

Návrh kalibrace a renovace dílenského mikroskopu využitím laseinterferometru

Bc. Milena Kubišová

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milena Kubišová**
Osobní číslo: **T12467**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh kalibrace a renovace dílenského mikroskopu využitím laserinterferometru**

Zásady pro vypracování:

TEORETICKÁ ČÁST:

- teorie měření délek pomocí délkoměru
- teorie nejistot měření
- zjišťování přesnosti měřících zařízení pomocí ČSN 230-1
- matematické hodnocení přesnosti zařízení pomocí ČSN 230-2
- popis základního principu měření délek pomocí laserinterferometru Renishaw

PRAKTICKÁ ČÁST:

- provedení renovace výkyvného ramene a optických clon na mikroskopu Zeiss
- provedení kalibrace pohyblivého šroubu mikroskopu Zeiss
- provedení kalibrace pohyblivého zařízení mikroskopu Zeiss
- provedení návrhu kalibračního postupu, včetně kalibračního protokolu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Vladimír Pata
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, 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 15. 4. 2014


.....

Děkuji tímto svému vedoucímu mé diplomové práce doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za odborné vedení, poskytnuté velmi cenné rady a čas, který mi věnoval při psaní této diplomové práce. Dále bych ráda podělovala panu Františku Peprnovi za pomoc s renovací, za odborné konzultace a sdělení svých zkušeností z praxe, které byly pro tuto diplomovou práci důležité.

Prohlašuji, že jsem na této práci pracovala samostatně, použitou literaturu jsem řádně citovala.

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

Ve Zlíně

Bc. Milena Kubišová

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá renovací a kalibrací dílenského mikroskopu Zeiss.

V teoretické části jsou popsány metody měření délek, normy ČSN ISO 230-1 a ČSN ISO 230-2. V praktické části této diplomové práce je popsána renovace mikroskopu Zeiss, nastavení a seřízení laserinterferometru Renishaw pro kalibraci šroubu a os na mikroskopu. Obsahem praktické části je také návrh kalibračního postupu, včetně kalibračního protokolu pro mikroskop Zeiss.

Klíčová slova: měření délek, mikroskop, nejistoty měření, laserinterferometr, kalibrace os

ABSTRACT

This thesis deals with renovations and calibration workshop Zeiss microscope. In the theoretical section describes the methods for measuring lengths, standard ČSN ISO 230-1 and ČSN ISO 230-2. In the practical part of this thesis describes the renovation Zeiss microscope, setting and adjustment of Renishaw laser interferometer for calibration screw axis and the microscope. The practical part is also a proposal calibration procedure, including calibration protocol for Zeiss microscope.

Keywords: measuring lengths, microscope, measurement uncertainty, laser interferometer, axis calibration

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 MĚŘENÍ DÉLEK	12
1.1 PŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ DÉLEK	13
1.2 NEPŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ DÉLEK	13
1.3 TYP VÝSTUPNÍCH ÚDAJŮ	14
1.4 DĚLENÍ PODLE CHARAKTERU ÚDAJŮ	14
1.5 KONTAKT S MĚŘENÝM PROSTŘEDÍM	14
2 LASEROVÉ SYSTÉMY	16
2.1 TYPY LASERŮ	16
2.1.1 CO2 laser.....	16
2.1.2 Polovodičový laser	17
2.1.3 Pevnolátkový laser	17
2.1.4 Plynový helium-neonový laser.....	17
2.2 INTERFERENCE SVĚTLA	18
2.3 INTERFEROMETRIE	18
2.4 INTERFEROMETR	20
2.4.1 Michalsonův interferometr.....	20
2.4.2 Machův-Zehnderův interferometr.....	21
2.4.3 Fabryův-Perotův interferometr.....	21
2.4.4 Interferenční komparátor.....	22
2.5 LASEROVÝ INTERFEROMETR	23
3 PŘESNOST A OPAKOVATELNOST NASTAVENÍ POLOHY NA ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÝCH OSÁCH	24
3.1 PŘESNOST INTERFEROMETRŮ	24
3.2 ZDROJE ÚCHYLEK INTERFEROMETRŮ	24
3.3 KONFIGURACE A PRINCIP LINEÁRNÍCH MĚŘENÍ POMOCÍ LASEROVÉHO INTERFEROMETRU	26
3.4 TYPY MĚŘÍCÍCH CYKLŮ	27
3.4.1 Lineární měřicí cyklus.....	27
3.4.2 Pendulární měřicí cyklus.....	28
4 METODY ZKOUŠEK A VYHODNOCENÍ PŘESNOSTI	29
4.1 NORMA ČSN ISO 230-2:2010 ZÁSADY ZKOUŠEK OBRÁBĚCÍCH STROJŮ-STANOVENÍ PŘESNOSTI A OPAKOVATELNOSTI NASTAVENÍ V ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÝCH OSÁCH	29
4.2 CHYBY VZNIKAJÍCÍ BĚHEM MĚŘENÍ	35
4.2.1 Absolutní chyba měření	36
4.2.2 Relativní chyba měření	36
4.2.3 Systematická chyba měření.....	36
4.2.4 Náhodná chyba měření.....	36
4.2.5 Hrubá chyba měření	37

4.3	NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	37
4.3.1	Nejistota měření typu A	38
4.3.2	Nejistota typu B.....	38
4.3.3	Kombinovaná nejistota.....	38
5	LASER XL – 80	39
5.1	LASEROVÁ HLAVICE XL - 80.....	40
5.2	PŘÍSLUŠENSTVÍ XL - 80	41
II	PRAKTICKÁ ČÁST	43
6	DÍLENSKÝ MIKROSKOP	44
6.1	NASTAVENÍ MIKROSKOPU	46
6.2	USTAVENÍ LASERU A KOMPONENT.....	47
7	REALIZACE MĚŘENÍ.....	48
7.1	VÝPOČET VÝSLEDKŮ KALIBRACE	48
7.2	KALIBRACE ODMĚŘOVACÍHO SYSTÉMU V OSE X (SANĚ)	51
7.3	NAMĚŘENÁ DATA: OSA X – CELÁ	53
7.4	KALIBRACE ODMĚŘOVACÍHO SYSTÉMU V OSE Y (SANĚ)	55
7.5	NAMĚŘENÁ DATA: OSA Y - CELÁ.....	57
8	RENOVACE A INOVACE MIKROSKOPU	59
8.1	RENOVACE MIKROSKOPU	59
8.2	INOVACE MIKROSKOPU.....	60
9	NÁVRH KALIBRAČNÍHO POSTUPU A KALIBRAČNÍHO LISTU	63
9.1	NÁVRH KALIBRAČNÍHO POSTUPU	63
9.2	NÁVRH KALIBRAČNÍHO LISTU	65
10	ZÁVĚR.....	67
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	69
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK.....	74

ÚVOD

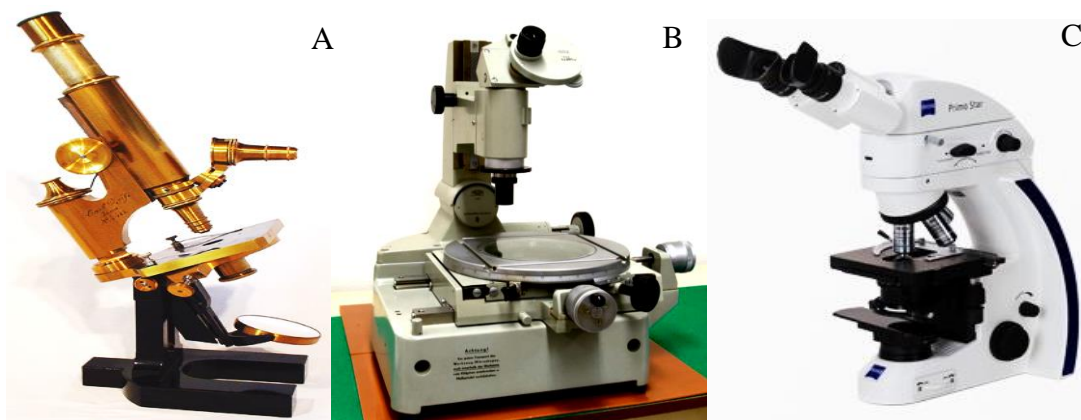
Již ve starověku nepostačovala rozlišitelnost předmětů, věcí, objektů pouze lidským okem a lidé začali hledat nástroje, které by jim byly nápomocny při zvětšování pozorovaných objektů. Nejdříve se používali skleněné koule naplněné vodou a později přišli i na způsob, jak vybrousit minerální kámen (beryl) do čočky tak, aby bylo dosaženo kýženého efektu zvětšení.

Mikroskop byl vlastně vedlejším produktem při objevení teleskopů, jejichž konstrukcí se zabývali například Galileo Galilei či Johannes Kepler.

K velkému přelomu ve vývoji mikroskopů došlo až ve druhé polovině 17. století díky Robertu Hookovi, který v díle *Micrographia* z roku 1665 popsal konstrukci mikroskopu s odděleným objektivem, okulárem a především s osvětlovacím zařízením. Dalším výjimečným průkopníkem byl Anton van Leeuwenhoek, který je též nazýván otcem mikrobiologie.

První firma, která začala vyrábět mikroskopy, byla roku 1847 firma Carl Zeiss, avšak každý přístroj byl vlastně unikátem, dokud s ní nezačal spolupracovat Ernst Karl Abbe, zakladatel teorie optických přístrojů. Při vývoji optického mikroskopu dospěl ke zjištění, že musí brát v potaz nejen lom světla, ale i jeho pohyb.

Na obrázku č. 1 je zobrazen vývoj mikroskopů Carl Zeiss. Tyto mikroskopy se od sebe liší především zásluhou rozvoje optiky a v posledních desetiletích taky rozmachem výpočetní techniky. Tuto skutečnost názorně ukazuje porovnání tří těchto vybraných zástupců. Jeden z prvních mikroskopů vyrobených firmou Zeiss v roce 1873 (obr. č. 1A). Mikroskop z roku 1970 (obr. č.1B) a mikroskop z roku 2012 (obr. č.1C). Oba posledně uvedené pracují s přesností 0,01mm.



obr. 1 Vývoj mikroskopu Carl Zeiss

Cílem této diplomové práce je popsat renovaci dílenského mikroskopu z roku 1970 a kalibraci prokázat, že i po čtyřiceti letech, které uplynuly od jeho výroby, dokáže pracovat stejně přesně a spolehlivě jako v současnosti prodávané profesionální digitální mikroskopy, jejichž cena se pohybuje v řádech stovek tisíc korun.

V teoretické části diplomové práce je řešen princip laserinterferometru podle ČSN ISO 230-1 a teoretické základy z oblasti matematického popisu aplikace zařízení podle ČSN ISO 230-2. Jsou zde uvedeny a popsány chyby a nejistoty měření, které ovlivňují výsledky měření.

Praktická část obsahuje renovaci dílenského mikroskopu Zeiss včetně výkresové dokumentace. Dále je popsáno nastavení laserinterferometru Renishaw pro kalibraci os „X“, „Y“ a stavěcího šroubu podle ČSN ISO 230-2.

V závěru je navržen kalibrační postup, včetně kalibračního protokolu pro mikroskop číslo 11261 Carl Zeiss Jena.

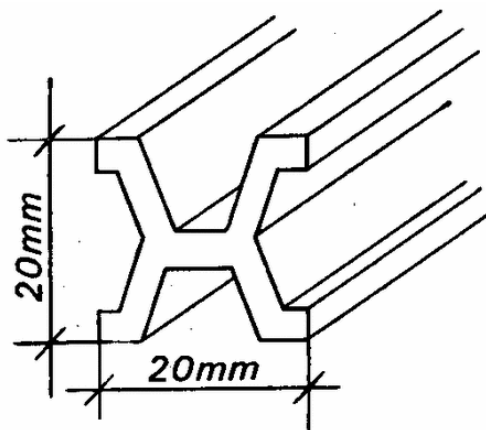
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MĚŘENÍ DÉLEK

Měření délek bylo jednou z prvních nutností, které člověk potřeboval při stanovení správného rozměru a první metoda měření délek byla odvozena z rozměrů lidského těla (loket, krok, stopa). Problém ale vznikal při obchodování, protože každý národ používal své jednotky a ty se nemusely shodovat s ostatními. Důležitým mezníkem byla Velká francouzská revoluce, během které byla ve Francii zavedena metrická soustava.

„Roku 1791 byla vytvořena komise pro váhy a míry, která stanovila délku rovnu desetimilionté části kvadrátu zemského poledníku, procházejícího pařížskou hvězdárnou. Tato jednotka již nesla označení metr a její velikost byla 0,51307398 toise du Pérou (1m). Etalonem byla platinová tyč délky jednoho metru zhotovená s přesností 0,01mm. Tento archivní metr je dodnes uložen ve francouzském státním archívu. Platinový archivní metr byl poměrně měkký a opotřebovával se. Nebyl vhodný k určování délek národních etalonů a vyvstal požadavek, aby byl zhotoven a definován mezinárodní prototyp metru.

Roku 1875 byla vytvořena Metrická konvence, což bylo seskupení většiny evropských států, které již zavedly nebo se zavázaly zavést metrický systém. Již roku 1874 bylo vyhotoveno 30 platinoirodových tyčí délky 102 cm a profilu ve tvaru písmene X“.[7]



obr. 2 Mezinárodní prototyp metru [9]

V 19. století zásluhou velkého technického rozvoje pak byly jednotné míry čím dál potřebnější, proto byl roku 1875 zřízen Mezinárodní ústav pro míry a váhy. Zde se jednotky měření stále zpřesňovaly a roku 1960 byla na základě toho vytvořena Mezinárodní soustava jednotek SI. V České republice byla nejdříve roku 1922 zavedena metrická konvence a roku 1980 byla přijata zákonem stanovená soustava SI.

tab. 1 SI soustava pro metr

Jednotka	Značka jednotky	Převody
Kilometr	km	1km = 1000 m
Decimetr	dm	1 m = 10 dm
Centimetr	cm	1 m = 100 cm
Milimetr	mm	1 m = 1000 mm
Mikrometr	μm	1 m = 1000000 μm
Nanometr	nm	1m= 1000000000 nm

Při měření musíme brát v potaz vhodnou metodu měření délek. Tyto metody jsou rozděleny do několika skupin. Na přímé a nepřímé metody měření délek, v souladu s typem výstupních údajů, na základě charakteru údajů a podle styku s měřeným prostředím.

1.1 Přímé metody měření délek

Přímé metody měření znamenají, že měřidlo klademe do přímé spojnice dvou bodů. Přímými metodami měření jsou:

- měření délek pomocí tuhých měřidel (pásma, latě),
- elektrooptické dálkoměry,
- rádiové dálkoměry,
- laserové dálkoměry.

1.2 Nepřímé metody měření délek

Nepřímé metody jsou takové, při nichž používáme jiné veličiny nebo pomocné základy a určenou délku dopočítáváme. Patří sem:

- optické dálkoměry,
- trigonometrické určování délek,
- GPS.

1.3 Typ výstupních údajů

Při měření získáme dva druhy údajů:

- analogový výstup získáme z měřicích přístrojů, jejichž údaje mají spojitou funkci měřené veličiny,
- digitální výstupní údaje získáme z měřicích přístrojů, které poskytují výsledek v číslicové formě.

1.4 Dělení podle charakteru údajů

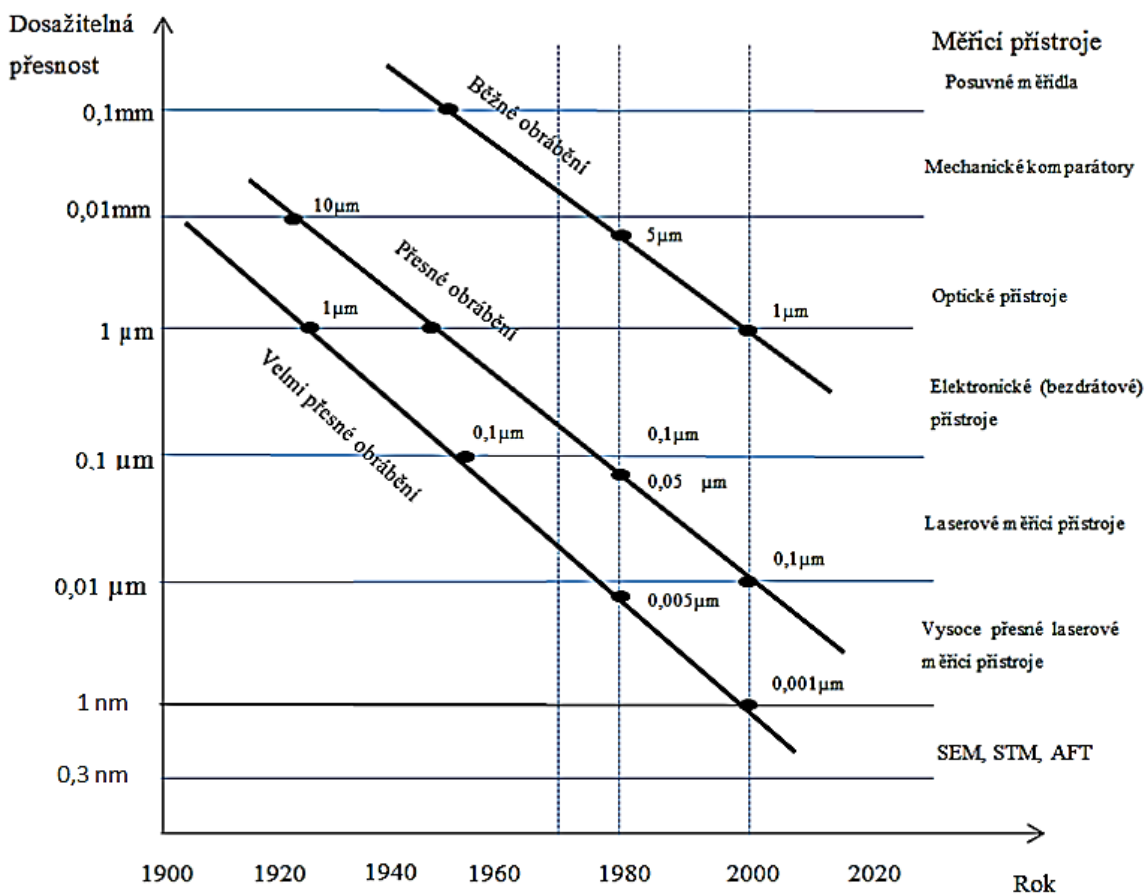
Jednotlivá měřidla dělíme podle charakteru získávaných údajů na:

- indikační: například mikrometr, posuvné měřidlo,
- registrační: například zapisovací spektrometr.

1.5 Kontakt s měřeným prostředím

Měřicí zařízení můžeme rozdělit podle způsobu kontaktu s měřeným objektem na:

- dotykové: přijdou do přímého kontaktu s měřeným prostředím, např. mikrometr,
- bezdotykové: nepřijdou do přímého kontaktu s měřeným prostředím, např. laser.



obr. 3 Vývoj dosažitelné přesnosti ve výrobě [9]

Díky novým technologiím výroby se zvyšují nároky na dosažitelnou přesnost měřících přístrojů a tím pádem i na jejich kalibraci. Je důležité držet krok s výrobní technologií a zdokonalovat kontrolní systémy. Nejpřesnější měření je laserovými systémy, a proto byl tento systém použit pro kalibraci mikroskopu Zeiss.

2 LASEROVÉ SYSTÉMY

Laser je zkratkou anglického výrazu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesílení světla pomocí vynucené – stimulované – emise záření). Toto světlo má velmi specifické vlastnosti, které jsou využívány k mnoha činnostem v nejrůznějších odvětvích.

Důležitými vlastnostmi jsou:

- monochromaticnost – elektromagnetické záření o jedné vlnové délce,
- koherence – neměnnost fázového posunu a frekvence záření,
- malá divergence – malá rozbíhavost, protože průměr paprsku vrůstá se vzdáleností,
- vlnová délka – vzdálenost celé vlny, kterou urazí během jedné periody.

„Laser je tvořen zdrojem energie, aktivním prostředím a rezonátorem. Tato energie vybudí elektrony aktivního prostředí do vyšší energetické hladiny, dojde k tzv. excitaci. Takto je vybudena většina elektronů aktivního prostředí. Při přesunu elektronu na nižší energetickou hladinu dojde k vyzáření (emisi) kvanta energie ve formě fotonů. Tyto fotony se ovlivňují s dalšími elektrony, čímž spouštějí stimulovanou emisi fotonů, se stejnou frekvencí a fází. Jelikož je aktivní prostředí umístěno do rezonátoru, dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovným průchodem aktivním prostředím. To podporuje stimulovanou emisi, a tím dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Výsledný svazek fotonů opouští rezonátor skrze výstupní polopropustné zrcadlo.“ [8]

Lasery rozdělujeme:

- podle typu aktivního prostředí na plynový, pevnolátkový, diodový a kapalinový,
- podle vlnové délky na infračervený a ultrafialový,
- podle režimu práce na kontinuální, pulzní a impulzní.

2.1 Typy laserů

Na základě aktivního prostředí se lasery dělí na CO_2 , polovodičové, pevnolátkové a plynové.

2.1.1 CO_2 laser

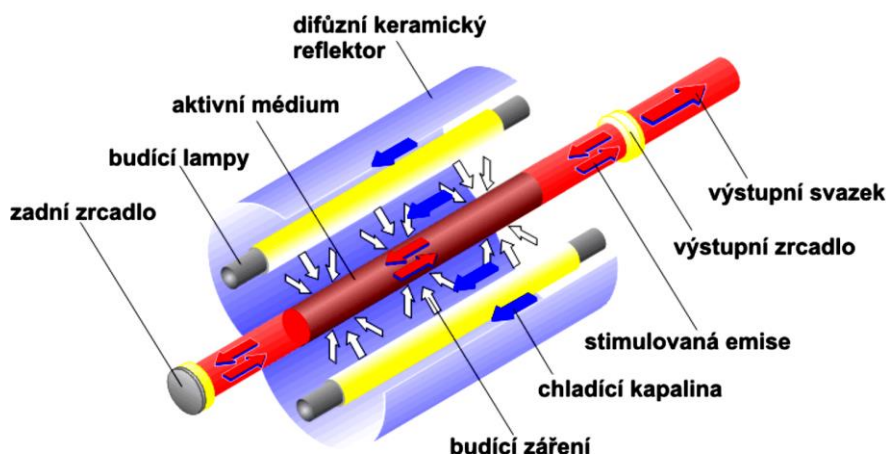
Aktivní částicí je lineární molekula CO_2 , kde na jedné přímce leží dva atomy kyslíku vázané k jednomu atomu uhlíku. Aktivní jsou především atomy kyslíku, které mohou kmitat všemi směry a vyzářují tak velké spektrum frekvencí. CO_2 lasery se využívají především ke svařování a řezání ocelových nosníků. [10]

2.1.2 Polovodičový laser

Patří k jedněm z nejrozšířenějších laserů, někdy také nazývané jako laserová dioda. Aktivním prostředím jsou elektronové přechody mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Tyto lasery jsou velmi citlivé na změnu teploty, proto našli uplatnění především ve výpočetní technice. Mohou pracovat v kontinuálním i pulzním režimu, protože paprsek lze snadno modulovat pomocí změny budícího elektrického proudu. [10]

2.1.3 Pevnolátkový laser

Pevnolátkový rubínový laser byl prvním vynalezeným laserem na světě. U tohoto laseru se využívá syntetický rubín. I když se dá používat v kontinuálním i impulzním režimu, nejvíce se používá v režimu impulzním. Jeho vynález ovlivnil především medicínu, protože jeho první práce byla přivaření odchlípnuté sítnice lidského oka. [10]



obr. 4 Lampami buzený Nd: YAG laser

2.1.4 Plynový helium-neonový laser

Aktivním prostředím je výbojka plněná směsí hélia a neonu. Za pomoci elektrického výboje se vybudí atomy hélia do vyšších energetických svazků. Takto vybudené atomy narážejí do atomů neonu a předávají jim svoji energii. Stimulované atomy neonu, když přecházejí na nižší energetickou hladinu, generují koherentní záření. Generované světlo má malou divergenci svazku a je monochromatické, což jsou jeho nejlepší vlastnosti.

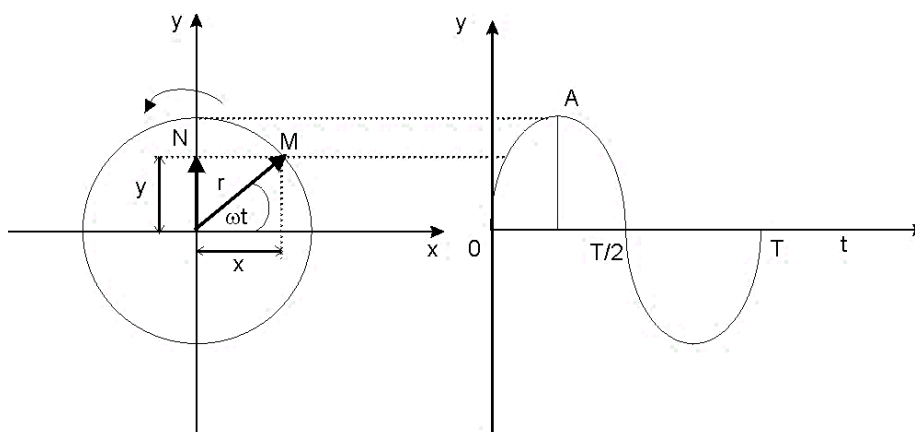
2.2 Interference světla

Světlo je elektromagnetické vlnění o malé vlnové délce (380 – 760nm). Interference potvrzuje vlnový charakter světla.

Pokud se vlnění šíří prostorem, uvede postupně jednotlivé částice prostředí do periodického pohybu, tj. pohybu, který se opakuje v určitých, stejných časových intervalech. Pohyb nějaké částice M se děje po přímce y. Zvolme na této přímce pevný bod O a označme okamžitou vzdálenost částice M od bodu O písmenem y. Potom můžeme periodický pohyb v nejjednodušším případě vyjádřit rovnicí:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \omega^2 y = 0 \quad (1)$$

$$y = A \cdot \sin \omega t \quad y = A \cdot \cos \omega t \quad (2)$$



obr. 5 Mechanické vlnění

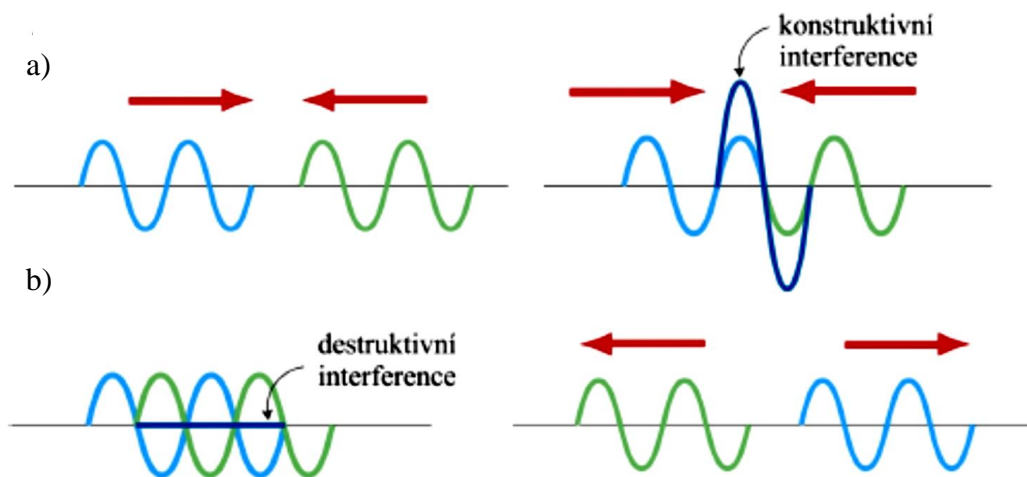
2.3 Interferometrie

Interferometrie je založena na interferenci světla. Interference vzniká za splnění podmínek:

- Veškeré záření dopadající do jednoho bodu musí mít stejnou vlnovou délku.
- V daném bodu na stínítku musí veškeré záření mít neměnný dráhový rozdíl.

Splněním těchto podmínek dojde k interferenci světla na stínítku, což je označováno jako koherentní záření. Každý bod stínítka musí být pokryt světlem z obou štěrbin. Dráhový rozdíl pak rozhoduje o tom, jestli na stínítku vznikne světlý či tmavý proužek. Pokud je dráhový rozdíl roven sudému násobku vlnové délky, vznikne světlý proužek a pak jde o konstruk-

ktivní interferenci. Pokud bude dráhový rozdíl roven lichému násobku, vznikne tmavý proužek a jde o destruktivní interferenci.



obr. 6 Super pozice vln - a) Konstruktivní b) Destruktivní interference [19]

„Pokud máme dvě vlny:

$$\psi_1(x, t) = \psi_{10} \sin(k_1 \pm \omega_1 t + \varphi_1); \quad \psi_2(x, t) = \psi_{20} \sin(k_2 \pm \omega_2 t + \varphi_2) \quad (3)$$

Výsledná vlna je jednoduše:

$$\psi(x, t) = \psi_{10} \sin(k_1 \pm \omega_1 t + \varphi_1); \quad \psi_2(x, t) = \psi_{20} \sin(k_2 \pm \omega_2 t + \varphi_2) \quad (4)$$

Interferometrie je konstruktivní, pokud je výsledná vlna $\psi(x, t)$ větší než vlny původní

(obr. 6. a) a destruktivní, pokud je menší (obr. 6. b).“ [19]

V závislosti na velikosti dráhového rozdílu vznikají interferenční maxima pro:

$$\Delta l = k \lambda \quad (5)$$

(kde k je celé číslo, λ vlnová délka paprsku) a interferenční minima pro:

$$\Delta l = (2k + 1)\lambda/2 \quad (6)$$

2.4 Interferometr

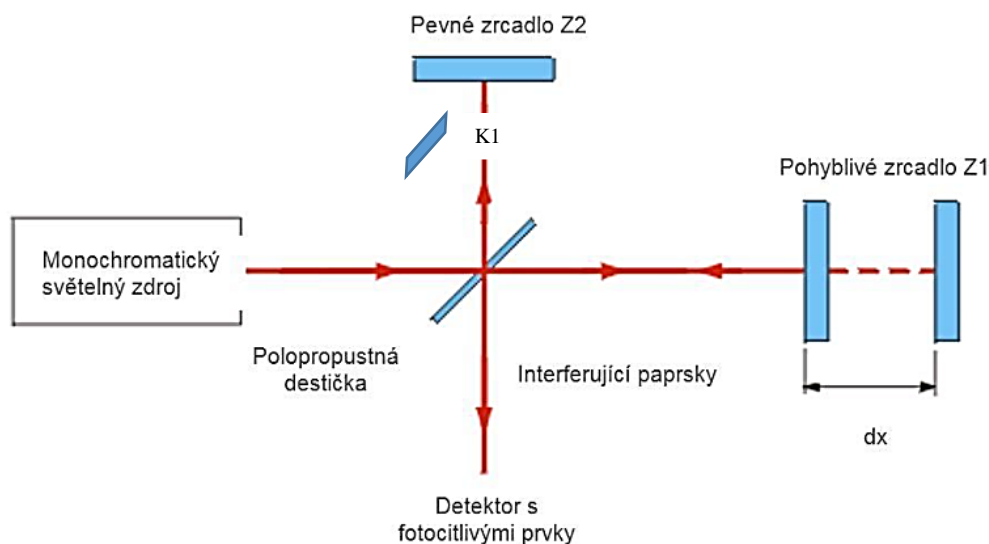
Interferometr je zařízení pro velmi přesná měření, založená na principu interference světla. Máme několik typů interferometrů:

- k měření délek se používá interferenční komparátor,
- k určení lomu u plynů a kapalin se používá interferenční refraktometr,
- k určení jemné struktury spektrálních čar se používá interferenční spektroskop.

2.4.1 Michalsonův interferometr

Michalsonův interferometr se skládá z monochromatického světelného zdroje, polopropustné destičky, detektoru a dvou zrcadel.

Paprsek ze zdroje dopadá pod úhlem 45° na polopropustnou destičku, kde se štěpí na dva paprsky. První paprsek dopadá kolmo na pevné zrcadlo (Z_2), odrazí se zpět na polopropustnou destičku, kterou prochází do detektoru. Druhý paprsek projde polopropustnou destičkou a dopadá kolmo na pohyblivé zrcadlo (Z_1). Po jeho odrazu zpět na polopropustnou destičku se znovu odrazí, tentokrát do detektoru, kde se oba paprsky opět sejdou.



obr. 7 Schéma Michalsonova Interferometru [10]

Protože druhý paprsek projde polopropustnou destičkou celkem třikrát, vkládá se do cesty prvnímu paprsku destička $K1$ (kompenzační) rovnoběžná s polopropustnou destičkou. Jestliže jsou vzdálenosti zrcadel Z_1 a Z_2 od polopropustné destičky stejné, budou stejné i dráhy

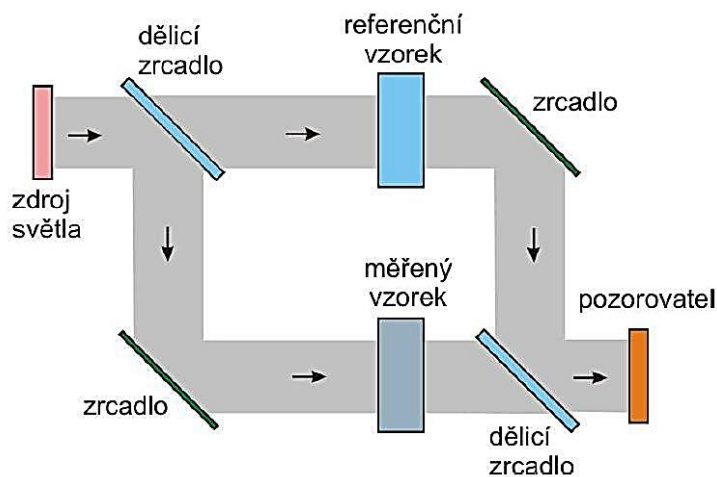
paprsků a v ohnisku objektivu oba paprsky zesílí. V případě, že posuneme zrcadlo Z_2 o vzdálenost l , dráhový rozdíl paprsků bude:

$$\Delta l = 2dx \quad (7)$$

2.4.2 Machův-Zehnderův interferometr

Machův-Zehnderův interferometr je vhodný především pro přesná měření transparentních objektů. Není tak citlivý jako Michalsonův interferometr, u kterého prochází paprsek vícekrát. Pokud ale světelný zdroj umístíme do dostatečné vzdálenosti od optických prvků a od referenčního svazku, můžeme zařízení používat i pro výzkum objektů generujících do okolí tepelný tok.

Světelný svazek z laseru se na děliči rozdělí na svazek předmětový a referenční. Předmětový svazek je upraven čočkami na paralelní svazek o větším průměru a prochází měřicím prostorem, přičemž původní rovinná vlnoplocha se transparentním objektem deformuje. Obdobně je čočkami upraven referenční svazek. Po spojení svazků na děliči vzniká díky různým optickým drahám předmětových a referenčních paprsků interference. Čočka zobrazuje pak rovinu z měřicího prostoru do prostoru pozorovatele. [11]

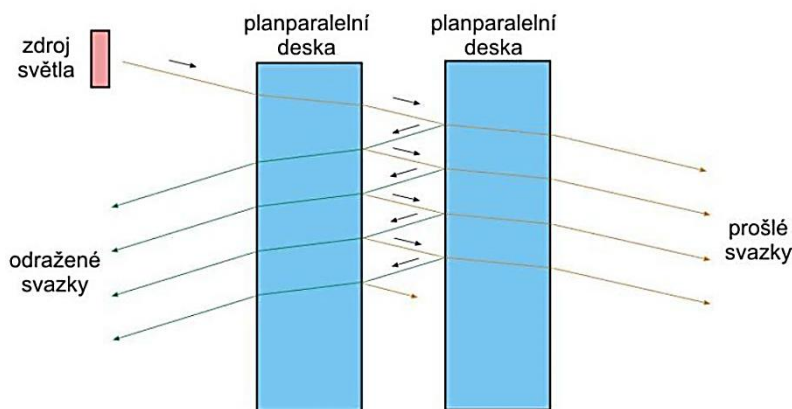


obr. 8 Schéma Machova-Zehnderova interferometru [10]

2.4.3 Fabryův-Perotův interferometr

Tento interferometr se skládá ze dvou planparalelních desek. První je částečně propustná. Světlo vstupuje do interferometru téměř kolmo a mnohokrát se odrazí. Část paprsků odchází

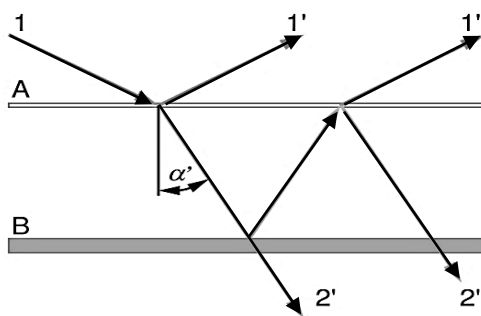
a projdou ven první deskou, a část světelného svazku projde ven druhou deskou. Stejně jako u Machova-Zehnderova interferometru zde měříme rozdíl indexu lomu ve fázových prostředích.



obr. 9 Schéma Fabryova-Perotova interferometru [10]

2.4.4 Interferenční komparátor

Interferenční komparátor je složité mechanicko-optické zařízení, které na svoji činnost využívá interferenci dvojicí paprsků.



obr. 10 interferenční jev [10]

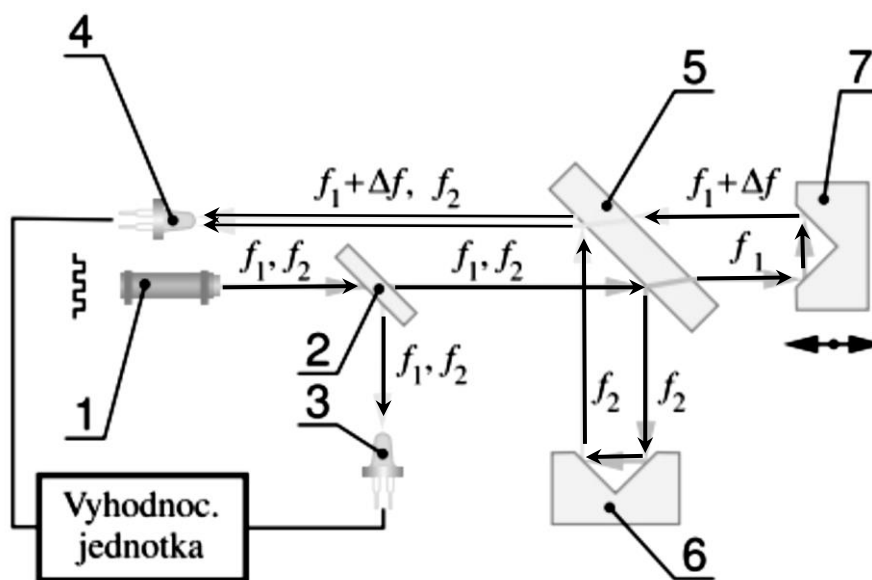
Interferenční vrstva je omezena dvěma rovnoběžnými plochami. Horní plocha A je polopropustná a spodní vrstva B je tvořena zrcadlem. Při dopadu monochromatického paprsku 1 na plochu A dochází k částečnému odrazu ve směru 1' a zároveň k jeho lomu ve směru 2'. Paprsek 2' se opět částečně odrazí a dělí se. Část projde polopropustnou vrstvou A (1'') a druhá část se odrazí ve směru 2''. Paprsky 1' a 1'' jsou koherentní, takže spolu mohou interferovat. Mezi oběma paprsky vzniká dráhový rozdíl δ , který se vypočítá podle rovnice:

$$\delta = 2 \cdot n \cdot b \cdot \cos \alpha' + \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

Kde b je hloubka interferenční vrstvy, n je index lomu prostředí vrstvy a λ je vlnová délka světla. [12]

2.5 Laserový interferometr

Laserový interferometr pracuje na fyzikálním principu interferenčního komparátoru. Zdrojem světla je zde dvojfrequenční plynový helium-neonový laser (1), který emituje světelné záření na dvou blízkých frekvencích $f_1 = 5,0000002 \cdot 10^{14}\text{Hz}$ a $f_2 = 5,0000000 \cdot 10^{14}\text{Hz}$. Paprsky jsou navzájem ortogonálně polarizované. Umožňuje to jejich oddělení pomocí polarizačního filtru (2). Tímto způsobem dostaneme referenční a měřicí paprsky. Referenční paprsky f_1 a f_2 dopadají na fotocitlivý prvek (3). Měřicí paprsek pokračuje na polopropustné zrcadlo (5), kde se paprsky dělí. Jedna část f_2 se odrazí od koutového odražeče (6), odkud se opět odrazí zpět na polopropustné zrcadlo a vrací se na fotocitlivý prvek (4). Druhá část f_1 projde polopropustným zrcadlem, kde dopadá na druhý koutový odražeč (7) upevněný na měřeném objektu. Právě zde dochází k frekvenčnímu posuvu tohoto paprsku o hodnotu $f_1 + \Delta f$. Tento paprsek se také vrací na fotocitlivý prvek (4). Na výstupu pak vzniká výstupní signál přímo úměrný změně frekvence Δf .



obr. 11 Schéma laserového interferometru [10]

3 PŘESNOST A OPAKOVATELNOST NASTAVENÍ POLOHY NA ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÝCH OSÁCH

Každé měření je průkazné, pokud jsme schopni jej za stejných podmínek zopakovat. Aby byla zajištěna přesnost, je potřeba přípravu na měření normalizovat.

ČSN ISO 230-1:1998 Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek normalizuje zkoušení přesnosti obráběcích strojů. V této normě je specifikováno zatížení daného stroje (v případě této diplomové práce přístroje), teplota a naprogramování (nastavení) os.

Dále tato norma specifikuje chyby nastavení měřících přístrojů a jejich přesnost. Při kalibraci měřících zařízení je důležité používat kalibrační zařízení o řád přesnější než zařízení kalibrované.

Norma ČSN ISO 230-1 uvádí, že přesnost interferometru je určena vlnovou délkou laseru a je lepší než $0,5 \mu\text{m}$.

3.1 Přesnost interferometrů

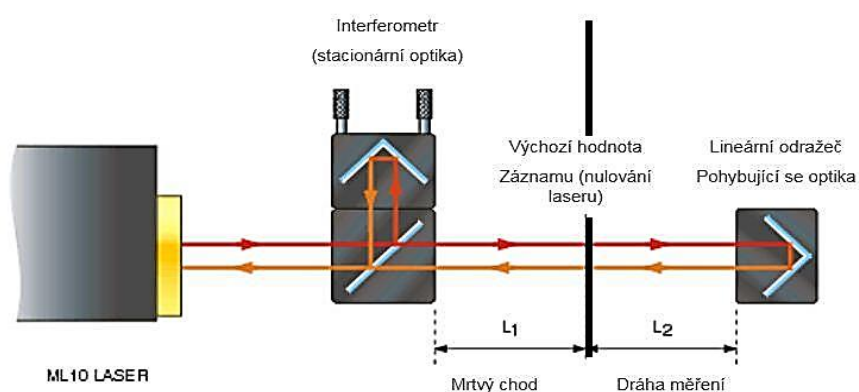
Laserinterferometr umí měřit pět ze šesti stupňů volnosti (lineární nastavení plochy, vodorovnou přímost, svislou přímost, klopení a kolmost dvou ploch). Největší problémy mohou nastat při měření nežádoucích úhlových pohybů a nepřímocharých translačních pohybů, které mohou být větší než úchytky lineárního nastavení polohy v souřadné ose. [13]

3.2 Zdroje úchylek interferometrů

Při měření délek je nutné si uvědomit, že naprostá přesnost měření je možná pouze tenkrát, když známe stav okolí a vlivů. Je velmi důležité docílit stability při celém průběhu měření. Hlavními zdroji možných chyb jsou:

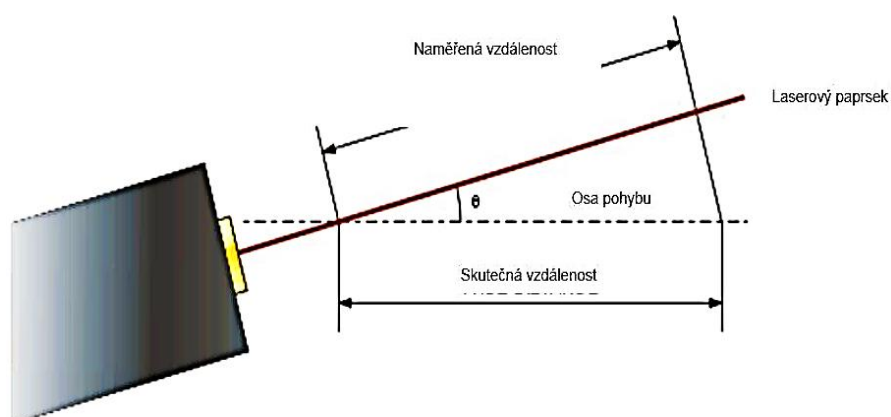
- a) prostředí – důležitým faktorem může být změna teploty (změna o 1°C = chyba $1 \mu\text{m}$), stejným způsobem se projevuje chyba při změně absolutního tlaku nebo relativní vlhkosti,
- b) teplota povrchu stroje – dalším podstatným zdrojem chyb při vyhodnocování měření je vliv teploty vlastního (obráběcího) stroje (v ČSN ISO 230-1 se uvádí vliv, že při ohřátí vodícího šroubu o 1°C , při celkové dráze šroubu 1000mm vznikne prodloužení přibližně $0,0108\text{mm}/^\circ\text{C}$),

- c) chyba způsobená tepelnými zdroji – změna teploty nebo měření v blízkosti tepelných zdrojů může způsobit roztažení optiky nebo vzduchové turbulence, které mohou ovlivnit laserový paprsek,
- d) znečištění optiky – znečištění má vliv především při měření delších drah a to ovlivněním síly signálu laserového paprsku,
- e) chyba „mrtvé dráhy“ – tato chyba je způsobena nulováním systému, mezi dvěma optickými prvky,



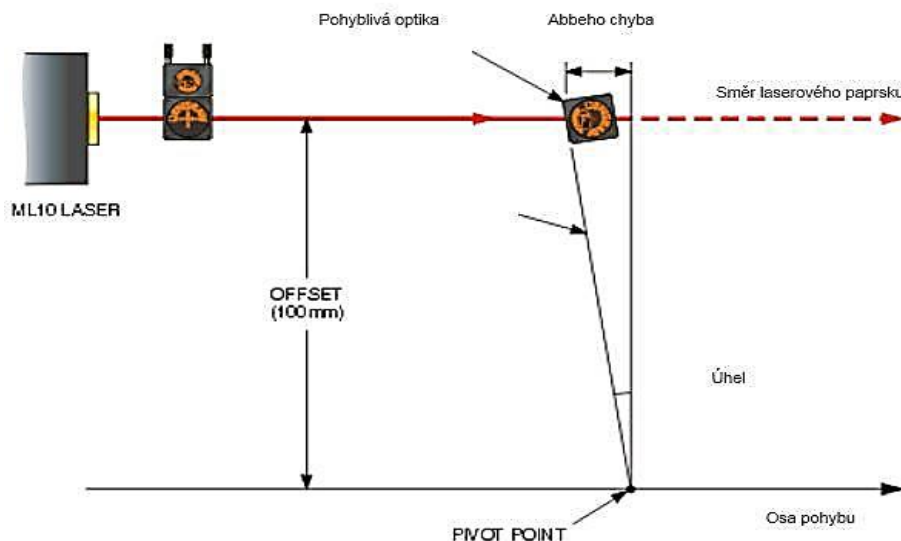
obr. 12 Chyba „mrtvé dráhy“

- f) Kosinova chyba – tato chyba je způsobena nerovnoběžností dráhy paprsku laseru a osy pohybu stroje. Chyba je úměrná kosinu úhlu odchytky, což znamená, že měřená dráha je kratší než dráha skutečná,



obr. 13 Kosinova chyba

- g) Abbého chyba – chyba může být způsobena natočením optiky po správném seřízení laseru vůči definované ose kalibrace.



obr. 14 Abbého chyba

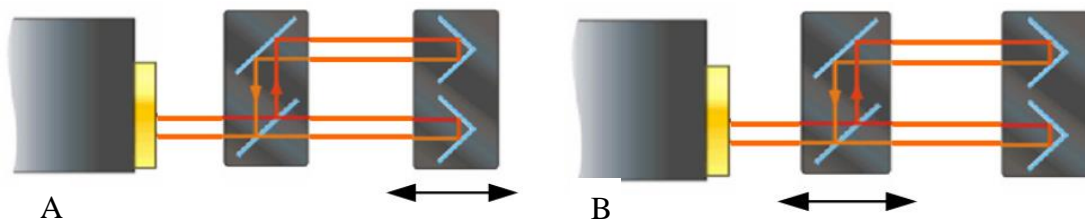
Při seřizování laserových systémů bychom měli dodržovat základní pravidla:

- zvolit správné uspořádání pro měření požadovaných parametrů,
- minimalizovat možné zdroje chyb,
- co nejlépe napodobit pracovní podmínky stroje.

Dodržením těchto pravidel bychom se neměli výše zmíněných chyb vůbec dopustit a měření by mělo proběhnout bezchybně.

3.3 Konfigurace a princip lineárních měření pomocí laserového interferometru

Máme dva základní typy konfigurace používané při lineárním měření os prováděném v této práci. První variantou je pevně umístěný lineární dělič a pohyblivý odražeč, druhou variantou pak lineární dělič pohyblivý a odražeč pevně umístěný.

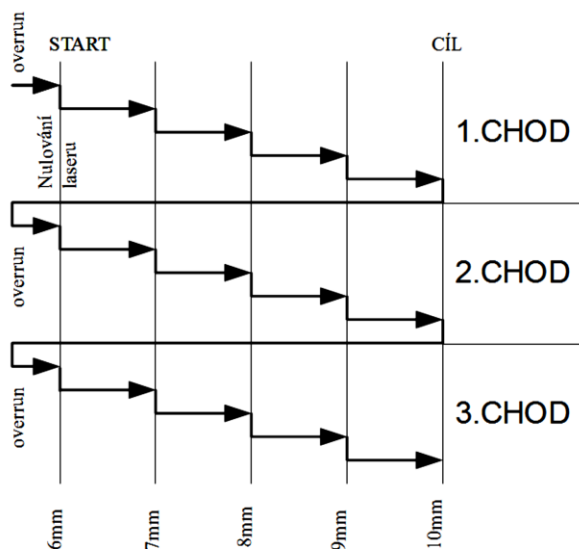
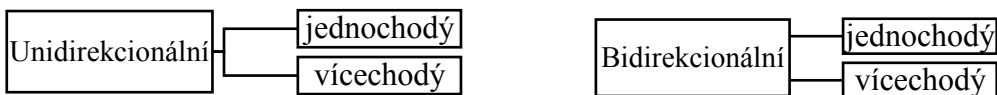


obr. 15 A) stacionární lineární dělič a kinematický odražeč

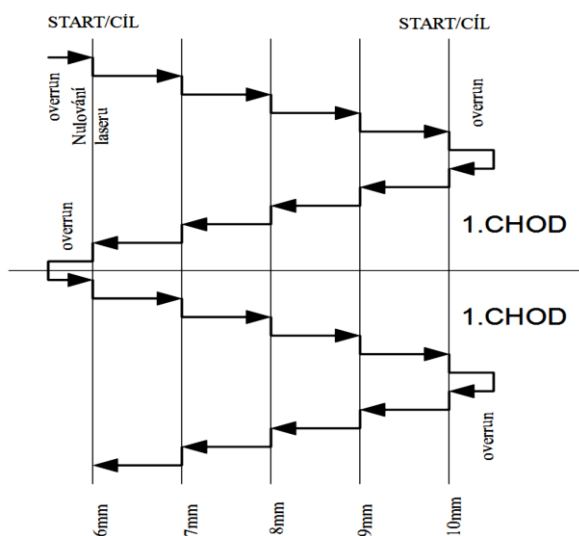
B) kinematický lineární dělič a stacionární lineární odražeč

3.4 Typy měřících cyklů

3.4.1 Lineární měřící cyklus



obr. 16 Lineární trojchodý unidirek. cyklus [11]

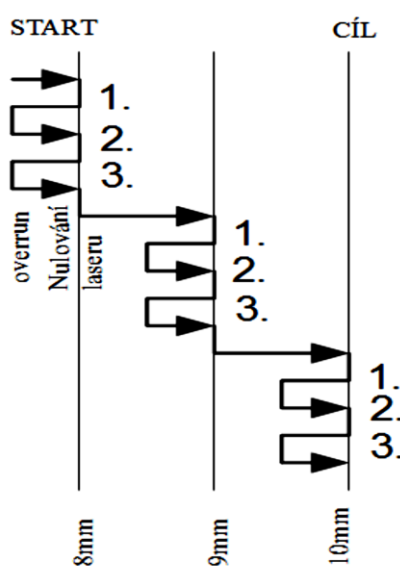


obr. 17 Lineární dvouchodý bidirek. cyklus [11]

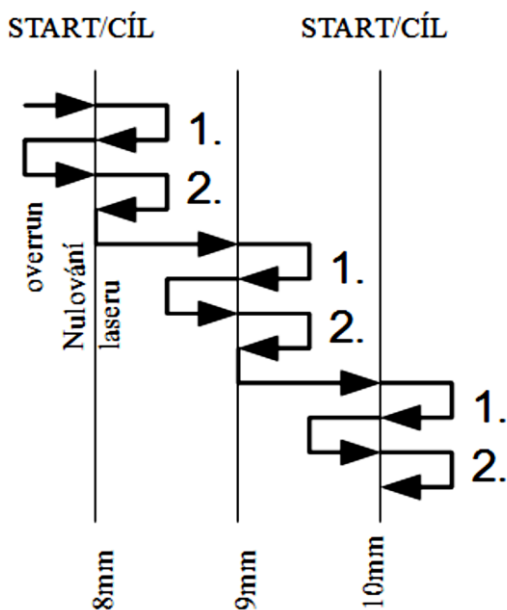
Unidirekcionální (jednostranný) – výraz vztahujeme k sérii měření, kdy nastavení pro zadanou polohu a osu, vykonáváme vždy ve stejném smyslu pohybu.

Bidirekcionální (dvoustranný) – tento výraz vztahujeme k sérii měření, kdy nastavení pro zadanou polohu a osu vykonáváme vždy v obou směrech pohybu.

3.4.2 Pendulární měřicí cyklus



obr. 18 Pendulární trojchodý unidirek. cyklus [11]



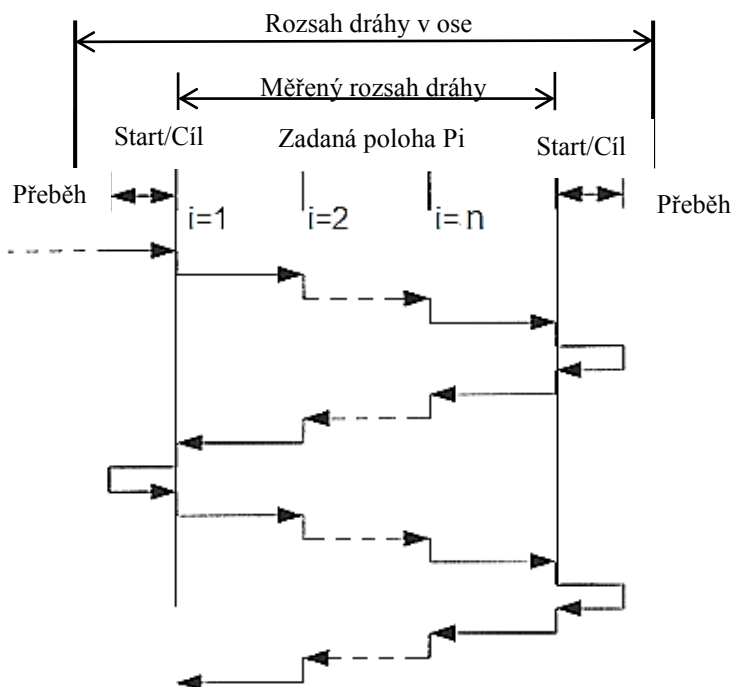
obr. 19 Pendulární dvouchodý bidirek. cyklus [11]

4 METODY ZKOUŠEK A VYHODNOCENÍ PŘESNOSTI

4.1 Norma ČSN ISO 230-2:2010 Zásady zkoušek obráběcích strojů- stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení v číslicově řízených osách

Tato norma specifikuje metody zkoušek a vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy pro přímé měření polohy v jednotlivých osách.

Literatura použitá v této sekci [11;13;20]



obr. 20 Lineární dvouchodý bidirekcionální cyklus [11]

„Rozsah dráhy v ose – jde o největší dráhu lineární či úhlovou, v jejímž rozsahu se může pohyblivá část pomocí číslicového řízení přestavovat.

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 najetí z obou stran.

Zadaná poloha P_i ($i = 1$ až m) – poloha, do které je programován pohyb nastavené části.

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

Polohová úchylka x_{ij} – rozdíl mezi skutečnou a dosaženou nastavovanou částí a polohou.

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (9)$$

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

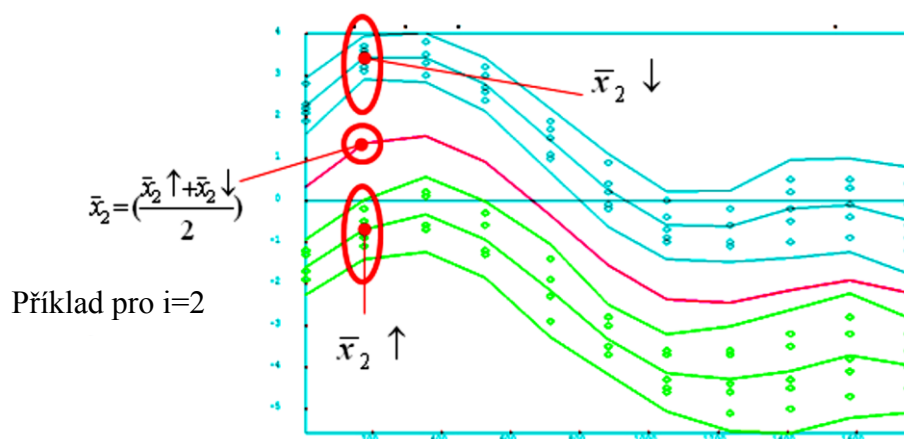
Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze $\bar{X}_i \uparrow$ nebo $\bar{X}_i \downarrow$ - aritmetický průměr polohových úchylek, zjištěných při sérii „n“ najetí do polohy P_i v jednom smyslu.

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (10)$$

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (11)$$

Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze \bar{X}_i – aritmetický průměr průměrných jednostranných polohových úchylek $\bar{X}_i \uparrow$ a $\bar{X}_i \downarrow$, zjištěných při najíždění do polohy P_i v obou směrech.

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (12)$$



obr. 21 Diagram průměrných polohových úchylek [11]

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

$$B_i = \bar{X}_i \uparrow - \bar{X}_i \downarrow \quad (13)$$

Necitlivost v ose B – největší z absolutních hodnot necitlivosti $|B_i|$ ze všech zadaných poloh v dané ose.

$$B_i = \max \cdot \llbracket B_i \rrbracket \quad (14)$$

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.

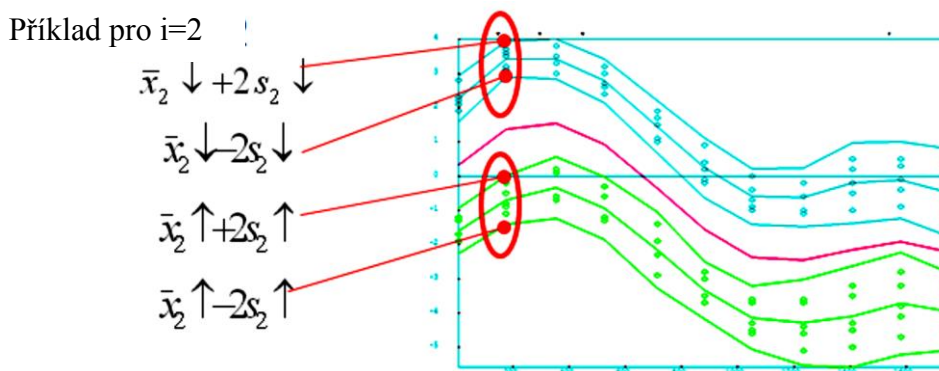
$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ji} \uparrow - \bar{X}_i \uparrow)^2} \quad (15)$$

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ji} \downarrow - \bar{X}_i \downarrow)^2} \quad (16)$$

Hranice úchylek – pro každou zadanou hodnotu P_i a pro n nastavení poloh v každém smyslu se určí hranice úchylek.

$$\bar{x}_i \uparrow \pm 2s_i \uparrow \quad (17)$$

$$\bar{x}_i \downarrow \pm 2s_i \downarrow \quad (18)$$



obr. 22 Diagram hranic úchylek [11]

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.

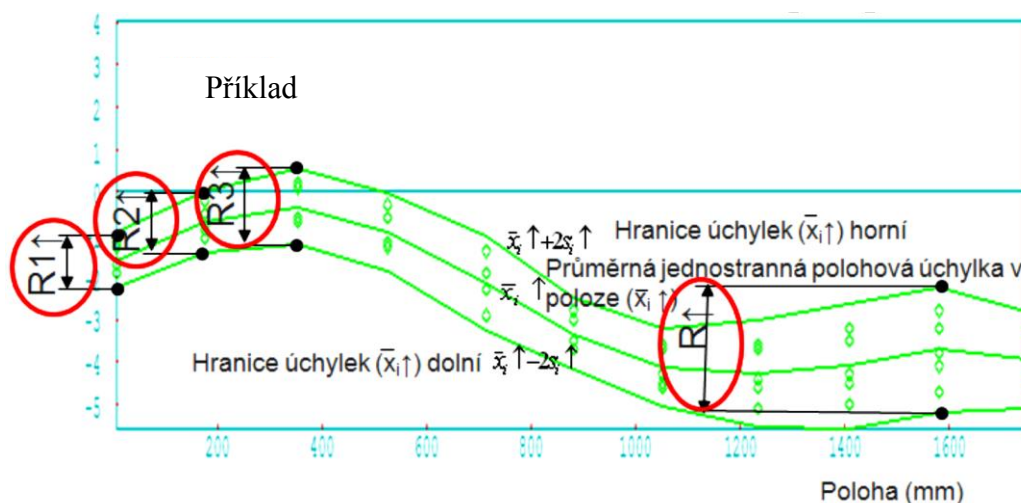
$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \quad (19)$$

$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (20)$$

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.

$$R \uparrow = [R_i \uparrow] \quad (21)$$

$$R \downarrow = [R_i \downarrow] \quad (22)$$



obr. 23 Diagram jednostranné opakovatelnosti nastavení v ose [11]

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 dané ose.

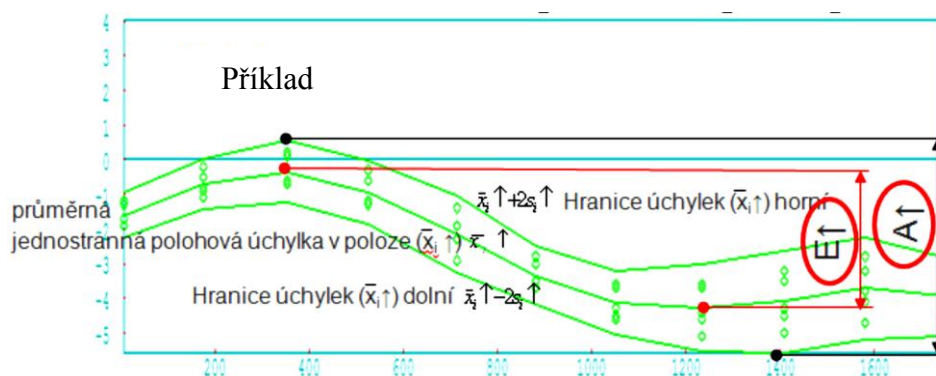
$$E \uparrow = \max[x_i \uparrow] - \min[x_i \uparrow] \tag{23}$$

$$E \downarrow = \max[x_i \downarrow] - \min[x_i \downarrow] \tag{24}$$

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

$$A \uparrow = \max[x_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min[x_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \tag{25}$$

$$A \downarrow = \max[x_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[x_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \tag{26}$$



obr. 24 Diagram jednostranné systematické polohové úchylky v ose $E \uparrow$ a jednostranné polohy v ose $A \uparrow$ [11]

Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze

$$R \uparrow = [2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|] \tag{27}$$

Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R

$$R = \max[R_i] \tag{28}$$

Necitlivost v poloze B_i – rozdíl mezi průměrnými jednostrannými polohovými úchylkami zjištěnými při najíždění do polohy P_i v obou směslech.

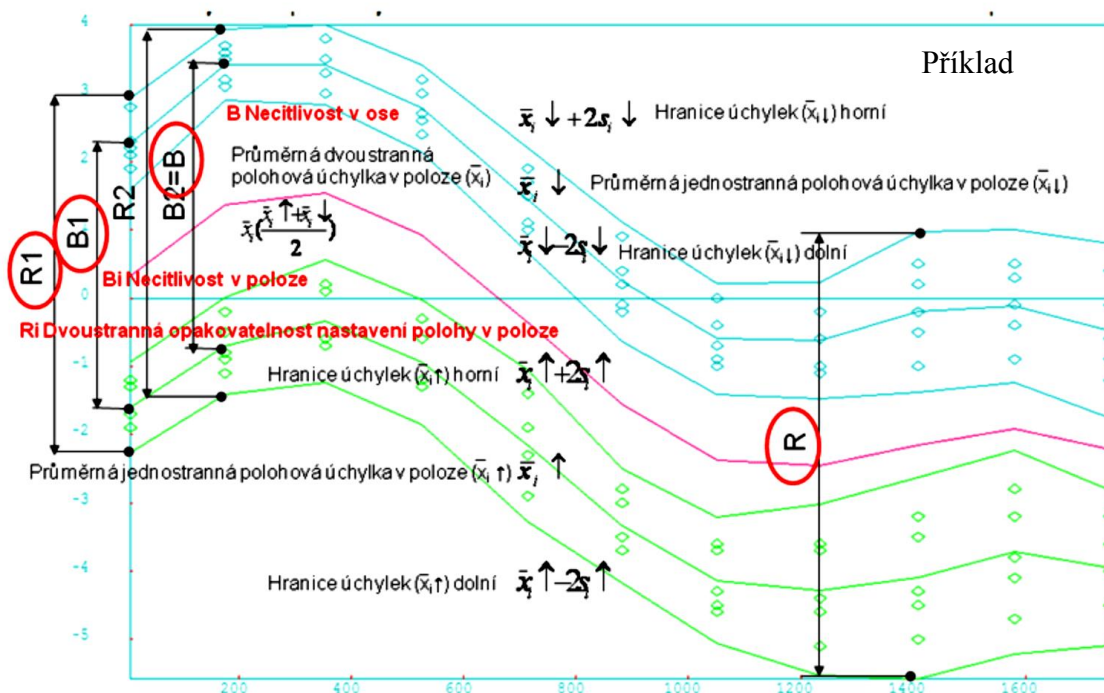
$$B_i = x_i \uparrow - x_i \downarrow \tag{29}$$

Necitlivost v ose B – největší z absolutních hodnot necitlivosti $|B_i|$ ze všech zadaných poloh v dané ose.

$$B = \max[|B_i|] \tag{30}$$

Průměrná necitlivost v ose \bar{B} – aritmeticky průměr necitlivosti B_i ze všech zadaných poloh v dané ose.

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m B_i \tag{31}$$



obr. 25 Diagram necitlivosti osa/poloza, hranice úchylek a opakovatelnosti polohy v poloze [11]

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

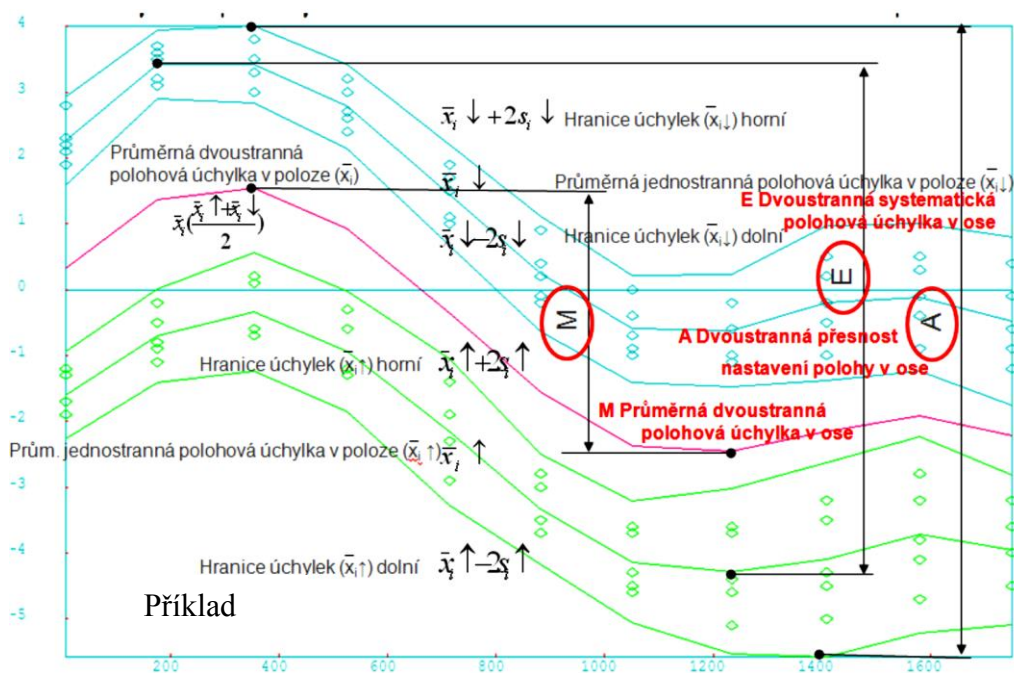
$$M = \max[x_i] - \min[x_i] \tag{32}$$

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

$$E = \max[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \tag{33}$$

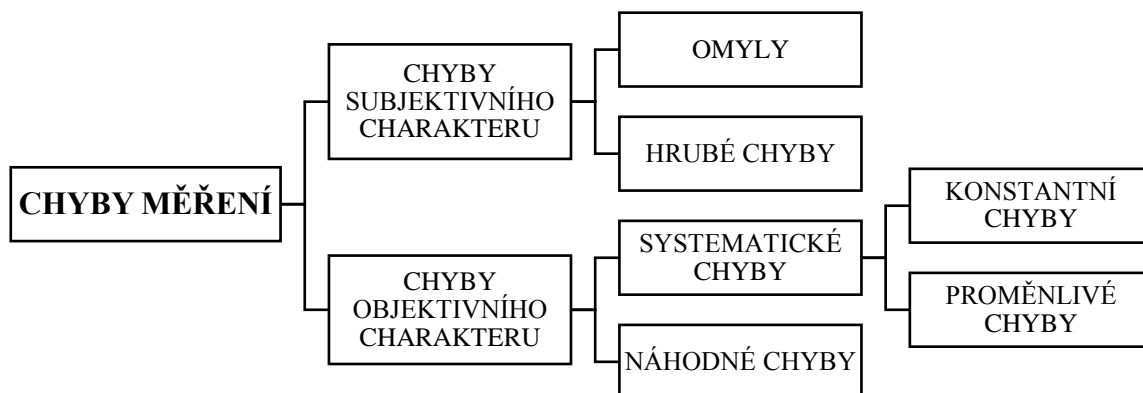
Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose A – rozsah odvozený ze spojení dvoustranných systematických úchylek a odhadu standardní nejistoty při dvoustranném nastavování polohy při použití koeficientu rozšíření 2.“ [11;13;20]

$$A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \tag{34}$$



obr. 26 Diagram dvoustranné polohové – úchylky v ose, přesnosti nastavení polohy a systematické polohové úchylky v ose [11]

4.2 Chyby vznikající během měření



obr. 27 Klasifikace chyb měření

tab. 2 Přehled chyb měření a jejich vzorců

Správná hodnota měřené veličiny	X
i -tá hodnota veličiny	X_i
Absolutní chyba měření	$\Delta = x_m - x_p$ (35)
Relativní chyba měření	$\Delta_r = \frac{x_m - x_p}{x_p} \cdot 100$ (36)
Systematická chyba	$\Delta = \Delta_s + \delta$ (37)
Pravděpodobná hodnota veličiny při n měřeních	$\bar{X} = \sum_n x_i$ (38)
Rozptyl (variance)	$\rho^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum (\Delta x_i)^2$ (39)
Střední kvadratická chyba měření	$\rho = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum (\Delta x_i)^2}$ (41)
Směrodatná chyba	$\rho_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (\Delta x_i)^2}$ (42)
Chyba aritmetického průměru n měření	$\bar{\rho} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum (\Delta x_i)^2}$ (43)

Kromě chyb uvedených v tabulce se vyskytuje ještě chyba způsobená zaokrouhlováním a chyba náhodná.

Pro tuto diplomovou práci je důležité identifikovat především: náhodné chyby, systematické chyby, relativní chyby a absolutní chyby. Tyto nám mohou výsledky měření velmi ovlivnit.

4.2.1 Absolutní chyba měření

Absolutní chyba vzniká rozdílem mezi výsledkem a konvenčně pravou hodnotou měřené veličiny. Největším problémem je, že nejsme v praxi schopni zjistit pravou hodnotu měřené veličiny, proto ji nahrazujeme právě konvenčně pravou hodnotou, která se k pravé hodnotě přibližuje s dostatečnou přesností. [21]

Dle vzorce (35) je X_m - změřená hodnota a X_p - je konvenčně pravá hodnota.

4.2.2 Relativní chyba měření

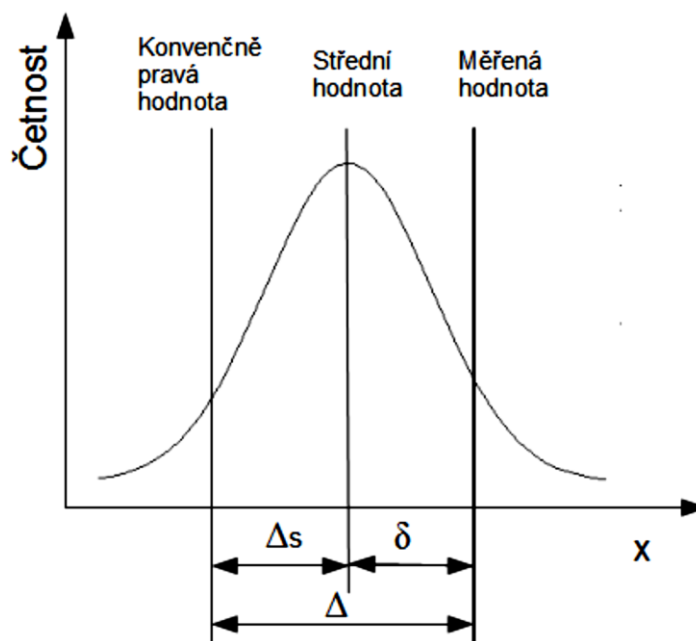
Relativní chyba měření je vlastně v procentech vyjádřená absolutní chyba měření. [21]

4.2.3 Systematická chyba měření

Systematická chyba měření vzniká např. v důsledku stárnutí měřicího přístroje, nebo poškozením některé z jeho částí. Její odhalení není někdy lehké, ale pokud o této chybě víme, můžeme její hodnotu odečíst od měřené hodnoty. [21]

4.2.4 Náhodná chyba měření

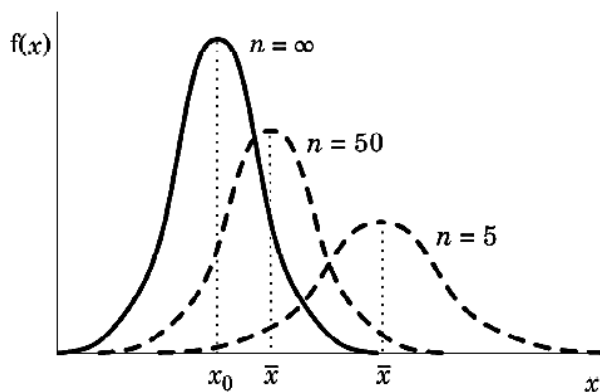
Náhodnou chybu nejsme schopni stanovit pouze z jednoho měření. Nejčastěji uvažujeme o součtu velkého množství malých až zanedbatelných rušivých účinků. Ty při celkovém součtu ovlivňují výslednou hodnotu.



obr. 28 Chyby měření

4.2.5 Hrubá chyba měření

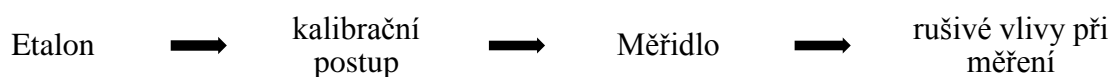
Hrubé chyby jsou způsobeny nesprávným zapsáním výsledku, selháním měřícího přístroje, nesprávným nastavením podmínek měření atd. Tato hodnota se pak velmi liší od ostatních naměřených hodnot. Pokud prokážeme statistickým propočtem, že se jedná o hrubou chybu, můžeme ji ze zpracování vyloučit, aby nezkreslovala výsledek. [21]



obr. 29 Vliv počtu měření n na přesnost měření

4.3 Nejistoty měření

Nejistota měření je vlastně koncepce komplexního posouzení měření, kdy uvažujeme o nejistotách celého měřícího řetězce. Většinou se v řetězci výrazně uplatňuje nepřesnost pouze jednoho článku.



tab. 3 Druhy nejistot měření [21]

Nejistota typu A	u_A/u_B	(44)
Koeficient nejistoty typu A	K_A	(45)
Nejistota typu B	$u_c = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}$	(46)
Kombinovaná nejistota	$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_B^2}$	(47)

4.3.1 Nejistota měření typu A

Stejně jako u chyby náhodné, je nejistota typu A způsobena malými náhodnými vlivy. Pokud je počet n menší jak 10, násobíme chybu koeficientem K_A podle tabulky 4. Navíc při zmenšujícím n klesá věrohodnost nejistoty, což právě koeficient kompenzuje.

tab. 4 rozšiřující koeficient nejistoty typu A [21]

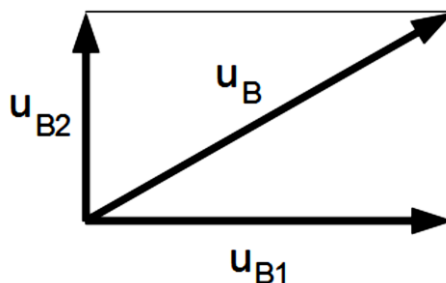
počet n	10	9	8	7	6	5	4	3	2
koef. K_A	1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

4.3.2 Nejistota typu B

Nejistotu typu B stanovujeme z charakteru měření, protože jde o nedokonalosti způsobené buď chybou měřidla, nebo chybou metrologa.

Chyba měřidla je dána typem měřidla a jeho rozlišitelností (U_{B1}) obr. 30

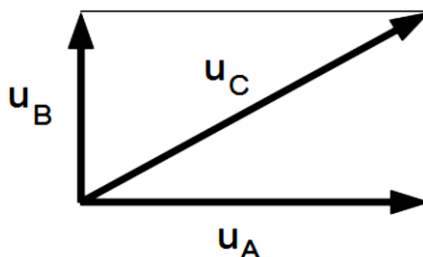
Chyba metrologa je dána jeho zkušeností, kvalifikací a odhadem (U_{B2}) obr. 30 [21]



obr. 30 Vektor. Součet nejistot typu B [21]

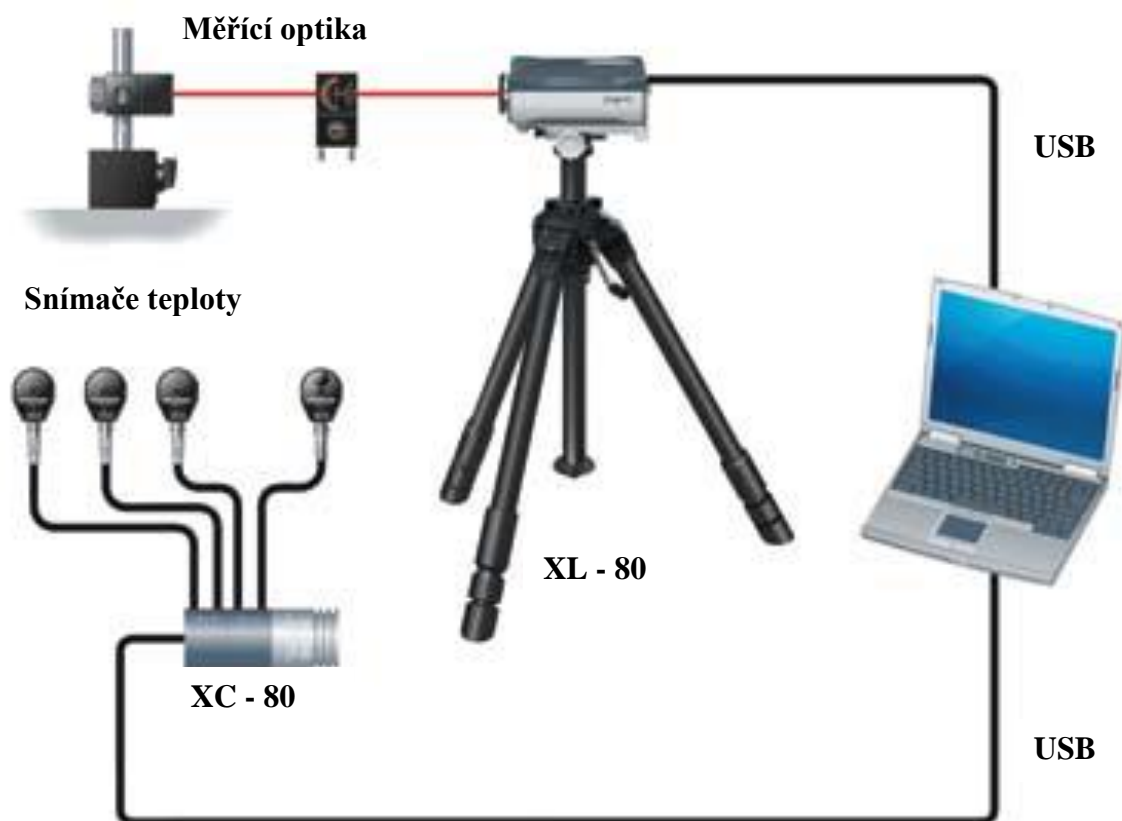
4.3.3 Kombinovaná nejistota

Kombinovaná nejistota je dána součtem nejistot typu A a Typu B.



obr. 31 Vektor. Součet kombinovaných nejistot [21]

5 LASER XL – 80



obr. 32 Laserový systém XL – 80 [18]

tab. 5 Parametry měřicího zařízení [18]

$\pm 0,5\mu m/m$	Certifikovaná přesnost lineárního měření v celém rozsahu
$1nm$	Lineární rozlišení
$4m/s$	Maximální rychlost posuvu
7 sekund	Mezi jednotlivými automat. aktualizacemi kompenzace podmínek prostředí
$50kHz$	Frekvence dynamického snímání dat
80 m	Standartní rozsah lineárního měření

5.1 Laserová hlavice XL - 80



obr. 33 Laserová hlavice XL – 80 [18]

tab. 6 Technické parametry laserové hlavice XL – 80 [18]

Přesnost kmitočtů	$\pm 0,05 \mu\text{m}/\text{m}$
Přesnost lineár. měření	$\pm 0,5 \mu\text{m}/\text{m}$
Měřicí rozsah	0 – 80 metrů
Rozlišení	1 nm (i při max. rychlosti)
Max. rychlost posuvu	$\pm 4,0 \text{m}/\text{s}$
Pracovní teplota	0 – 40 °C
Provozní vlhkost	0% – 95% nekondenzující
Hmotnost	1,85kg
Rozměry	214mm x 120mm x 70 mm
Laserový zdroj	\pm Helium – neonový (HeNe) laser (class II)
Výkon Laseru	<1 mW
Vlnová délka ve vakuu	632,8 nm

5.2 Příslušenství XL - 80

Kromě hlavice jsou dalšími důležitými součástmi tohoto zařízení kompenzační jednotka, měřicí optika, stativ se stolkem a vyhodnocovací software.



obr. 34 Kompenzační jednotka [18]

Kompenzační jednotka dokáže zaručit přesnost měření pro celý systém. Pomocí inteligentních snímačů zpracovává naměřenou hodnotu, měří tlak vzduchu, relativní vlhkost i teplotu vzduchu. Na základě naměřených údajů upravuje vlnovou délku laseru tak, aby vstupovali do výpočtů pouze správné údaje, čímž eliminuje chyby měření vznikající změnami podmínek prostředí. [17]



Pro měření polohy

Rozsah: 0 – 80m

Přesnost: $\pm 0,5 \mu m/m$

Rozlišení: $\pm 0,001 \mu m$



Pro měření úhlu

Rozsah: 0 – 15 m

Rozsah úhel. měření: $\pm 175 mm/m$

Přesnost: $\pm 0,2\% \pm 0,5 \pm 0,1 M \mu m/m$

Rozlišení: $0,1 \mu m/m$

obr. 35 Technické parametry měřicí optiky pro měření polohy a úhlu [18]



Pro měření rotační osy

Rozsah: neomezený

Rozsah úhel. měření: $5\mu m/m$

Opakovatelnost: $1\mu m/m$

Max. rychlost: 30 ot/min při kroku měření méně než 10°

2 ot/min při kroku měření více než 10°



Pro měření rovinnosti

Rozsah: 0 – 15 m

Rozsah měření rovinnosti: $\pm 1,5mm$

Rozsah úhel. měření: $\pm 175mm/m$

Přesnost: $\pm 0,6\% \pm 0,02\% M^2\mu m$

Rozlišení: $0,01\mu m/m$

obr. 36 Technické parametry měřicí optiky pro měření rotace a rovinnosti [18]

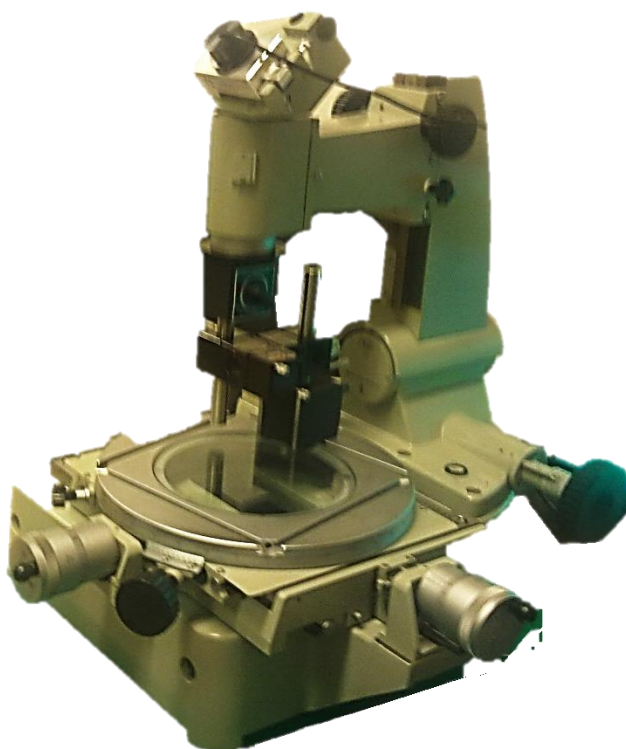


obr. 37 Příslušenství – a) stativ, b) stojan, c) kufr [18]

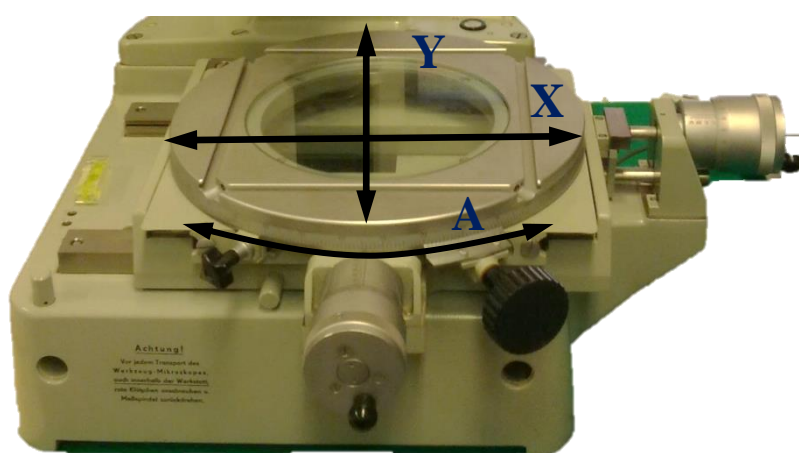
II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 DÍLENSKÝ MIKROSKOP

Tento dílenský mikroskop číslo 11261 Carl Zeiss Jena byl vyroben přibližně před čtyřiceti lety. Bylo proto důležité provést jeho renovaci, která spočívala v rozpořbování ramene a ve vyčištění a promazání pohybových šroubů. Poté byla provedena kalibrace a následně kontrola lineárního polohování os X a Y.



obr. 38 Dílenský mikroskop Zeiss



obr. 39 Definice os mikroskopu

Mikroskop má pojezdový stolek, se kterým je možné pohybovat lineárním posuvem v osách X, Y a zároveň může vykonávat rotační pohyb A (viz. Obr. 39).

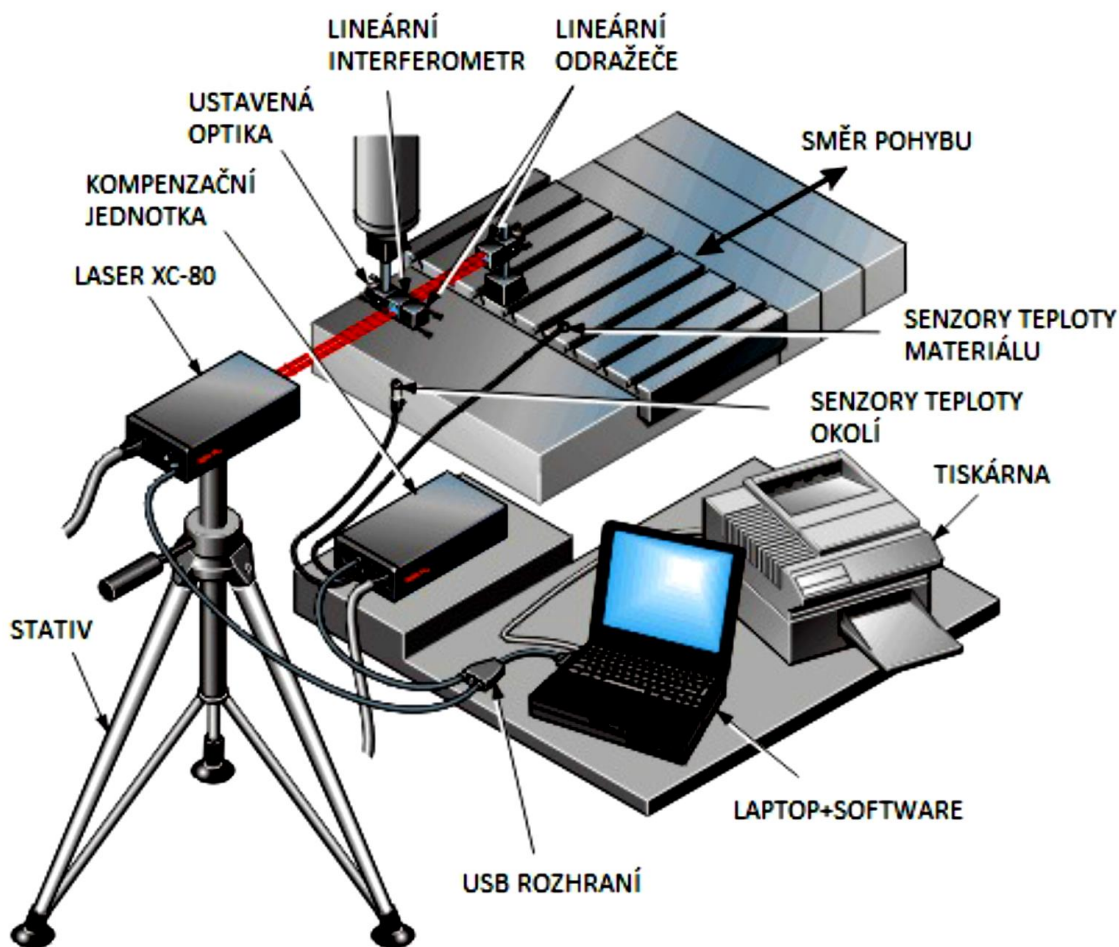


obr. 40 Detail mikrometrické hlavičky



obr. 41 Vodící prvky polohování mikroskopu

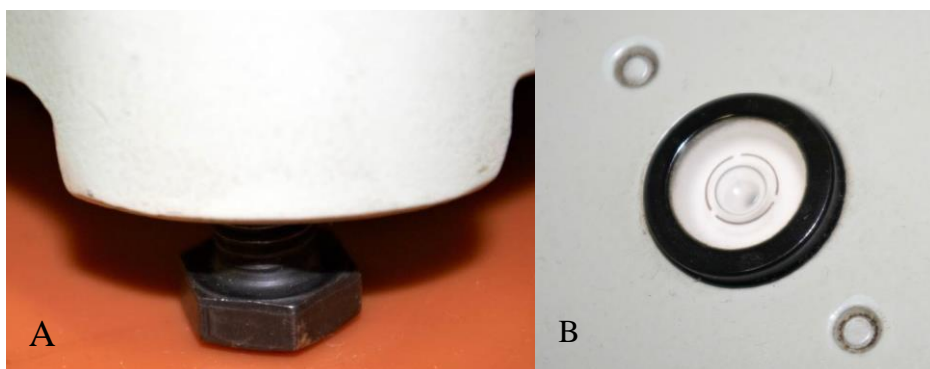
V rámci této diplomové práce kontroluji přesnost lineárního polohování v osách X a Y. Tento lineární pohyb je vykonáván pomocí polohovacího šroubu, vestavěné mikrometrické hlavičky s udanou přesností 0,01mm (viz. obr. 40). Polohovací stolek se pohybuje na vodících lištách (viz. obr. 41).



obr. 42 Rozmístění komponent pro měření [12]

6.1 Nastavení mikroskopu

Celá měřicí soustava musí být v rovině, abych se při měření vyvarovala hrubých chyb. Nejdříve jsem ustavila měřicí soustavu do vodorovné polohy pomocí stavitelných šroubů (viz. obr. 43A). Přesnost nastavení jsem kontrolovala vestavěnou libelou na mikroskopu (viz obr. 43B).

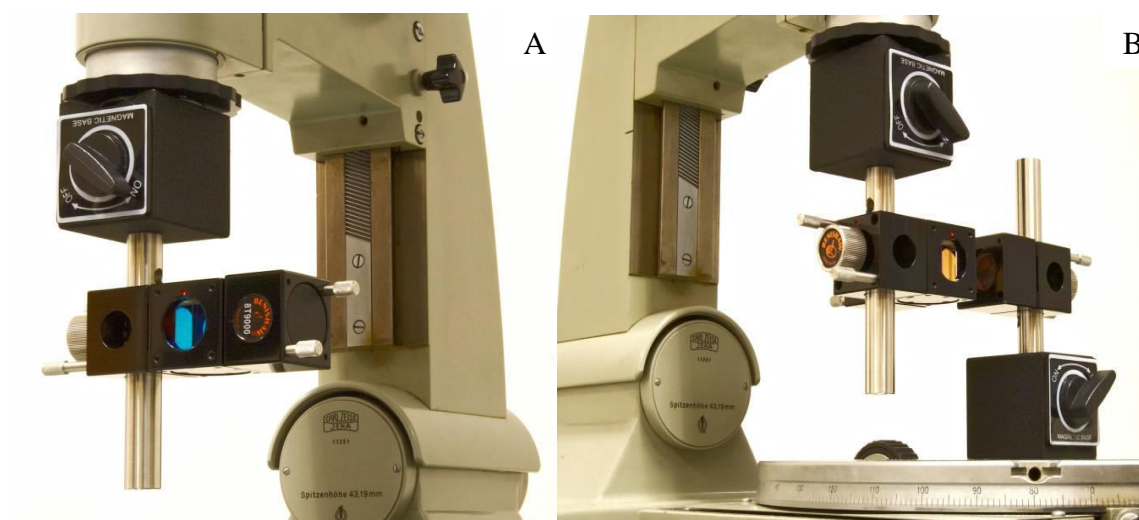


obr. 43 A) Stavitelný šroub B) Vestavěná libela

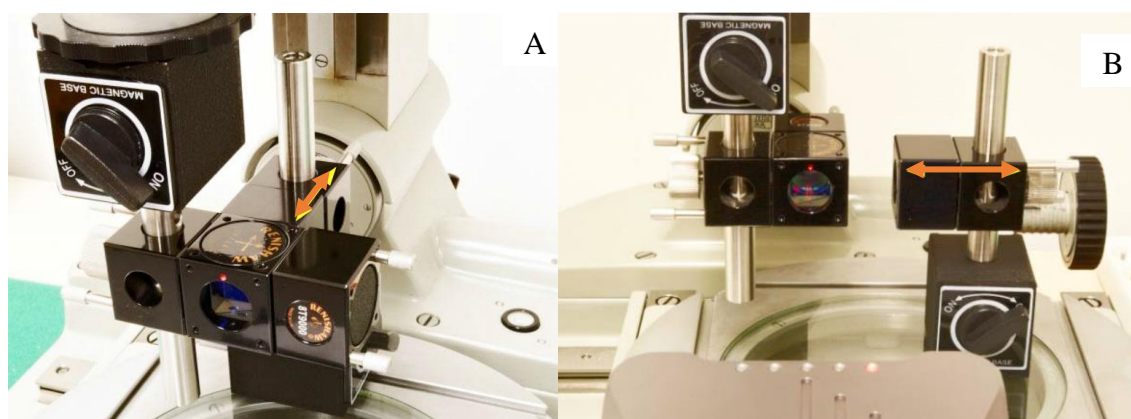
6.2 Ustavení laseru a komponent



obr. 44 Ustavení laseru do roviny



obr. 45 A) Způsob upnutí optiky k mikroskopu, B) Vzájemná poloha komponent



obr. 46 Pohyb komponent pro měření A) osa X, B) osa Y

7 REALIZACE MĚŘENÍ

Měření probíhalo v ose X a Y a v obou osách se prováděla kalibrace odměřovacího systému – tzv. saně.

7.1 Výpočet výsledků kalibrace

Doložené ilustrativní výpočty jsou pro kalibraci odměřovacího systému v ose X.

Pro výpočty je použita norma ČSN ISO 230 – 2: 2010.

1. Polohová úchylka: $X_{ij} = P_{ij} - P_i$

Rozdíl mezi skutečnou a dosaženou polohou. Tyto hodnoty jsem nepočítala, protože jsem je získala ze softwaru Renishaw LaserXL Capture.

2. Průměrná polohová úchylka: $\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow$

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

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow = \frac{1}{3} * (0,0 + 3,0 + 0,0) = \underline{1,0\mu\text{m}}$$

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow = \frac{1}{3} * (-3,0 + 0,0 + (-1,0)) = \underline{-1,33\mu\text{m}}$$

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} = x = \frac{1,0 + (-1,3)}{2} = \underline{-0,15\mu\text{m}}$$

tab. 7 Výpočet jednostranné průměrné polohové úchylky

	1,5	2	6	11	14,5	20	25	(mm)
$\bar{x}_i \uparrow$	1,0	-1,7	-3,7	-7,7	-9,3	-18,7	-24,3	(μm)
$\bar{x}_i \downarrow$	-1,3	-0,3	-4,3	-9,3	-13,7	-19,0	-24,3	(μm)
\bar{x}_i	-0,15	-1,0	-4,0	-8,5	-11,5	-18,9	-24,3	(μm)

3. Necitlivost v poloze: $B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow = 1,0 - (-1,3) = \underline{2,3\mu\text{m}}$

tab. 8 Výpočet průměrné polohové úchylky

	1,5	2	6	11	14,5	20	25	(mm)
B_i	2,3	1,3	0,7	1,7	4,3	0,3	0,0	(μm)

4. Necitlivost v poloze:

$$B = \max * [B_i] = \max * [2,3; 1,3; 0,7; 1,7; 4,3; 0,3; 0,0] = \underline{4,3\mu\text{m}}$$

5. Odhad jednostranné standartní nejistoty nastavení v poloze:

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ji} \uparrow - X_i \uparrow)^2} = \sqrt{\frac{1}{3-1} * ((0,0 + 3,0 + 0,0) - 1,0)^2} = \underline{1,7\mu\text{m}}$$

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ji} \downarrow - X_i \downarrow)^2} = \sqrt{\frac{1}{3-1} * ((-3,0 + 0,0 + (-1,0)) - (-1,3))^2} = \underline{1,5\mu\text{m}}$$

tab. 9 Výpočet odhadu jednostranné standartní nejistoty nastavení v poloze

	1,5	2	6	11	14,5	20	25	(mm)
$s_i \uparrow$	1,7	0,6	3,2	4,0	8,2	0,9	0,6	(μm)
$s_i \downarrow$	1,5	1,5	2,1	2,1	2,1	2,0	0,6	(μm)

6. Hranice úchylek:

$$\bar{x}_i \uparrow \pm 2s_i \uparrow$$

$$\bar{x}_i \uparrow \pm 3s_i \uparrow$$

$$\bar{x}_i \pm 2s_i ; \bar{x}_i \pm 3s_i$$

tab. 10 Výpočet hranice úchylek

	1,5	2	6	11	14,5	20	25	(mm)
$\pm 2s_i \uparrow$	3,4	1,2	6,4	8,0	16,4	1,8	1,2	(μm)
$\pm 2s_i \downarrow$	3,0	3,0	4,2	4,2	4,2	4,0	1,2	(μm)
$\pm 2s_i$	3,3	2,1	5,3	6,1	10,2	2,6	1,2	(μm)
$\pm 3s_i$	4,9	3,2	7,9	9,2	15,3	9,9	1,7	(μm)

7. Opakovatelnost nastavení polohy v ose:

$$R_i \uparrow = 4 * s_i \uparrow = 4 * 1,7 = \underline{6,8\mu\text{m}}$$

$$R_i \downarrow = 4 * s_i \downarrow = 4 * 1,5 = \underline{6,0\mu\text{m}}$$

tab. 11 Výpočet opakovatelnosti nastavení polohy v ose

	1,5	2	6	11	14,5	20	25	(mm)
$4 * s_i \uparrow$	6,8	2,4	12,8	16	32,8	3,6	2,4	(μm)
$4 * s_i \downarrow$	6,0	6,0	8,4	8,4	8,4	8,0	2,4	(μm)

$$R = \max[R_i] = \max * \begin{bmatrix} 6,8; 2,4; 12,8; \\ 32,8; 3,6; 2,4; 6,0; \\ 6,0; 8,4; 8,4; 8,4; \\ 8,4; 8,0; 2,4 \end{bmatrix} = \underline{32,8\mu\text{m}}$$

8. Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose:

$$E = \max[X_i \uparrow; X_i \downarrow] - \min[X_i \uparrow; X_i \downarrow]$$

$$E = \max \begin{bmatrix} 1,0; -1,7; -3,7; -7,7; \\ -9,3; -18,7; -24,3; \\ -1,3; -0,3; -4,3; -9,3; \\ -13,7; -19,0; -24,3 \end{bmatrix} - \min \begin{bmatrix} 1,0; -1,7; -3,7; -7,7; \\ -9,3; -18,7; -24,3; \\ -1,3; -0,3; -4,3; -9,3; \\ -13,7; -19,0; -24,3 \end{bmatrix} = \underline{25,3\mu\text{m}}$$

9. Průměrná dvoustranná polohová úchylka:

$$M = \max \begin{bmatrix} -0,2; -1,0; -4,0; -8,5; \\ -11,5; -18,8; -24,3 \end{bmatrix} - \min \begin{bmatrix} -0,2; -1,0; -4,0; -8,5; \\ -11,5; -18,8; -24,3 \end{bmatrix} = \underline{24,2\mu\text{m}}$$

10. Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose:

$$A = \max[X_i \uparrow + 2s_i \uparrow; X_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[X_i \uparrow - 2s_i \uparrow; X_i \downarrow - 2s_i \downarrow]$$

$$A = \max \left[\begin{pmatrix} 1,0; -1,7; -3,7; -7,7; \\ -9,3; -18,7; -24,3; \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3,4; 1,2; 6,4; 8,0; \\ 16,4; 1,8; 1,2 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} -1,3; -0,3; -4,3; -9,3 \\ -13,7; -19,0; -24,3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3,0; 3,0; 4,2; 4,2; \\ 4,2; 4,0; 1,2 \end{pmatrix} \right] -$$

$$- \min \left[\begin{pmatrix} 1,0; -1,7; -3,7; -7,7; \\ -9,3; -18,7; -24,3; \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3,4; 1,2; 6,4; 8,0; \\ 16,4; 1,8; 1,2 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} -1,3; -0,3; -4,3; -9,3 \\ -13,7; -19,0; -24,3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3,0; 3,0; 4,2; 4,2; \\ 4,2; 4,0; 1,2 \end{pmatrix} \right]$$

$$A = \underline{32,6\mu\text{m}}$$

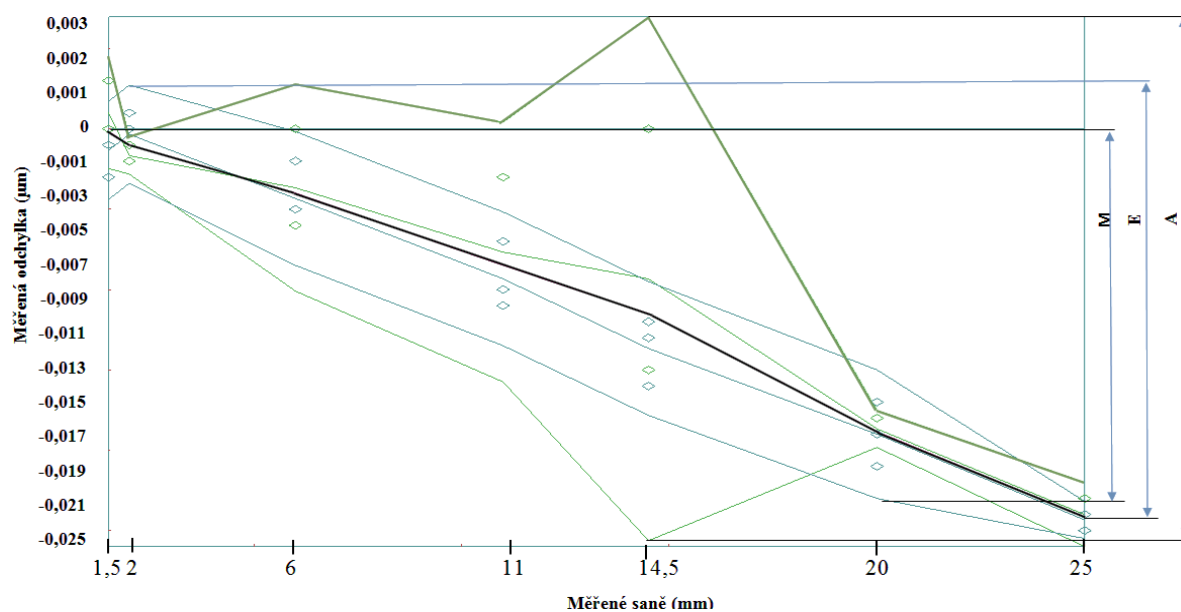
7.2 Kalibrace odměřovacího systému v ose X (saně)

tab. 12 Naměřená data

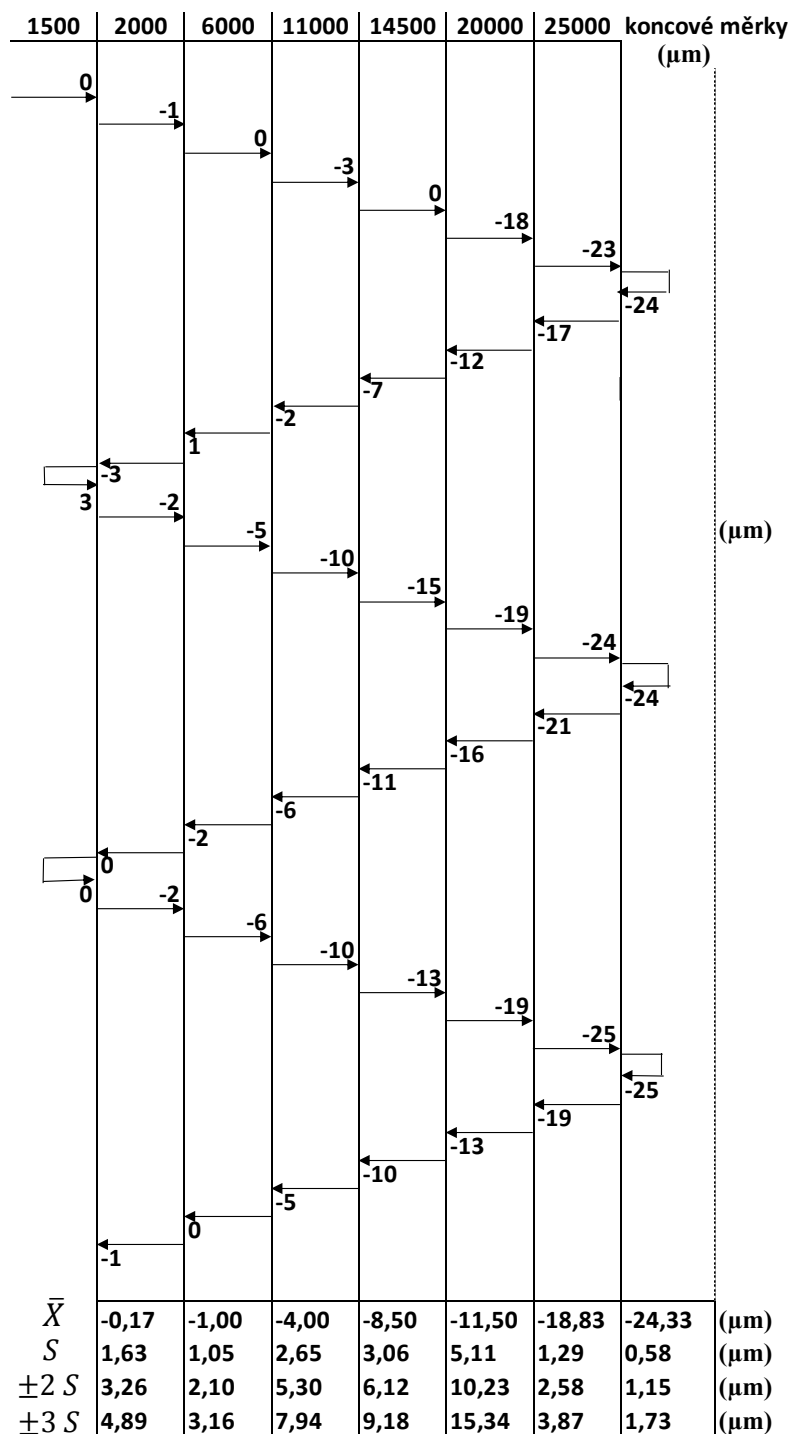
krok	1,5	2	6	11	14,5	20	25	(mm)
1	0,0	-1,0	0,0	-3,0	0,0	-18,0	-24,0	(μm)
2	-3,0	1,0	-2,0	-7,0	-12,0	-17,0	-24,0	(μm)
3	3,0	-2,0	-5,0	-10,0	-15,0	-19,0	-24,0	(μm)
4	0,0	-2,0	-6,0	-11,0	-16,0	-21,0	-24,0	(μm)
5	0,0	-2,0	-6,0	-10,0	-13,0	-19,0	-25,0	(μm)
6	-1,0	0,0	-5,0	-10,0	-13,0	-19,0	-25,0	(μm)

tab. 13 Vypočítané hodnoty pro saně na ose X

Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	32,6	μm
B	Necitlivost v ose	4,3	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	25,3	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	24,2	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	32,8	



obr. 47 Zobrazení hodnot A, E, M – saně X



obr. 48 Lineární dvouchodý bidirekcionální cyklus

- Chyby do 10 μm jsou způsobeny polohováním mikroskopu.
- Chyby nad 10 μm vyžadují vyšší stupeň opotřebení polohovacího šroubu.

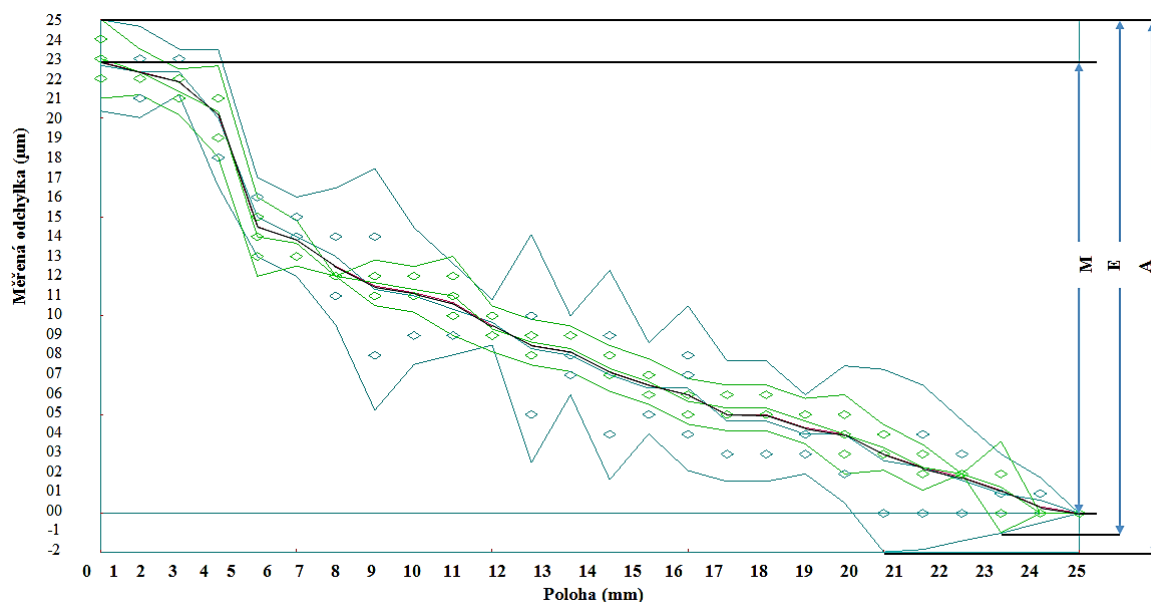
7.3 Naměřená data: osa X – celá

tab. 14 Vypočítané hodnoty pro celou osu X

Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	27,0	μm
B	Necitlivost v ose	1,0	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	23,0	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	22,8	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	12,2	

tab. 15 Naměřená data

krok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	(mm)	
1	0	1	0	0	0	0	2	3	3	3	4	5	4	7	5	9	9	9	8	11	13	14	18	22	21	22	(μm)	
2	0	0	0	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7	8	8	9	12	11	12	12	14	14	21	21	22	23	(μm)	
3	0	1	1	3	4	4	5	4	5	5	7	7	8	9	10	10	11	12	14	14	15	16	21	23	23	24	(μm)	
4	0	0	2	2	2	3	4	5	5	5	6	7	7	8	9	9	10	11	11	12	14	14	15	19	21	23	24	(μm)
5	0	0	2	2	3	4	5	5	6	6	8	7	9	8	10	10	11	12	12	14	14	15	21	22	23	22	(μm)	
6	0	0	2	2	3	4	5	5	6	6	6	7	8	9	9	10	11	12	12	12	13	15	21	22	22	22	(μm)	



obr. 49 Zobrazení hodnot A, E, M

Z grafu je zřetelné, že mezi hodnotami 3 a 4 mm dochází k velkému skokovému zhoršení úchylek. Po porovnání s kalibrací bez vnitřního čištění, která byla provedena před třemi roky, jsem zjistila, že díky částečné renovaci, čištění a kalibraci vykazuje polohovací šroub značné opotřebení po celé ploše. To je patrné z tab. 11, kde je zřetelné dvojnásobné zvýšení rozptylu.

tab. 16 Porovnání hodnot pro osu X

Zkratka	Hodnota předchozí Kalibrace	Hodnota mé Kalibrace	Jednotka
A	16,8	27,0	μm
B	3,0	1,0	
E	13,7	23,0	
M	11,3	22,8	
R	6,5	12,2	

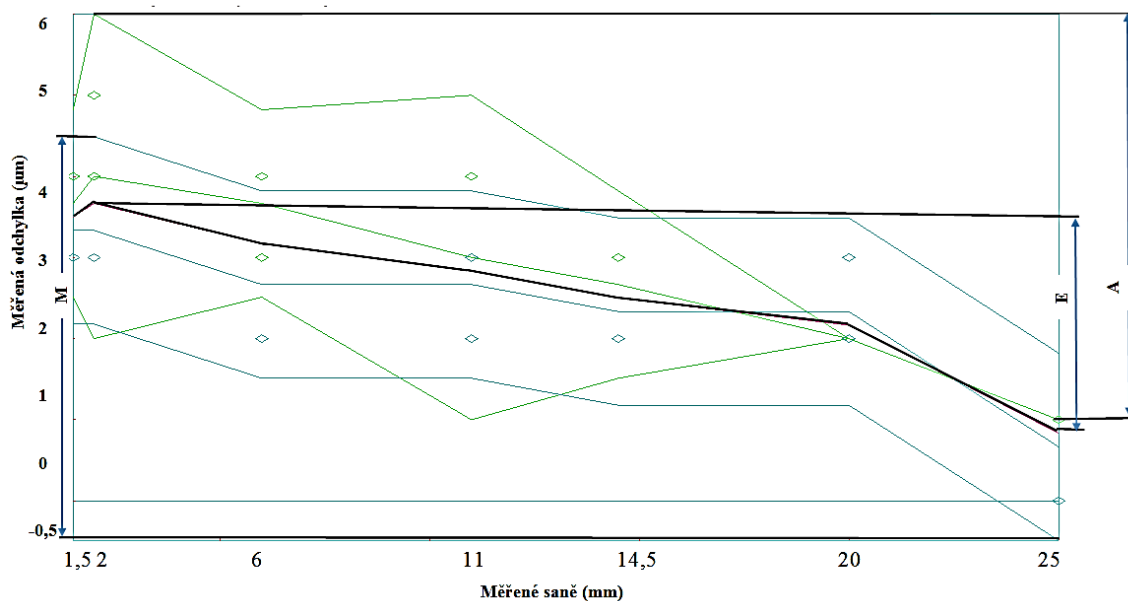
7.4 Kalibrace odměřovacího systému v ose Y (saně)

tab. 17 Naměřená data

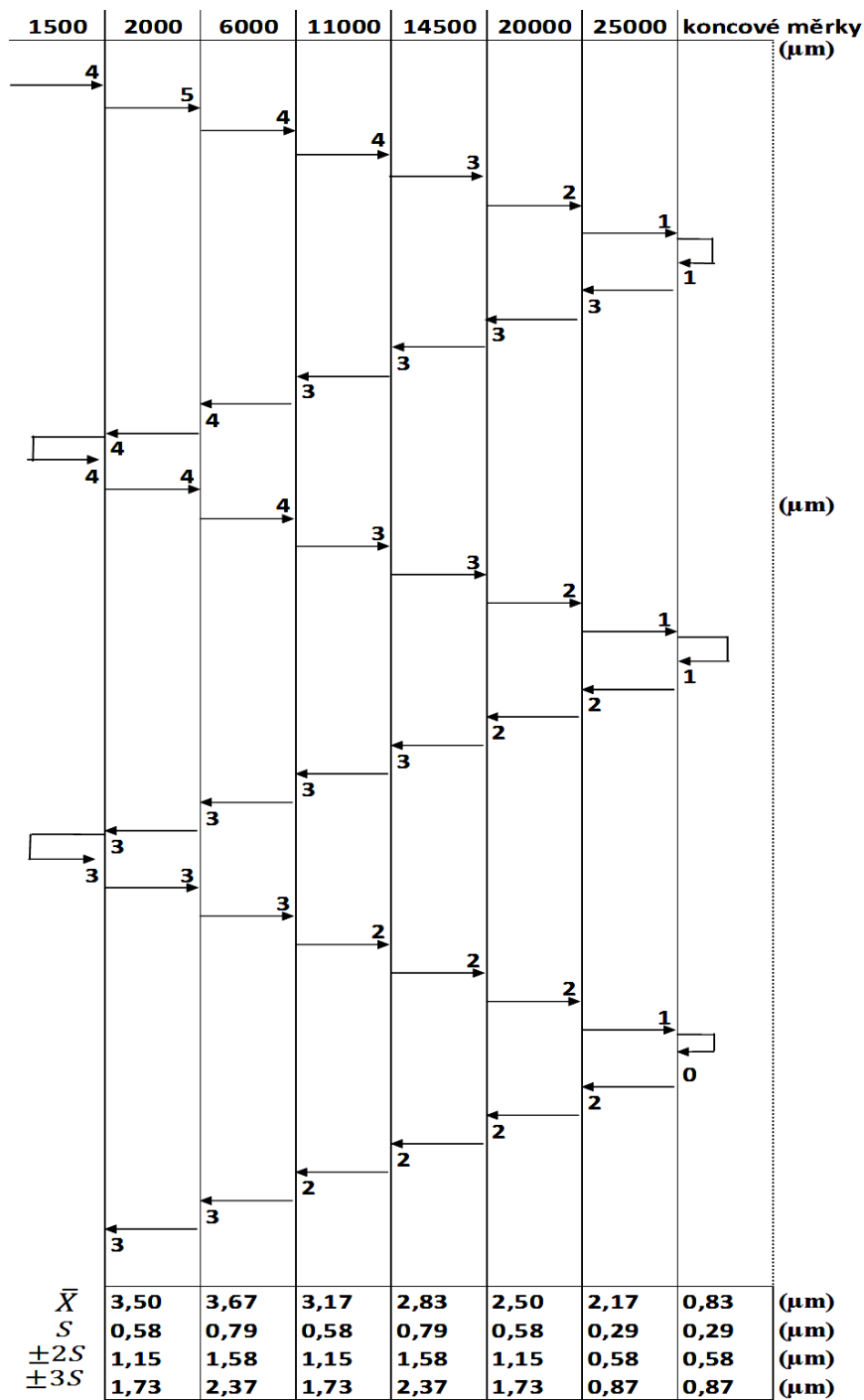
krok	1,5	2	6	11	14,5	20	25	(mm)
1	4,00	5,00	4,00	4,00	3,00	2,00	1,00	(μm)
2	4,00	4,00	3,00	3,00	3,00	3,00	1,00	(μm)
3	4,00	4,00	4,00	3,00	3,00	2,00	1,00	(μm)
4	3,00	3,00	3,00	3,00	2,00	2,00	1,00	(μm)
5	3,00	3,00	3,00	2,00	2,00	2,00	1,00	(μm)
6	3,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	(μm)

tab. 18 Vypočítané hodnoty pro saně na ose Y

Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	6,5	μm
B	Necitlivost v ose	1,0	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	3,3	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	2,8	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	4,0	



obr. 50 Zobrazení hodnot A, E, M



obr. 51 Lineární dvouchodý bidirekcionální cyklus

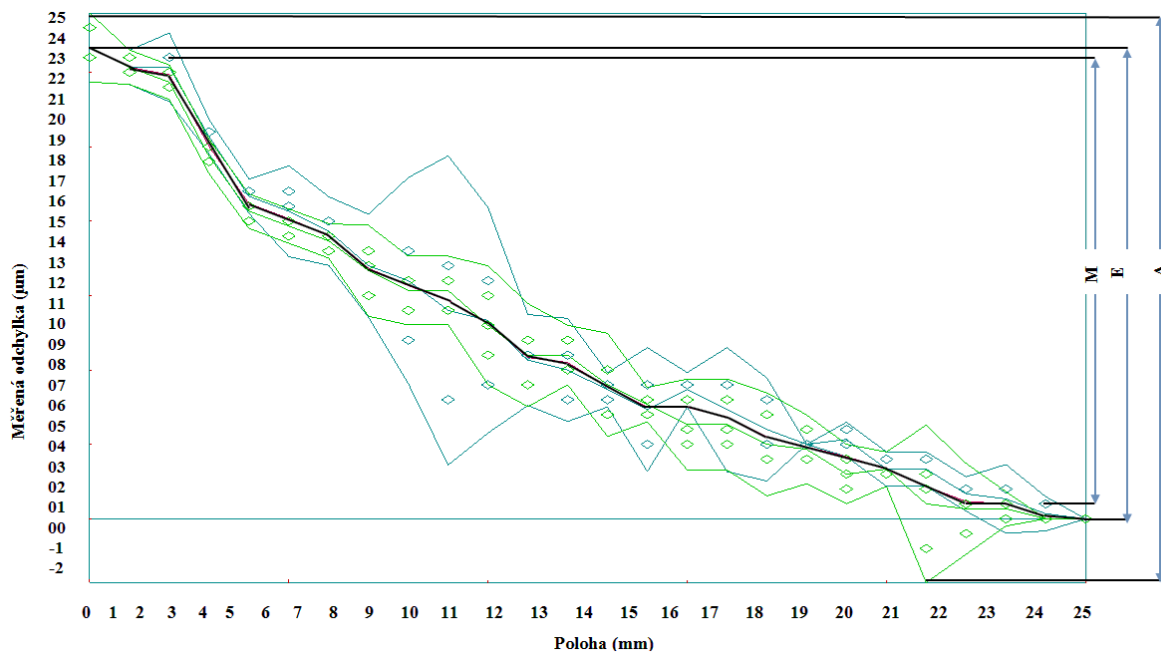
7.5 Naměřená data: osa Y - celá

tab. 19 Vypočítané hodnoty pro celou osu X

Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	38,3	μm
B	Necitlivost v ose	2,3	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	31,7	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	31,7	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	20,8	

tab. 20 Naměřená data

krok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	(mm)
1	0	1	2	2	3	3	5	5	5	5	8	5	8	8	9	9	8	12	15	18	19	21	25	29	30	31	(μm)
2	0	0	1	2	2	3	3	4	4	5	6	7	4	10	9	11	14	14	15	19	20	21	25	29	30	31	(μm)
3	0	0	2	1	3	3	5	5	5	8	9	8	9	11	11	16	17	18	18	20	21	22	26	31	30	31	(μm)
4	0	0	1	1	3	4	4	4	4	6	5	8	10	11	12	13	16	16	17	18	19	20	24	29	30	31	(μm)
5	0	0	0	2	4	4	6	5	8	9	9	9	9	11	12	15	17	18	18	20	22	22	26	31	31	33	(μm)
6	0	0	0	-1	-2	3	2	6	7	8	8	8	10	12	12	15	16	16	18	19	20	21	24	30	31	33	(μm)



obr. 52 Zobrazení hodnot A, E, M

Z doloženého grafu vyplývá, že mezi hodnotami 2 až 3,3 mm dochází k velkému skokovému zhoršení úchylek. Porovnáním s kalibrací bez vnitřního čištění, která byla provedena před třemi roky, jsem zjistila, že díky částečné renovaci, čištění a kalibraci vykazuje polohovací šroub značné opotřebení po celé ploše. To je patrné z tab. 17, kde je zřetelné více jak dvojnásobné zvýšení rozptylu. Chyby do 10 μm jsou způsobeny polohováním mikroskopu a chyby nad 10 μm vyjadřují vyšší stupeň opotřebení polohovacího šroubu.

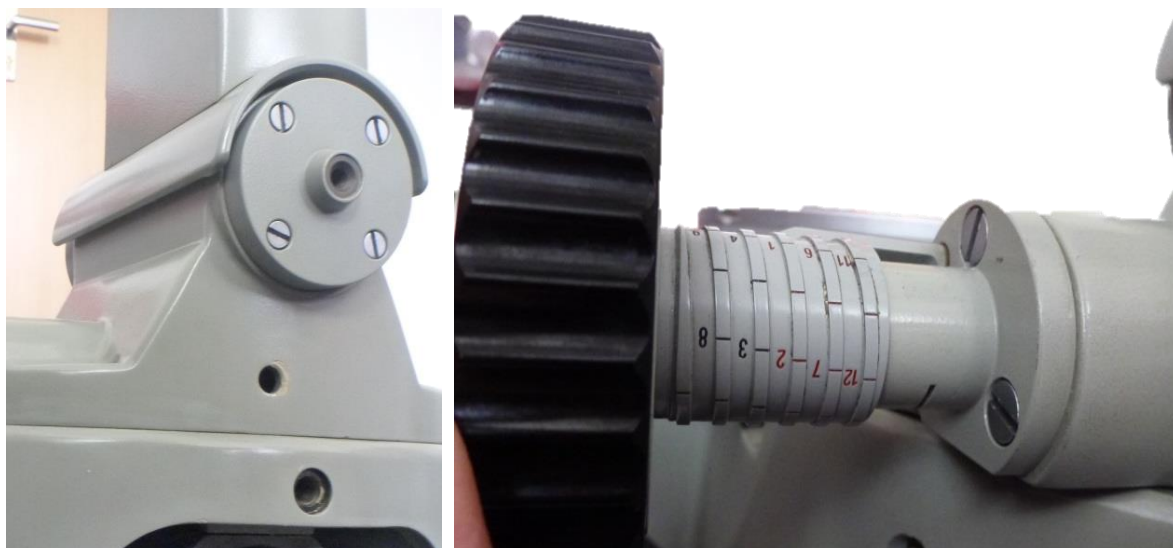
tab. 21 Porovnání hodnot pro osu Y

Zkratka	Hodnota předchozí Kalibrace	Hodnota mé Kalibrace	Jednotka
A	12,3	38,3	μm
B	1,7	2,3	
E	10,3	31,7	
M	9,7	31,7	
R	4,6	20,8	

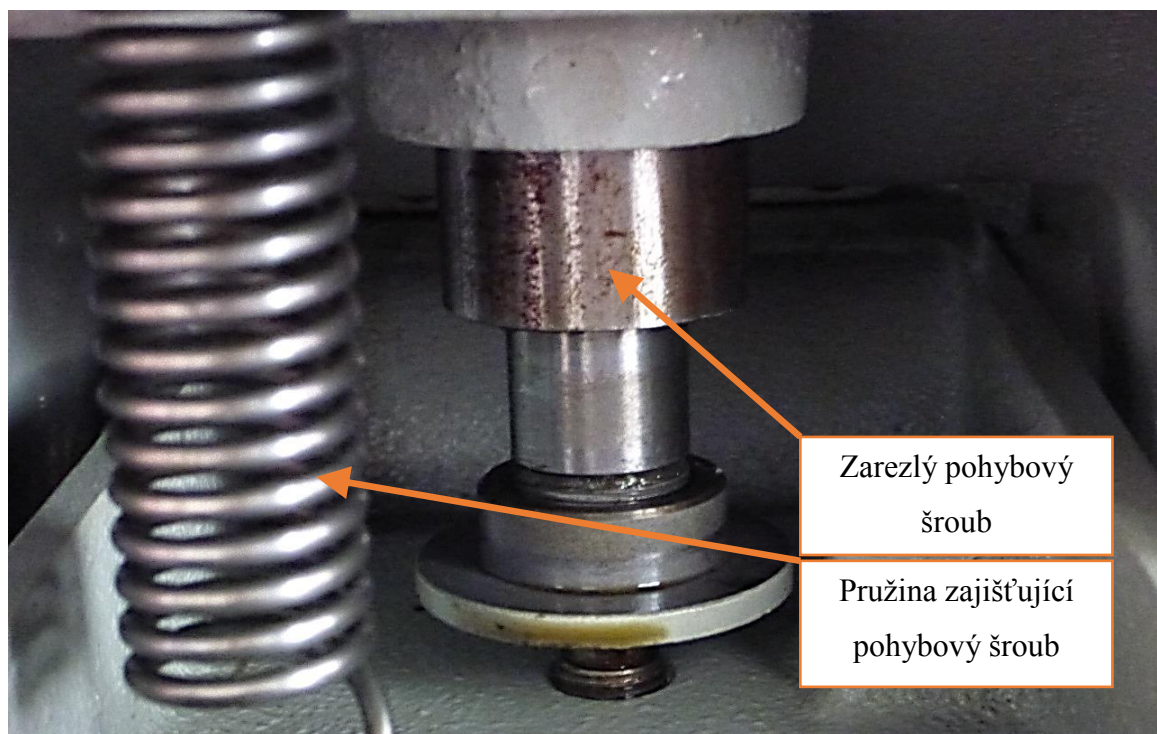
8 RENOVACE A INOVACE MIKROSKOPU

8.1 Renovace mikroskopu

Rozhodli jsme se provést renovaci mikroskopu. Nejdříve bylo renovováno rameno, které může měnit úhel nakhonění okuláru.



obr. 53 Rameno mikroskopu s nastavovacím šroubem



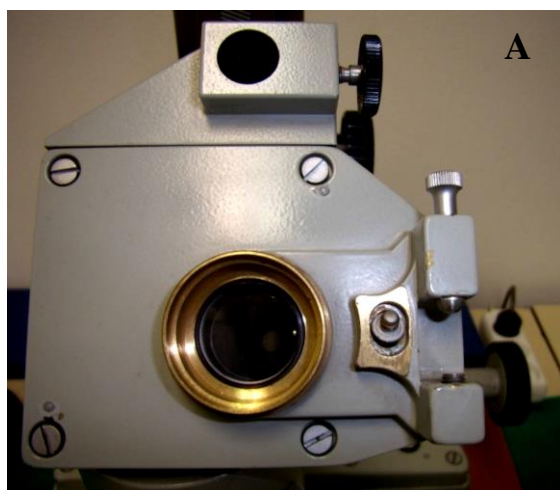
obr. 54 Detail pohybového šroubu

Vyčištěním pohybového šroubu od staré vazelíny a jeho promazáním silikátovým mazivem bylo docíleno možnosti dosažení nastavení úhlu až o 12° v obou směrech pohybu.

8.2 Inovace mikroskopu

Po důkladném vyčištění všech dílů mikroskopu jsem zjistila velmi závažné poškození polohovacích šroubů jak pro osu X, tak pro osu Y. Proto jsem se rozhodla navrhnout inovaci formou výměny vadných polohovacích šroubů za nové, digitální.

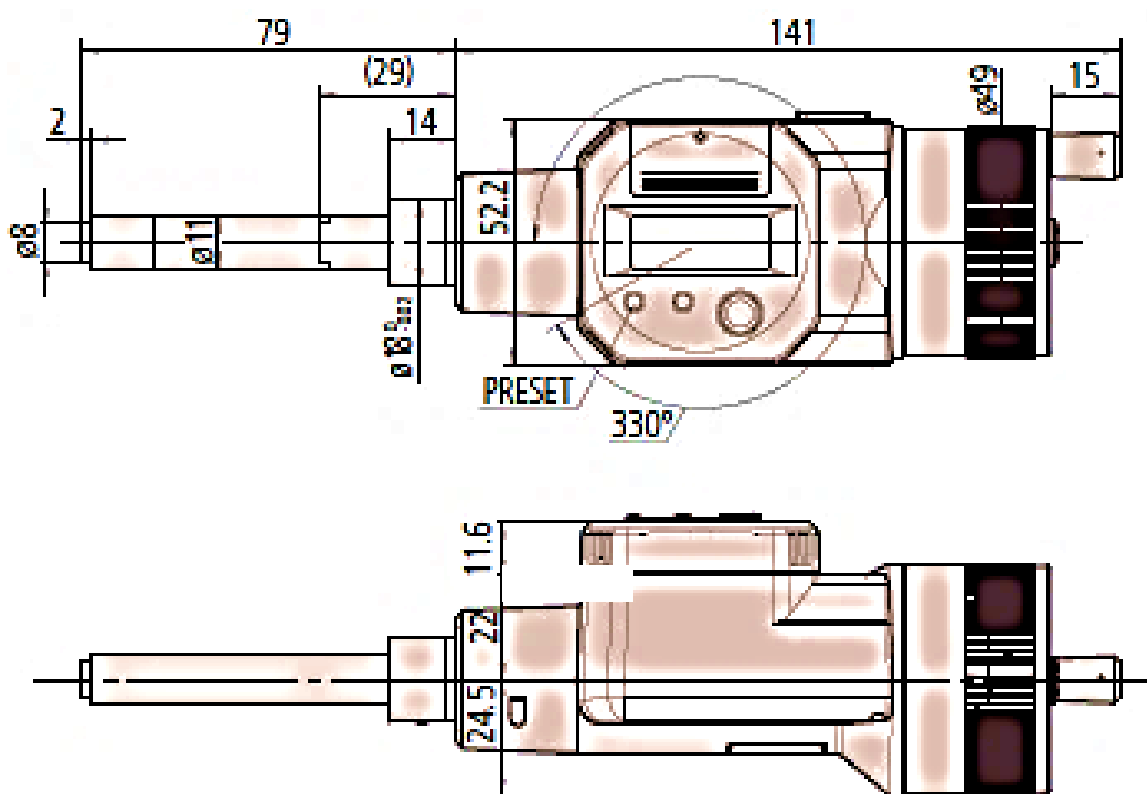
V rámci diplomové práce z roku 2011 byla na mikroskopu provedena první část inovace. Mikroskop byl digitalizován. Původní okulár byl nahrazen digitální kamerou propojenou s PC.



obr. 55 A) původní okulár B) okulárová kamera



obr. 56 Digitální vestavěná mikrometrická hlavice [16]



obr. 57 Výkres mikrometrické hlavice [16]

tab. 22 Parametry mikrometrické hlavice

Název	Digitální vestavěná mikrometrická hlavice
Série Mitutoyo	164
Rozsah měření	0 - 50 mm
Přesnost měření	$\pm 3 \mu\text{m}$
Číslicový krok	1 μm
Displej	LCD
Napájení	Dvě baterie SR - 44

Pro inovaci tohoto mikroskopu budou potřebné tyto hlavice dvě, aby byla zabezpečena přesnost obou os.

Cena hlavice: 1kus, 742,- €, tj.: 20 279,- Kč

Cena Kabelu USB INPUT Tool (2m): 43,50,- €, tj.: 1 189,- Kč

Cena celkem za nákup je tedy 41 747,- Kč

Cena za 4 hodiny práce: 1 200,- Kč

(Při přepočtu byl použit kurz ČNB ze dne 7. 3. 2014 o hodnotě 27,33 Kč/ 1,- €)

Celková cena této navrhované inovace je vyčíslena na hodnotu 42 947,- Kč.

Inovací by byl získán plnohodnotně pracující dílenský mikroskop s předpokládanou přesností měření 0,001 mm a zvětšením 50x. Toto kritérium odpovídá nejpřísnějším požadavkům vybavení pro laboratorní použití.

Porovnáním cenových nabídek společností zabývajících se výrobou a dodávkou mikroskopů (Zeiss, Mitutoyo) jsem zjistila, že nový mikroskop s 50-ti násobným zvětšením, požadovanou přesností 0,001 mm, nosností stolku minimálně 5 kg a stabilní konstrukcí při zatížení (litinová konstrukce) je možno zakoupit v ceně od 600 000,- Kč do 1 200 000,- Kč.

9 NÁVRH KALIBRAČNÍHO POSTUPU A KALIBRAČNÍHO LISTU

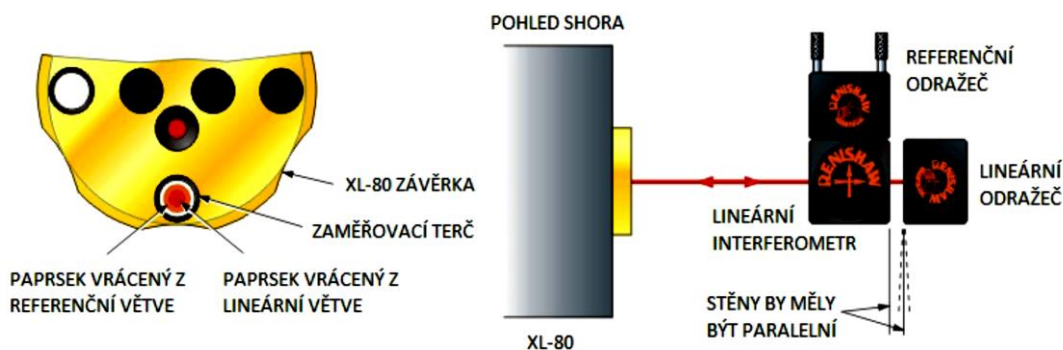
9.1 Návrh kalibračního postupu

- Ustavení laseru na stativ a zajištění proti pohybu stojanu
- Upnutí optiky a komponent pro příslušné měření (viz. obr. 45 a 46)
- Nasazení krytky na lineární odražeč, pro nasměrování laserového paprsku do správné polohy vůči odražeči (viz. obr. 58)
 - Krytku s bílým terčíkem používáme pro usnadnění nasměrování paprsku, protože na bílém terčíku je paprsek zřetelnější
 - Po nasměrování paprsku na bílý terčík, krytku odstraníme



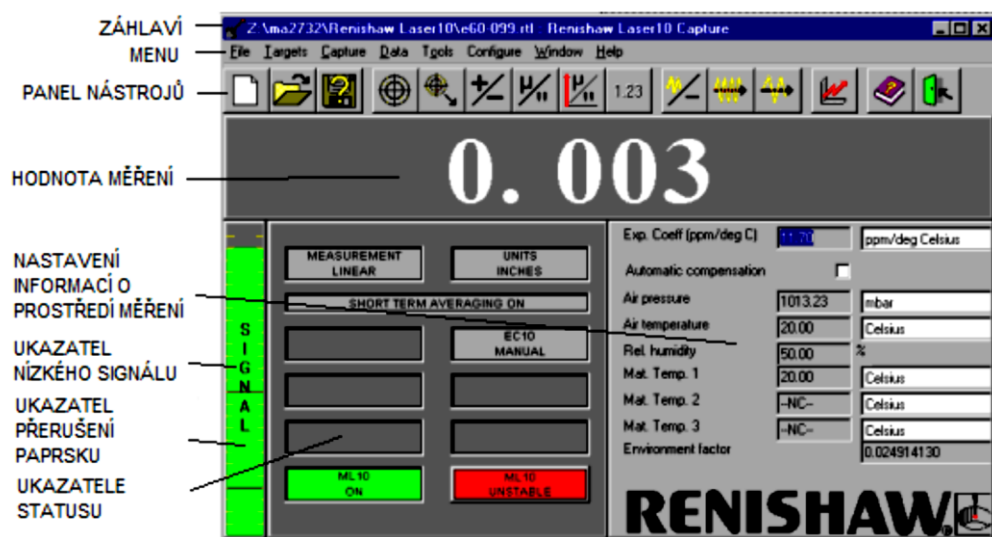
obr. 58 Zaměření paprsku na lineární odražeč se zaměřovací krytkou

- Po nasměrování paprsku a sejmutí krytky zkontrolujeme, zda je paprsek správně nastaven (paprsek se musí vrátit po na střed zaměřovacího bodu na závěre obr. 59)



obr. 59 Dobře seřízený laserový paprsek

- Snímání dat se provádí pomocí softwaru Renishaw LaserXL Capture, který komunikuje s laserem přes USB (obr. 60)
- Před zahájením samotného snímání najedeme lineárním odražečem co nejbližší k interferometru, vynulujeme hodnotu měření na displeji PC. Tímto vynulováním minimalizujeme chybu „mrtvé dráhy“ (viz. kap. 3.2.)



obr. 60 Interference programu LaserXL Capture

- Provedeme kontrolu nastavení softwaru (viz. tab. 18) a začneme snímat požadovaný počet cyklů

tab. 23 Souhrn nastavení pro měření

Teplota vzduchu venku/místnosti	24° C/ 20° C
Atmosférický tlak	1012 mbar
Vlhkost vzduchu v místnosti	90 %
Typ cyklu	Lineární trojchodý bidirekcionální
Měřený rozsah dráhy	0 – 25 mm
Rozlišitelnost	0,001 mm
Velikost kroku	1 mm

9.2 Návrh kalibračního listu

KALIBRAČNÍ LABORATOŘ

firma XX a.s. Nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín

KALIBRAČNÍ LIST č. 1/14

Zákazník: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Druh měřidla: mikroskop Carl Zeiss Jena
Evidenční číslo: č. 11261
Měřicí rozsah: 25 mm
Hodnota dílku: 1 mm
Třída přesnosti: 1

Použité etalony: Laserinterferometr Renishaw

Metoda měření: Podle interního kalibračního postupu
Podmínky měření: 20,5 °C

Platnost kalibrace: 4/15

Měření provedl: Milena Kubišová

Datum kalibrace: 1. 4. 2014

Datum vystavení KL: 1. 4. 2014

Podpis:

Zkontroloval a schválil: Vladimír Pata

tab. 24 Vypočítané hodnoty pro saně na ose X

Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	32,6	μm
B	Necitlivost v ose	4,3	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	25,3	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	24,2	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	32,8	

tab. 25 Vypočítané hodnoty pro celou osu X

Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	27,0	μm
B	Necitlivost v ose	1,0	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	23,0	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	22,8	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	12,2	

tab. 26 Vypočítané hodnoty pro saně na ose Y

Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	6,5	μm
B	Necitlivost v ose	1,1	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	3,3	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	2,8	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	4,0	

tab. 27 Vypočítané hodnoty pro celou osu Y

Zkratka	Název	Hodnota	Jednotka
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	38,3	μm
B	Necitlivost v ose	2,3	
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	31,7	
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	31,7	
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení v ose	20,8	

10 ZÁVĚR

Pro tuto diplomovou práci jsem využila metodu laserové interferometrie při kalibraci dílen-
ského mikroskopu Carl Zeiss.

V teoretické části této diplomové práce jsem popsala metody měření délek a druhy přístrojů,
kterými mohou být délky měřeny. Vyjmenovala jsem chyby, které mohou při měření vznik-
nout a metody jak se jich vyvarovat a norma ČSN ISO 230 – 1, která tyto chyby specifikuje
a zároveň uvádí přesnost interferometru.

Další normou, kterou jsem popsala v teoretické části je ČSN ISO 230 – 2, která specifikuje
metody zkoušek, vyhodnocování přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy pro přímé
měření polohy v jednotlivých osách.

V praktické části této diplomové práce jsem popsala laser XL – 80 Renishaw, ustavení a
kalibrace. Dále jsem zde uvedla nastavení lineárního odražeče, všech ostatních komponent a
softwaru pro vyhodnocování naměřených dat.

Mikroskop v rámci diplomové práce prošel kompletním vyčištěním, seřízením a novým na-
stavením do kalibrační polohy.

Po vyhodnocení naměřených dat jsem zjistila, že osa X je poškozena v celém svém rozsahu.
Osa Y vykazuje opotřebovanost nebo vadu v několika místech.

Porovnáním s kalibrací provedenou v roce 2011 jsem zjistila, že díky vyčištění polohovacích
šroubů se projeví vady či poškození, které nebyli při předchozí kalibraci zřetelné z důvodu
neprovedeného čištění mikroskopu před kalibrací.

Tento mikroskop nelze bez mnou doporučené inovace využívat jako měřicí, protože poško-
zení je příliš velké a přesnost se tím snížila z 0,01mm na 0,1mm.

Mikroskop je nadále možno využívat pouze pro orientační polohování dílů při kontrolu jakosti povrchu před vlastním snímáním na scanneru Taylor Hobson CLI 500.

S velmi malou investicí, vypočítanou v hodnotě maximálně 43 000,- Kč, je však možné tento mikroskop inovovat a touto inovací získat pro laboratorní využití plnohodnotné vybavení pracující s požadovanou přesností.

V průběhu zpracovávání podkladů pro tuto diplomovou práci jsem se spojila s několika servisními pracovníky společnosti Zeiss a to jak v České republice, tak i v Německu. Podle jejich informací pracuje v České republice stejných nebo podobných mikroskopů vyrobených firmou Zeiss mezi lety 1965 – 1980 několik desítek.

Jejich vlastníci je plně využívají, ale také opravují a inovují. Hlavním důvodem renovací a inovací starších přístrojů, jako jsou mikroskopy od firmy Carl Zeiss Jena, je, samozřejmě, vysoká pořizovací hodnota nového moderního mikroskopu a v neposlední řadě jejich spolehlivost a přesnost.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] J. Anděl: Základy matematické statistiky. Matfyzpress, Praha, 2005
- [2] J. Antoch, D. Vorlíčková: Vybrané metody statistické analýzy dat. Academia, Praha, 1992.
- [3] D. L. Massart, B. G. M. Vandeginste, L. M. C. Buydens, S. de Jong, P. J. Lewi, J. Smeyers-Verbeke: Handbook of Chemometrics and Qualimetrics. Elsevier, Amsterdam, 1997.
- [4] M. Meloun, J. Militký: *Statistická analýza experimentálních dat*. Academia, Praha, 2004.
- [5] M. Meloun, J. Militký, M. Hill: Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech. Academia, Praha, 2005.
- [6] M. Meloun, J. Militký: *Kompendium statistického zpracování dat*. Academia, Praha, 2002.
- [7] Differential Interference Contrast: Fundamental Concepts. In: [Http://micro.magnet.fsu.edu](http://micro.magnet.fsu.edu) [online]. 2005, 26.7 2005 [cit. 2013-10-27]. Dostupné z: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/techniques/dic/dicintro.html>
- [8] MACHŮV - ZEHNDERŮV INTERFEROMETR. [online]. brno, 2013 [cit. 2013-10-27]. Dostupné z: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&ved=0CGoQFjAG&url=http%3A%2F>
- [9] *Technické meranie: Učebné texty z projektu Metromedia-Online* [online]. 1. vydání. Bratislava, 2005 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.kam.sjf.stuba.sk/katedra/publikacie/leonardo/ucebnica/obsah.htm>
- [10] ŠRŮT, Petr. *Využití Laserů ve strojírenství - interferometr renishaw*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce ing. Jana Doňarová, Ph.D.
- [11] 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.

- [12] MAREŠ, Adam. *Kalibrace dílenského mikroskopu Zeiss bezkontaktním způsobem s využitím laserinterferometru Renishaw*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Vladimír Pata. Seznam použitých symbolů a zkratek
- [13] ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. 1998. vyd. Brno: Český normalizační institut, 1998.
- [14] [ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. 2010. vyd. Brno: Český normalizační institut, 2010.
- [15] ČECH, Jaroslav, PERNIKAR, Jiří, PODANY, Kamil *Strojírenská metrologie*. 4. vyd. Brno: CERM, 2005. 175 s. ISBN 80-214-3070-2
- [16] MITUTOYO [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/rmp.asp>>.
- [17] [PERNIKAŘ, Jiří. *Technická měření* [online]. 2002. [cit. 2013-12-04]. Dostupný z WWW: <<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TechnickaMereni.pdf>>.
- [18] XL-80 Laserový systém [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupný z WWW: <[http://resources.renishaw.com/download/\(d45dd6569592477a8c634cf5b4deb032\)?lang=cs&inline=true](http://resources.renishaw.com/download/(d45dd6569592477a8c634cf5b4deb032)?lang=cs&inline=true)>.
- [19] Lasery: historie. *České Vysoké Učení Technické v Praze* [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_9.pdf
- [20] BREN, David. *Elektrina a magnetismus: Interference světla*. [online]. 2007, s. 28, 2007 [cit. 2013-12-07]. Klasická teorie elektromagnetického pole. Dostupné z: www.aldebaran.cz/elmg/kurz_14_inter.pdf
- [21] VOJTA, Jaroslav. *Kalibrace a návrh repase universálního měřicího mikroskopu*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Vladimír Pata Dr.
- [22] VÍTKOVEC, J. *stanovení nejistot měření*. ČMÚ. Praha, 1993
- [23] Česká metrologická společnost. *Kalibrační postupy a publikace*, KP 1.1.3/01/13 - KP "Měřicí mikroskop" [online]. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/spolecnosti/cms/kalibracni-postupy-publikace>

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
k		Koeficient pro rovnoměrné rozdělení
kt		Rozšiřující koeficient
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_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
uA	[mm]	Standardní nejistota Typu A
uB	[mm]	Standardní nejistota Typu B
uB1	[mm]	Standardní nejistota Typu B – chyba měřidla
uB2	[mm]	Standardní nejistota Typu B – chyba metrologa
uC	[mm]	Kombinovaná standardní nejistota
uD	[mm]	Rozšířená standardní nejistota
\bar{x}_i	[mm]	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze
$\bar{x}_i\uparrow, \bar{x}_i\downarrow$	[mm]	Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze
$x_i\uparrow\pm 2s_i\uparrow,$ $x_i\downarrow\pm 2s_i\downarrow$	[mm]	Hranice úchylek
x_{ij}	[mm]	Polohová úchylka
xm	[mm]	Naměřená hodnota veličiny
xp	[mm]	Konvenčně pravá hodnota měřené veličiny
zj		Rozlišitelnost měřidla
zm		Chyba metrologa
δ	[mm]	Náhodná chyba
Δ	[mm]	Absolutní chyba měření
Δ_r	[%]	Relativní chyba měření
Δ_s	[mm]	Systematická chyba
λ	[mm]	Vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu
λ_0	[mm]	Vlnová délka laserového paprsku ve vakuu

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1 Vývoj mikroskopu Carl Zeiss.....	9
obr. 2 Mezinárodní prototyp metru [9]	12
obr. 3 Vývoj dosažitelné přesnosti ve výrobě [9]	15
obr. 4 Lampami buzený Nd: YAG laser	17
obr. 5 Mechanické vlnění.....	18
obr. 6 Super pozice vln - a) Konstruktivní b) Destruktivní interference [19]	19
obr. 7 Schéma Michalsonova Interferometru [10].....	20
obr. 8 Schéma Machova-Zehnderova interferometru [10]	21
obr. 9 Schéma Fabryova-Perotova interferometru [10]	22
obr. 10 interferenční jev [10].....	22
obr. 11 Schéma laserového interferometru [10]	23
obr. 12 Chyba „mrtvé dráhy“	25
obr. 13 Kosinova chyba	25
obr. 14 Abbého chyba	26
obr. 15 A) stacionární lineární dělič a kinematický odražeč	26
obr. 16 Lineární trojchodý unidirek. cyklus [11].....	27
obr. 17 Lineární dvouchodý bidirek. cyklus [11]	27
obr. 18 Pendulární trojchodý unidirek. cyklus [11].....	28
obr. 19 Pendulární dvouchodý bidirek. cyklus [11].....	28
obr. 20 Lineární dvouchodý bidirekcionální cyklus [11]	29
obr. 21 Diagram průměrných polohových úchylek [11].....	30
obr. 22 Diagram hranic úchylek [11].....	31
obr. 23 Diagram jednostranné opakovatelnosti nastavení v ose [11]	32
obr. 24 Diagram jednostranné systematické polohové úchylky v ose $E \uparrow a$	32
obr. 25 Diagram necitlivosti osa/poloha, hranice úchylek a opakovatelnosti	33
obr. 26 Diagram dvoustranné polohové – úchylky v ose, přesnosti nastavení.....	34
obr. 27 Klasifikace chyb měření	35
obr. 28 Chyby měření	36
obr. 29 Vliv počtu měření n na přesnost měření.....	37
obr. 30 Vektor. Součet nejistot typu B [21].....	38
obr. 31 Vektor. Součet kombinovaných nejistot [21].....	38
obr. 32 Laserový systém XL – 80 [18]	39

obr. 33 Laserová hlavice XL – 80 [18]	40
obr. 34 Kompenzační jednotka [18]	41
obr. 35 Technické parametry měřicí optiky pro měření polohy a úhlu [18].....	41
obr. 36 Technické parametry měřicí optiky pro měření rotace a rovinnosti [18].....	42
obr. 37 Příslušenství – a) stativ, b) stojan, c) kufr [18].....	42
obr. 38 Dílenský mikroskop Zeiss	44
obr. 39 Definice os mikroskopu.....	44
obr. 40 Detail mikrometrické hlavice	45
obr. 41 Vodící prvky polohování mikroskopu.....	45
obr. 42 Rozmístění komponent pro měření [12].....	46
obr. 43 A) Stavitelný šroub B) Vestavěná libela	46
obr. 44 Ustavení laseru do roviny	47
obr. 45 A) Způsob upnutí optiky k mikroskopu, B) Vzájemná poloha komponent	47
obr. 46 Pohyb komponent pro měření A) osa X, B) osa Y	47
obr. 47 Zobrazení hodnot A, E, M – saně X.....	51
obr. 48 Lineární dvouchodý bidirekcionální cyklus	52
obr. 49 Zobrazení hodnot A, E, M.....	53
obr. 50 Zobrazení hodnot A, E, M.....	55
obr. 51 Lineární dvouchodý bidirekcionální cyklus	56
obr. 52 Zobrazení hodnot A, E, M.....	57
obr. 53 Rameno mikroskopu s nastavovacím šroubem	59
obr. 54 Detail pohybového šroubu.....	59
obr. 55 A) původní okulár B) okulárová kamera.....	60
obr. 56 Digitální vestavěná mikrometrická hlavice [16]	61
obr. 57 Výkres mikrometrické hlavice [16].....	61
obr. 58 Zaměření paprsku na lineární odražeč se zaměřovací krytkou	63
obr. 59 Dobře seřízený laserový paprsek.....	63
obr. 60 Interference programu LaserXL Capture	64

SEZNAM TABULEK

tab. 1 SI soustava pro metr.....	13
tab. 2 Přehled chyb měření a jejich vzorců.....	35
tab. 3 Druhy nejistot měření [21].....	37
tab. 4 rozšiřující koeficient nejistoty typu A [21].....	38
tab. 5 Parametry měřicího zařízení [18].....	39
tab. 6 Technické parametry laserové hlavice XL – 80 [18].....	40
tab. 7 Výpočet jednostranné průměrné polohové úchylky	48
tab. 8 Výpočet průměrné polohové úchylky	48
tab. 9 Výpočet odhadu jednostranné standardní nejistoty nastavení v poloze	49
tab. 10 Výpočet hranice úchylek.....	49
tab. 11 Výpočet opakovatelnosti nastavení polohy v ose	50
tab. 12 Naměřená data	51
tab. 13 Vypočítané hodnoty pro saně na ose X.....	51
tab. 14 Vypočítané hodnoty pro celou osu X.....	53
tab. 15 Naměřená data	53
tab. 16 Porovnání hodnot pro osu X	54
tab. 17 Naměřená data	55
tab. 18 Vypočítané hodnoty pro saně na ose Y.....	55
tab. 19 Vypočítané hodnoty pro celou osu X.....	57
tab. 20 Naměřená data	57
tab. 21 Porovnání hodnot pro osu Y	58
tab. 22 Parametry mikrometrické hlavice	62
tab. 23 Souhrn nastavení pro měření	64
tab. 24 Vypočítané hodnoty pro saně na ose X.....	66
tab. 25 Vypočítané hodnoty pro celou osu X.....	66
tab. 26 Vypočítané hodnoty pro saně na ose Y.....	66
tab. 27 Vypočítané hodnoty pro celou osu Y.....	66