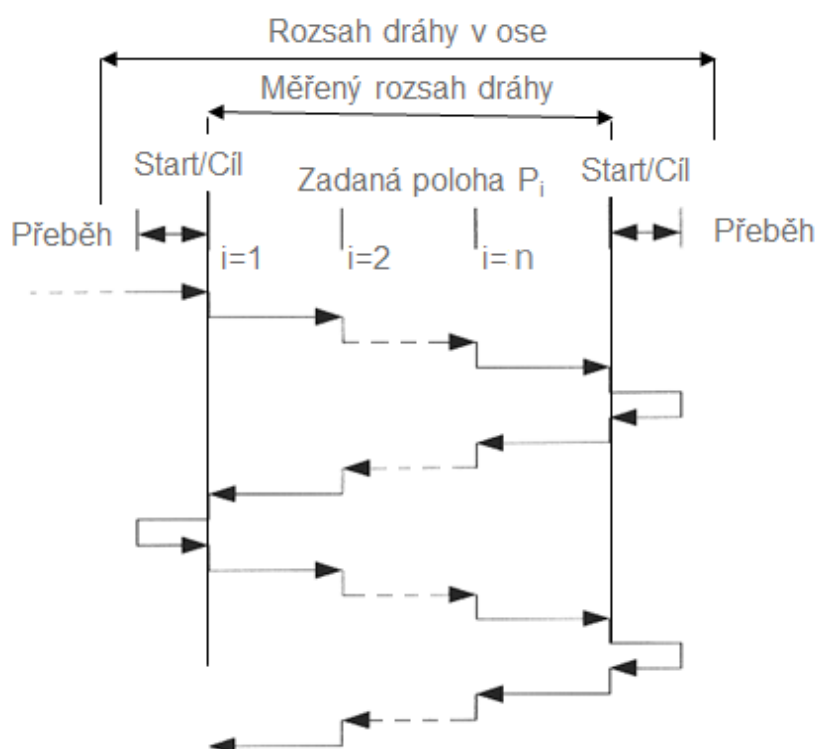


Obr. 11. Pendulární dvojchodý bidirekcionální cyklus

2.4.3 Základní definice dle ČSN ISO 230-2

Rozsah dráhy v ose – největší dráha lineární nebo úhlová, v jejímž rozsahu se může pohyblivá část pomocí číslicového řízení přestavovat. [2]

Měřený rozsah dráhy – část rozsahu dráhy, která je použita pro měření. Je zvolena tak, aby jak do první, tak do poslední zadané polohy bylo možné najet z obou stran. [2]



Obr. 12. Dvojchodý lineární bidirekcionální cyklus

Zadaná poloha P_i ($i=1-m$) – poloha, do které je naprogramován pohyb nastavované části. Index i udává jednu určitou polohu ze všech zadaných poloh v dané ose. [2]

Skutečná poloha P_{ij} ($i=1-m; j=1-n$) – měřená poloha dosažená nastavovanou částí při j -tém nastavení do i -té zadané polohy. [2]

Úchylka polohy; polohová úchylka x_{ij} – rozdíl mezi skutečnou polohou, dosaženou nastavovanou částí a zadanou polohou. ($x_{ij}=P_{ij}-P_i$). [2]

Jednostranný (unidirekcionální) – výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykoná vždy ve stejném smyslu pohybu. Symbol

↑ značí, že se jedná o parametr odvozený z měření při nastavování polohy v kladném smyslu, symbol ↓ značí, že se jedná o parametr odvozený z měření při nastavování polohy v záporném smyslu, např. $x_{ij} \uparrow$, nebo $x_{ij} \downarrow$. [2]

Dvoustranný (bidirekcionální) – výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykoná v obou směrech pohybu. [2]

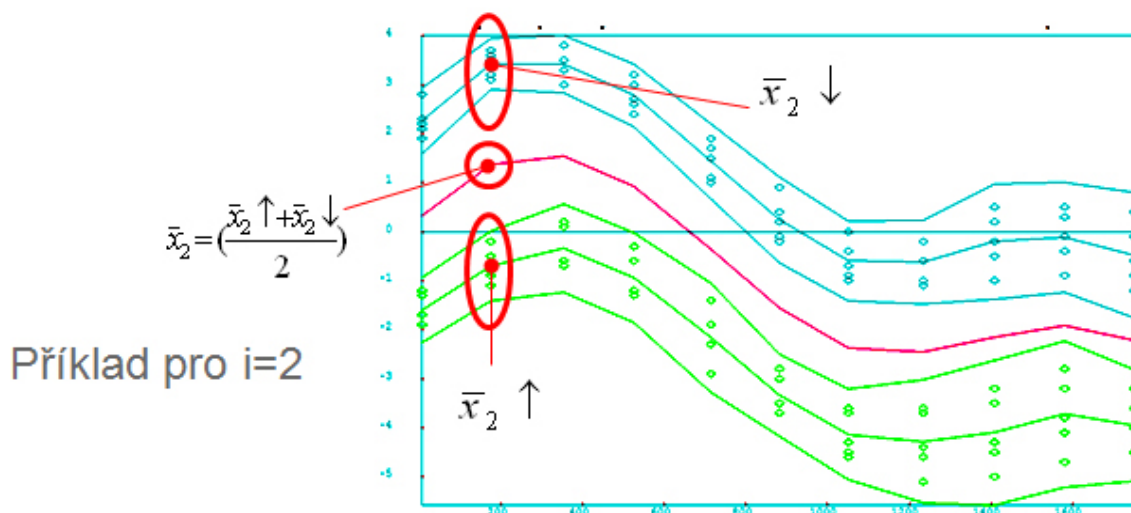
Průměrná jednostranná polohová úchylna v poloze $\bar{x}_i \uparrow$, nebo $\bar{x}_i \downarrow$ - aritmetický průměr polohových úchylek zjištěných při sérii n najetí do polohy P_i v jednom směru. [2]

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

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (2)$$

Průměrná dvoustranná polohová úchylna v poloze \bar{x}_i - aritmetický průměr průměrných jednostranných polohových úchylek $\bar{x}_i \uparrow$, nebo $\bar{x}_i \downarrow$ zjištěných při najíždění do polohy P_i v obou směrech. [2]

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (3)$$



Obr. 13. Diagram průměrných polohových úchylek

Odhad jednostranné standartní nejistoty nastavení v poloze $s_i \uparrow$ nebo $s_i \downarrow$ - odhad standartní nejistoty polohových úchylek zjištěných při sérii n najetí do polohy P_i v jednom smyslu. [2]

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \quad (4)$$

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2} \quad (5)$$

Hranice úchylek – pro každou zadanou hodnotu P_i a pro n (dle ČSN ISO 230-2 je $n=5$) nastavení poloh v každém smyslu se určí hranice úchylek. [2]

$$\bar{x}_i \uparrow \pm 2s_i \uparrow \quad (6)$$

$$\bar{x}_i \downarrow \pm 2s_i \downarrow \quad (7)$$

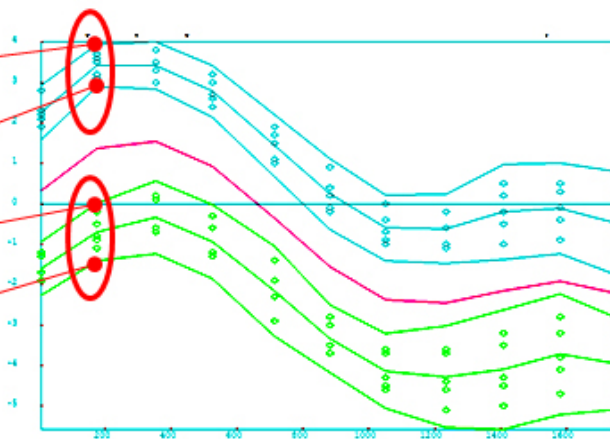
Příklad pro $i=2$

$$\bar{x}_2 \downarrow + 2s_2 \downarrow$$

$$\bar{x}_2 \downarrow - 2s_2 \downarrow$$

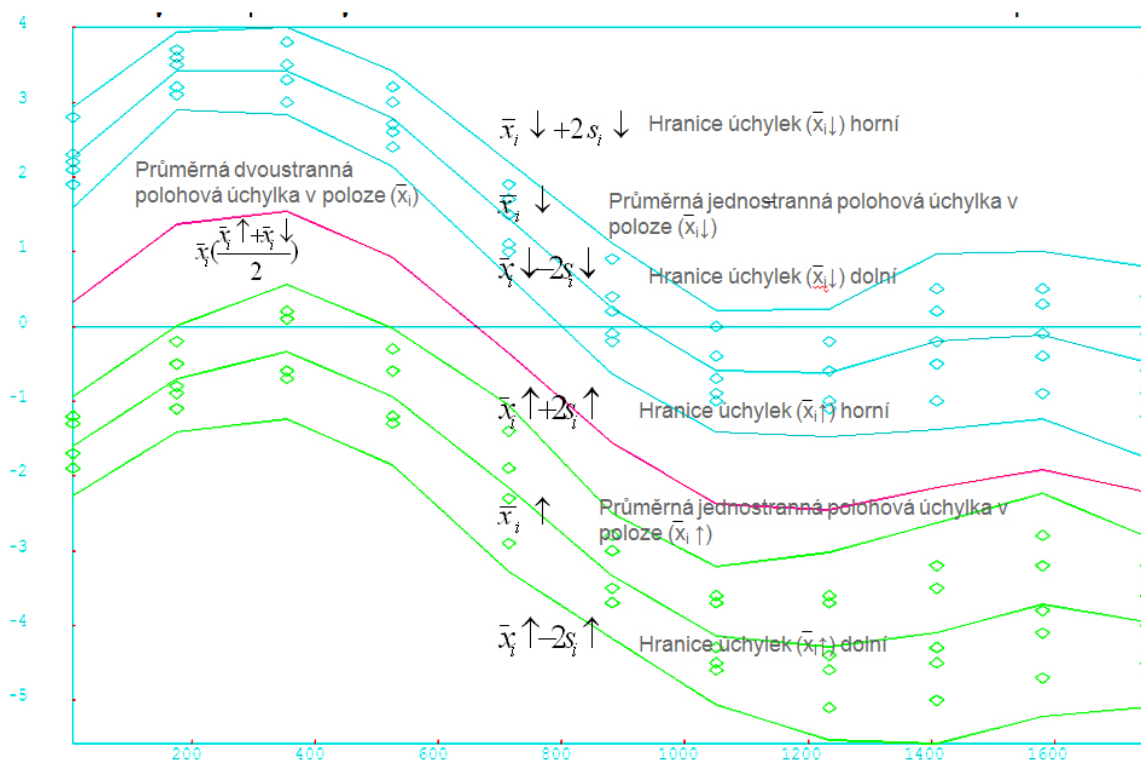
$$\bar{x}_2 \uparrow + 2s_2 \uparrow$$

$$\bar{x}_2 \uparrow - 2s_2 \uparrow$$



Obr. 14. Diagram hranic úchylek

Dvoustranná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy



Obr. 15. Diagram průměrných polohových úchylek a jejich hranic

Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_{i\uparrow}$, nebo $R_{i\downarrow}$ - rozsah odvozený z rozšířené nejistoty jednostranných polohových úchylek v poloze při použití koeficientu rozšíření 2. [2]

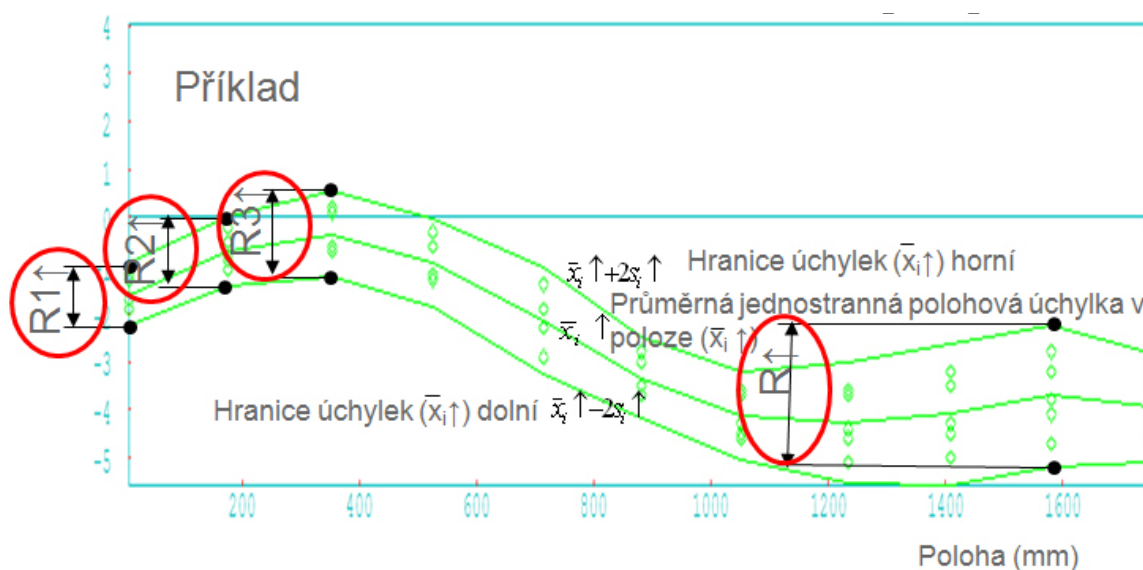
$$R_{i\uparrow} = 4s_{i\uparrow} \quad (8)$$

$$R_{i\downarrow} = 4s_{i\downarrow} \quad (9)$$

Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R_{\uparrow} , nebo R_{\downarrow} - největší hodnota z opakovatelnosti nastavení polohy v kterékoliv poloze P_i v dané ose. [2]

$$R_{\uparrow} = \max[R_{i\uparrow}] \quad (10)$$

$$R_{\downarrow} = \max[R_{i\downarrow}] \quad (11)$$



Obr. 16. Diagram jednostranné opakovatelnosti nastavení v ose

Jednostranná systematická polohová úchylka v ose $E \uparrow$ nebo $E \downarrow$ - rozdíl mezi největší a nejmenší aritmetickou hodnotou průměrných jednostranných polohových úchylek při nastavování polohy v jednom smyslu, které byly zjištěny v kterékoliv poloze v dané ose. [2]

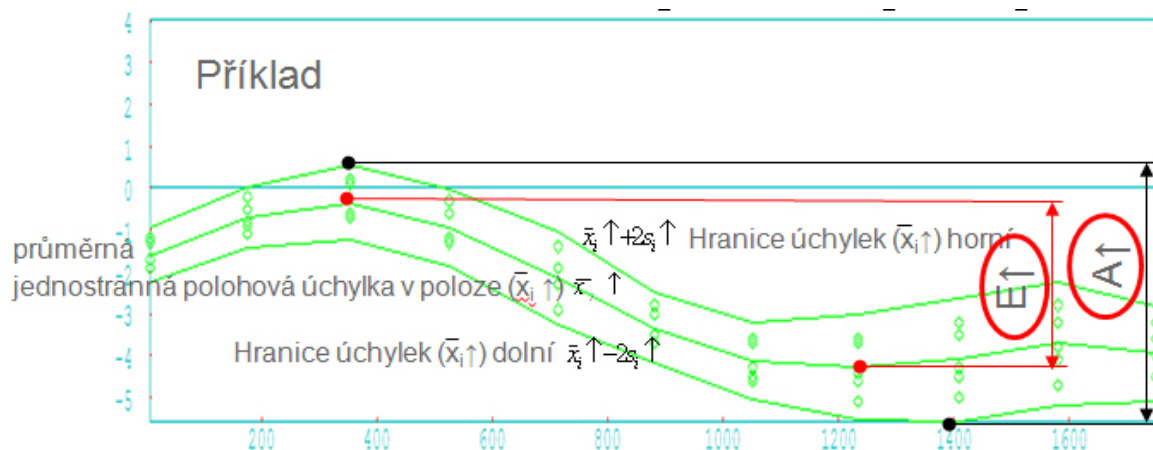
$$E \uparrow = \max[\bar{x}_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow] \quad (12)$$

$$E \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow] \quad (13)$$

Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose $A \uparrow$ nebo $A \downarrow$ - rozsah odvozený ze spojení jednostranných systematických úchylek a odhadu standardní nejistoty při jednostranném nastavování polohy při použití koeficientu 2. [2]

$$A \uparrow = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \quad (14)$$

$$A \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (15)$$



Obr. 17. Diagram jednostranné systematické polohové úchylky v ose E↑ a jednostranné přesnosti nasatvení polohy v ose A↑

Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze

$$R_i = [2s_{i \uparrow} + 2s_{i \downarrow} + |B_i|] \tag{16}$$

Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R

$$R = \max [R_i] \tag{17}$$

Necitlivost v poloze B_i – rozdíl mezi průměrnými jednostrannými polohovými úchylkami zjištěnými při najíždění do polohy P_i v obou směrech. [2]

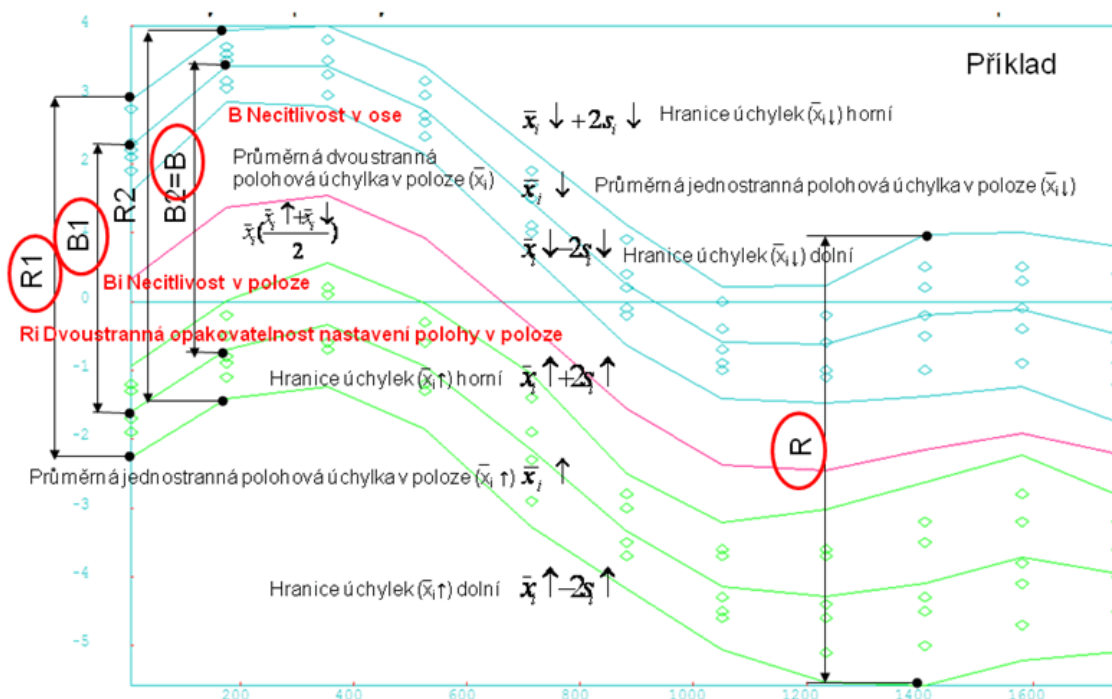
$$B_i = \bar{x}_{i \uparrow} - \bar{x}_{i \downarrow} \tag{18}$$

Necitlivost v ose B – největší z absolutních hodnot necitlivostí $|B_i|$ ze všech zadaných poloh v dané ose. [2]

$$B = \max [|B_i|] \tag{19}$$

Průměrná necitlivost v ose B – aritmetický průměr necitlivostí B_i ze všech zadaných poloh v dané ose. [2]

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m B_i \tag{20}$$



Obr. 18. Diagram necitlivostí v ose/poloze, hranic úchylek a opakovatelnosti nastavení polohy v poloze

Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose M – rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných dvoustranných polohových úchylek, které byly zjištěny v kterékoliv poloze P_i v dané ose. [2]

$$M = \max[\bar{x}_i] - \min[\bar{x}_i] \quad (21)$$

Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose E – rozdíl mezi největší a nejmenší aritmetickou hodnotou průměrných jednostranných polohových úchylek při nastavování polohy v obou smyslech, které byly zjištěny v kterékoliv poloze v dané ose. [2]

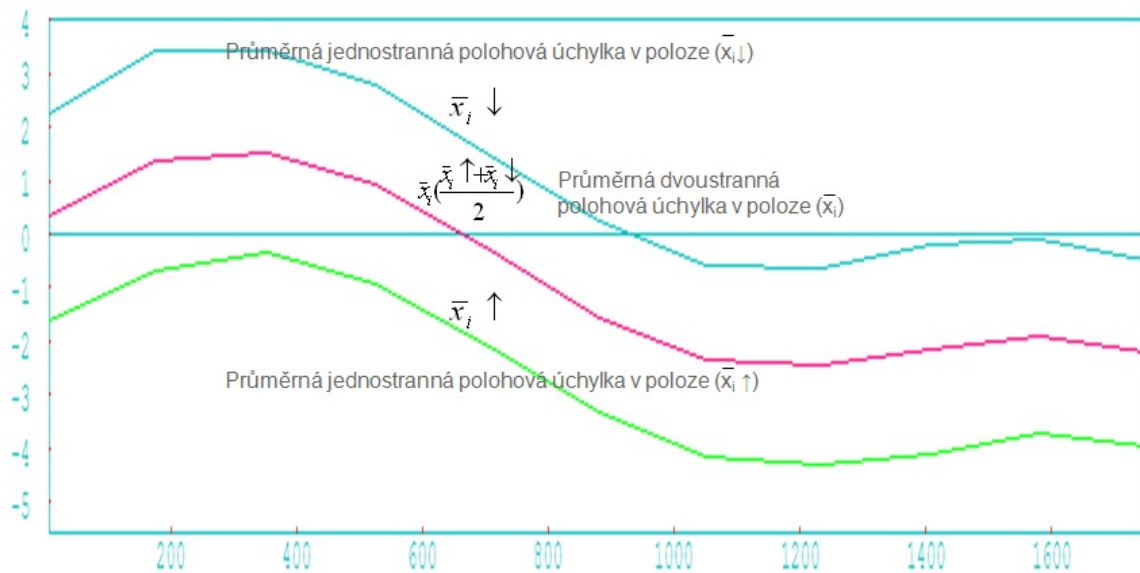
$$E = \max[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (22)$$

Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose A – rozsah odvozený ze spojení dvoustranných systematických úchylek a odhadu standardní nejistoty při dvoustranném nastavování polohy při použití koeficientu rozšíření 2. [2]

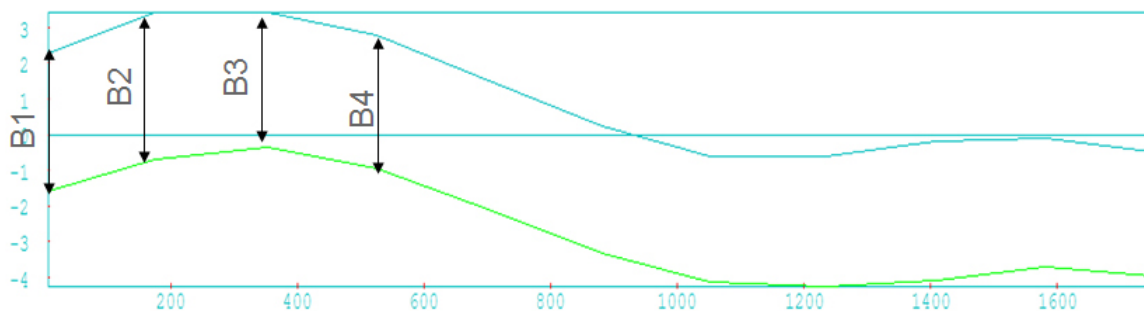
$$A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (23)$$



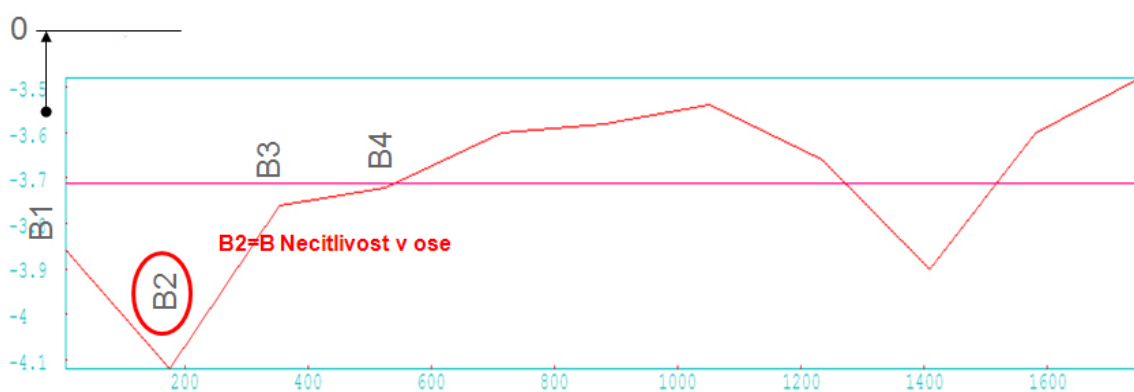
Obr. 19. Diagram průměrné dvostranné polohové úchylky v ose, dvostranné přesnosti nastavení polohy v ose a dvostranné systematické polohové úchylky v ose



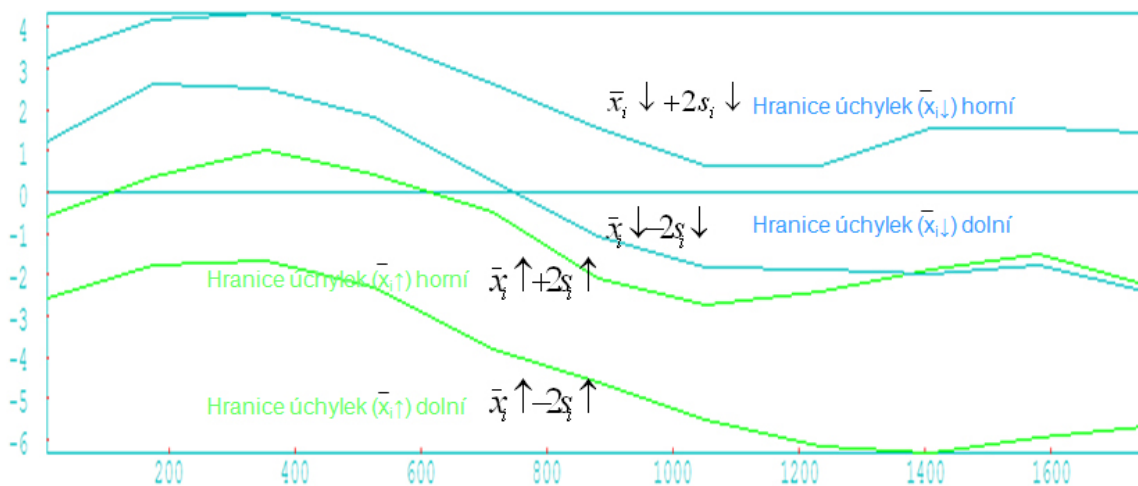
Obr. 20. Diagram průměrných jednostranných polohových úchylek v poloze a průměrné dvostranné polohové úchylky v poloze



Obr. 21. Diagram necitlivostí v poloze B_i

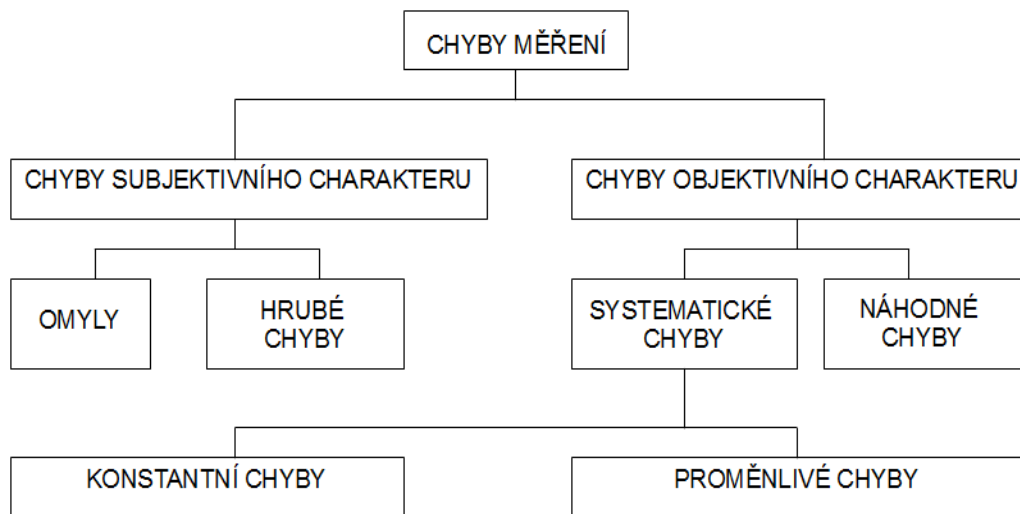


Obr. 22. Diagram necitlivostí v ose B_i - všechny hodnoty jsou vztahy k nulové ose



Obr. 23. Diagram opakovatelnosti nastavení polohy v obou směrech pohybu

3 CHYBY VZNIKAJÍCÍ BĚHEM MĚŘENÍ



Obr. 24. Klasifikace chyb měření

3.1 Absolutní chyba měření

Je to rozdíl mezi výsledkem měření a (konvenčně) pravou hodnotou měřené veličiny. Protože v praxi není možné pravou hodnotu měřené veličiny získat, nahrazujeme ji tzv. konvenčně pravou hodnotou, která se blíží pravé hodnotě s dostatečnou přesností. Konvenčně pravá hodnota se získá pomocí metod měření, které jsou řádově 3 až 10 krát přesnější. [7]

$$\Delta = x_m - x_p \quad (24)$$

Kde: x_m – změřená hodnota měřené veličiny,
 x_p – je (konvenčně) pravá hodnota měřené veličiny.

3.2 Relativní chyba měření

Je to vyjádření absolutní chyby měření v procentech.

$$\Delta_r = \frac{x_m - x_p}{x_p} \cdot 100 \quad (25)$$

3.3 Náhodná chyba

Je to výsledek měření mínus střední hodnota, která vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny uskutečněné za podmínek opakovatelnosti. V praxi lze provést pouze odhad náhodné chyby. [7]

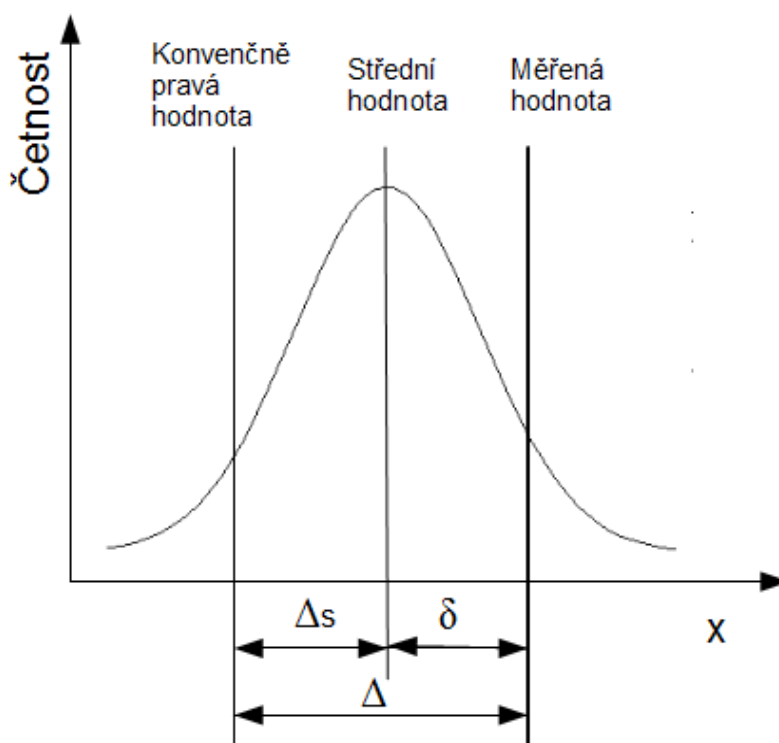
3.4 Systematická chyba

Je to střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny, uskutečněných za podmínek opakovatelnosti, od které se odečte pravá hodnota měřené veličiny. [7]

$$\Delta = \Delta_s + \delta \quad (26)$$

Kde: Δ_s – systematická chyba,

δ – náhodná chyba.



Obr. 25. Chyba měření

3.5 Vliv prostředí na interferometrická měření

Vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu závisí na indexu lomu vzduchu. Index lomu vzduchu je funkcí teploty vzduchu, tlaku, vlhkosti a složení vzduchu (CO₂ a další příměsy mají také malý vliv). [6]

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (27)$$

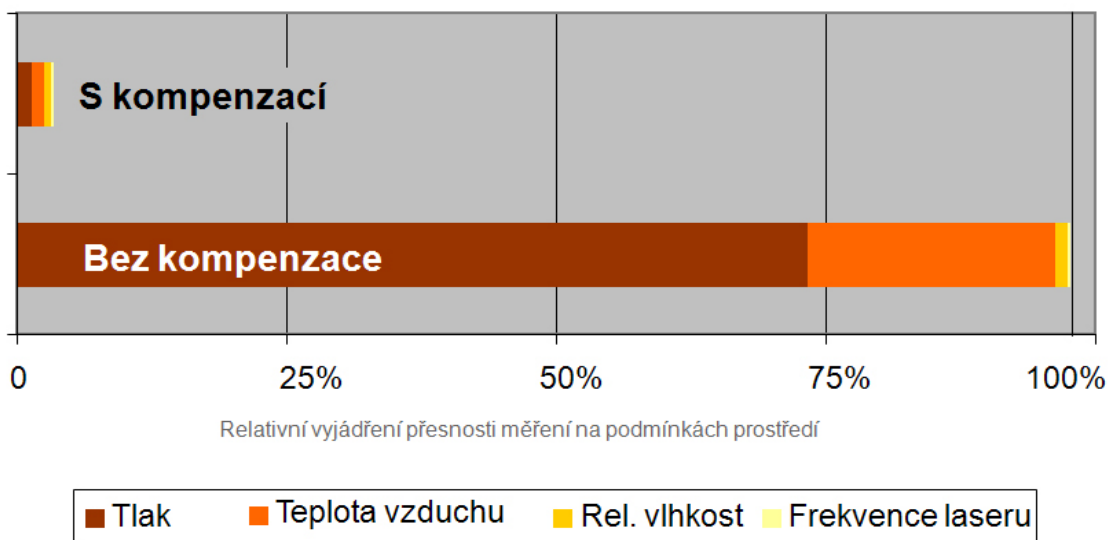
Kde: λ – vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu

λ_0 – vlnová délka laserového paprsku ve vákuu

n - index lomu vzduchu

Nejistotu měření ovlivňuje také znečištění optické cesty mezi laserem, interferometrem a lineárním odražečem a dále skutečná teplota měřeného předmětu. Má-li interferometrické měření prováděné ve vzduchu poskytnout odpovídající výsledky, je nezbytné kompenzovat změnu indexu lomu vzduchu: [6]

- pomocí přidavné kompenzační jednotky, buď v manuálním nebo automatickém režimu
- měřením v laboratořích s definovaným prostředím



Obr. 26. Měření s/bez kompenzace [11]

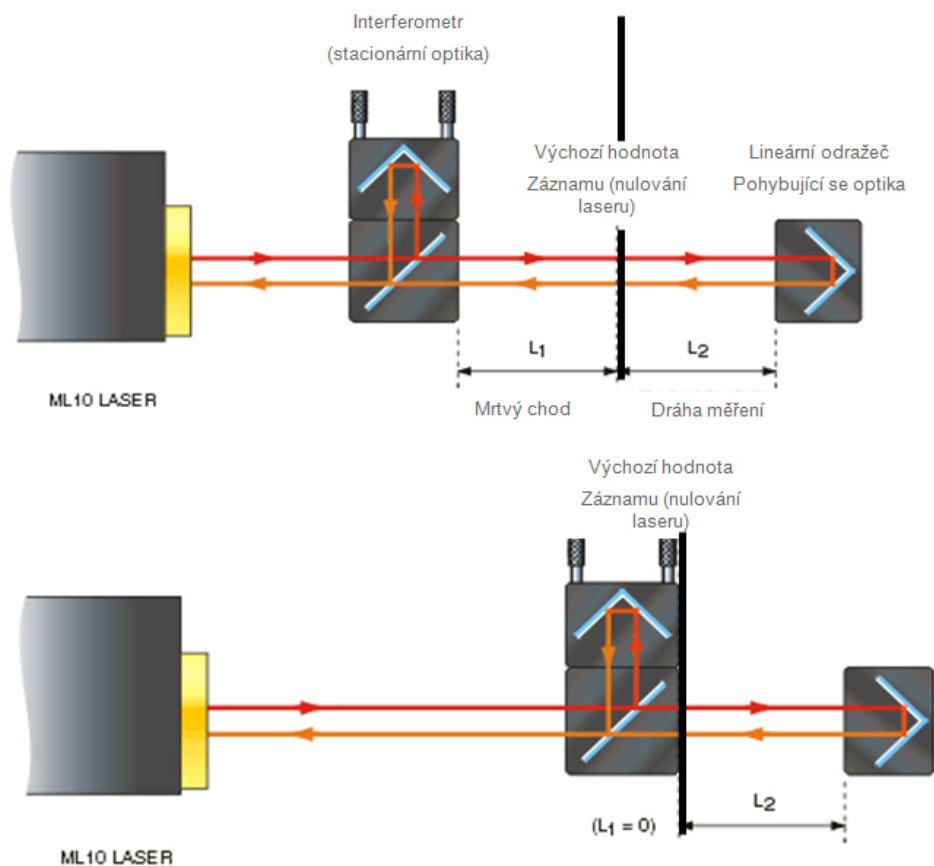
3.6 Chyby vznikající nevhodným seřizováním laser interferometru

Při délkových měřeních laser interferometrem mohou v důsledku jeho seřizování vzniknout tři druhy chyb.

3.6.1 Chyba vznikající tzv. Mrtvou dráhou

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

Chyba mrtvé dráhy u laserového měření vzdálenosti L_2 je závislá na vzdálenosti mezi dvěma optickými prvky při nulování systému. Pokud nedochází k pohybu mezi interferometrem a reflektorem, a mění se podmínky prostředí v okolí laserového paprsku, pak se vlnová délka ve vzduchu bude měnit podél celé dráhy (L_1+L_2) , ale laserový měřicí systém ji bude kompenzovat pouze podél dráhy L_2 . Tím chyba mrtvé dráhy zavedena do paprsku na dráze L_1 nebude kompenzována. [6]

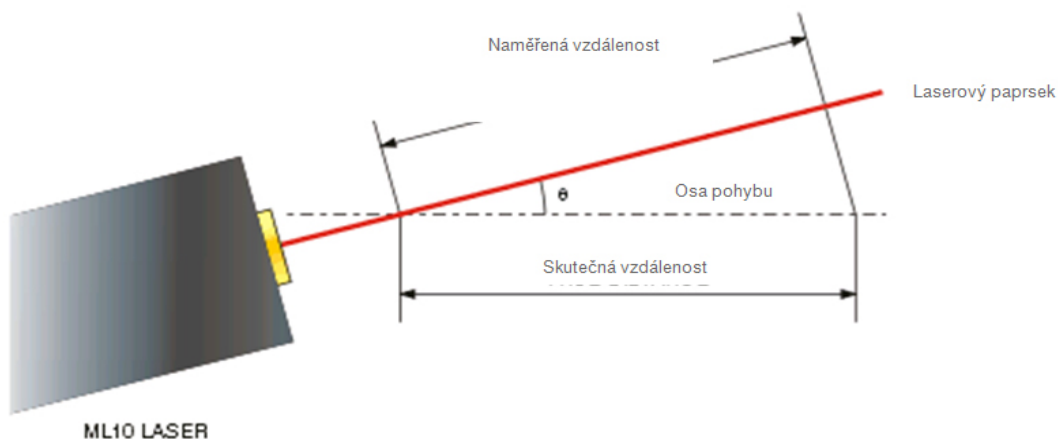


Obr. 27. Chyba vznikající tzv. Mrtvou dráhou

Tato chyba bude ovšem zanedbatelná, pokud se stacionární a pohyblivá optika dotýkají v době, kdy se provádí nulování.

3.6.2 Cosinová chyba

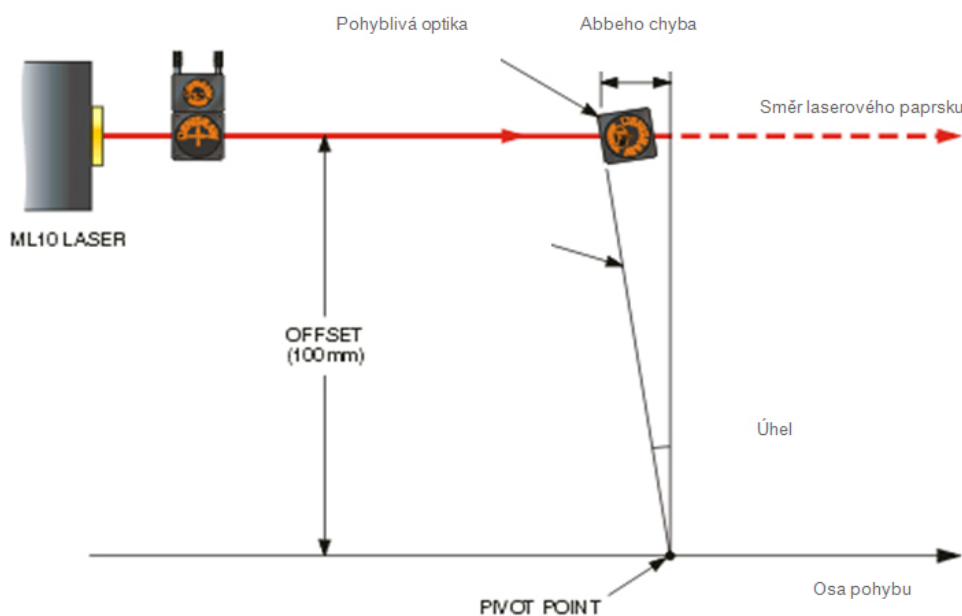
Cosinová chyba vzniká špatným nastavením směru laserového paprsku. Odklonem o určitý úhel od osy měření, která znamená skutečnou vzdálenost, dochází k nežádoucí odchylce. Jedná se o chybu 2. řádu.



Obr. 28. Cosinová chyba

3.6.3 Chyba způsobena nedodržením tzv. „Abbeho principu“

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



Obr. 29. Chyba způsobená nedodržením tzv. „Abbeho principu“

4 NEJISTOTA MĚŘENÍ

Nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině. Ke každé naměřené hodnotě se musí uvádět nejistota měření. [6]

4.1 Standartní nejistota Typu A

Je způsobena chybami náhodnými a příčiny jsou neznámé. Řídí se normálním rozdělením. Nejistota se zmenšuje s počtem měření. Značí se „ u_A “. [6]

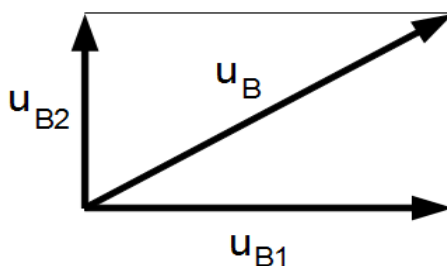
4.2 Standartní nejistota Typu B

Je způsobena známými a odhalitelnými příčinami vzniku, stanovuje se nestatisticky. Jsou známy dva druhy: [6]

- u_{B1} – chyba měřidla,
- u_{B2} – chyba metrologa.

Pro výpočet výsledné Standartní nejistoty Typu B se používá vektorový součet jednotlivých chyb měření. Značí se „ u_B “. [6]

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad (28)$$



Obr. 30. Vektorový součet nejistoty Typu B

4.2.1 Standartní nejistota Typu B – chyba měřidla

Je dána typem měřidla a jeho rozlišitelností.

$$u_{B1} = \frac{z_j}{k} \quad (29)$$

Kde: z_j - rozlišitelnost měřidla
 k – koeficient pro rovnoměrné rozdělení $k = \sqrt{3}$.

4.2.2 Standartní nejistota Typu B – chyba metrologa

Je dána zkušeností, kvalifikací a odhadem metrologa.

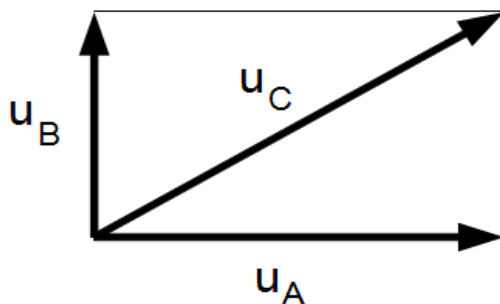
$$u_{B2} = \frac{z_m}{k} \quad (30)$$

Kde: z_m – chyba metrologa
 k – koeficient pro rovnoměrné rozdělení $k = \sqrt{3}$.

4.3 Kombinovaná standartní nejistota

Je dána vektorovým součtem nejistoty Typu A a Typu B. Značí se „ u_C “. [6]

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (31)$$



Obr. 31. Vektorový součet kombinované nejistoty

4.4 Rozšířená standartní nejistota

Vypočítá se vynásobením Kombinované standartní nejistoty a koeficientu k_t , který se volí v intervalu 1 až 3, podle požadované nejistoty. [6]

$$u_D = k_t \cdot u_C \quad (32)$$

Kde: u_D – rozšířená standartní nejistota

k_t – rozšiřující koeficient

u_C – kombinovaná standartní nejistota

Tab. 1 Tabulka pravděpodobnosti [6]

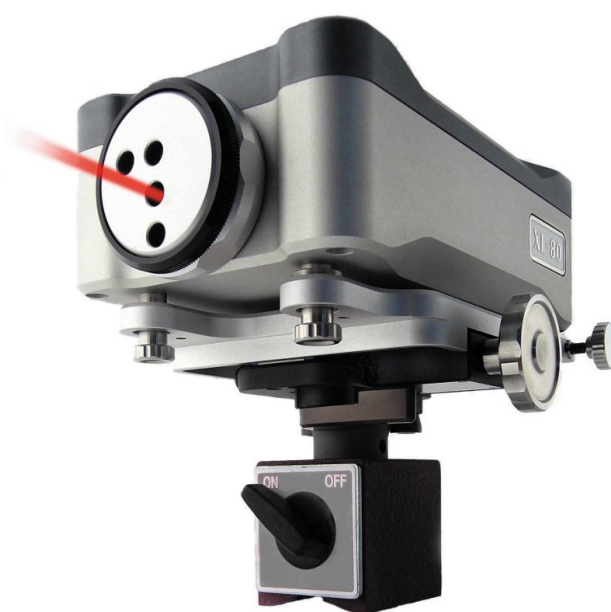
Pravděpodobnost	k_t
68,27%	1
95,00%	1,96
95,40%	2
99,00%	2,58
99,73%	3

4.5 Laser XL-80

Laser XL-80 vytváří stabilní svazek laserového záření s vlnovou délkou odpovídající národním a mezinárodním normám.

Stabilita frekvence vyzařované vlnové délky je $\pm 0,05$ ppm za 1 rok a $\pm 0,02$ za 1 hodinu. Těchto hodnot je dosaženo dynamickou teplotní stabilizací délky laserové trubice v řádu několika málo nanometrů.

Zaručená přesnost lineárního měření je ± 5 $\mu\text{m}/\text{m}$ v celém rozsahu podmínek prostředí, tj. při teplotě 0 °C až 40 °C a tlaku 650 mbar až 1150 mbar. Systém čte hodnoty s frekvencí 50 kHz i při maximální rychlosti lineárního měření 4 m/s. Dosahovaná lineární rozlišitelnost 1 nm je zachována v celém rozsahu rychlostí měření (platí při použití kompenzační jednotky XC-80). [11]



Obr. 32. Laser XL-80 [11]

Laser XL-80 má zabudovaný USB port a nepotřebuje tedy samostatný interface laser – PC. Laserová hlavice je standartně vybavena konektorem s výstupem pomocného analogového signálu. Z výroby je možno nastavit i výstup obdélníkového signálu. Také je možno připojit signál pro synchronizaci měření dat.

Signalizační LED diody ukazují stav stabilizace laseru a sílu signálu. Tyto diody také slouží jako podpora softwarových informačních návěstí. Díky uvedenému vybavení, době stabilizace kratší než 6 minut a možnosti přepnutí do režimu velkého rozsahu (40 - 80 m) se systém XL-80 snadno a rychle používá. [11]

4.6 Příslušenství laserového systému

- Kompenzační jednotka XC-80 (není součástí vybavení laboratoře)
- Měřicí optika s příslušenstvím
- Stativ a stolek
- Převážný kufr

4.6.1 Kompenzační jednotka XC-80

Kompenzátor pomocí „inteligentních snímačů“, které umí zpracovat naměřenou hodnotu, měří velmi přesně teplotu vzduchu, tlak vzduchu a relativní vlhkost.

Na základě zjištěných údajů upravuje vlnovou délku laseru tak, aby do výpočtů stále vstupovala její správná hodnota, čímž prakticky eliminuje jakékoliv chyby měření vyplývající ze změn podmínek prostředí.

Stejně jako laser XL-80 je i kompenzátor připojen přímo k PC prostřednictvím USB portu, který také zajišťuje napájení kompenzatoru XC-80. [11]



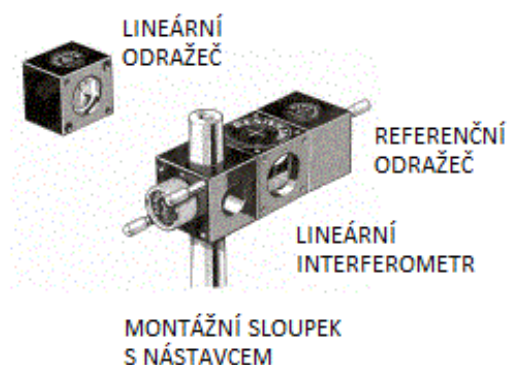
Obr. 33. Kompenzační jednotka XC-80 včetně snímačů [11]

4.6.2 Měřicí optika s montáží

Hlavní části optiky pro lineární měření jsou:

- Dělič paprsku,
- Dva odražeče paprsků,
- Dvě zaměřovací krytky pro lepší nastavování paprsků.

Pokud zkombinujeme dělič paprsku a lineární odražeč, dostaneme lineární interferometr. Kostky optiky je vyrobeny z lehké slitiny hliníku, který redukuje chvění stroje a vliv teploty na materiál. Dle potřeby je lze různě kombinovat, vzájemné spojení zajišťují šrouby.



Obr. 34. Sestavená měřicí optika [8]

Měřicí optiku je nutné na měřený přístroj připevnit. K tomu slouží univerzální sada příslušenství obsahující potřebné komponenty. Využívají se především magnetické držáky, montážní sloupky, pomocné upínací kostky apod.



Obr. 35. Příslušenství měřicí optiky [8]

4.6.3 Technické příslušenství laserového systému

Součástí laserového systému XL je i stolek na stativu usnadňující manipulaci se zařízením. Stolek stativu XL umožňuje přesné pootočení a posun laserové jednotky XL-80 při ustavování a je navržen tak, aby mohl být připevněn k laserové jednotce pro rychlé uložení i rozbalení systému.



Obr. 36. Stativ a stolek pro XC-80 [11]

Upínací mechanismus stolku umožňuje rychlé a bezpečné upevnění na stativ. V aplikacích, kdy nevyhovuje instalace na stativ, např. při montáži přímo na stůl obráběcího stroje, lze stolek s laserem také uchytit na většinu standartních magnetických držáků pomocí adaptéru se závitem M8. Laserový systém XL-80 je navržen tak, aby bylo zařízení maximálně mobilní a metrolog měl všechny potřebné komponenty v dosahu. Proto je vybavení potřebné pro měření přenášeno ve speciálním, nárazuvzdorném kufru.



Obr. 37. Přenosný kufr laserového systému [11]

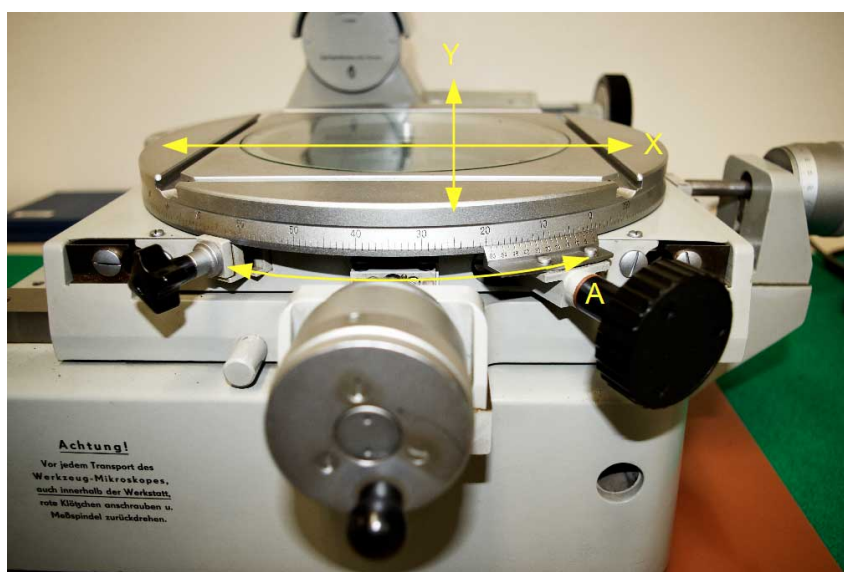
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 DÍLENSKÝ MIKROSKOP ZEISS

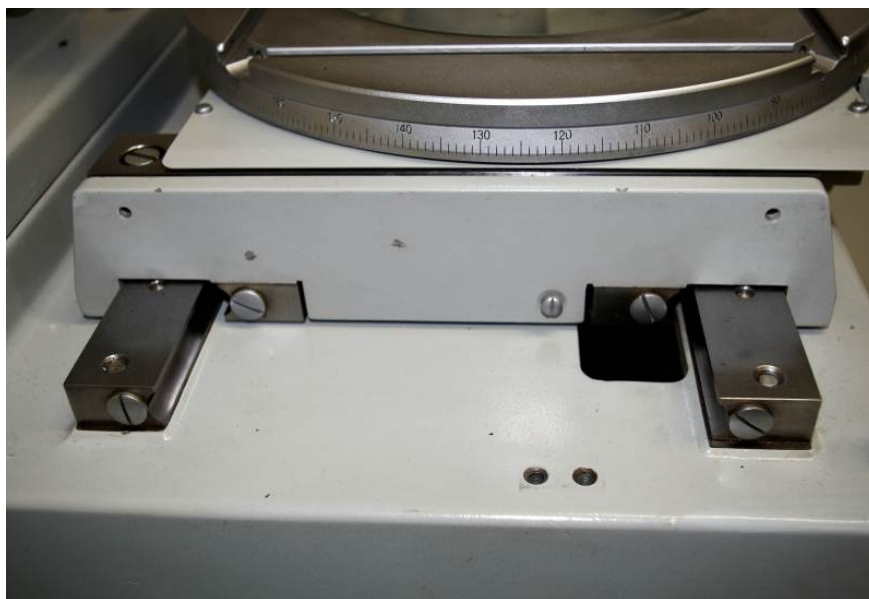


Obr. 38. Měřené zařízení - dílenský mikroskop
Zeiss

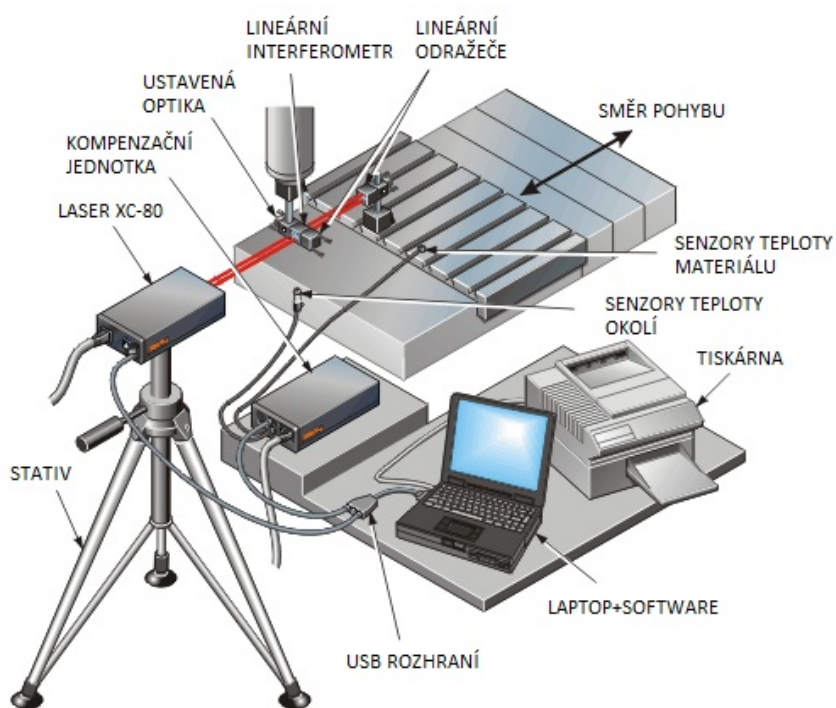
Stolem mikroskopu je možné ve vodorovném směru vykonávat lineární posuv v osách X, Y a rotační pohyb A. Jedním z cílů diplomové práce je pomocí laserinterferometru zkontrolovat lineární polohování os X a Y. Stůl se pohybuje pomocí vodících šroubů na vodících lištách. Odečítání hodnot posunutí je realizováno mikrometrickými hlavicemi s udávanou přesností 0,01 mm.



Obr. 39. Definování os na mikroskopu



Obr. 40. Vodící prvky polohování mikroskopu



Obr. 41. Rozmístění komponent pro měření-schema [8]

5.1 Seřízení měřicí soustavy

Celá soustava složená z měřeného a měřícího zařízení musí být v rovině, aby nedocházelo k nežádoucím chybám měření. Proto jako první ustavíme soustavu do vodorovné polohy. To je zajištěno libelami, které ukazují odklon od správné polohy. Na mikroskopu se navíc nachází vestavěná libela, tzv. „býčí oko“. Mikroskop stojí na třech stavitelných šroubech s šestihranou hlavou, takže k seřízení do vodorovné polohy stačí pouze montážní klíč.



Obr. 42. Vestavěná libela na mikroskopu, tzv. "Býčí oko"



Obr. 43. Stavitelný šroub podstavy mikroskopu

Ustavení laserového interferometru do vodorovné polohy je provedeno pomocí stavitelných noh stativu. Kontrola odchýlení je zajištěna dvěma libelami.



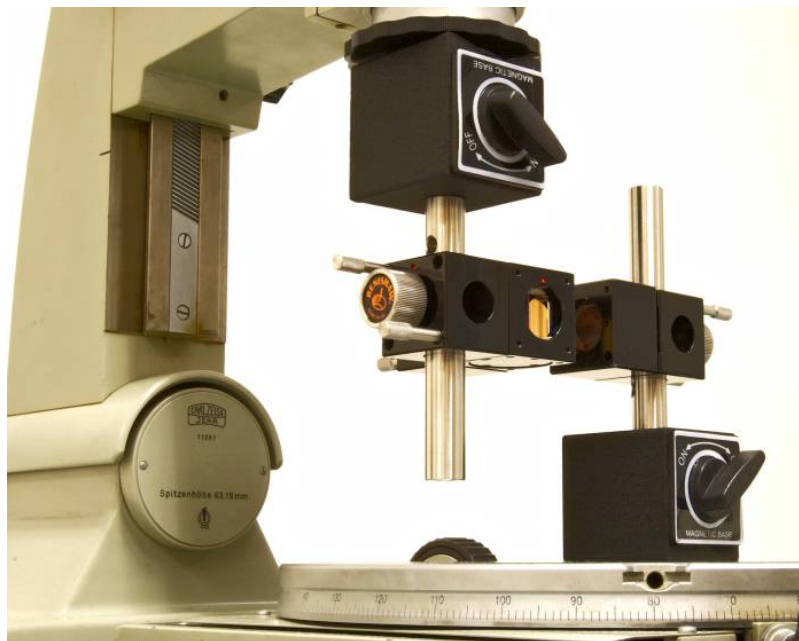
Obr. 44. Ustavení laserového interferometru do roviny

5.2 Princip měření polohování mikroskopu

Soustava optických členů, která má za úkol směřování laserových paprsků do jednotlivých směrů se dělí na část stacionární (nepohyblivou) a část kinematickou (pohyblivou). Stacionární část je upnutá zesponu na tubus mikroskopu pomocí magnetického držáku. Skládá se z děliče paprsků a referenčního odražeče, které jako celek tvoří lineární interferometr.



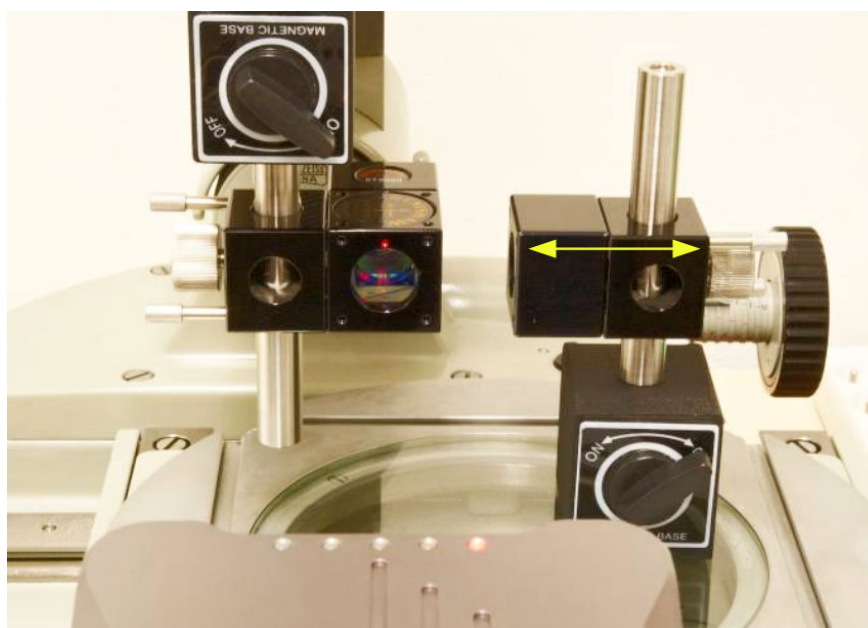
Obr. 45. Způsob upnutí laserového interferometru na mikroskop



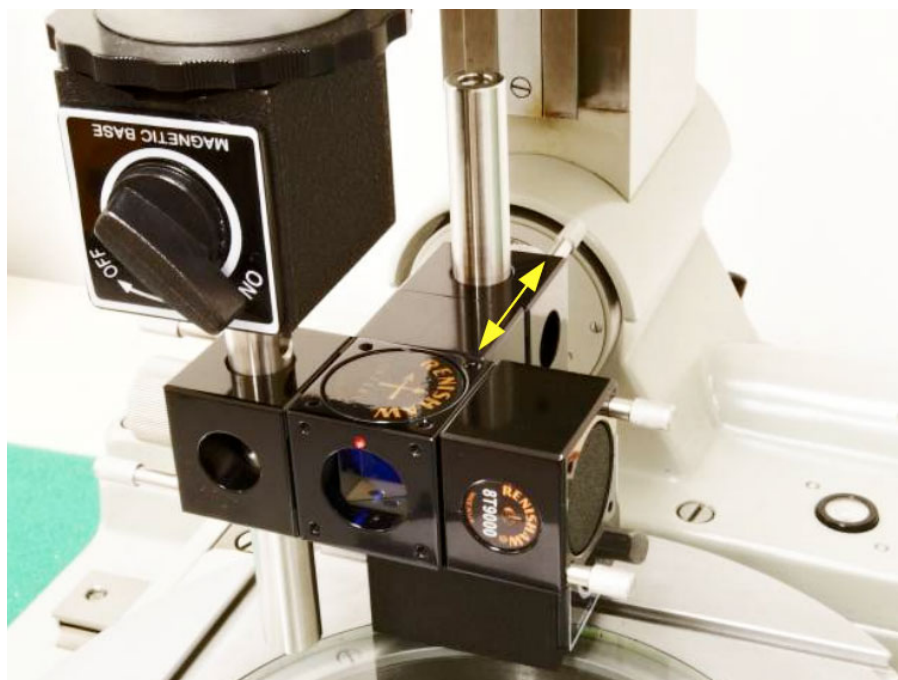
Obr. 46. Vzájemná poloha komponent na mikroskopu

Část kinematická je upnutá také pomocí magnetického držáku, ale na kovové části polohovatelného stolu mikroskopu. Celek tvoří pouze lineární odražeč s montážním sloupkem, kostkou a zmíněným magnetickým držákem.

Měření v obou osách je možné provést bez nutnosti přemístování laseru XL-80. Po naměření hodnot na ose X je třeba pouze u stacionární části přemontovat referenční odražeč a kinematickou část celou upnout na pozici protínající osu Y.



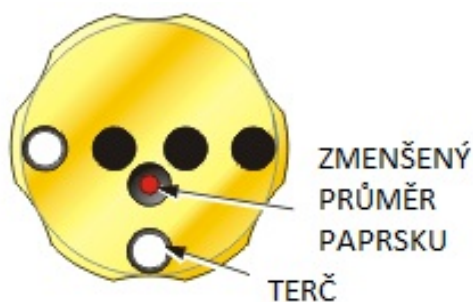
Obr. 47. Znáznornění pohybu komponent při měření na ose X



Obr. 48. Znáznornění pohybu komponent při měření na ose Y

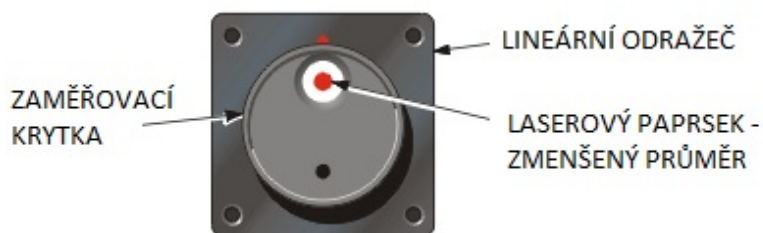
5.3 Zkalibrování lineárního interferometru a odražeče

- Ustavíme laser na stativu tak aby mířil do prostoru kde se nachází měřící optika. Pohledem sladíme směr laseru s osou pohybu přístroje tak, aby nedocházelo k chybě měření.
- Otočením závěrky laseru dosáhneme zmenšení průměru paprsku. Menší průměr paprsku usnadňuje pozorování případného vychýlení.



Obr. 49. Zmenšení průměru paprsku otočením závěrky [8]

- Popojedeme se stolem tak, aby se lineární odražeč přiblížil k laseru. Umístíme zaměřovací krytku na přední část lineárního odražeče bílým terčem nahoru. Posouváme laser nebo stůl stroje dokud paprsek nemíří na bílý terč zaměřovací krytky na lineárním odražeči. (Během tohoto nastavování by neměl být lineární interferometr umístěn mezi laserem a lineárním odražečem).



Obr. 50. Zaměření paprsku na lineární odražeč (ilustrace) [8]



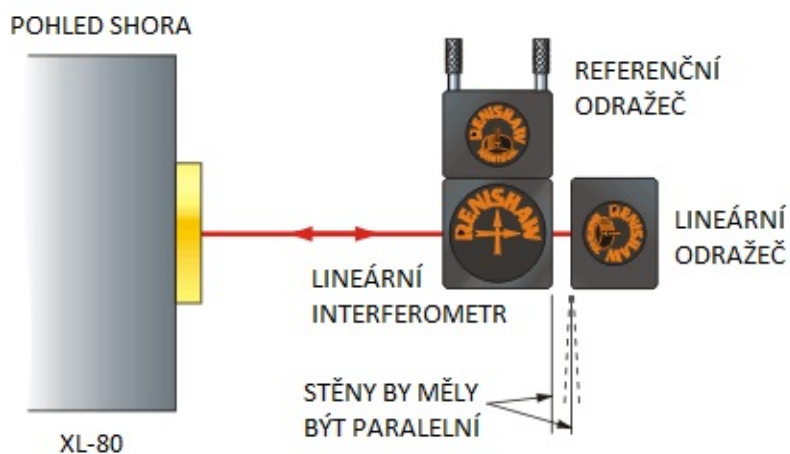
Obr. 51. Zaměření paprsku na lineární odražeč

- Odstraníme zaměřovací krytku z lineárního odražeče a zkontrolujeme jestli vrácený paprsek míří do středu zaměřovacího bodu na závěrce laseru.

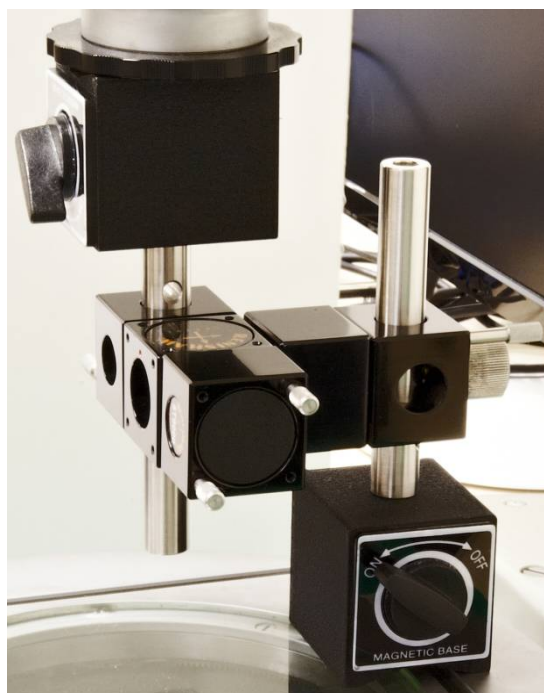


Obr. 52. Vracený paprsek lineárního odražeče [8]

- Umístíme lineární interferometr co nejbližší k odražeči. Pokud jsou komponenty umístěny těsně vedle sebe, dosáhneme zbylého vyrovnání pouze nastavením laserové hlavy.
- Ujistíme se jestli jsou protilehlé stěny interferometru a odražeče paralelní se strojem a vzájemně se vyrovnávají. Pokud tato podmínka není splněna, dochází ke snížení přesnosti a případnému přerušení paprsku během měření. Obecné pravidlo zní, že maximální vybočení, vytočení, naklonění lineárního interferometru by nemělo přesáhnout $\pm 2^\circ$, čehož lze dosáhnout nastavením od oka.

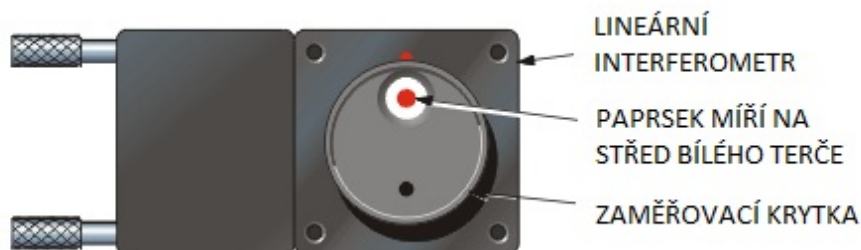


Obr. 53. Vyrovnání měřící optiky (ilustrace) [8]

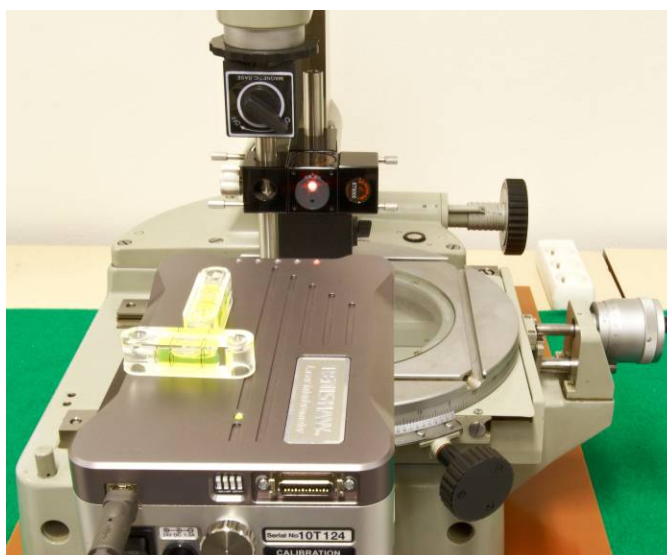


Obr. 54. Vyrovnání měřící optiky

- Připevníme zaměřovací krytku na vstupní otvor interferometru a pohybujeme s interferometrem vertikálně a horizontálně, dokud paprsek nemíří přímo na bílý terč této krytky.

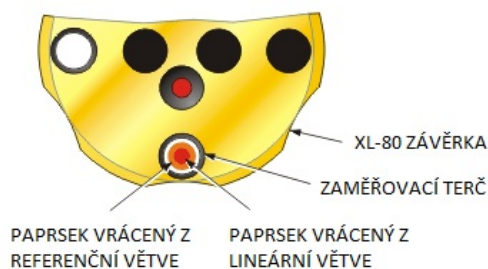


Obr. 55. Zaměření paprsku na lineární interferometr (ilustrace) [8]



Obr. 56. Zaměření paprsku na lineární interferometr

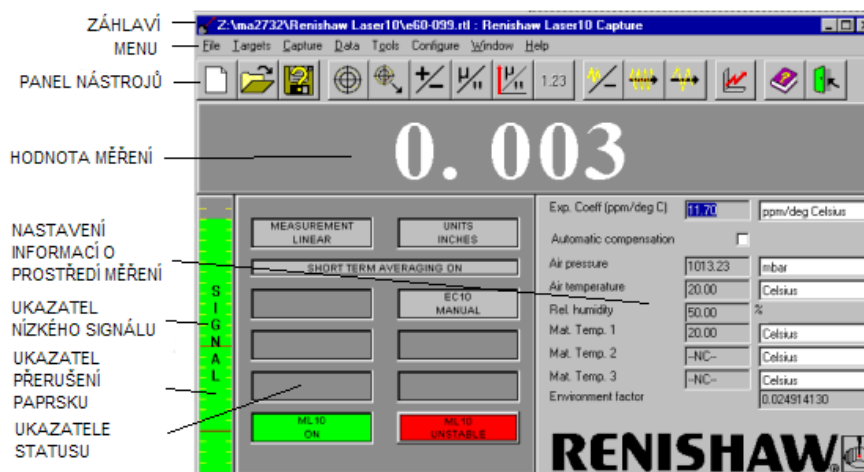
- Odstraníme zaměřovací krytku z lineárního interferometru a zkontrolujeme jestli vrácené paprsky z lineární a referenční větve míří na střed bílého terče závěrky laseru.



Obr. 57. Kontrola paprsků na terči závěrky (ilustrace) [8]

5.4 Snímání dat

Snímání naměřených hodnot probíhá pomocí softwaru Renishaw LaserXL Capture, který je nainstalovaný v PC a komunikuje se zařízením přes USB rozhraní. Před samotným měřením je třeba počkat až přístroj dokončí tzv. zahřívací sekvenci, což je signalizováno oranžovou LED diodou na horní straně zařízení.

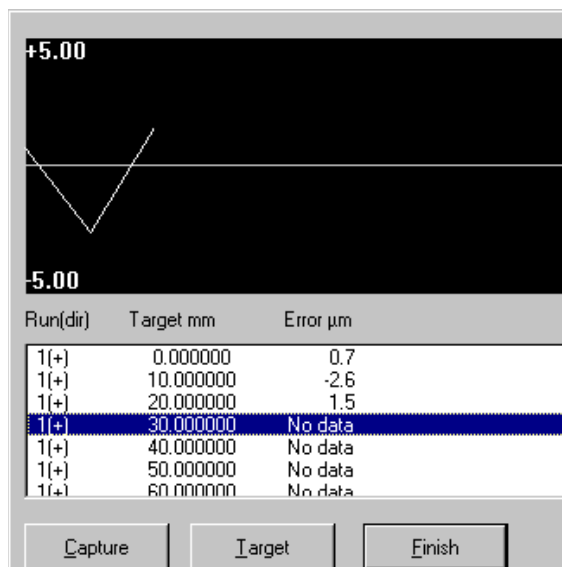


Obr. 58. Interface programu LaserXL Capture

- Pohybem stolu zajistíme, aby lineární interferometr a lineární odražeč byli co nejbližší u sebe. Poté vynulujeme hodnotu měření na displeji stisknutím Ctrl+D. Vynulováním při vzájemně přiblížené optice minimalizujeme chybu „mrtvé dráhy.“
- Najedeme stolem do startovací pozice, která je na počátku měřicího rozsahu osy. K tomu připočteme přeběh, který je zajištěn otočením mikrometrické hlavy o půl otáčky.
- Nastavíme cílovou pozici, frekvenci snímaných hodnot a počet chodů.

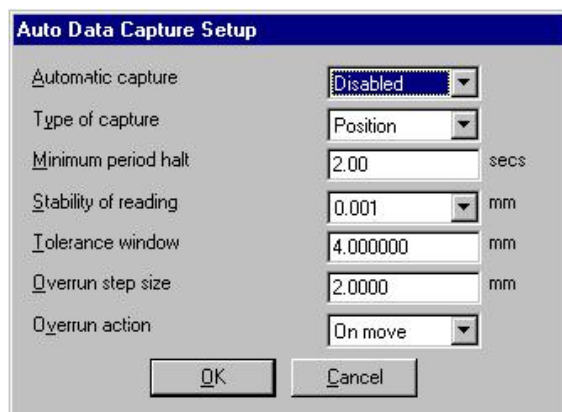
Tab. 2 Souhrn nastavení měření

Typ cyklu	Lineární trojchodý bidirekcionální
Měřený rozsah dráhy	0-25 mm
Rozlišitelnost	0,01 mm
Krok	1 mm



Obr. 59. Okno snímání dat [11]

- V nabídce vybereme normu ČSN ISO 230-2. Software je schopen pracovat s různými mezinárodními normami popisující měření a vyhodnocování.
- Poté již spustíme měření. To je realizováno stisknutím tlačítka Capture, vždy po najetí do zadané hodnoty (krok). Během měření se v okně snímání dat postupně vykresluje chybová křivka. Pokud dojde během měření k přerušení paprsku, např. neopatrnou manipulací v určeném prostoru, musí se celé měření opakovat.



Obr. 60. Okno nastavení snímání dat [11]

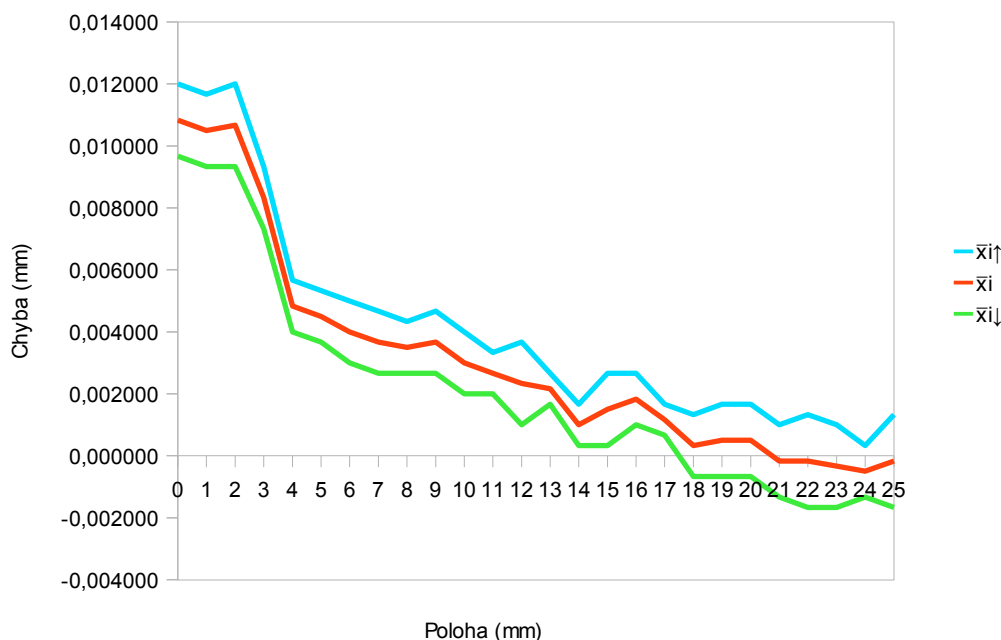
- Vyhodnocení dat, které je realizováno pomocí modulu v programu, zobrazuje všechny potřebné údaje a grafy dle dané normy. Jako problém se jevila nepřehlednost získaných údajů a grafů. Proto byly data v rámci diplomové práce zpracovány v tabulkovém editoru, to hlavně z důvodu přehlednosti a aktualizování dle nejnovější úpravy normy ČSN ISO 230-2.

5.5 Naměřená data – osa X

Tab. 3 Naměřená data – osa X

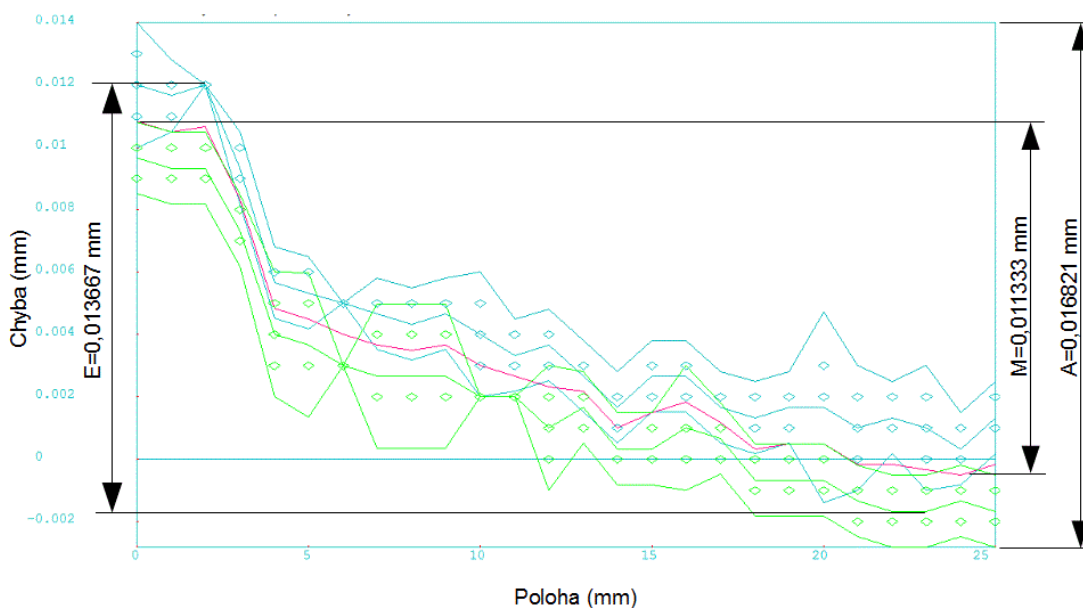
Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	0,016821	mm
B	Necitlivost v ose	0,003000	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	0,013667	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	0,011333	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	0,006543	

Průměrné polohové úchylky v ose X



Obr. 61. Průměrné polohové úchylky v ose X

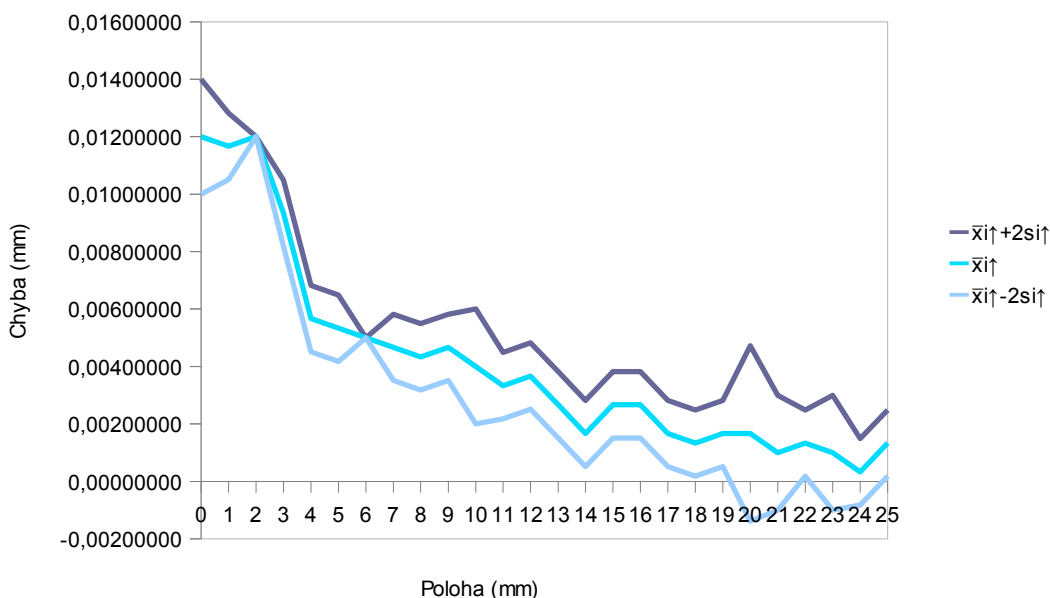
Z grafu průměrných polohových úchylek pro osu X je patrné, že u prvních tří hodnot dochází ke skokovému zhoršení těchto úchylek. To může být způsobeno tím, že polohovací šroub je právě v těchto místech více opotřebovaný. Z toho důvodu doporučuji při požadavku přesného měření polohovat stůl po ose X v rozsahu hodnot 4-25mm, tím se zlepší přesnost nastavení polohy o řád.



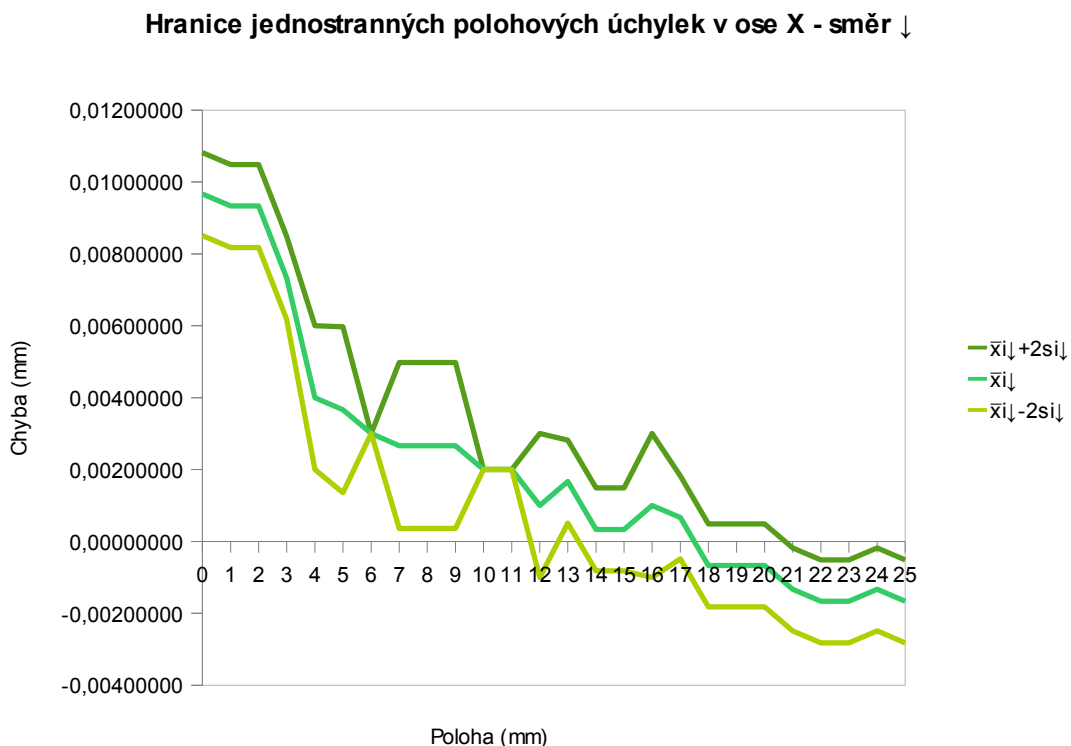
Obr. 62. Zobrazení hodnot A , E , M - osa X

Graf získaný výstupem ze software LaserXL Capture, který je dodáváný jako součást laserového měřicího systému. Zakótovány jsou nejdůležitější hodnoty A , E , M – viz. teoretická část diplomové práce. Pro přehlednost byla data zpracována tabulkovým editorem a výstupy v podobě grafů se nacházejí níže.

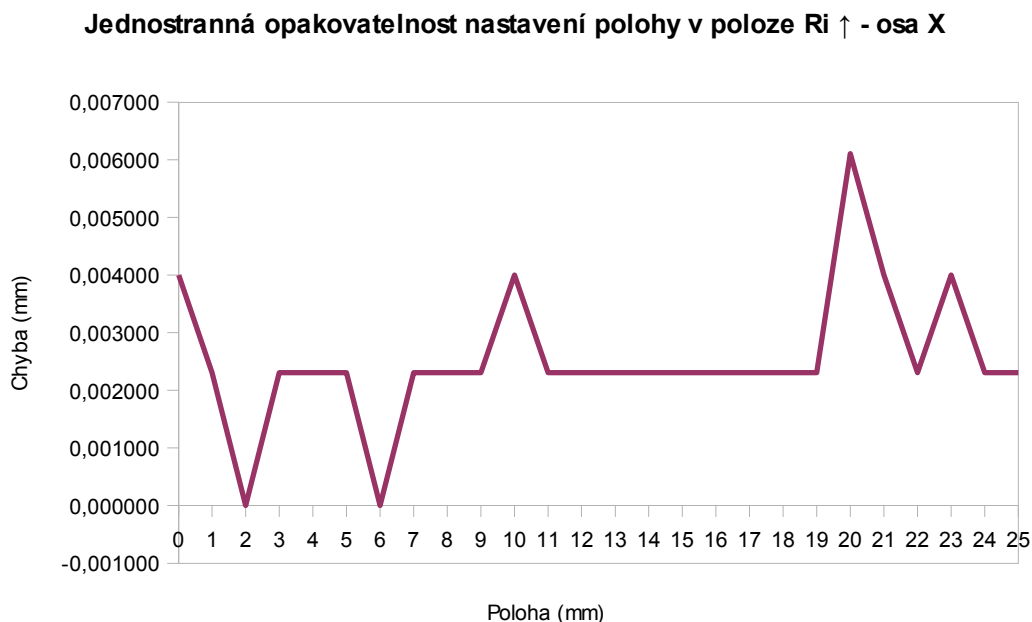
Hranice jednostranných polohových úchylek v ose X - směr \uparrow



Obr. 63. Hranice jednostranných polohových úchylek v ose X - směr \uparrow

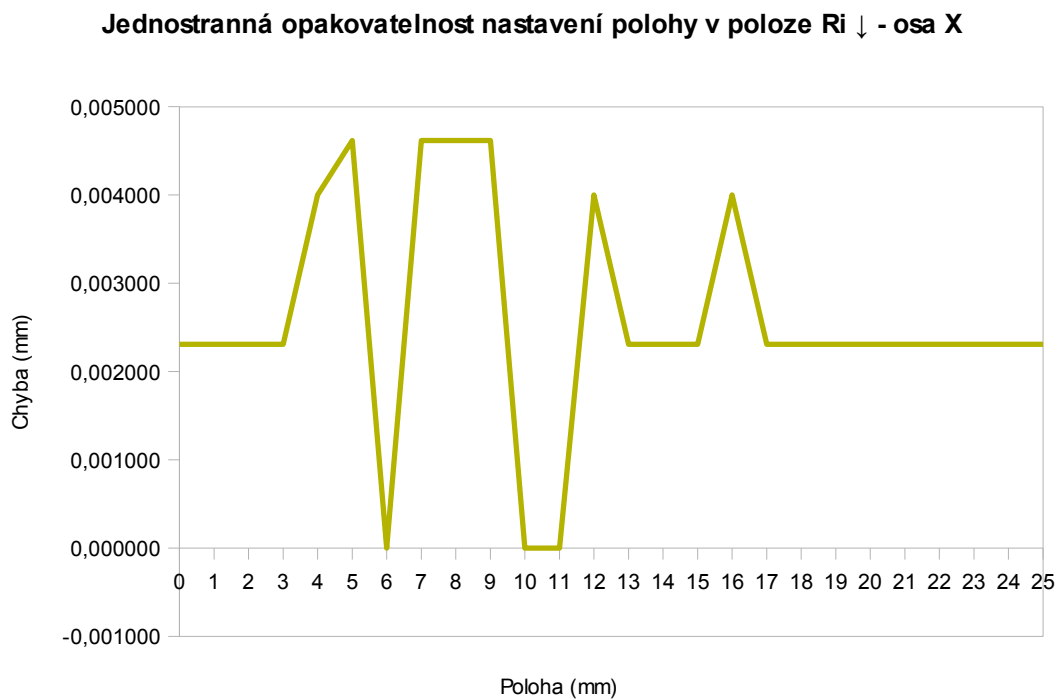


Obr. 64. Hranice jednostranných polohových úchylek v ose X - směr ↓



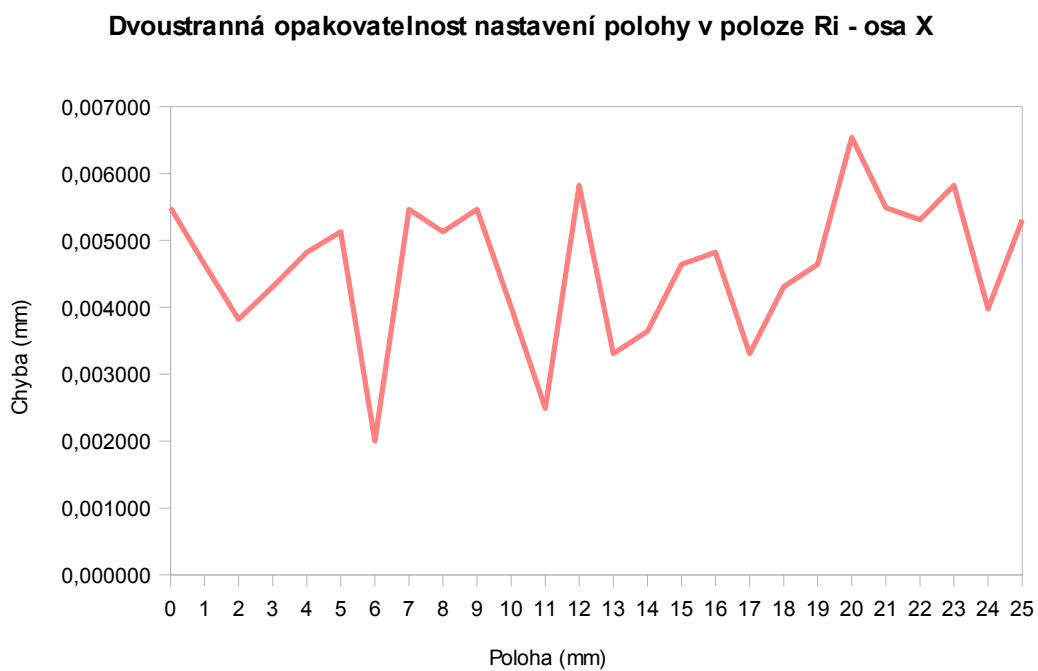
Obr. 65. Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_i \uparrow$ - osa X

Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_i \uparrow$ se nachází v rozmezí 0,004 mm.



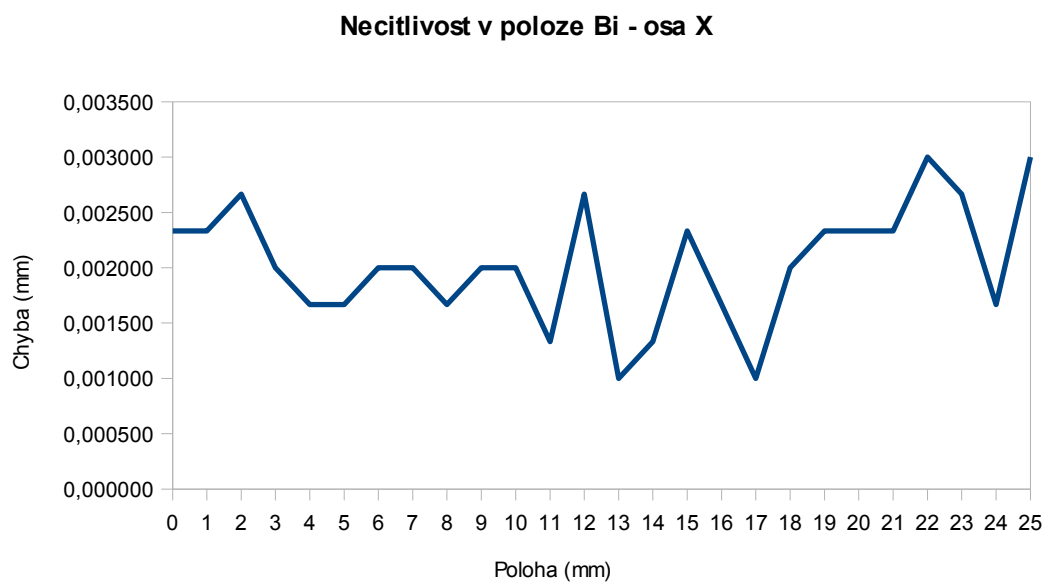
Obr. 66. Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_i \downarrow$ - osa X

Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_i \downarrow$ se nachází v rozmezí 0,004619 mm.



Obr. 67. Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze R_i - osa X

Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze se nachází v rozmezí 0,004543 mm.



Obr. 68. Necitlivost v poloze Bi - osa X

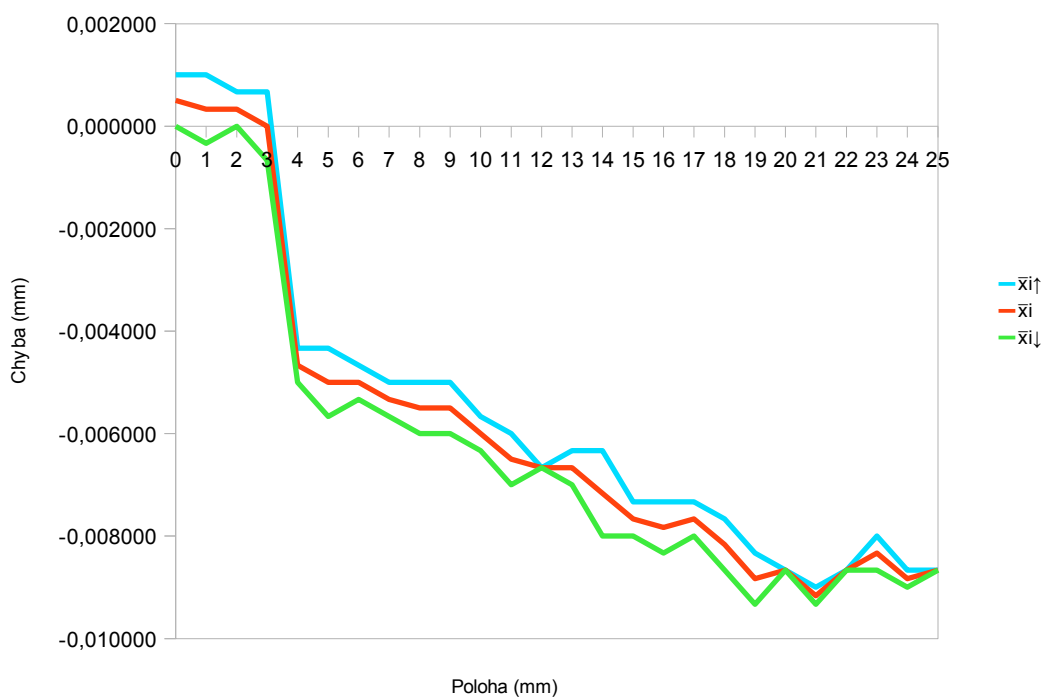
Necitlivost v poloze Bi se nachází v rozmezí 0,002 mm.

5.6 Naměřená data – osa Y

Tab. 4 Naměřená data – osa Y

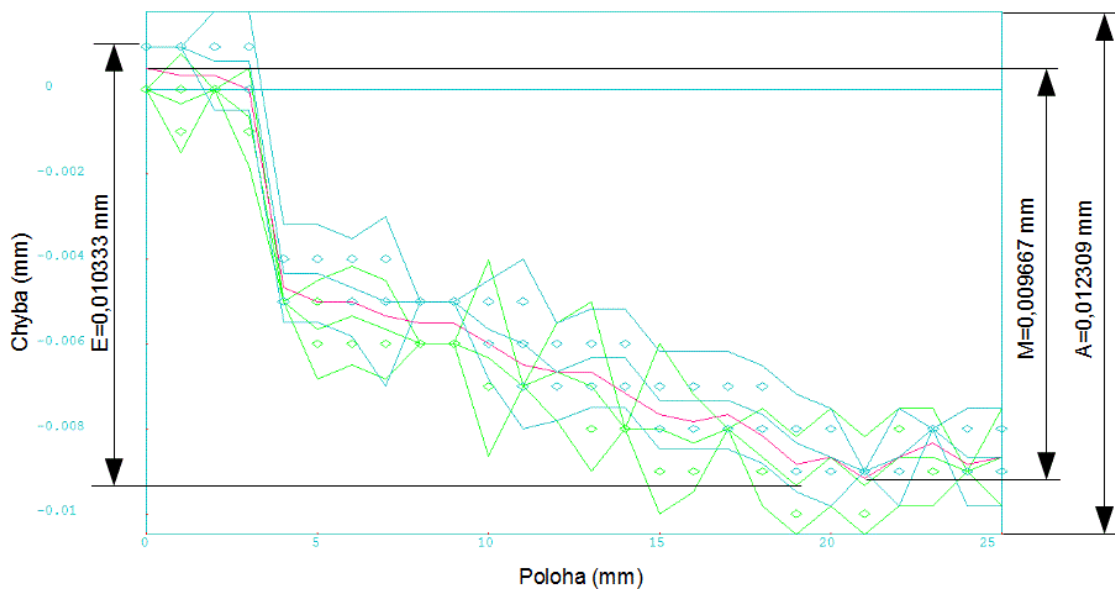
Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	0,012309	mm
B	Necitlivost v ose	0,001667	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	0,010333	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	0,009667	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	0,004619	

Průměrné polohové úchylky v ose Y



Obr. 69. Průměrné polohové úchylky v ose Y

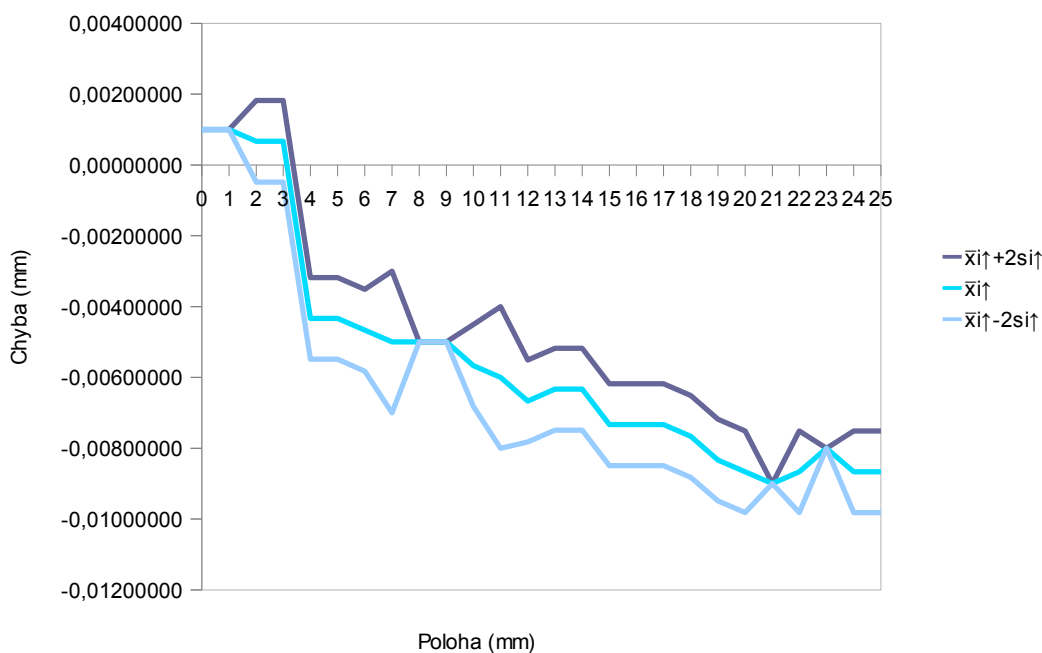
Z grafu průměrných polohových úchylek pro osu Y je patrné, že u prvních tří hodnot dochází ke skokovému zhoršení těchto úchylek stejně jako u osy X. To může být způsobeno tím, že polohovací šroub je právě v těchto místech více opotřebovaný. Z toho důvodu doporučuji při požadavku přesného měření polohovat stůl po ose Y v rozsahu hodnot 4-25mm, tím se zlepší přesnost nastavení polohy o řád.



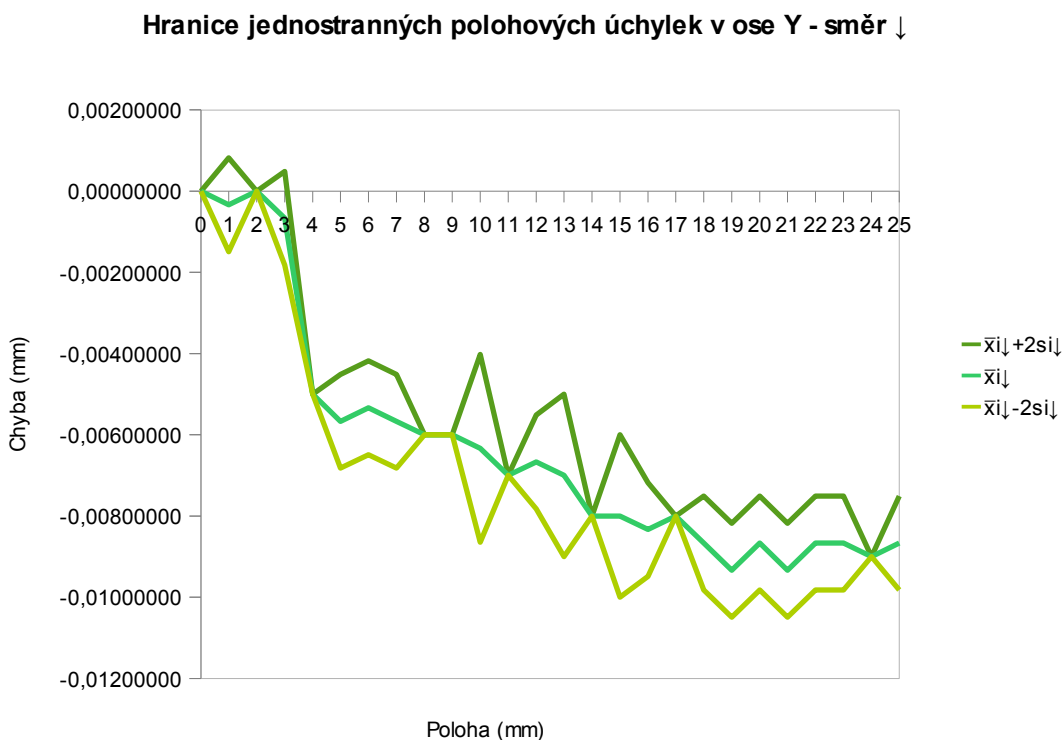
Obr. 70. Zobrazení hodnot A, E, M - osa Y

Graf získaný výstupem ze software LaserXL Capture, který je dodáváný jako součást laserového měřicího systému. Zakótovány jsou nejdůležitější hodnoty A, E, M – viz. teoretická část diplomové práce. Pro přehlednost byla data zpracována tabulkovým editorem a výstupy v podobě grafů se nacházejí níže.

Hranice jednostranných polohových úchylek v ose Y - směr ↑



Obr. 71. Hranice jednostranných polohových úchylek v ose Y - směr ↑

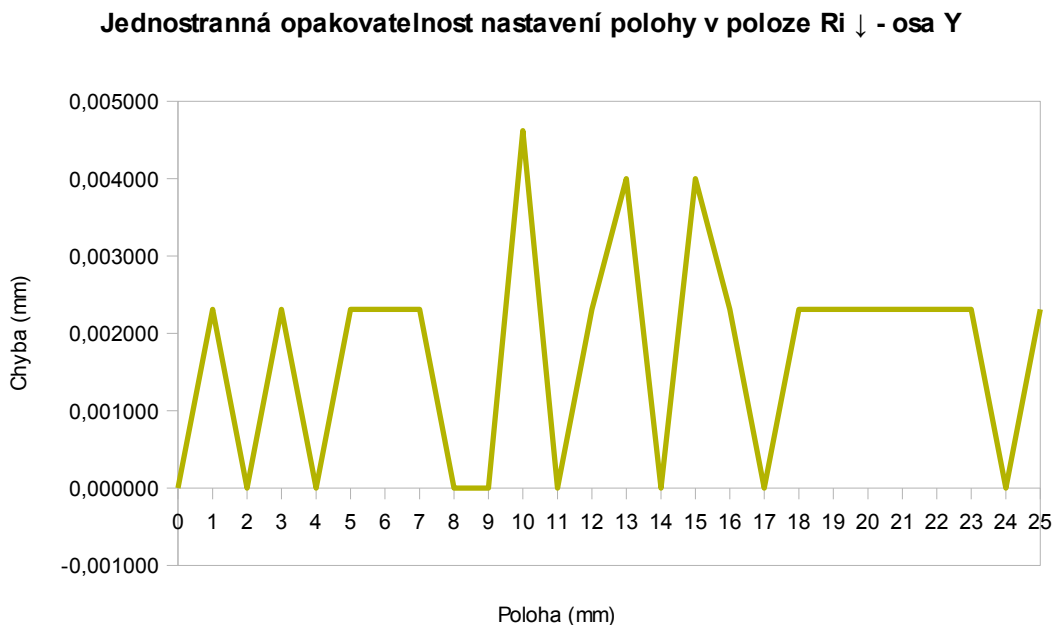


Obr. 72. Hranice jednostranných polohových úchylek v ose Y - směr ↓



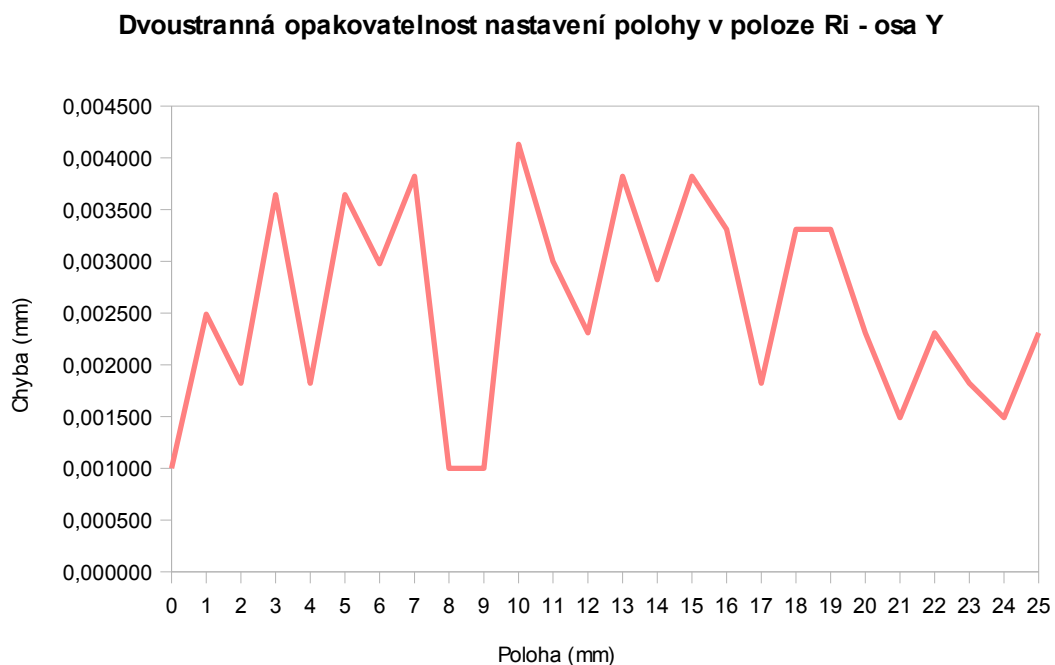
Obr. 73. Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri ↑ - osa Y

Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri ↑ se nachází v rozmezí 0,004 mm.



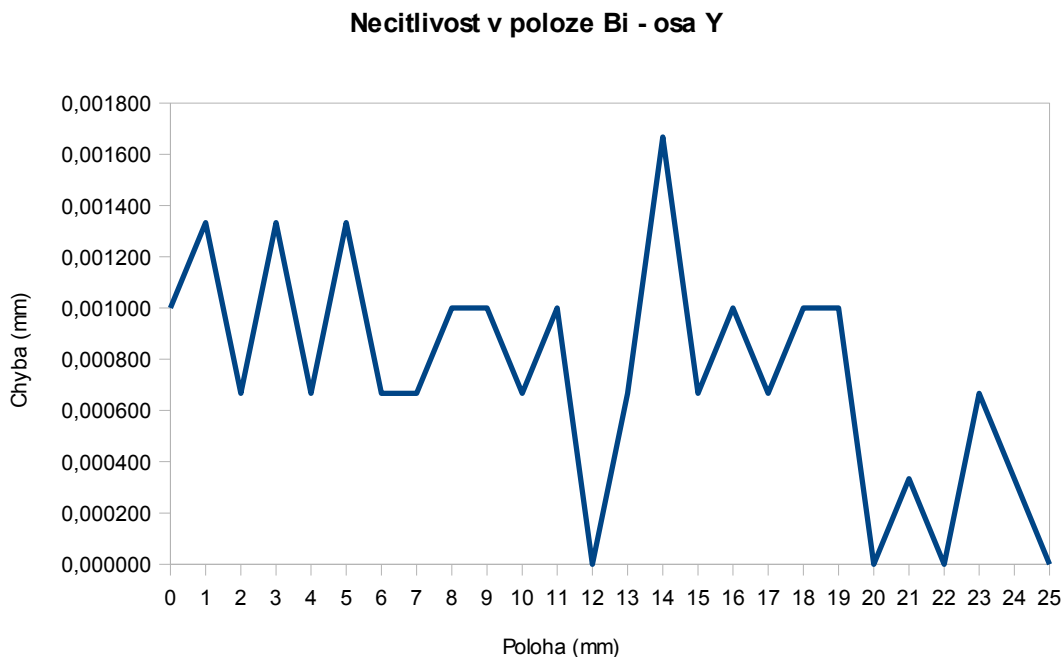
Obr. 74. Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri ↓ - osa Y

Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri ↓ se nachází v rozmezí 0,004619 mm.



Obr. 75. Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri - osa Y

Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri se nachází v rozmezí 0,003131 mm.



Obr. 76. Necitlivost v poloze Bi - osa Y

Necitlivost v poloze Bi se nachází v rozmezí 0,001667 mm.

5.7 Návrh digitalizace mikroskopu

Rozhodnutí digitalizovat mikroskop vyplynulo z potřeby získávat digitální výstup z měření ve formě obrázků, videí pro podporu výuky studentů. Podmínky pro návrh digitalizace byly:

- musí obsahovat software pro měření s využitím jednoduchých entit (úsečky, kružnice, apod.),
- možnost manuální kalibrace,
- propojení s PC přes USB rozhraní,
- vhodné rozměry zařízení s ohledem na stávající konstrukci mikroskopu.

Mikroskop má jednoduše odjímatelný okulár, který je upevněn na mosazné objímce a zajištěn šroubem. Součástí příslušenství k mikroskopu je i sada výměnných zvětšovacích objektivů.



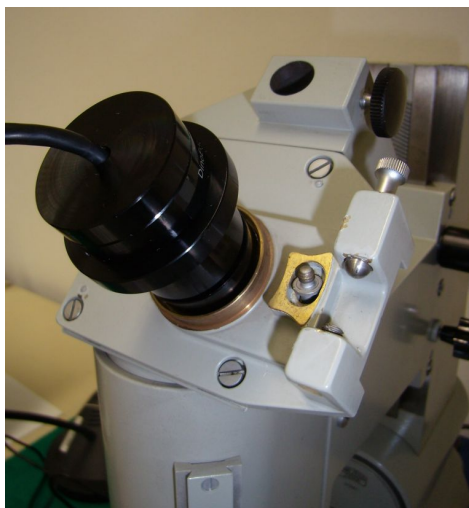
Obr. 77. Způsob uchycení okuláru na mosaznou objímku mikroskopu

Z konstrukčních důvodů byla zvolena možnost nahradit původní okulár tzv. okulárovou kamerou, která by se vsadila do mosazné objímky a přenášela obraz na monitor PC. Při použití tohoto řešení zůstává pro nás výhodná možnost výměny objektivů. Na základě dosavadního průběhu řešení návrhu byla kontaktována firma Intraco Micro spol. s r.o., která se zabývá prodejem příslušenství k mikroskopům s žádostí o doporučení vhodného produktu. Pan Tomáš Tancl z jmenované firmy na základě našich požadavků doporučil pro mikroskop okulárovou kameru Dino-Eye AM423B USB, kterou nám také ochotně zapůjčil na vyzkoušení.



Obr. 78. Okulárová kamera Dino-Eye AM423B USB

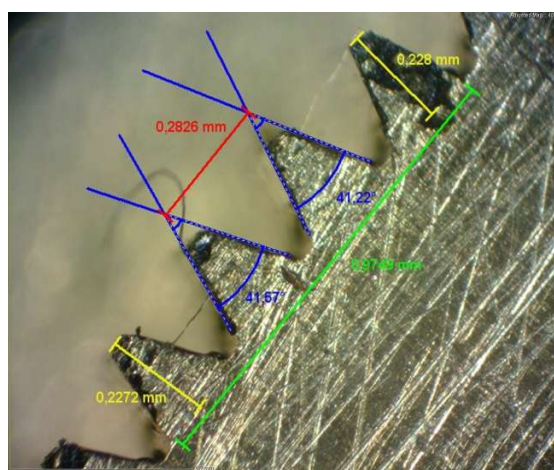
Měřit zmíněnou kamerou lze pouze objekty, které jsou vyfoceny a jsou tedy na jednom snímku, tzn. rozsah měření je dán aktuálním zorným polem. To se liší dle použitého objektivu. Ostření obrazu je zajištěno ručním vertikálním posouváním horní části mikroskopu a jemné doostření se děje šroubováním vyměnitelným objektivem.



Obr. 79. Okulárová kamera vsunutá do objímky mikroskopu

Tab. 5 Technické specifikace - Dino-Eye AM423B USB

Rozlišení	1,3 Megapixel (1280x1024)
Rozhraní	USB 2.0
Materiál	Hliník
Výstupy	Obrázky, video, časosběrné video
Počet snímků	Až 30/s, při max. rozlišení 15/s
Měření	Úsečka, úhel, kruh, kruh pomocí tří bodů, atd.
Kalibrace	Ano
Kompatibilita	Windows XP/Vista/7 a Mac OS X
Software	DinoCapture 2

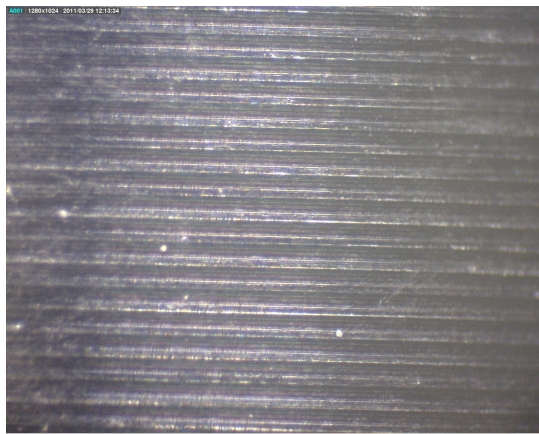


Obr. 80. Ukázka měření pomocí kamery Dino-Eye AM423 USB [10]

Zapůjčená kamera splnila veškeré požadavky ohledně požadovaných funkcí do té míry, že bylo rozhodnuto o zakoupení tohoto zařízení pro laboratoř Ústavu výrobního inženýrství.

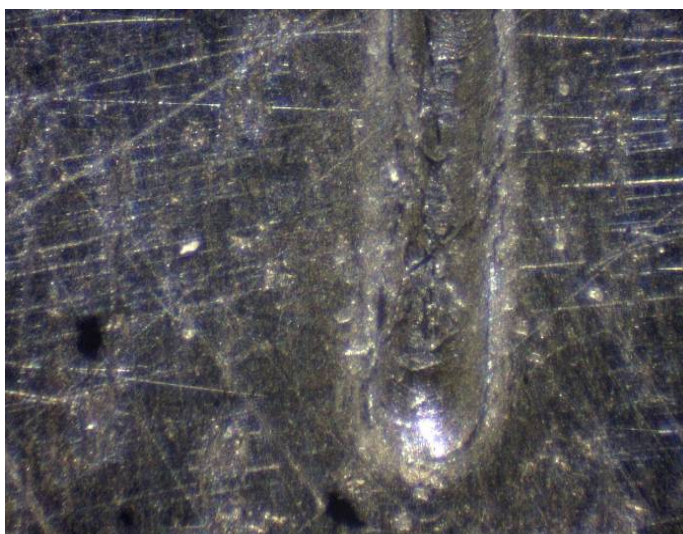
5.7.1 Využití digitalizovaného mikroskopu v praxi

Již první týden po nainstalování a zprovoznění okulárové kamery jsme se mohli přesvědčit o přínosu digitalizovaného mikroskopu pro praktické využití. Jednalo se o snímání povrchu soustružených vzorků různých ocelí při různých parametrech obrábění v rámci diplomové práce „Kvalifikace parametrů jakosti se zaměřením na analýzu soustružených ploch“ Bc. Štěpánky Nemravové.



*Obr. 81. Vzorek soustruženého materiálu
sejmutý pomocí okulárové kamery*

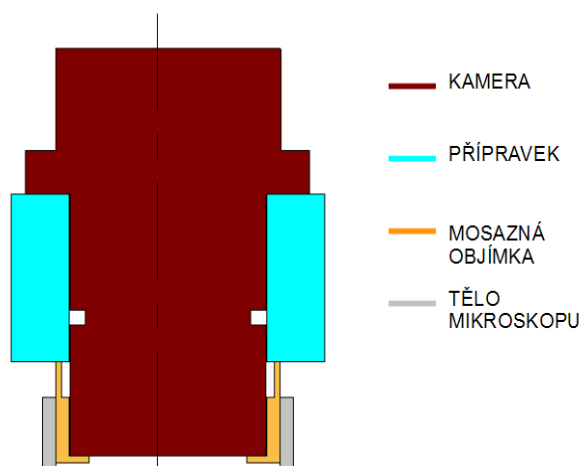
Digitalizovaný mikroskop slouží v laboratoři také jako příprava snímání povrchu bezkontaktním způsobem pomocí 3D drsnoměru Talysurf CLI 500, jehož provoz je výrazně nákladnější. Drsnost materiálu se smí měřit na plošce vzorku, kde nejsou rýhy, škrábance a jiné vady. Metrolog si tudíž může nejdříve povrch vyhodnocovaného vzorku prozkoumat na obrazovce monitoru, kam je přenášen obraz okulárové kamery a rozhodnout které místo vzorku materiálu je pro něj vyhovující. Tím zařízení plní funkci makroskopu.



Obr. 82. Vzorek materiálu s viditelnou vadou povrchu

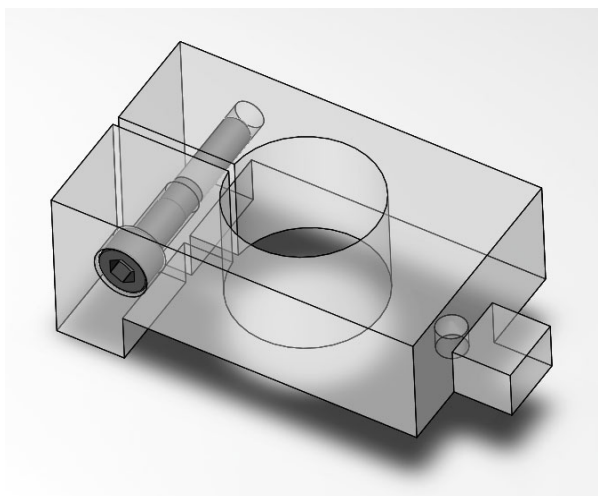
5.8 Návrh přípravku pro ustavení kamery v objímce mikroskopu

Bylo třeba ještě vyřešit způsob upevnění okulárové kamery v mosazné objímce, protože kamera je vsunuta v objímce pouze 5 mm. Hlavně z důvodu hrozícího nebezpečí pootočení nebo dokonce vyražení, vylomení, kamery neopatrným pohybem v blízkosti mikroskopu bylo rozhodnuto navrhnout a vyrobit přípravek, který by lepší upevnění v objímce vyřešil.

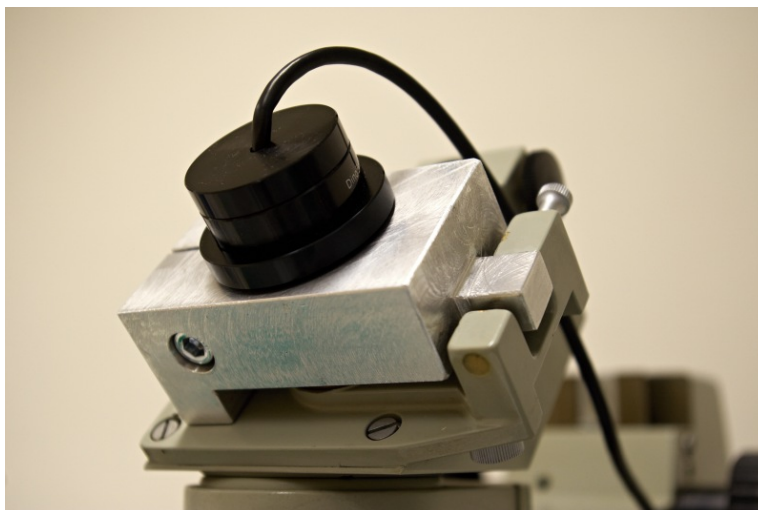


Obr. 83. Schema ustavení kamery (průřez)

Z konstrukčního hlediska a za podmínky co nejjednodušší výroby se jako nejlepší možnost jeví použití principu svěrného spoje. Jedná se o přípravek z duralu, který se nasune na mosaznou objímku mikroskopu a zajistí se proti pootočení úchytem na těle mikroskopu, který původně sloužil pro zajištění okuláru. Okulárová kamera AM423B je pak nasunuta do otvoru přípravku a šroubem svěrného spoje a dotáhnuta imbusovým klíčem. Protože svěrný spoj nepřenáší žádný kroutící moment, není třeba určitá upínací síla. Z toho důvodů není řešen potřebný utahovací moment.



Obr. 84. Vizualizace přípravku pro ustavení kamery v objímce mikroskopu



Obr. 85. Vyrobený přípravek ustavující kameru

5.9 Návrh přípravku na zlepšení odečítání hodnot z mikrometrických hlavic

Při manuálním odečítání hodnot z mikrometrických hlavic je vhodné pro zvýšení přesnosti používat zvětšovací sklo. Doposud byl tento problém řešen provizorně, volně uloženou zvětšovací čočkou, se kterou se špatně manipulovalo a hrozilo její rozbití. Z laboratoře Ústavu výrobního inženýrství proto vzešel požadavek navrhnout a vyrobit specifické zařízení, které by bylo univerzálně použitelné na měřících přístrojích, které jsou součástí vybavení laboratoře. Existuje sice možnost odečítání hodnot digitalizovat a vestavné mikrometrické hlavice vyměnit za digitální mikrometry (např. DIGIMATIC firmy Mitutoyo), ale pro používání mikroskopu v rámci potřeby laboratoře není digitální odměřování příliš důležité.



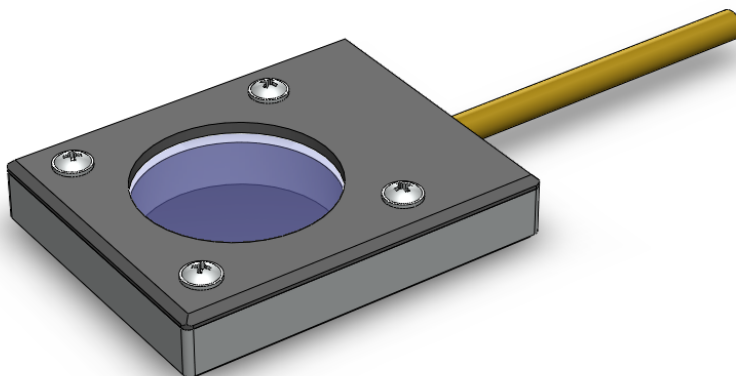
*Obr. 86. Univerzální držák
Mitutoyo s flexibilním sloupkem*

Z důvodu tuhosti a pevnosti odečítacího zařízení byly zavrženy varianty uchycení pomocí různých stojánek a polohování tzv. husím krkem, apod.

Uchycení vyráběného zařízení je realizováno pomocí univerzálního držáku Mitutoyo s magnetickým prizmatickým podstavcem a flexibilním sloupkem. Magnetický prizmatický podstavec bude připevněn ke kovovému tělu určeného přístroje a flexibilní sloupek nastaven tak, aby dosahoval do blízkosti odečítací stupnice.

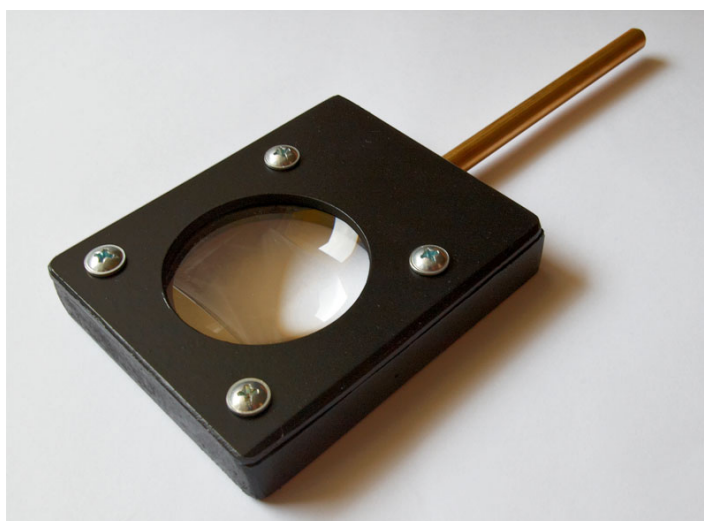
Tab. 6 Technické specifikace - Univerzální držák Mitutoyo s flexibilním sloupkem

Akční rádius	250 mm
Celková výška	393 mm
Hmotnost	1,5 kg
Magnetická síla	750 N vertikální odtrhová síla
Velikost podstavce	50x60x55 mm



Obr. 87. Vizualizace přípravku pro přesné odečítání hodnot

Vyráběný přípravek bude k univerzálnímu držáku Mitutoyo uchycen pomocí mosazné tyčky průměru 8 mm. Při tvorbě tohoto zařízení jsem z důvodu minimalizace pořizovacích nákladů vycházel z dostupných dílů – zvětšovací čočky a plastových polotovarů. Skládá se z horního a spodního plastového dílu mezi nimiž je ve tvarovém vybrání umístěna zvětšovací čočka. Horní díl je ke spodnímu uchycen čtyřmi šrouby s metrickým závitem, díky čemuž je přípravek dle potřeby opakovaně rozebiratelný. Plastové tělo přípravku zabraňuje poškrábání čočky a dochází k jejímu výhodnému a pevnému ustavení. Výkresová dokumentace vyrobeného přípravku je součástí přílohy diplomové práce.



Obr. 88. Vyrobený přípravek pro přesné odečítání hodnot

6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Na začátku diplomové práce byl vyřazený dílenský mikroskop o kterém nebylo známo, jak přesně je schopen je měřit a jaké jsou možnosti jeho praktického využití v laboratoři. Měřením lineárních vzdáleností při polohování metodou laserové interferometrie bylo zjištěno, že jeho přesnost a opakovatelnost vyhodnocená dle normy ČSN ISO 230-2 je velice dobrá. U obou měřených os v polohách 0-3 mm byla ovšem zjištěna skokově zhoršená přesnost. Z toho důvodu doporučuji při požadavku přesného měření na mikroskopu vynechat počáteční polohy 0, 1, 2, 3 mm.

Díky velmi dobrým výsledkům co se týče přesnosti zařízení, bylo rozhodnuto navrhnout modernizaci zařízení. Jako nejlepší řešení se jevila možnost přenášení obrazu povrchu na monitor PC. Bylo vybráno konstrukční řešení tzv. okulárové kamery, která nahrazuje původní odjímatelný okulár. Mezi výhody této modernizace patří i možnost odměřovat různé entity (úsečky, oblouky...) přes dodaný software. Součástí byl i návrh a výroba přípravku, který přesně ustaví kameru v objímce mikroskopu.

U mikroskopu byla také zjištěna možnost digitalizovat odečítání hodnot. To se děje výměnou mikrometrických hlavic za digitální mikrometry (např. DIGIMATIC firmy Mitutoyo). Tato možnost ovšem z hlediska využití mikroskopu v praxi není příliš rentabilní, proto jsme ji nevyužili.

Pro přesné odečítání hodnot z mikrometrických hlavic bylo navrženo řešení sestávající se z magnetického prizmatického podstavce, flexibilního sloupku a držáku lupy. Toto zařízení je využitelné i u dalších přístrojů v laboratoři, kde je nutné přesné odečítání.

Pro konstrukční návrhy a vizualizace přípravků byly využity programy Catia V5 a Solidworks 2010.

7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Ceny nových profesionálních digitálních mikroskopů se pohybují v řádech stovek tisíc korun. Proto spousta uživatelů uvažuje o modernizaci sice morálně zastaralých, ale pořád dostatečně kvalitních zařízeních. Tato záležitost se samozřejmě netýká jen metrologických přístrojů, ale například i obráběcích strojů apod.

Při modernizaci dílenského mikroskopu Zeiss, byly kladeny požadavky na co nejlepší využitelnost zařízení v praxi, jednoduchost ovládání a pořizovací náklady.

Cena okulárové kamery Dino-Eye AM423B USB včetně softwaru DinoCapture 2 (viz. kap. „Návrh digitalizace mikroskopu“) činí 5549,- Kč bez DPH.

Přípravek na přesné ustavení kamery v objímce mikroskopu byl navrhnut tak, že jeho výrobu bylo možno realizovat na konvenčních obráběcích strojích v dílně Ústavu výrobního inženýrství.

Náklady na univerzální držák Mitutoyo s flexibilním sloupkem jsou 3500,- Kč bez DPH. Tento držák lze využít i pro další potřeby v rámci laboratoře.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo využití metody laserové interferometrie při měření vzdáleností a kalibrace daného zařízení. Teoretická část řešila základní principy zmíněné metody a základy z oblasti matematického popisu aplikované kalibrace zařízení dle ČSN ISO 230-2. Také je zmíněna problematika možných chyb a nejistot, které mohou ovlivnit výsledky měření. V praktické část bylo provedeno a popsáno samotné měření a vyhodnocení dat s využitím již zmíněné normy, dále pak modernizace dílenského mikroskopu.

Změřením polohování os stolu dílenského mikroskopu Zeiss laserinterferometrem Renishaw, bylo zjištěno, že je jeho přesnost se nachází v dané rozlišitelnosti 0,01 mm. Toto zjištění nás přesvědčilo o kvalitách měřeného přístroje a tak bylo rozhodnuto zjistit vhodné řešení modernizace.

Jedna z možností čím mikroskop vylepšit, aby splňoval nároky kladené na moderní zařízení, bylo zajistit přenos obrazu viditelného dosud pouze skrz okulár na monitor PC. Z konstrukčního hlediska se jako nejlepší možnost jevila použití okulárové kamery, která by byla se zaměnila za původní okulár. Bylo rozhodnuto o jejím zakoupení Ústavem výrobního inženýrství. Pro přesné ustavení okulárové kamery v objímce mikroskopu byl navržen a vyroben přípravek.

Toto řešení se ukázalo jako velmi prospěšné a digitalizovaný mikroskop se stal plnohodnotnou laboratorní pomůckou. Mezi jeho výhody patří možnost umístit na polohovatelný stůl i velmi těžkou součást v řádech desítek kilogramů, bez toho, aby docházelo ke chvění nebo nestabilitě přístroje.

Je využíván také pro přípravu před snímání povrchu bezkontaktním způsobem pomocí 3D drsnoměru Talysurf CLI 500 jehož provoz je výrazně nákladnější (viz. kap. Využití digitalizovaného mikroskopu v praxi). Zařízení tím plní i funkci makroskopu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČECH, Jaroslav, PERNÍKÁŘ, Jiří, PODANÝ, Kamil *Strojírenská metrologie*. 4. vyd. Brno: CERM, 2005. 175 s. ISBN 80-214-3070-2
- [2] ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. 1. vyd. Brno: ČMI, 2010. 36 s.
- [3] CHUDÝ, Vladimír, PALENČÁR, Rudolf, KUREKOVÁ, Eva, HALAJ, Martin *Meranie technický veličin*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. 672 s. ISBN 80-227-1275-2
- [4] MITUTOYO [online]. [cit. 2011-03-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/rmp.asp>>.
- [5] OLYMPUS [online]. [cit. 2011-01-21]. Dostupný z WWW: <<http://http://olympusfluoview.com/java/henelasers/index.html>>.
- [6] PATA, Vladimír. Studijní materiály a podklady z předmětu T7TMR – Technická měření v akademickém roce 2009/2010.
- [7] PERNÍKÁŘ, Jiří. *Technická měření* [online]. 2002. [cit. 2010-11-24]. Dostupný z WWW: <<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TechnickaMereni.pdf>>.
- [8] RENISHAW [online]. [cit. 2011-01-17]. Dostupný z WWW: <<http://renishaw.cz>>.
- [9] TICHÁ, Šárka, ADAMEC, Jaromír. *Návody do cvičení z předmětu strojírenská metrologie*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. 92 s. ISBN 978-80-248-1916-7
- [10] WHP TECHNIK [online]. [cit. 2011-04-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.whp.cz/merici-software-pro-mikroskopy.html>>.
- [11] XL-80 Laserový systém [online]. [cit. 2011-01-19]. Dostupný z WWW: <[http://resources.renishaw.com/download/\(d45dd6569592477a8c634cf5b4deb032\)?lang=cs&inline=true](http://resources.renishaw.com/download/(d45dd6569592477a8c634cf5b4deb032)?lang=cs&inline=true)>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[mm]	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose
$A\uparrow, A\downarrow$	[mm]	Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose
B		Necitlivost v ose
\bar{B}		Průměrná necitlivost v ose
B_i		Necitlivost v poloze
E	[mm]	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose
$E\uparrow, E\downarrow$	[mm]	Jednostranná systematická polohová úchylka v ose
f	[Hz]	Frekvence
He-Ne		Helium-Neon
k		Koeficient pro rovnoměrné rozdělení
k_t		Rozšiřující koeficient
LASER		Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
M	[mm]	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose
n		Index lomu vzduchu
$P_i(i=1-m)$	[mm]	Zadaná poloha
$P_{ij}(i=1-m; j=1-n)$	[mm]	Skutečná poloha
R	[mm]	Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose
$R\uparrow, R\downarrow$	[mm]	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose
R_i	[mm]	Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze
$R_i\uparrow, R_i\downarrow$	[mm]	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze
$s_i\uparrow, s_i\downarrow$	[mm]	Odhad jednostranné standardní nejistoty v poloze
u_A	[mm]	Standardní nejistota Typu A
u_B	[mm]	Standardní nejistota Typu B
u_{B1}	[mm]	Standardní nejistota Typu B – chyba měřidla
u_{B2}	[mm]	Standardní nejistota Typu B – chyba metrologa
u_C	[mm]	Kombinovaná standardní nejistota
u_D	[mm]	Rozšířená standardní nejistota
\bar{x}_i	[mm]	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze
$x_i\uparrow, x_i\downarrow$	[mm]	Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze
$\bar{x}_i\uparrow, \bar{x}_i\downarrow$	[mm]	Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze
$\bar{x}_i\uparrow\pm 2s_i\uparrow, \bar{x}_i\downarrow\pm 2s_i\downarrow$	[mm]	Hranice úchylek
x_{ij}	[mm]	Polohová úchylka
x_m	[mm]	Naměřená hodnota veličiny
x_p	[mm]	Konvenčně pravá hodnota měřené veličiny
z_j		Rozlišitelnost měřidla
z_m		Chyba metrologa
δ	[mm]	Náhodná chyba

Δ	[mm]	Absolutní chyba měření
Δ_r	[%]	Relativní chyba měření
Δ_s	[mm]	Systematická chyba
λ	[nm]	Vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu
λ_0	[nm]	Vlnová délka laserového paprsku ve vakuu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schema He-Ne laseru.....	12
Obr. 2. Řez He-Ne laserem [5].....	13
Obr. 3. Schema laserového interferometru [3].....	14
Obr. 4. Způsob rozmístění komponentů.....	15
Obr. 5. Kinematický lineární dělič a stacionární odražeč.....	16
Obr. 6. Stacionární lineární dělič a kinematický odražeč.....	16
Obr. 7. Modelový případ měření (poloha 0-100mm, krok 10mm).....	17
Obr. 8. Lineární trojchodý unidirekcionální cyklus.....	18
Obr. 9. Lineární dvojchodý bidirekcionální cyklus.....	18
Obr. 10. Pendulární trojchodý unidirekcionální cyklus.....	19
Obr. 11. Pendulární dvojchodý bidirekcionální cyklus.....	19
Obr. 12. Dvojchodý lineární bidirekcionální cyklus.....	20
Obr. 13. Diagram průměrných polohových úchylek.....	21
Obr. 14. Diagram hranic úchylek.....	22
Obr. 15. Diagram průměrných polohových úchylek a jejich hranic.....	23
Obr. 16. Diagram jednostranné opakovatelnosti nastavení v ose	24
Obr. 17. Diagram jednostranné systematické polohové úchyly v ose $E\uparrow$ a jednostranné přesnosti nastavení polohy v ose $A\uparrow$	25
Obr. 18. Diagram necitlivostí v ose/poloze, hranic úchylek a opakovatelnosti nastavení polohy v poloze	26
Obr. 19. Diagram průměrné dvoustranné polohové úchyly v ose, dvoustranné přesnosti nastavení polohy v ose a dvoustranné systematické polohové úchyly v ose	27
Obr. 20. Diagram průměrných jednostranných polohových úchylek v poloze a průměrné dvoustranné polohové úchyly v poloze.....	27
Obr. 21. Diagram necitlivostí v poloze B_i	28
Obr. 22. Diagram necitlivostí v ose B_i – všechny hodnoty jsou vztaženy k nulové ose	28
Obr. 23. Diagram opakovatelnosti nastavení polohy v obou smyslech pohybu.....	28
Obr. 24. Klasifikace chyb měření.....	29
Obr. 25. Chyba měření.....	30
Obr. 26. Měření s/bez kompenzace [11].....	31
Obr. 27. Chyba vznikající tzv. Mrtvou dráhou.....	32
Obr. 28. Cosinová chyba.....	33
Obr. 29. Chyba způsobená nedodržením tzv. „Abbeho principu“.....	33

Obr. 30. Vektorový součet nejistoty Typu B.....	34
Obr. 31. Vektorový součet kombinované nejistoty.....	35
Obr. 32. Laser XL-80 [11].....	36
Obr. 33. Kompenzační jednotka XC-80 včetně snímačů [11].....	37
Obr. 34. Sestavená měřicí optika [8].....	38
Obr. 35. Příslušenství měřicí optiky [8].....	38
Obr. 36. Stativ a stolec pro XC-80 [11].....	39
Obr. 37. Přenosný kufr laserového systému [11].....	39
Obr. 38. Měřené zařízení - dílenský mikroskop Zeiss.....	41
Obr. 39. Definování os na mikroskopu.....	41
Obr. 40. Vodící prvky polohování mikroskopu.....	42
Obr. 41. Rozmístění komponent pro měření-schema [8].....	42
Obr. 42. Vestavěná libela na mikroskopu, tzv. "Býčí oko".....	43
Obr. 43. Stavitelný šroub podstavy mikroskopu.....	43
Obr. 44. Ustavení laserového interferometru do roviny.....	44
Obr. 45. Způsob upnutí laserového interferometru na mikroskop.....	44
Obr. 46. Vzájemná poloha komponent na mikroskopu.....	45
Obr. 47. Znárodnění pohybu komponent při měření na ose X.....	45
Obr. 48. Znárodnění pohybu komponent při měření na ose Y.....	46
Obr. 49. Zmenšení průměru paprsku otočením závěrky [8].....	46
Obr. 50. Zaměření paprsku na lineární odražeč (ilustrace) [8].....	47
Obr. 51. Zaměření paprsku na lineární odražeč.....	47
Obr. 52. Vrácený paprsek lineárního odražeče [8].....	47
Obr. 53. Vyrovnání měřicí optiky (ilustrace) [8].....	48
Obr. 54. Vyrovnání měřicí optiky.....	48
Obr. 55. Zaměření paprsku na lineární interferometr (ilustrace) [8].....	49
Obr. 56. Zaměření paprsku na lineární interferometr.....	49
Obr. 57. Kontrola paprsků na terči závěrky (ilustrace) [8].....	49
Obr. 58. Interface programu LaserXL Capture.....	50
Obr. 59. Okno snímání dat [11].....	51
Obr. 60. Okno nastavení snímání dat [11].....	51
Obr. 61. Průměrné polohové úchytky v ose X.....	52
Obr. 62. Zobrazení hodnot A , E , M - osa X.....	53
Obr. 63. Hranice jednostranných polohových úchylek v ose X - směr ↑.....	53

Obr. 64. Hranice jednostranných polohových úchylek v ose X - směr ↓.....	54
Obr. 65. Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri ↑ - osa X	54
Obr. 66. Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri ↓ - osa X.....	55
Obr. 67. Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri - osa X.....	55
Obr. 68. Necitlivost v poloze Bi - osa X.....	56
Obr. 69. Průměrné polohové úchylky v ose Y.....	57
Obr. 70. Zobrazení hodnot A, E, M - osa Y.....	58
Obr. 71. Hranice jednostranných polohových úchylek v ose Y - směr ↑.....	58
Obr. 72. Hranice jednostranných polohových úchylek v ose Y - směr ↓.....	59
Obr. 73. Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri ↑ - osa Y.....	59
Obr. 74. Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri ↓ - osa Y.....	60
Obr. 75. Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze Ri - osa Y.....	60
Obr. 76. Necitlivost v poloze Bi - osa Y.....	61
Obr. 77. Způsob uchycení okuláru na mosaznou objímku mikroskopu.....	62
Obr. 78. Okulárová kamera Dino-Eye AM423B USB.....	62
Obr. 79. Okulárová kamera vsunutá do objímky mikroskopu.....	63
Obr. 80. Ukázka měření pomocí kamery Dino-Eye AM423 USB [10].....	63
Obr. 81. Vzorek soustruženého materiálu sejmутý pomocí okulárové kamery.....	64
Obr. 82. Vzorek materiálu s viditelnou vadou povrchu.....	64
Obr. 83. Schema ustavení kamery (průřez).....	65
Obr. 84. Vizualizace přípravku pro ustavení kamery v objímce mikroskopu.....	65
Obr. 85. Vyrobený přípravek ustavující kameru	66
Obr. 86. Univerzální držák Mitutoyo s flexibilním sloupkem.....	66
Obr. 87. Vizualizace přípravku pro přesné odečítání hodnot.....	67
Obr. 88. Vyrobený přípravek pro přesné odečítání hodnot.....	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Tabulka pravděpodobnosti [6].....	36
Tab. 2 Souhrn nastavení měření.....	50
Tab. 3 Naměřená data – osa X.....	52
Tab. 4 Naměřená data – osa Y.....	57
Tab. 5 Technické specifikace - Dino-Eye AM423B USB	63
Tab. 6 Technické specifikace - Univerzální držák Mitutoyo s flexibilním sloupkem.....	67

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI: Výkresová dokumentace

Příloha PII: DVD disk obsahující:

- Diplomovou práci
- Zpracovaná naměřená data
- Modely přípravků
- Výkresy přípravků