

# **Interferometrická a statistická kalibrace posuvů univerzálního dílenského mikroskopu**

Jana Pilarská

---

Bakalářská práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jana Pilarská**  
Osobní číslo: **T15137**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Interferometrická a statistická kalibrace posuvů univerzálního  
dílenského mikroskopu**

Zásady pro vypracování:

**1. TEORETICKÁ ČÁST:**

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

**7. PRAKTICKÁ ČÁST:**

8. provedení kalibrace pohyblivého zařízení mikroskopu Zeiss
9. provedení návrhu kalibračního postupu, včetně kalibračního protokolu

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. ČSN ISO 230-1. Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínkách obrábění. 1998. vyd. Brno: Český normalizační institut, 1998.
2. ČSN ISO 230-2. Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách. 2010. vyd. Brno: Český normalizační institut, 2010.
3. M. Meloun, J. Militký: Kompendium statistického zpracování dat. Academia, Praha, 2002.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Milena Kubišová**

Ústav výrobního inženýrství

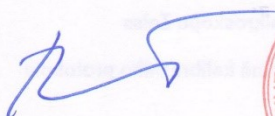
Datum zadání bakalářské práce:

**2. ledna 2018**

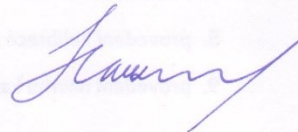
Termín odevzdání bakalářské práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 28. února 2018



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



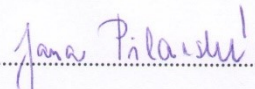
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## 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 <sup>1)</sup>;
- 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> 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 4. května 2018

  
.....

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> 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, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> 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 užit 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**

Bakalářská práce se zabývá návrhem kalibrace mikroskopu Carl Zeiss Jena.

Teoretická část obsahuje popisy metod měření, zkoušek strojů a vyhodnocování přesnosti podle norem ČSN ISO 230-1 a ČSN ISO 230-2.

Praktická část je věnována měření a statistickému zpracování naměřených výsledků. Kalibrace dílenského mikroskopu Carl Zeiss je učiněna v ose X i Y. Součástí praktické části je zpracovaný kalibrační postup s kalibračním protokolem pro tento mikroskop.

Klíčová slova: interferometr, laser, měření, kalibrování, metody, mikroskop

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the design of calibration of the Carl Zeiss Jena microscope.

The theoretical part contains descriptions of measuring methods, machine tests and accuracy evaluation according to the standards ČSN ISO 230-1 and ČSN ISO 230-2.

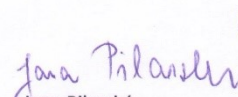
The practical part is devoted to measurement and statistical processing of measured results. The calibration of the Carl Zeiss workshop microscope is performed on the X and Y axis. Part of the practical part is a calibrated calibration procedure with a calibration protocol for this microscope.

Keywords: interferometer, laser, measurement, calibration, methods, microscope

Tímto velmi děkuji své vedoucí mé bakalářské práce Ing. Mileně Kubišové Ph.D. za výborné odborné vedení, za poskytnuté rady, připomínky a také za čas, který mi věnovala při tvorbě této bakalářské práce.

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

Ve Zlíně 4. května 2018

  
Jana Pilarská

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 MĚŘENÍ DÉLKY</b> .....	<b>12</b>
1.1 MĚŘENÍ DÉLEK PŘÍMOU METODOU .....	13
1.2 MĚŘENÍ DÉLEK NEPŘÍMOU METODOU .....	13
1.3 VÝSTUPNÍ ÚDAJE .....	13
<b>2 LASERY</b> .....	<b>15</b>
2.1 DRUHY LASERŮ .....	15
2.1.1 Lasery pevnolátkové .....	15
2.1.2 Lasery polovodičové .....	16
2.1.3 Lasery kapalinové .....	16
2.1.4 Lasery plynové .....	16
2.2 POJEM INTERFERENCE SVĚTLA .....	17
2.3 POJEM INTERFEROMETRIE .....	18
2.4 POJEM INTERFEROMETR .....	19
2.4.1 Interferometr Michalsonův.....	19
2.4.2 Interferometr Machův-Zehnderův.....	20
2.4.3 Interferometr Fabryův-Perotův .....	21
2.4.4 Pojem interferenční komparátor.....	22
2.5 INTERFEROMETR LASEROVÝ.....	23
<b>3 NASTAVITELNOST POLOH</b> .....	<b>24</b>
3.1 INTERFEROMETRY A JEJICH PŘESNOST .....	24
3.2 ÚCHYLKY INTERFEROMETRŮ A JEJICH ZDROJE .....	24
3.3 USPOŘÁDÁNÍ A LINEÁRNÍ MĚŘENÍ PROSTŘEDNICTVÍM LASERINTERFEROMETRU .....	26
3.4 MĚŘÍCÍ CYKLY .....	27
3.4.1 Lineární měřicí cykly .....	27
3.4.2 Pendulární měřicí cykly .....	29
<b>4 METODY ZKOUŠEK STROJŮ A VYHODNOCOVÁNÍ PŘESNOSTI</b> .....	<b>30</b>
4.1 „NORMA ČSN ISO 230-2: 2010 ZÁSADY ZKOUŠEK OBRÁBĚCÍCH STROJŮ.....	30
4.2 CHYBY BĚHEM MĚŘENÍ .....	36
4.2.1 Absolutní chyba .....	38
4.2.2 Relativní chyba.....	38
4.2.3 Systematická chyba .....	38
4.2.4 Náhodná chyba.....	38
4.2.5 Hrubá chyba .....	39
4.3 NEJISTOTY PŘI MĚŘENÍ .....	39
4.3.1 Nejistota typu A .....	39
4.3.2 Nejistota typu B.....	39
4.3.3 Kombinovaná nejistota.....	39
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>40</b>
<b>5 MIKROSKOP</b> .....	<b>41</b>



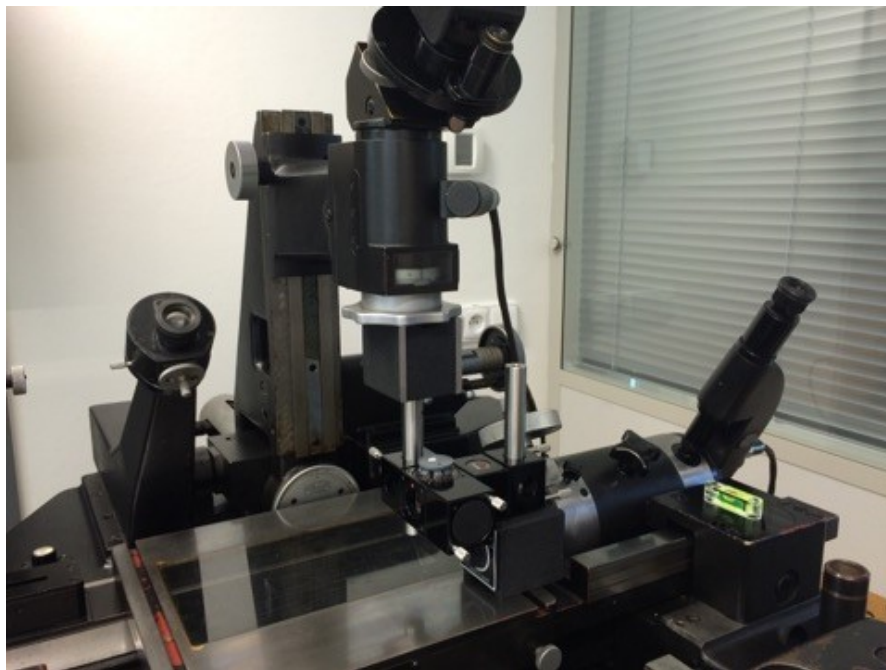
5.1	NASTAVENÍ DÍLENSKÉHO MIKROSKOPU.....	42
5.2	USTAVENÍ MIKROSKOPU.....	43
5.3	PODMÍNKY PRO KALIBROVÁNÍ.....	44
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ.....</b>	<b>46</b>
6.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY V OSE X, VE SMĚRU „↑“ .....	46
6.1.1	Grafické znázornění - medián .....	47
6.1.2	Grafické znázornění - průměr .....	47
6.1.3	Grafické znázornění – Min, Max .....	48
6.1.4	Grafické znázornění – průměr ± 3s.....	48
6.1.5	Grafické znázornění – rozpětí .....	49
6.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY V OSE X VE SMĚRU „↓“ .....	49
6.2.1	Grafické znázornění – medián .....	50
6.2.2	Grafické znázornění – průměr.....	50
6.2.3	Grafické znázornění – Min, Max .....	51
6.2.4	Grafické znázornění – průměr ± 3s.....	51
6.2.5	Grafické znázornění – rozpětí .....	52
6.3	NAMĚŘENÉ HODNOTY V OSE Y VE SMĚRU „↑“ .....	52
6.3.1	Grafické znázornění – medián .....	53
6.3.2	Grafické znázornění – průměr.....	53
6.3.3	Grafické znázornění – Min, Max .....	54
6.3.4	Grafické znázornění – průměr ± 3s.....	54
6.3.5	Grafické znázornění – rozpětí .....	55
6.4	NAMĚŘENÉ HODNOTY V OSE Y VE SMĚRU „↓“ .....	55
6.4.1	Grafické znázornění – medián .....	56
6.4.2	Grafické znázornění – průměr.....	56
6.4.3	Grafické znázornění – Min, Max .....	57
6.4.4	Grafické znázornění – průměr ± 3s.....	57
6.4.5	Grafické znázornění – rozpětí .....	58
<b>7</b>	<b>KALIBRAČNÍ POSTUP A KALIBRAČNÍ LIST .....</b>	<b>59</b>
7.1	NAVRŽENÍ KALIBRAČNÍHO POSTUPU .....	59
<b>8</b>	<b>NÁVRH VHODNÉHO KALIBRAČNÍHO LISTU .....</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>69</b>

## ÚVOD

Mikroskopy patří do světa přístrojů, které měly a mají velký vliv na vědecký vývoj i naše běžné životy. Tento přístroj odhalil lidem tajemství mikrosvěta, a to již před více než 400 lety. Již ve starověku se začaly používat silné čočky k probádání menších předmětů. Zhruba kolem roku 1590 vyrobil jako první mikroskop, který bylo možné používat, holandský výrobce brýlí Zacharias Jansen. Tento jeho vynález zdokonalil Galileo Galilei. První jednočočkový mikroskop vymyslel Antonius van Leeuwenhoek. Složený mikroskop, který měl více čoček, však sestrojil až v roce 1665 anglický chemik a fyzik Hooke. Za prudký vývoj mikroskopů vděčíme Carlu Zeissovi, Ernstu Abbemu a Ottu Schottovi. [16]

Mikroskopy se od té doby neuvěřitelně zdokonalily. V současnosti provádíme měření s přesností až na tisícinu.

Cílem této bakalářské práce je provedení kalibrace dílenského mikroskopu Carl Zeiss. Pro každého uživatele tohoto mikroskopu budou výsledky této kalibrace sloužit jako informace o odchylkách, se kterými budou při práci počítat.



Obr. 1 Mikroskop Carl Zeiss

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 MĚŘENÍ DÉLKY

Délkové měření patří mezi nestarší druh měření v historii lidstva. Nutnost měření se objevila při rozvoji směnného obchodu. Nejprve lidé používali jako základní jednotky délky části lidského těla (krok, palec, loket). Tato metoda měla však velký nedostatek. Při prodeji zboží každý obchodník používal vlastní jednotky, které se často vzájemně odlišovaly. Situace se změnila rozhodujícím způsobem po Velké francouzské revoluci. V jejím průběhu byla zavedena metrická soustava.

Délková jednotka byla nejdříve určena z rozměru zeměkoule a jeden metr odpovídal jedné desetimiliontině poloviny poledníkové délky. Byla vyrobena mosazná tyč o délce jeden metr, která se stala etalonem. V roce 1875 byla 17 evropskými státy podepsána „Konvence metru“, která určila, že délkovou jednotkou je jeden metr a jeho délka je dána tyčí z platiny a iridia. Státy se shodly na tom, že tento artefakt bude uložen v Paříži v Úřadu pro míry a váhy a etalony budou všemi státy odvozovány od délky dané touto tyčí.

Míry jednotlivých měř se neustále upřesňovaly a v roce 1960 vznikla Mezinárodní soustava jednotek SI, která byla v naší republice stanovena zákonem v roce 1980. [13]



Obr. 2 Etalon metru [7]

## 1.1 Měření délek přímou metodou

U tohoto typu měření měřidlo pokládáme mezi dva body, do jejich spojnice. Zjištěný rozměr odečteme na stupnici daného měřidla.

Mezi přímé metody patří:

- Délková měření tuhými měřidly (svinovací metr, pásmo, posuvná měřítka)
- Dálkoměry elektronické: elektrooptické a rádiové
- Dálkoměry laserové

## 1.2 Měření délek nepřímou metodou

Neměříme požadovanou délku přímo, ale měříme veličiny, z nichž délku vypočítáme.

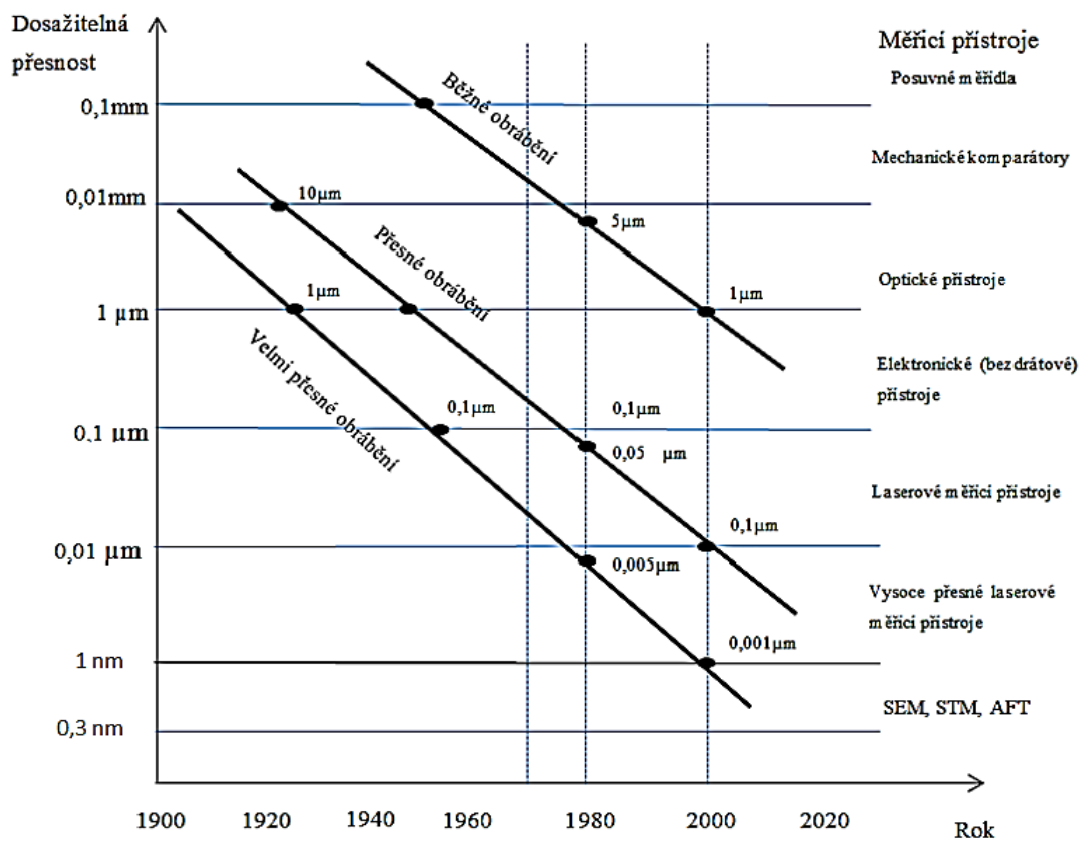
Mezi tyto metody náleží:

- Měření délek geometrické
- Zjišťování délkových hodnot pomocí trigonometrie
- Měření délkových hodnot prostřednictvím dálkoměrů

## 1.3 Výstupní údaje

Výstupy dělíme na:

- analogové – výstupní údaje získáváme z měřících přístrojů, hodnoty se vyznačují spojitou funkcí měřených veličin,
- digitální – výstupy dostáváme z měřících přístrojů v číselné podobě



Obr. 3 Dosažitelná výrobní přesnost [11]

## 2 LASERY

Pojem LASER vznikl z anglického Light Amplification by Emission of Radiation – světelné zesílení pomocí stimulované emise záření. Toto zesílení mají na svědomí opakující se fotonové průchody, které vykazují jedinečné vlastnosti. Laser vytváří unikátní druh světla. Toto světlo není přírodního původu. Vyznačuje se monochromaticností, nízkou rozbíhavostí, stálostí fázových posunů, je možné jeho zaostření na průměr o nízkých hodnotách. První laser byl zkonstruován v roce 1960. Jeho autorem byl americký fyzik T. H. Maiman. Navrhnul rubínový laser o vlnové délce 694,3 nanometrů. Proti dnešním laserům nebyl příliš dokonalý a byl méně výkonný. Tento laser zdokonalili fyzici Basov, Prochorov a Townes, kteří použili více energetických hladin, čímž dosáhli souvislé práce laseru. Za tento objev jim byla udělena v roce 1964 Nobelova cena.

Pro svoji rozmanitost se lasery využívají v různých odvětvích průmyslu, lékařství a používáme je i v našem každodenním životě. Laser je v současnosti nezbytnou součástí v oblastech vědy i výzkumu.

Lasery rozdělujeme podle těchto hledisek:

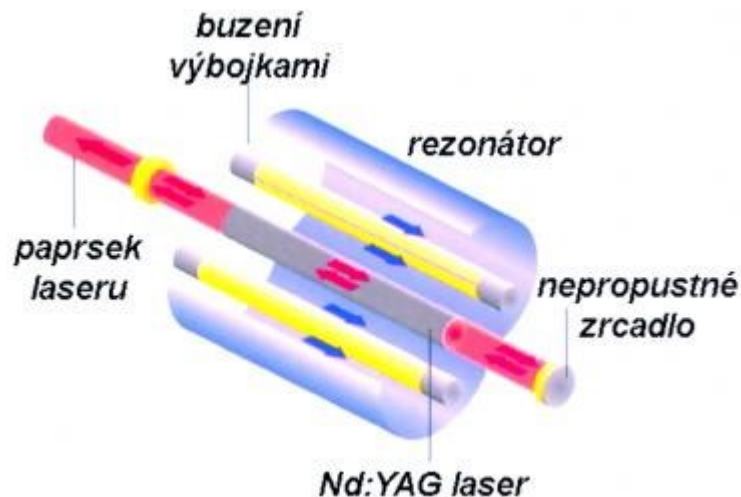
- druh aktivního prostředí – plynové, diodové, pevnolátkové, kapalinové
- vlnová délka – infračervené, ultrafialové
- režim práce – pulzní, impulzní, kontinuální

### 2.1 Druhy laserů

#### 2.1.1 Lasery pevnolátkové

Jako aktivní prostředí slouží krystalické či amorfní izolanty, které obsahují vhodné ionty s optickou excitací. Uvedené lasery pracují při mnoha režimech a snesou různé provozní podmínky. Jsou stálé a vyznačují se nízkými údržbovými nároky. Vlnové délky jejich záření jsou v klasifikaci viditelného a infračerveného světla.

Nejznámější je rubínový laser. Jako aktivní prostředí slouží krystal rubínu syntetického. Nejvíce rozšířený je v současnosti neodymový laser. Nejvíce se používá v lékařství. [8]



Obr. 4 Pevnolátkový Nd: YAG laser [8]

### 2.1.2 Lasery polovodičové

Tyto lasery jsou v dnešní době nejrozšířenější. Jako základ se používá laserová dioda malých rozměrů. V porovnání s ostatními typy laserů má větší rozbíhavost. Její účinnost může být až 50%. Pokud u diody změním velikost elektrického proudu, dosáhneme také změny výkonu. Tato dioda je používána především v oblasti výpočetní techniky. [12]

### 2.1.3 Lasery kapalinové

Základem těchto laserů jsou roztoky barviv organického původu. Různými kombinacemi můžeme dosahovat pomocí optiky nelineárního typu světla o různých rozsazích vlnových délek. Tyto lasery nacházejí uplatnění především ve spektroskopii. Jejich životnost je však omezena. Důvodem je rozklad aktivního prostředí vlivem světla a tepla.

### 2.1.4 Lasery plynové

Tento druh laserů je tvořen aktivním prostředím obsahující atomy, molekuly či ionty. Mají velký rozsah. Mohou fungovat v pulzním i kontinuálním režimu. Tyto lasery vynikají nadstandardními parametry, a to díky stejnorodému prostředí. Nevýhodou je nízký výkon.

Mezi nejznámější patří helium-neonový laser. Nejpoužívanější je CO<sub>2</sub> laser. Jeho vlnová délka má úroveň infračerveného záření.



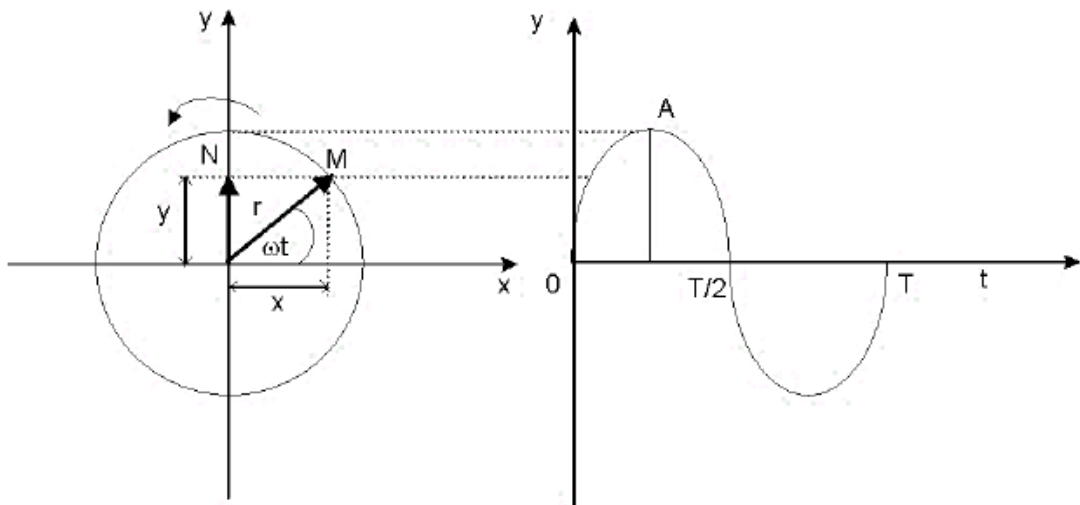
## 2.2 Pojem interference světla

Světlo je definováno jako elektromagnetické vlnění, které je schopné vnímat lidské oko. Pod pojem světla rozumíme elektromagnetická vlnění, u nichž se frekvence pohybuje v rozmezí 380 až 760 nm. Interference je potvrzením vlnového charakteru světla.

Vlnění, šířící se určitým prostředím, postupně uvádí každou částici do pravidelného pohybu, tzn. do pohybu periodického, opakujícího se ve stejných časových intervalech. Po přímce  $y$  probíhá pohyb částice  $M$ . Na dané přímce zvolíme bod  $O$  a označíme momentální vzdálenost bodu  $O$  od částice  $M$  jako  $y$ . Nyní jsme schopni tento pravidelný pohyb vyjádřit pomocí rovnice:

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

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



Obr. 5 Znáornění mechanického vlnění [11]

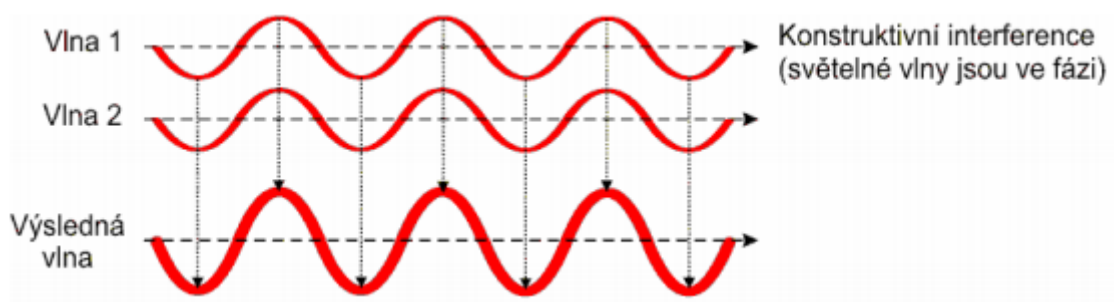
### 2.3 Pojem interferometrie

Interferometrie vychází z interference světla. Ta může vzniknout při splnění určitých podmínek:

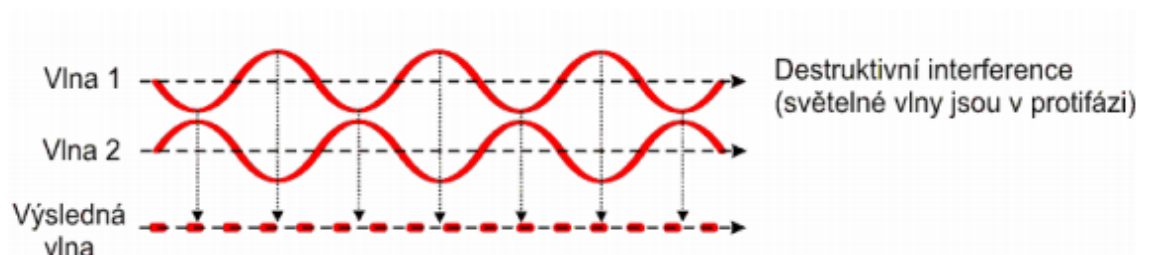
- Všechna záření, která dopadají do jednoho bodu, musí mít shodnou vlnovou délku
- Ve zvoleném bodě musí mít všechna záření stabilní rozdíl drah

Pokud budou splněny tyto podmínky, na stínítku dochází k interferenci světla. Tento jev je označován jako koherentní záření. Z obou štěrbin musí být každý bod na stínítku pokrytý světlem. O tom, jaký na stínítku bude proužek (tmavý nebo světlý), rozhodne dráhový rozdíl. Světlý proužek vzniká v případě, když je dráhový rozdíl sudým násobkem vlnové délky. Hovoříme o interferenci konstruktivní. Naopak tmavý proužek vzniká, pokud se dráhový rozdíl rovná násobku lichému. Jedná se o interferenci destruktivní. [13]

a)



b)



Obr. 6 Dvousvazková interference a) konstruktivní b) destruktivní [19]

„Pokud máme dvě vlny:

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

Konečná vlna je:

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

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).“

Interferenční maximum vzniká podle velikosti dráhového rozdílu pro:

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

( $k$  – celé číslo,  $\lambda$  – vlnová délka)

Interferenční minimum pro:

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

## 2.4 Pojem interferometr

Jedná se o optické zařízení pro přesné určování rozměrů, délek. Využívá princip interference světla.

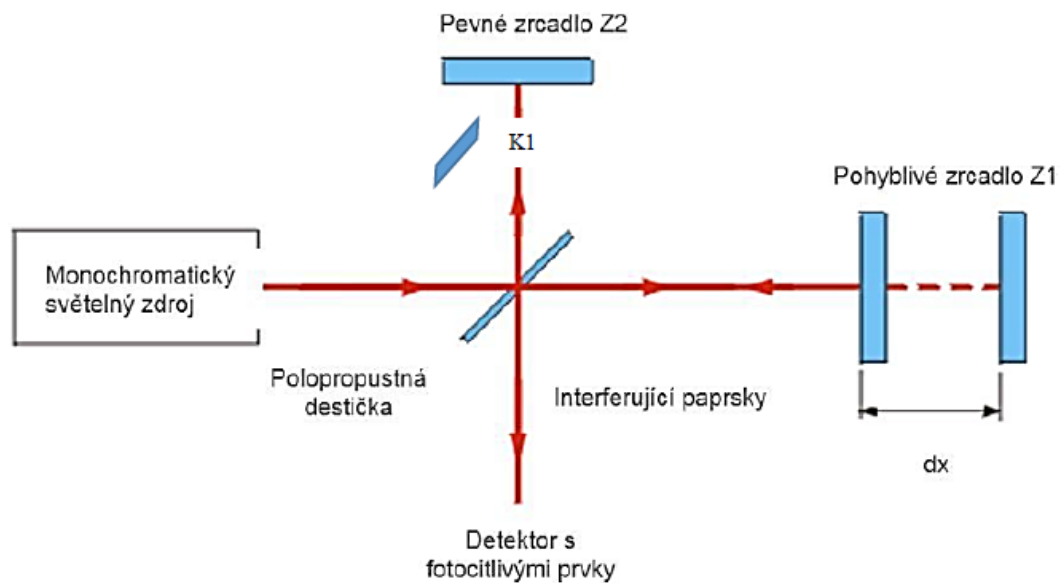
Typy interferometrů:

- Interferenční komparátor – pro měření délek
- Interferenční refraktometr – pro určování lomů u kapalin a plynů
- Interferenční spektroskop – pro určování jemných struktur spektrálních čár

### 2.4.1 Interferometr Michalsonův

Jde o dvousvazkový interferometr. Je složen z těchto částí: monochromatický světelný zdroj, polopropustné desky, detektor a dvě zrcadla.

Pod úhlem  $45^\circ$  na destičku dopadne paprsek, který se rozštěpí na dva samostatné paprsky. Na pevné zrcadlo ( $Z_2$ ) dopadne první paprsek, který se odrazem dostává na destičku. Skrz ni projde do detektoru. Na pohyblivé zrcadlo ( $Z_1$ ) dopadne pod úhlem  $90^\circ$  druhý paprsek, který předtím prošel přes polopropustnou destičku. Ten se znovu odrazí na destičku a poté se opět odrazí, nyní do detektoru. Zde se paprsky znovu setkají. [13]



Obr. 7 Michalsonův interferometr [9]

Do dráhy prvního paprsku se vloží kompenzační destička ( $K1$ ), která je s polopropustnou destičkou rovnoběžná. Druhý paprsek totiž prochází přes polopropustnou destičku třikrát.

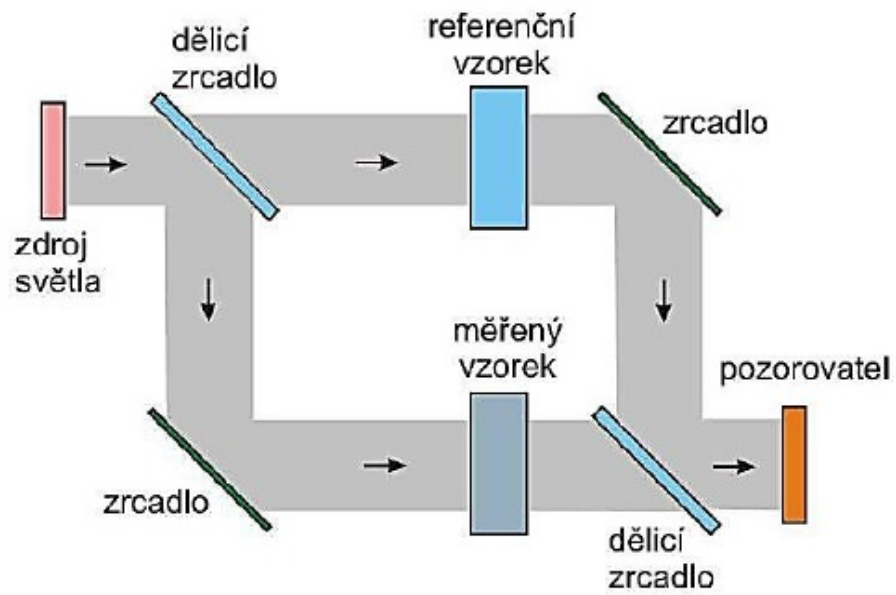
Pokud budou vzdálenosti obou zrcadel od destičky identické, nutně musí být identické i dráhy obou paprsků. V důsledku toho oba paprsky v ohnisku zintenzivní. Pokud pohneme zrcadlem  $Z_2$  o délku  $l$ , dostaneme dráhový rozdíl obou paprsků:

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

#### 2.4.2 Interferometr Machův-Zehnderův

Tento typ interferometru se také řadí mezi dvousvazkové interferometry. Používá se pro měření průhledných předmětů. Oproti Michalsonovu interferometru je méně citlivý. Skládá se ze dvou zrcadel a dvou polopropustných zrcadel.

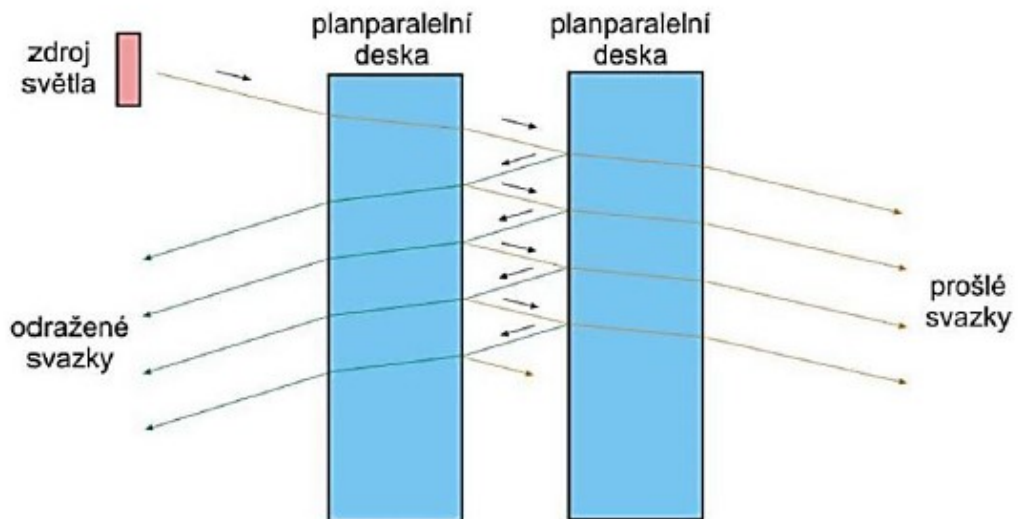
Na dělicím zrcadle vznikne ze světelného svazku svazek referenční a předmětový. Předmětový svazek se upravuje přidáním čoček na svazek paralelní, který má větší průměr. Ten projde přes měřicí prostor, zatímco se průhledným předmětem deformuje vlnoplocha, původně rovinná. Na dělicím zrcadle se svazky opět spojí a v důsledku různých optických drah referenčních a předmětových paprsků vznikne interference. Rovina z prostoru měření do pozorovatelského prostoru je zobrazována čočkou. [10]



Obr. 8 Machův-Zehnderův interferometr [9]

### 2.4.3 Interferometr Fabryův-Perotův

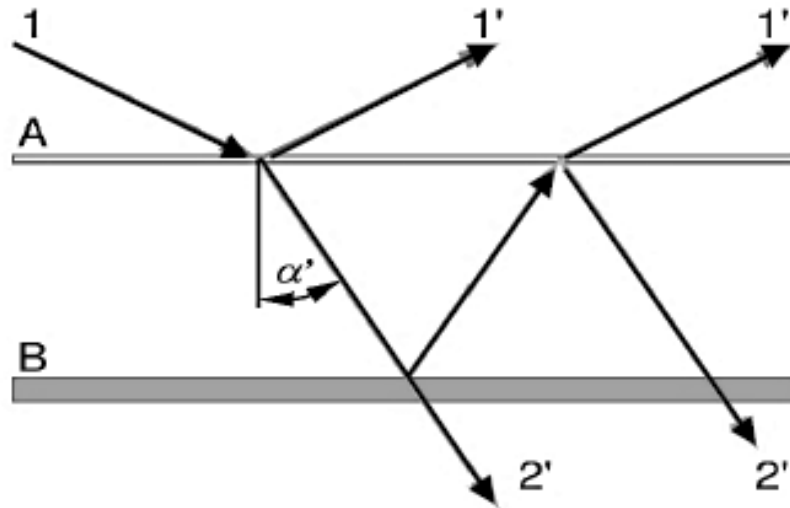
Tento typ interferometru má dvě planoparalelní desky. Jedna z nich je zčásti propustná. Do interferometru přichází světlo pod úhlem  $90^\circ$  a několikrát se odráží. Některé z paprsků odejdou a prochází přes první desku ven. Další část svazku prochází ven skrz druhou desku.



Obr. 9 Fabryův-Perotův interferometr [9]

#### 2.4.4 Pojem interferenční komparátor

Jedná se o sofistikované opticko-mechanické zařízení, které pro svoji funkci využívá interferenci dvojice paprsků.



Obr. 10 Interference [9]

Mezi dvěma plochami, které jsou rovnoběžné, se nachází interferenční vrstva. Vrchní oblast A má polopropustný charakter a spodní plochu B tvoří zrcadlo. Když monochromatický paprsek 1 dopadne na vrstvu A, dojde jednak k odrazu po směru 1', a také k lomu po směru k 2'.

Tento paprsek se zase odrazí a rozdělí se. Částečně prochází skrz polopropustnou vrstvu A a další část se odráží po směru 2''. Paprsky 1' a 1'' mezi sebou začnou interferovat, jsou koherentní. Je možné spočítat dráhový rozdíl mezi těmito dvěma paprsky, a to podle vzorce:

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

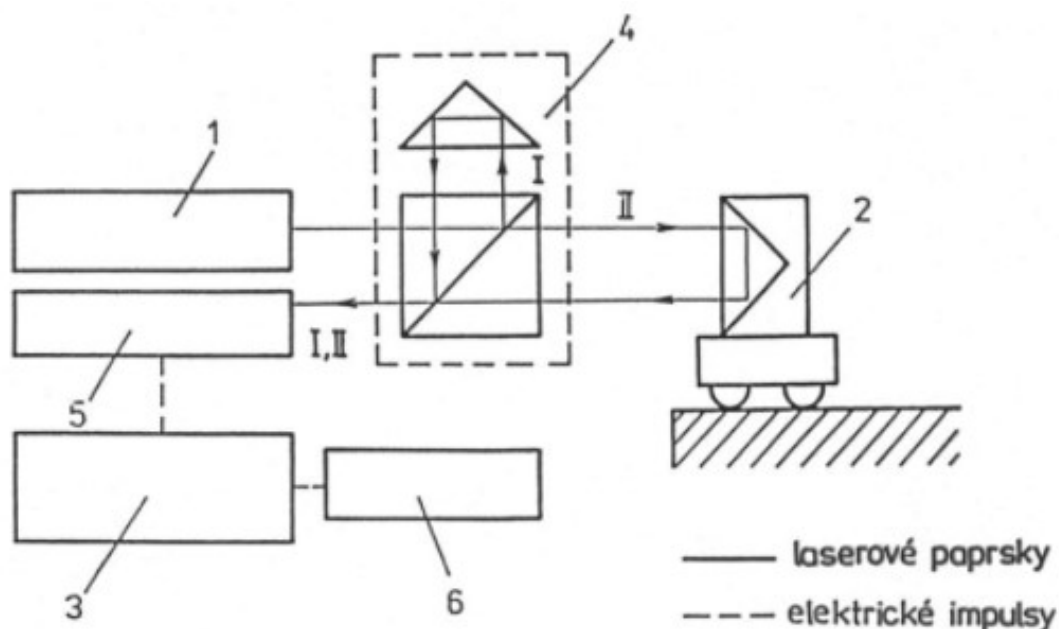
b – hloubka interferenční vrstvy

n – index lomu vrstvy

$\lambda$  – vlnová délka

## 2.5 Interferometr laserový

Je využíván k měření chyb pohybů pro lineární polohování, kdy odražeč je umístěn na nástroji a interferometr je na obrobku, může tomu být i opačně. Paprsek vychází z laserové hlavy. Aby se neprojevovala chyba Kosinova, musí být tento paprsek co nejvíc souběžný s lineárním pohybem, který stroj koná. Výchylinky a vibrace, které způsobuje akcelerace, musí být sníženy na minimum. Z toho důvodu je potřeba všechny optické části pevně spojit se strojem. Měřiče tlaku, teplot a vlhkosti je dobré umístit do těsné blízkosti dráhy paprsku. Tím kompenzujeme lom vzduchu. Nejvhodnější je teplota 20° C. V případě, že je jiná, zvyšujeme riziko zvýšení nejistoty přesnosti výrobku.



Obr. 11 Laserový interferometr - schéma [10]

### 3 NASTAVITELNOST POLOH

Pokud dokážeme při stejných podmínkách měření zopakovat, stává se každé takovéto měření průkazným. Z důvodu zajištění přesnosti měření musí být příprava měření normalizována.

ČSN ISO 230-1:1998 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek. Norma specifikuje zatížení příslušného přístroje, nastavení os a temperování.

V normě jsou také specifikovány chyby při nastavování měřících přístrojů a jejich přesnosti. Pokud kalibrujeme měřící zařízení, je nutné použít přesnější kalibrační zařízení oproti zařízení kalibrovanému.

Jak je uvedeno v normě ČSN ISO 230-1, vlnová délka laseru určuje přesnost interferometru.

#### 3.1 Interferometry a jejich přesnost

Z celkových šesti stupňů volnosti je schopen laserinterferometr změřit pět. Patří sem: lineární nastavení vrstvy, přímota vodorovná, přímota svislá, kolmost dvou ploch, klopení. Pokud měříme nechtěné úhlové pohyby a nepřímotačné translační pohyby, mohou se vyskytnout problémy.

#### 3.2 Úchyly interferometrů a jejich zdroje

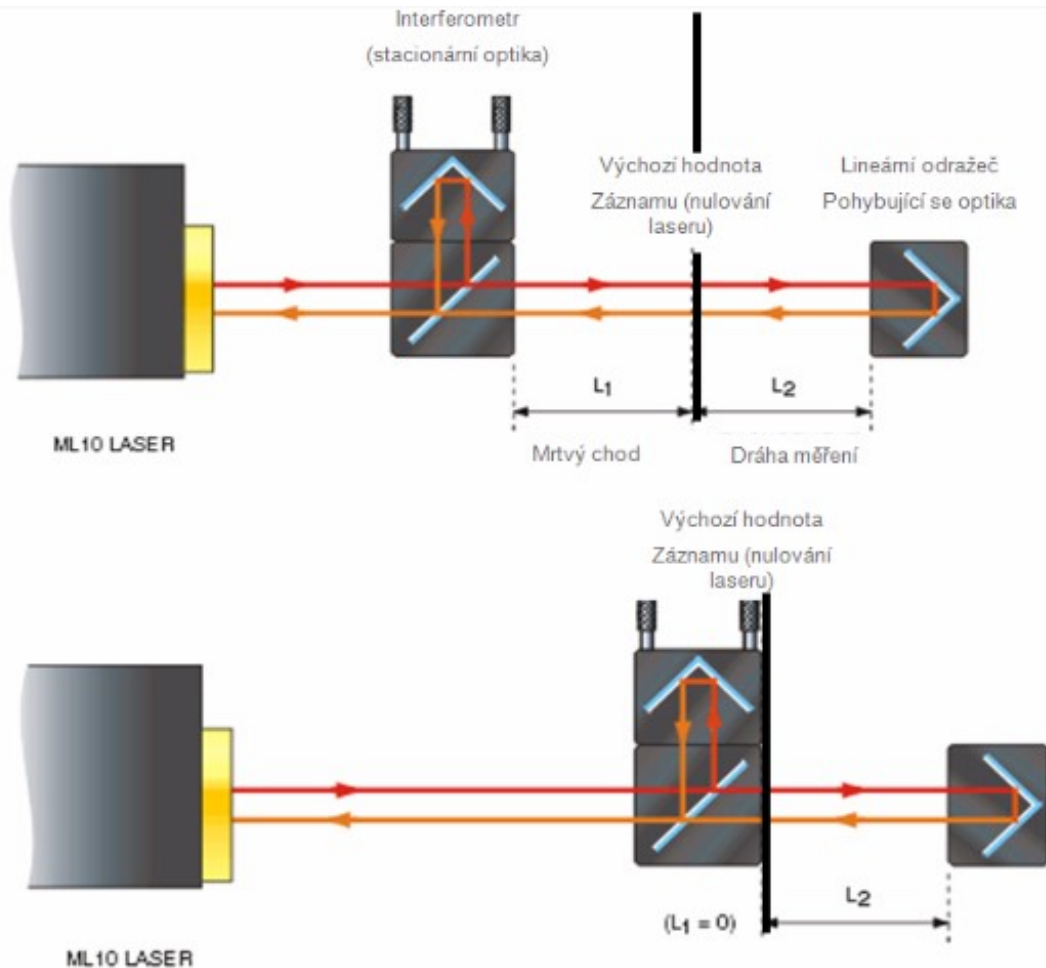
Chceme-li zachovat přesnost měření, musíme být seznámeni se stavem prostředí a okolními vlivy. Po celou dobu měření musíme zajistit stabilitu.

Možné chyby mohou mít svůj původ v:

- prostředí – příčinou může být kolísání teploty, taková chyba se projeví i při změnách relativní vlhkosti či absolutního tlaku
- povrchová teplota stroje – důležitým zdrojem chyb při měřeních může být hodnota teploty obráběcího stroje
- chyby zapříčiněné tepelnými zdroji – i změny teplot či provádění měření poblíž tepelných zdrojů mohou být příčinou roztahování optických částí či vzduchových turbulencí, které mohou působit na laserový paprsek

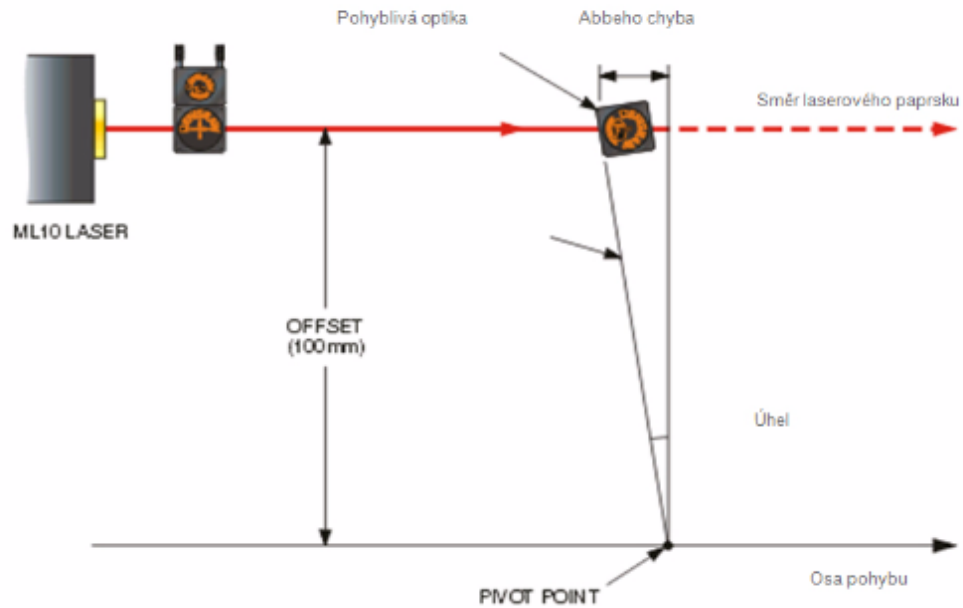


- znečištění optických částí – zejména pokud měříme delší dráhy, může mít toto znečištění vliv na intenzitu signálu laserového paprsku
- chyba způsobená tzv. „mrtvou dráhou“ – chyba vzniká při nulování systému, a to mezi dvěma optickými částmi



Obr. 12 Chyba vzniklá „mrtvou dráhou“ [11]

- chyba Kosinova – chyba vzniká, pokud dráha paprsku laseru není rovnoběžná s osou pohybu stroje. Tedy vzniká nesprávným nastavením směru laserového paprsku. Skutečná dráha je pak delší než dráha měřená.
- chyba Abbého – vzniká při porušení Abbého principu, kdy měřený rozměr i měřítko musí ležet ve stejné přímce



Obr. 13 Chyba Abbého [12]

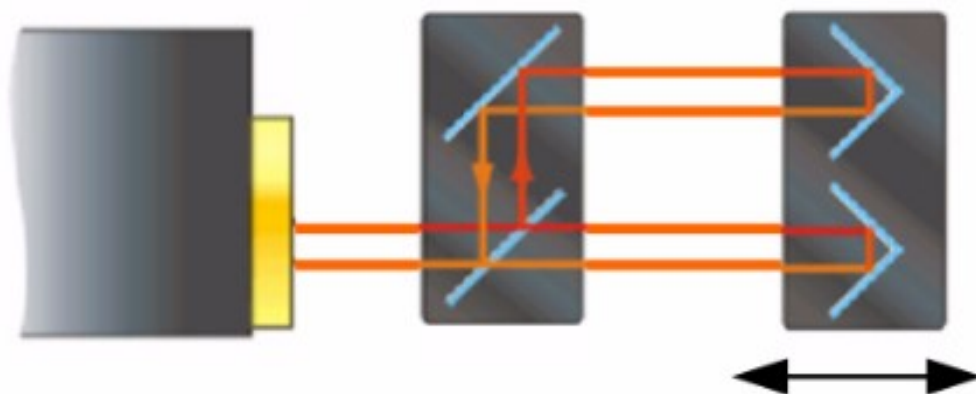
Pokud seřizujeme laserové systémy, je potřeba dodržování základních pravidel:

- je zapotřebí vhodně uspořádat všechny části,
- snížit riziko zdrojů chyb,
- nasimulovat pracovní či výrobní podmínky stroje.

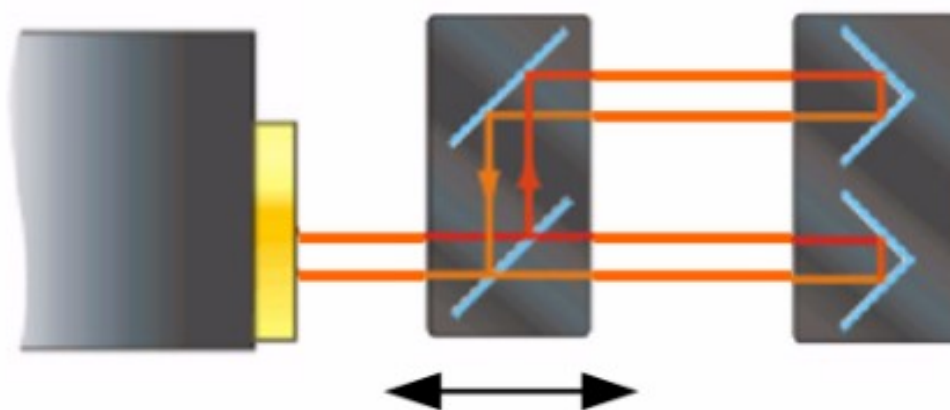
Při dodržení těchto pravidel by mělo měření probíhat správně a výše jmenovaných chyb bychom se neměli dopouštět.

### 3.3 Uspořádání a lineární měření prostřednictvím laserinterferometru

U lineárního měření os, které provádíme v této práci, jsou dva základní druhy uspořádání. V prvním případě máme pohyblivý odražeč a pevně uchycený lineární dělič, v druhém případě pak máme pevně uchycený odražeč a pohyblivý lineární dělič.



Obr. 14 Stacionární lineární dělič s kinematickým odražečem [11]



Obr. 15 Kinematický lineární dělič se stacionárním lineárním odražečem [11]

### 3.4 Měřicí cykly

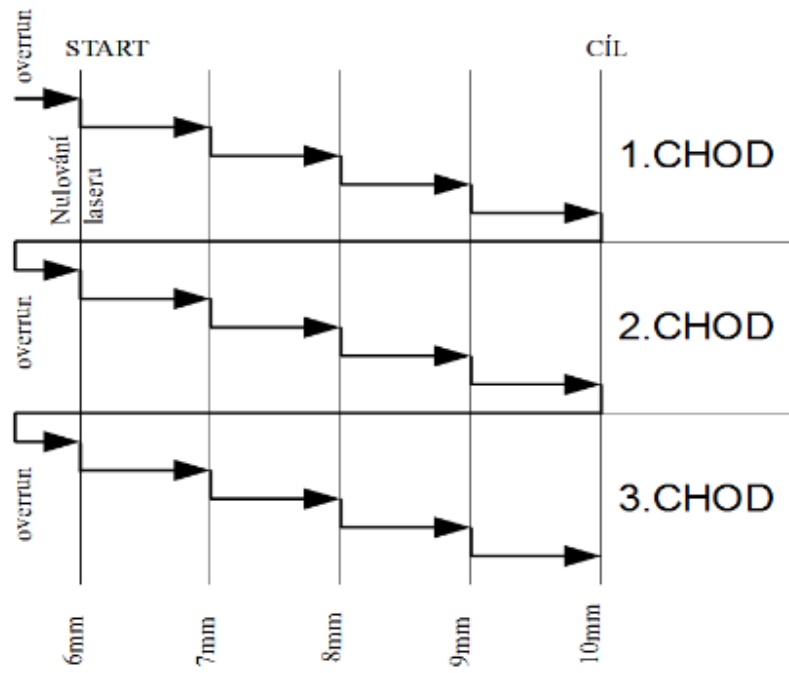
#### 3.4.1 Lineární měřicí cykly

Undirekcionální

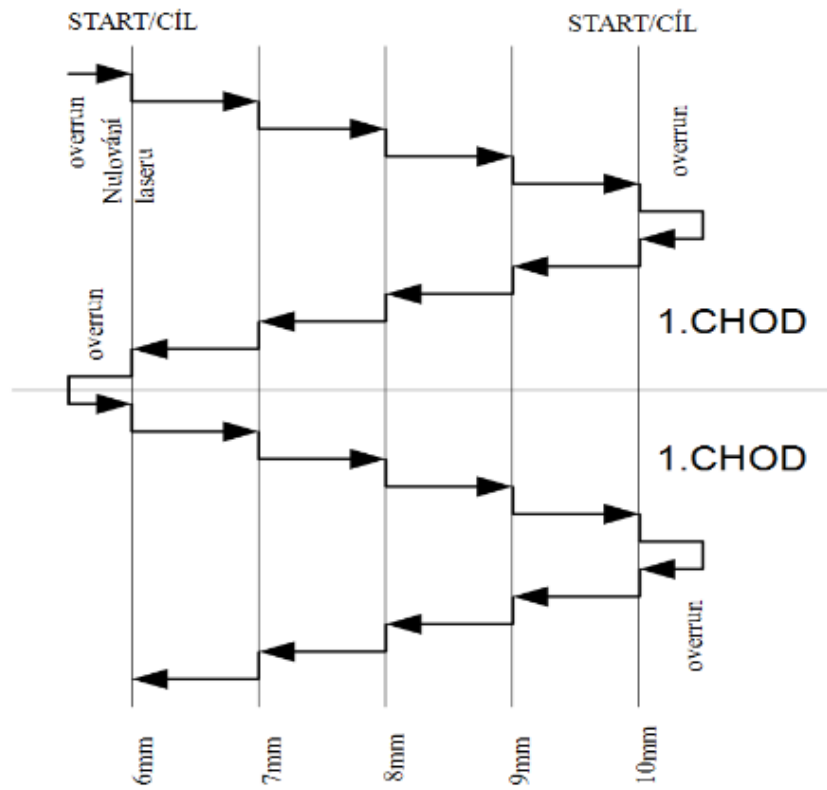
- Jednochodý
- Vícechodý

Bidirekcionální

- Jednochodý
- Vícechodý



Obr. 16 Trojchodý undirekcionální cyklus lineární [11]



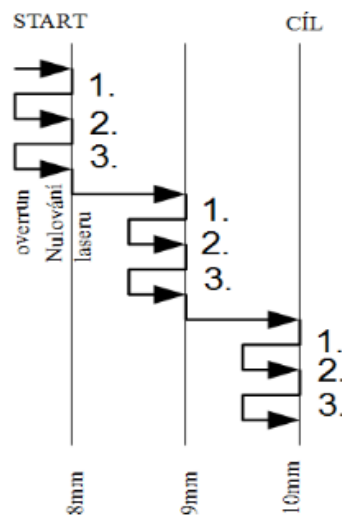
Obr. 17 Dvouchodý bidirekcionální cyklus lineární [11]

Undirekcionální – jednostranný – používáme pro sérii měření, kdy zadáváme hodnoty pro osu a polohu stále v tom samém smyslu pohybu.

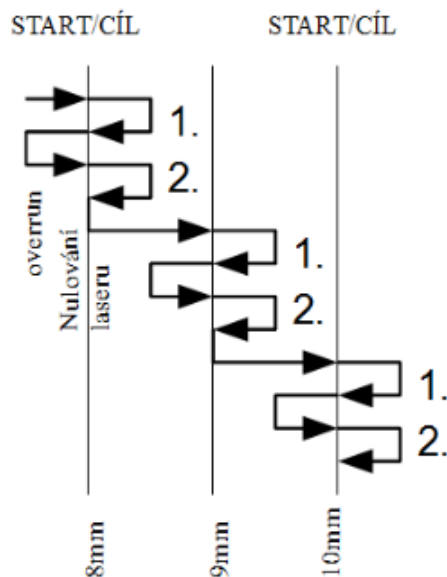
Bidirekcionální – dvoustranný - pro sérii měření, kdy nastavujeme hodnotu pro osu a polohu stále v obou směrech pohybu.

### 3.4.2 Pendulární měřicí cykly

Dělení těchto cyklů je identické jako u lineárních.



Obr. 18 Trojchodý undirekcionální cyklus pendulární [11]

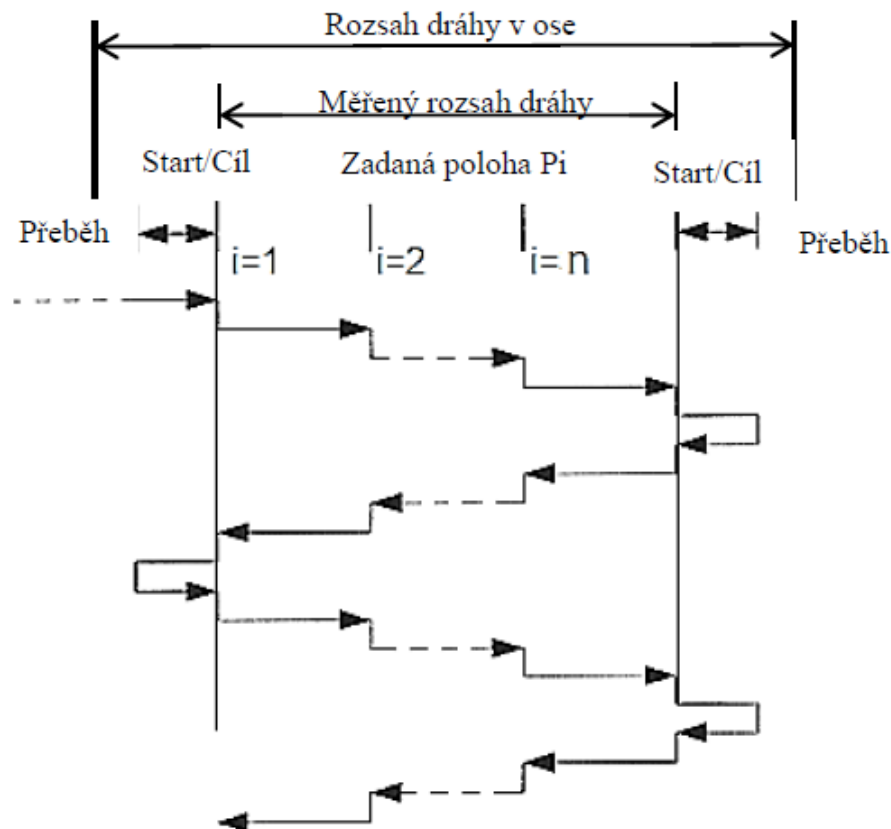


Obr. 19 Dvouchodý bidirekcionální cyklus pendulární [11]

## 4 METODY ZKOUŠEK STROJŮ A VYHODNOCOVÁNÍ PŘESNOSTI

### 4.1 „Norma ČSN ISO 230-2: 2010 Zásady zkoušek obráběcích strojů

V této normě jsou specifikovány metody zkoušek, vyhodnocování přesností, opakovatelnost nastavení poloh pro přímé měření poloh v osách.



Obr. 20 Dvouchodý bidirekcionální cyklus lineární [12]

**Rozsah dráhy v ose** – jedná se o největší dráhu úhlovou nebo lineární, v jejím rozsahu se může přestavovat pohyblivá část pomocí číslicového řízení.

**Měřený rozsah dráhy** – jde o část rozsahu dráhy, která se použije pro daná měření. Volí se tak, aby i do první, i do poslední zadané polohy byla možnost nájezdu z obou stran.

**Zadaná poloha  $P_i$  ( $i = 1$  až  $m$ )** – určuje polohu, do níž je naprogramován pohyb zvolené části.

**Skutečná poloha  $P_{ij}$**  ( $i = 1$  až  $m$ ;  $j = 1$  až  $n$ ) – měřená poloha, která se dosáhne nastavenou částí při  $j$ -tém nastavení do  $i$ -té zvolené polohy.

**Polohová úchylka** – je rozdílem mezi dosaženou a skutečnou nastavenou polohou a částí

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

**Rozšířená nejistota** – hodnota, která určuje interval výsledků všech měření, o nichž lze předpokládat, že bude obsahovat větší část rozložení hodnot.

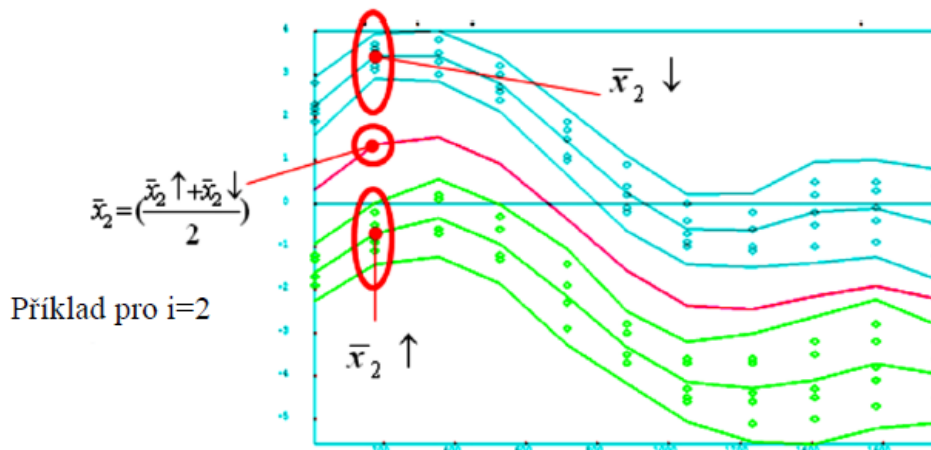
**Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze  $X_t \uparrow$  nebo  $X_t \downarrow$**  - aritmetický průměr polohových úchylek, které jsou zjištěny při sérii „n“ najetí do polohy  $P_i$  v jednom smyslu.

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

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

**Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze  $X_t$**  - aritmetický průměr průměrných jednostranných polohových úchylek  $X_t \uparrow$  a  $X_t \downarrow$ , kterou jsou zjištěny při nájezdech do polohy  $P_i$  v obou smělech.

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



Obr. 21 Průměrné polohové úchylky - diagram [12]

**Necitlivost v poloze  $B_i$**  – je rozdílem mezi průměrnými jednostrannými polohovými úchylkami, které jsou zjištěny při nájezdech do polohy  $P_i$  v obou smělech.

$$B_i = X_t \uparrow - X_t \downarrow \quad (13)$$

**Necitlivost v ose B** – je největší z absolutních hodnot necitlivosti  $B_i$  ze všech zadaných poloh ve zvolené ose.

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

**Odhad jednostranné standartní nejistoty nastavení v poloze  $s_i \uparrow$  nebo  $s_i \downarrow$**  - je odhad standartních nejistot polohových úchylek, které jsou zjištěny při sérii n najetím do polohy  $P_i$  v jednom smyslu.

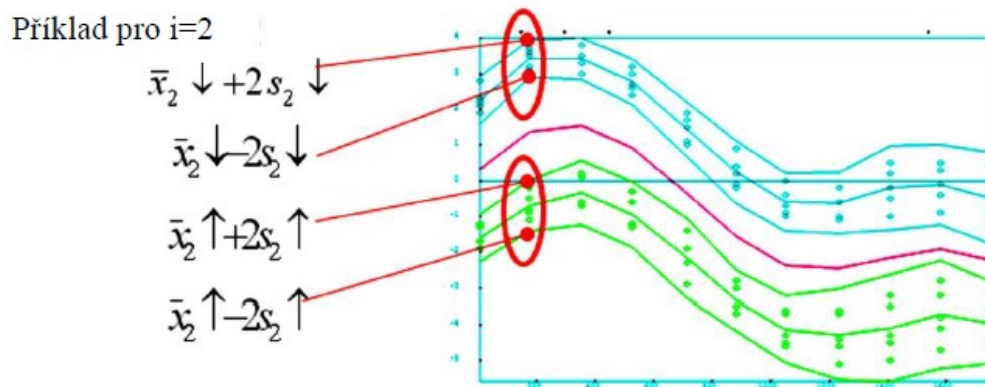
$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ji} \uparrow - X_i \uparrow)^2} \quad (15)$$

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

**Hranice úchylek** – ke každé zadané hodnotě  $P_i$  a pro n nastavení poloh ve všech smyslech se určuje hranice úchylek

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

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



Obr. 22 Hranice úchylek - diagram [12]

**Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze  $R_i \uparrow$ , či  $R_i \downarrow$**  - je rozsahem odvozeným z rozšířené nejistoty jednostranných polohových úchylek v poloze, pokud použijeme koeficient rozšíření 2.

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

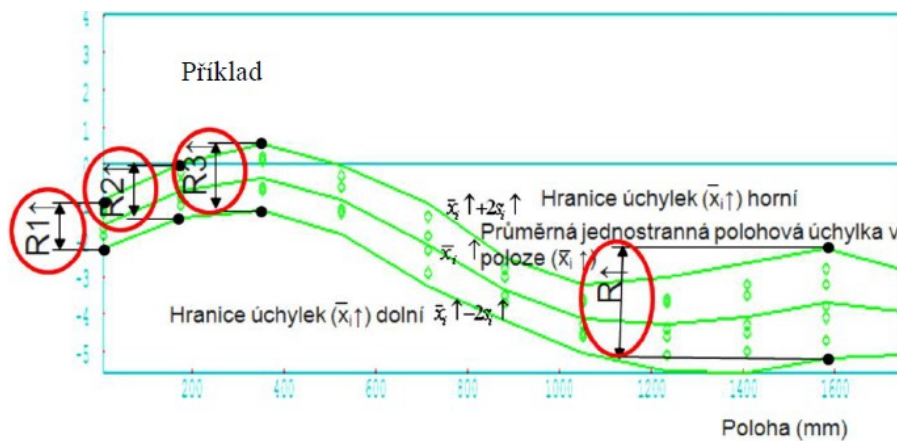
$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (20)$$



**Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose  $R \uparrow$ , či  $R \downarrow$**  - jedná se o největší hodnotu z opakovatelnosti nastavení polohy v jakékoliv poloze  $P_i$  v zadané ose.

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

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



Obr. 23 Jednostranná opakovatelnost nastavení v ose - diagram [12]

**Jednostranná systematická polohová úchylka v se  $E \uparrow$  nebo  $E \downarrow$**  - porovnává se nejmenší a největší aritmetická hodnota průměrných jednostranných polohových úchylek během nastavení polohy v jednom smyslu, které jsou zaznamenány v jakékoliv poloze osy.

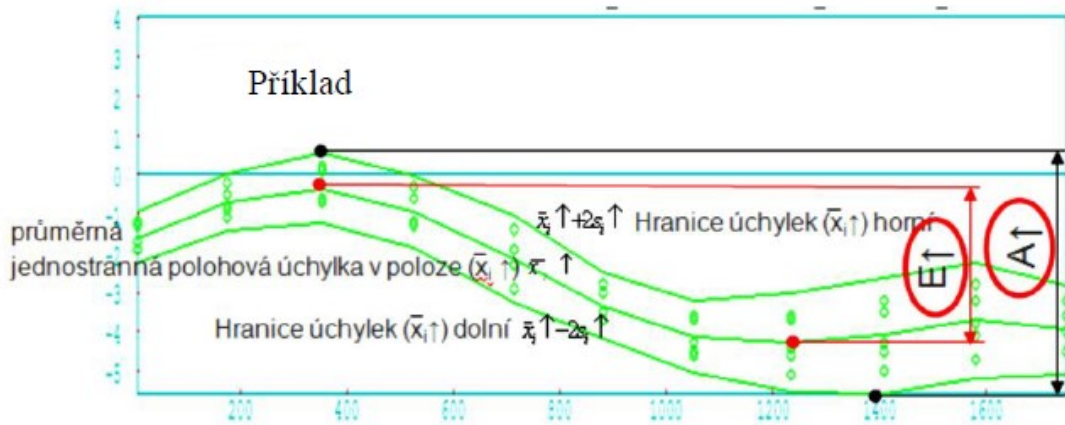
$$E \uparrow = \max[x_i \uparrow] - \min[x_i \uparrow] \quad (23)$$

$$E \downarrow = \max[x_i \downarrow] - \min[x_i \downarrow] \quad (24)$$

**Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose  $A \uparrow$  nebo  $A \downarrow$**  - je rozsahem odvozeným ze spojení jednostranných systematických úchylek a předpokladu standardní nejistoty za podmínky jednostranného nastavení polohy, přičemž je použit koeficient 2.

$$A \uparrow = \max[x_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min[x_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \quad (25)$$

$$A \downarrow = \max[x_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[x_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (26)$$



Obr. 24 Jednostranná systém. poloh.úchylka v ose E↑ a poloha v ose A↑ [12]

**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  $B_i$**  – porovnávají se průměrné jednostranné polohové úchylky, které jsou zjištěny při nájedzu do polohy  $P_i$  v obou směslech.

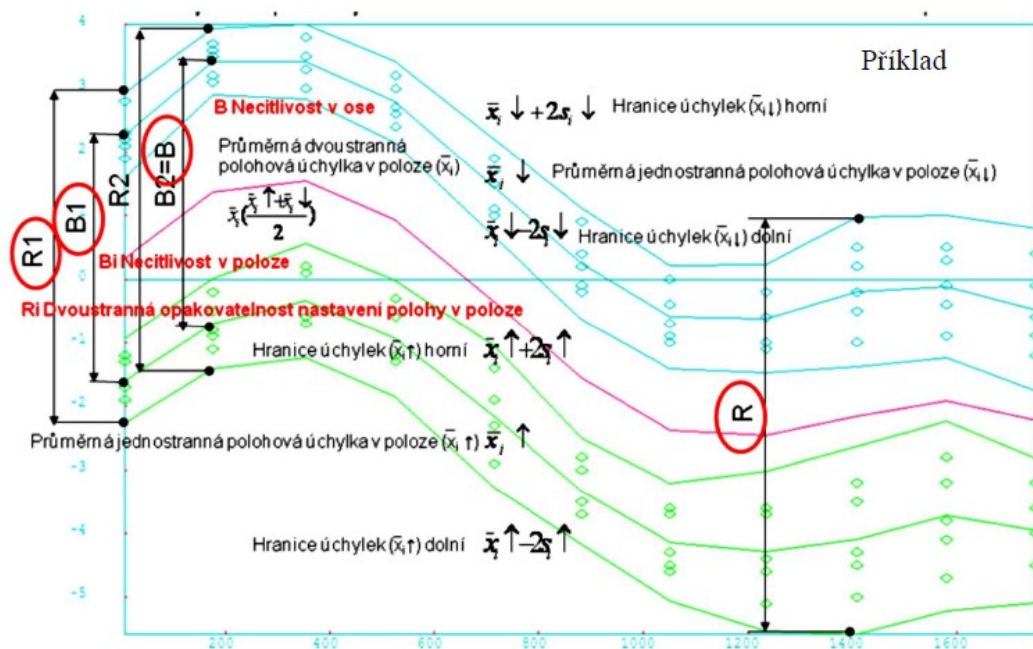
$$B_i = x_i \uparrow - x_i \downarrow \tag{29}$$

**Necitlivost v ose B** – je největší hodnotou z absolutních hodnot necitlivosti  $|B_i|$  ze zadaných poloh v ose.

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

**Průměrná necitlivost v ose  $\bar{B}$**  – označuje aritmetický průměr necitlivosti  $B_i$  ze zadaných poloh v ose.

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



Obr. 25 Necitlivost osa-poloha, hranice opakovatelnosti a úchylek [12]

**Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose M** – porovnává se nejmenší a největší algebraická hodnota průměrných dvoustranných polohových úchylek, které jsou zjišťovány v jakékoliv poloze  $P_i$  ve zvolené ose.

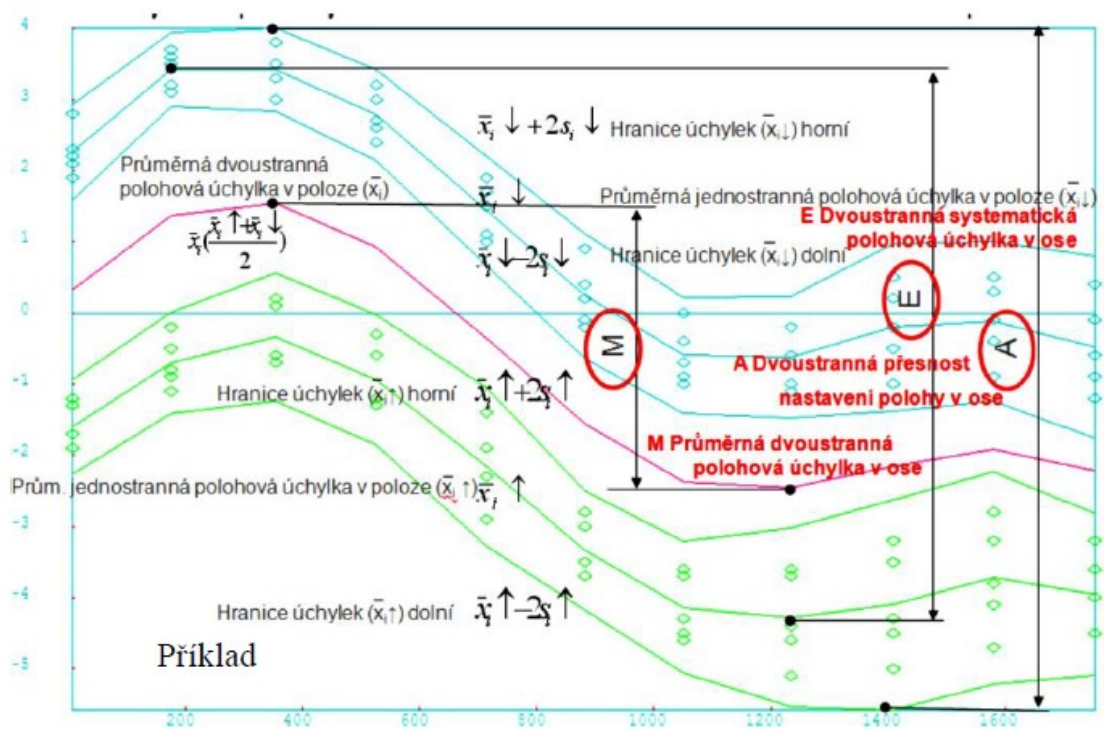
$$M = \max[x_i] - \min[x_i] \quad (32)$$

**Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose E** – porovnává se nejmenší a největší aritmetická hodnota průměrných jednostranných polohových úchylek během nastavení polohy v obou směrech, které jsou zjišťovány v jakékoliv poloze ve zvolené ose.

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

**Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose A** – je rozsahem odvozeným ze spojení dvoustranných systematických úchylek a předpokladu standardní nejistoty během dvoustranného nastavení polohy, pokud použijeme koeficient rozšíření 2.“

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



Obr. 26 Dvostranná poloh. úchylka v ose, systematická polohová úchylka [12]

## 4.2 Chyby během měření

Tyto chyby členíme na:

- Subjektivní
  - Omyly
  - Chyby hrubého charakteru
- Objektivní
  - Systematické – konstantní nebo proměnlivé
  - Náhodné

Chyby při měření a jejich vzorce

	$X$	
Správná hodnota veličiny		
i-tá hodnota veličiny	$X_i$	
Absolutní chyba	$\Delta = x_m - x_p$	(35)
Relativní chyba	$\Delta_r = \frac{x_m - x_p}{x_p} \cdot 100$	(36)
Systematická chyba	$\Delta = \Delta_s + \delta$	(37)
Pravděpodobná hodnota veličiny (n-měření)	$\bar{X} = \sum_n x_i$	(38)
Variance - rozptyl	$\rho^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum(\Delta x_i)^2$	(39)
Střední kvadratická chyba	$\rho = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum(\Delta x_i)^2}$	(40)
Směrodatná odchylka	$\rho_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum(\Delta x_i)^2}$	(41)
Chyba aritmetického průměru (n měření)	$\bar{\rho} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum(\Delta x_i)^2}$	(42)

Dále se mohou vyskytovat chyby, které se stávají při zaokrouhlování, a také je potřeba zmínit chybu náhodnou.

V této práci je nutná identifikace chyb: náhodných, systematických, relativních a absolutních. Tyto chyby se mohou podílet na výsledcích měření.

#### 4.2.1 Absolutní chyba

Pokud porovnáme výsledek měření a konvenčně pravou hodnotu veličiny, může nám vzniknout absolutní chyba. Pravá hodnota bývá v praxi nahrazována konvenčně pravou hodnotou. Ta má k pravé hodnotě nejbliže.

#### 4.2.2 Relativní chyba

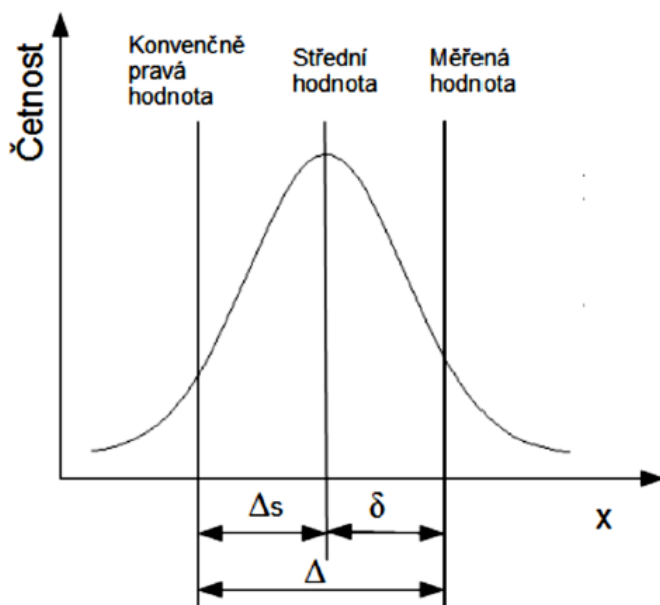
Rovná se absolutní chybě měření, její vyjádření je však v procentech.

#### 4.2.3 Systematická chyba

Tato chyba může vzniknout vlivem poškození přístroje, jeho částí nebo stárnutím měřicího přístroje. Pokud jsme s existencí chyby seznámeni, odečítáme její hodnotu od hodnoty měřené.

#### 4.2.4 Náhodná chyba

Stanovení této chyby vyžaduje více měření. Jde o součet většího počtu menších nepatříčných účinků. Jestliže se však sečtou, ovlivní celkovou hodnotu.



Obr. 27 Chyby při měření [11]

#### 4.2.5 Hrubá chyba

Hrubé chyby vznikají při nedbalých zápisech výsledných hodnot, při nesprávném nastavení měřicích podmínek, poruchou měřicího přístroje. Naměřená hodnota je velmi odlišná od jiných zjištěných hodnot. Ke zjištění, že jde o hrubou chybu, nám slouží statistický výpočet. Z ostatních měření ji vyloučíme, a to z důvodu zkreslení výsledku.

### 4.3 Nejistoty při měření

Pod tímto pojmem chápeme celkové zhodnocení měření, kdy předpokládáme nejistoty v měřícím řetězci. Často nepřesnost ovlivňuje jen jeden článek tohoto řetězce.

Řetězec: etalon, kalibrace, měřicí přístroj, vlivy během měření

Typy nejistot měření

- Nejistota typu A
- Koeficient nejistoty typu A
- Nejistota typu B
- Kombinovaná nejistota

#### 4.3.1 Nejistota typu A

Tuto chybu způsobují menší náhodné vlivy. Její hodnotu zjistíme z více měření konkrétní hodnoty zadané veličiny za stejných podmínek za pomoci statistického zkoumání. Čím více měření provedeme, tím menší bude její hodnota.

#### 4.3.2 Nejistota typu B

Většinou jde o chybu měřidla, která je způsobena jeho typem a rozlišitelností. Také může chybovat metrolog, který nemá dostatečnou kvalifikaci, a také mu mohou chybět potřebné zkušenosti.

#### 4.3.3 Kombinovaná nejistota

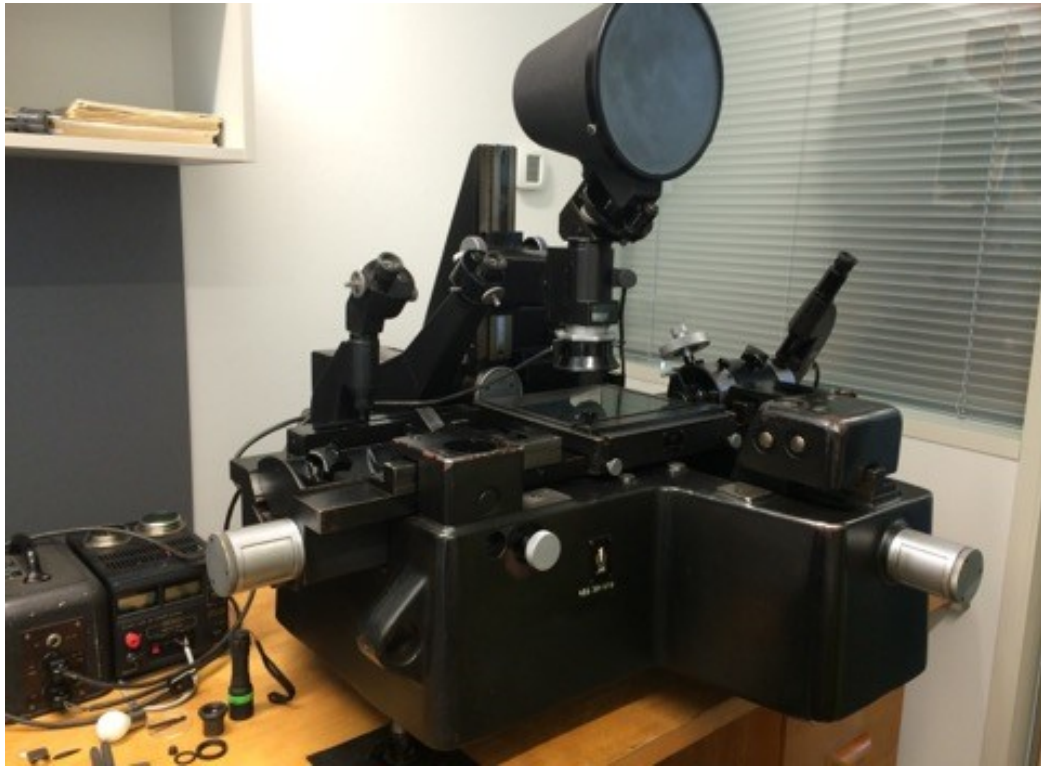
Kombinovanou nejistotu můžeme zjistit, pokud sečteme nejistoty typu A a typu B.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 5 MIKROSKOP

Měření bylo uskutečněno na repasovaném univerzálním dílenském mikroskopu Carl Zeiss Jena, číslo 519/II . Tento přístroj byl zkonstruován asi před 70 lety, je vyroben z litiny, jeho hmotnost je okolo 500 kg a umožňuje měření v ose X a v ose Y. Když ve špatném stavu skončil na šrotišti, byl vykoupen a převezen na univerzitní půdu a repasován. Cílem této bakalářské práce je provedení kalibrace a zjištění, jak přesně bude tento přístroj schopen provádět měření. Informace o přesnosti a chybách měření jsou potřeba pro případného uživatele. Také je nutné navrhnout kalibrační předpis.



Obr. 28 Mikroskop Carl Zeiss Jena

## 5.1 Nastavení dílenského mikroskopu

Nejdůležitějším předpokladem správného měření je dokonalé vyvážení celé soustavy. Pokud toto bude zachováno, nedopustím se hrubé chyby. Soustavu jsem připevnila prostřednictvím stavitelných šroubů do vodorovné polohy. Pro kontrolu přesnosti nastavení slouží vestavěná libela.

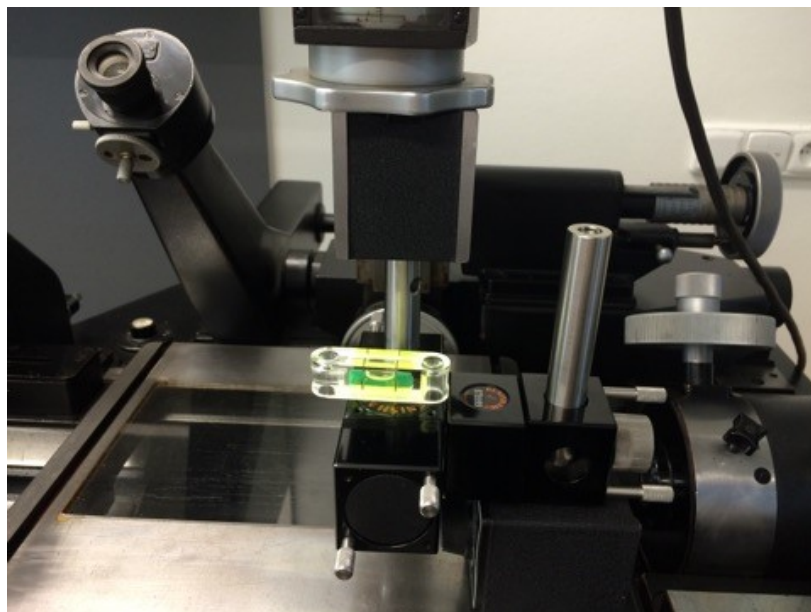


Obr. 29 Stavitelný šroub

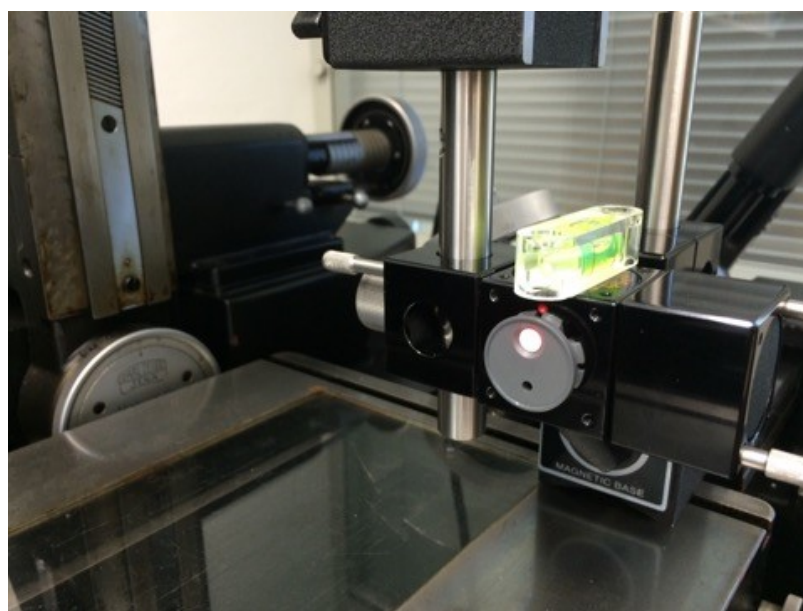


Obr. 30 Vestavěná libela

## 5.2 Ustavení mikroskopu



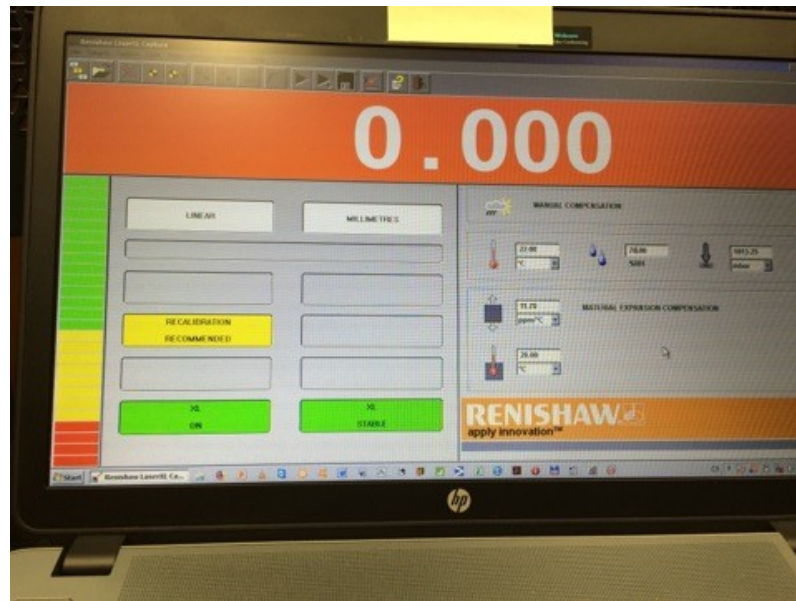
Obr. 31 Ustavování přístroje do roviny



Obr. 32 Ustavení přístroje

### 5.3 Podmínky pro kalibrování

Kalibrace mikroskopu probíhala za stálých podmínek. V laboratoři byla konstantní teplota 20 °C, vlhkost vzduchu v místnosti byla 90% a atmosférický tlak 1012 barů. Aby se teplota v místnosti nezvyšovala, bylo nutné zatemnění oken. Bylo zapotřebí, aby okolní prostředí mělo co možná nejmenší dopad na průběh měření.

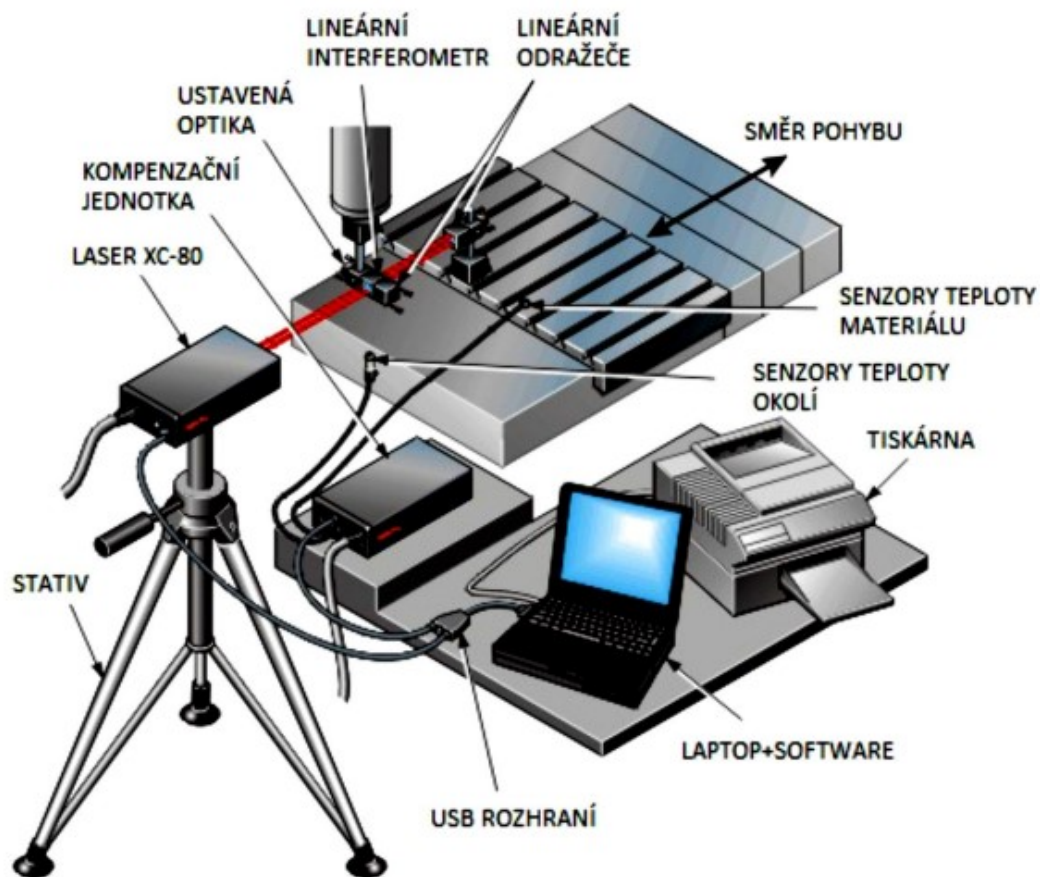


Obr. 33 Program Laser XL Capture

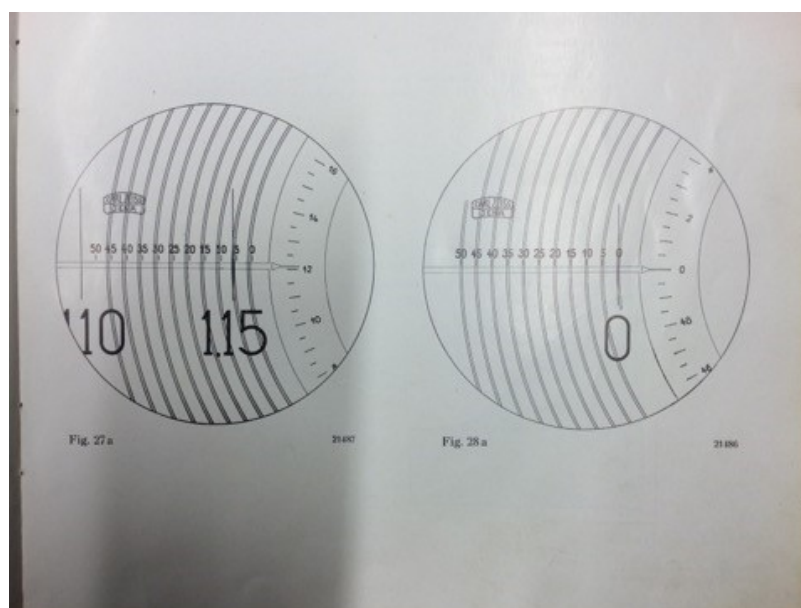
Součástí měřicího pracoviště je mikroskop Carl Zeiss, dále laserový interferometr Renishaw, notebook, v němž byl nainstalován program Laser XL Capture pro zaznamenávání měření.



Obr. 34 Uspořádání pracoviště



Obr. 35 Rozložení komponent při měření



Obr. 36 Výstup z mikrometrické hlavice

## 6 MĚŘENÍ

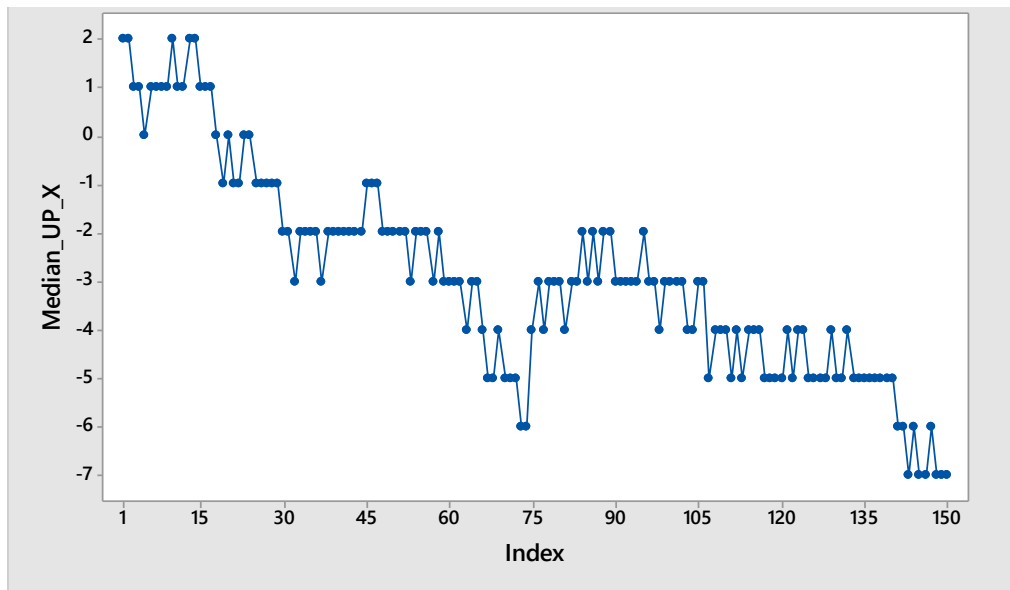
Nejdříve je potřeba změřit hodnoty v ose X, poté hodnoty v ose Y. V obou osách byl zvolen směr „↑“ a směr „↓“. Oba směry byly postupně změřeny a zapsány. U obou os jsou uvedeny naměřené hodnoty 3 cyklů.

### 6.1 Naměřené hodnoty v ose X, ve směru „↑“

Tab. 1 Měření v ose X

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	Poloha_X	x3	x5	x7	Median_UP_X	Mean_UP_X	Min_UP_X	Max_UP_X	S_UP_X	Mean+3S_UP_X	Mean-3S_UP_X	R_UP_X
1	1	2	2	3	2	2,33333	2	3	0,57735	4,06538	0,6013	1
2	2	2	0	2	2	1,33333	0	2	1,15470	4,79743	-2,1308	2
3	3	1	2	1	1	1,33333	1	2	0,57735	3,06538	-0,3987	1
4	4	1	1	2	1	1,33333	1	2	0,57735	3,06538	-0,3987	1
5	5	0	0	1	0	0,33333	0	1	0,57735	2,06538	-1,3987	1
6	6	1	2	1	1	1,33333	1	2	0,57735	3,06538	-0,3987	1
7	7	1	1	1	1	1,00000	1	1	0,00000	1,00000	1,0000	0
8	8	1	2	1	1	1,33333	1	2	0,57735	3,06538	-0,3987	1
9	9	1	1	2	1	1,33333	1	2	0,57735	3,06538	-0,3987	1
10	10	1	2	3	2	2,00000	1	3	1,00000	5,00000	-1,0000	2
11	11	1	1	1	1	1,00000	1	1	0,00000	1,00000	1,0000	0
12	12	1	1	2	1	1,33333	1	2	0,57735	3,06538	-0,3987	1
13	13	1	2	2	2	1,66667	1	2	0,57735	3,39872	-0,0654	1
14	14	1	2	2	2	1,66667	1	2	0,57735	3,39872	-0,0654	1
15	15	1	1	1	1	1,00000	1	1	0,00000	1,00000	1,0000	0
16	16	0	1	1	1	0,66667	0	1	0,57735	2,39872	-1,0654	1
17	17	-1	1	1	1	0,33333	-1	1	1,15470	3,79743	-3,1308	2
18	18	0	0	1	0	0,33333	0	1	0,57735	2,06538	-1,3987	1
19	19	-1	-1	1	-1	-0,33333	-1	1	1,15470	3,13077	-3,7974	2
20	20	0	1	0	0	0,33333	0	1	0,57735	2,06538	-1,3987	1
21	21	-1	0	-1	-1	-0,66667	-1	0	0,57735	1,06538	-2,3987	1
22	22	-1	-1	0	-1	-0,66667	-1	0	0,57735	1,06538	-2,3987	1
23	23	-2	0	0	0	-0,66667	-2	0	1,15470	2,79743	-4,1308	2
24	24	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,0000	0
25	25	-2	0	-1	-1	-1,00000	-2	0	1,00000	2,00000	-4,0000	2
26	26	-1	-1	0	-1	-0,66667	-1	0	0,57735	1,06538	-2,3987	1
27	27	-1	-1	0	-1	-0,66667	-1	0	0,57735	1,06538	-2,3987	1
28	28	-2	-1	-1	-1	-1,33333	-2	-1	0,57735	0,39872	-3,0654	1
29	29	-2	-1	-1	-1	-1,33333	-2	-1	0,57735	0,39872	-3,0654	1
30	30	-2	-2	-2	-2	-2,00000	-2	-2	0,00000	-2,00000	-2,0000	0
31	31	-2	-1	-2	-2	-1,66667	-2	-1	0,57735	0,06538	-3,3987	1
32	32	-3	-2	-3	-3	-2,66667	-3	-2	0,57735	-0,93462	-4,3987	1
33	33	-3	-2	-1	-2	-2,00000	-3	-1	1,00000	1,00000	-5,0000	2

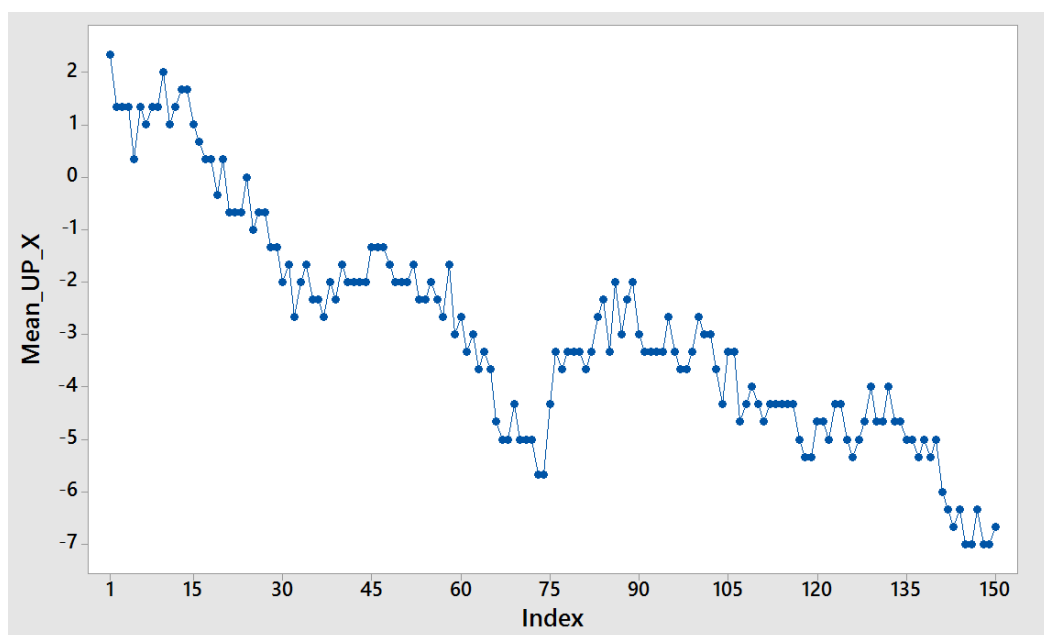
### 6.1.1 Grafické znázornění - medián



Obr. 37 Medián v ose X

V úvodních měřeních je zjištěna vyvážená variabilita, a to blízko hodnoty  $+0,001$  mm. V intervalu od  $<15;30>$  mm je vykazována odchylka  $-0,001$  mm. V intervalu od  $<30;60>$  mm jsou zjištěné odchylky stabilní. Naproti tomu interval od  $<60;75>$  mm má odchylky mnohem větší, hodnoty jsou přibližně  $0,005$  mm. Sestupný průběh, avšak stabilní odchylku, vykazuje interval od  $<75;150>$  mm.

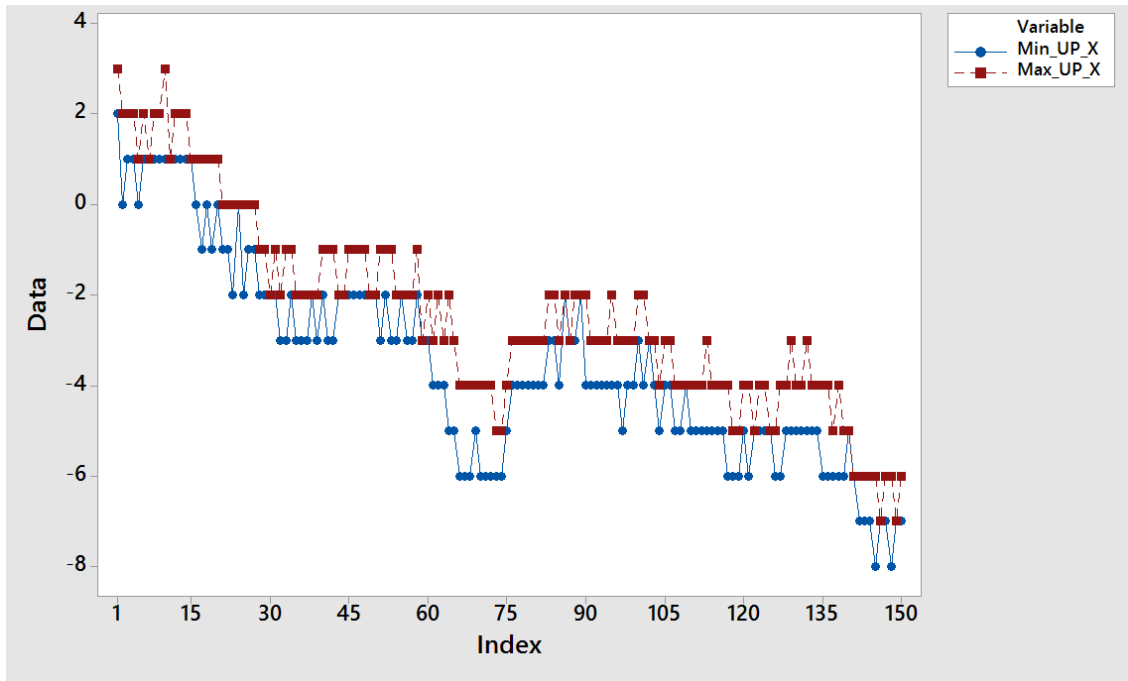
### 6.1.2 Grafické znázornění - průměr



Obr. 38 Průměr v ose X

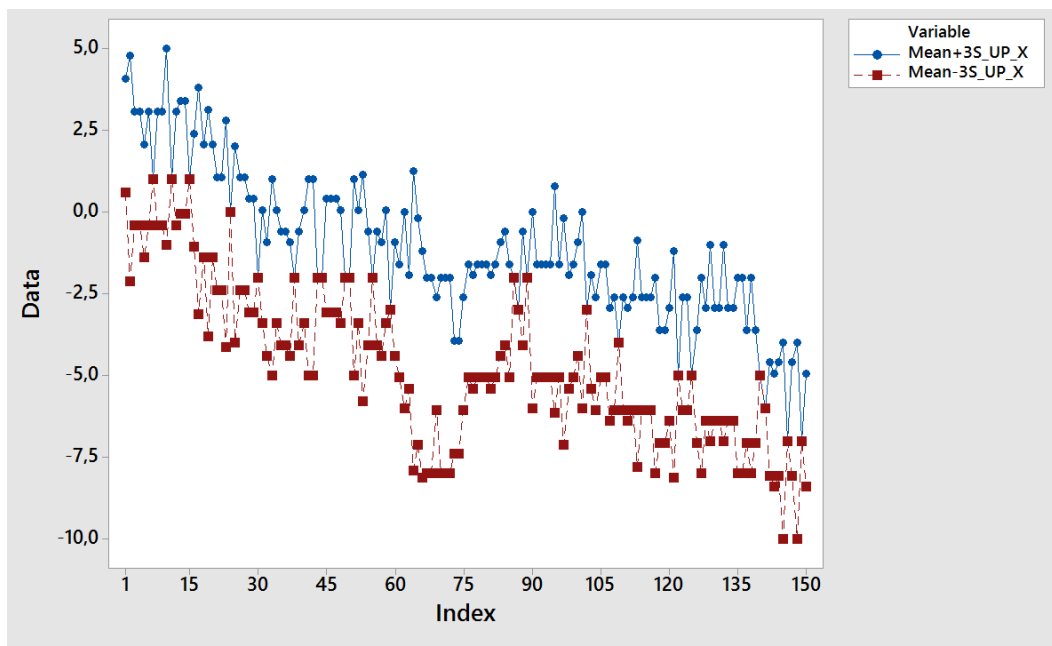
V intervalu od <140;150> mm došlo k odchylce od výchozí hodnoty -0,007 mm. V intervalu hodnot od <65;75> mm jsou zjištěné odchylky -0,006 mm.

### 6.1.3 Grafické znázornění – Min, Max



Obr. 39 Min, Max v ose X

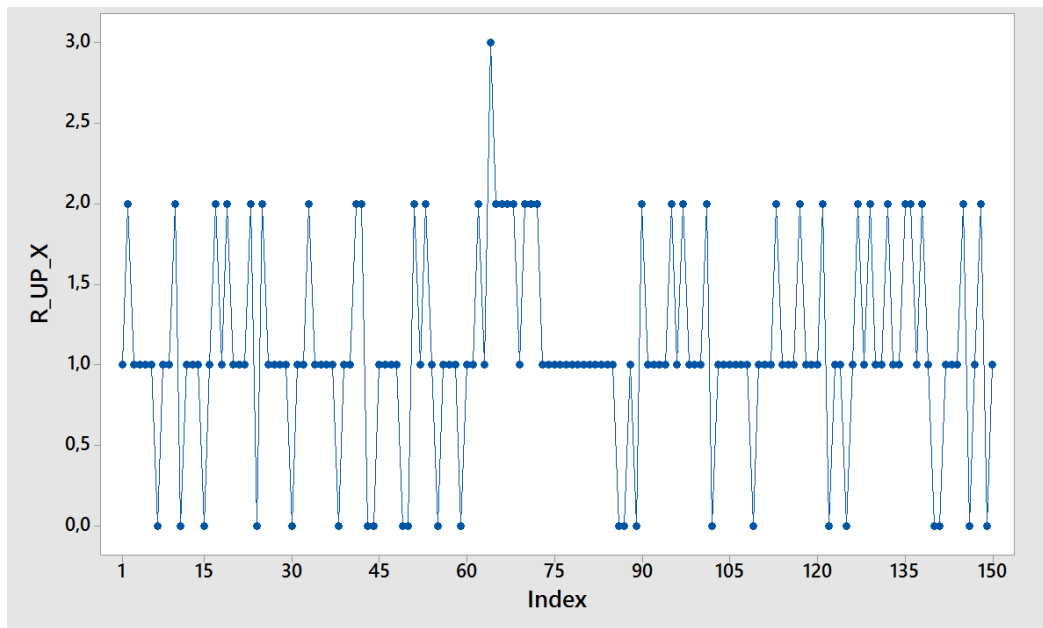
### 6.1.4 Grafické znázornění – průměr $\pm 3s$



Obr. 40 Průměr  $\pm 3s$  v ose x



6.1.5 Grafické znázornění – rozpětí



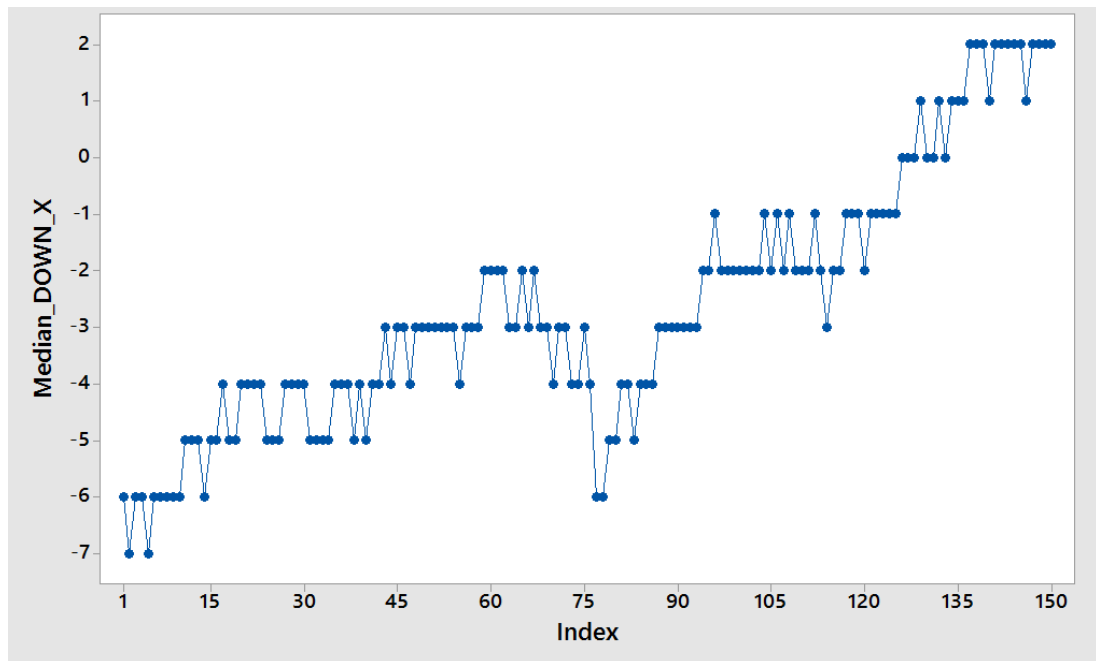
Obr. 41 Rozpětí v ose X

6.2 Naměřené hodnoty v ose X ve směru „↓“

Tab. 2 Měření v ose X

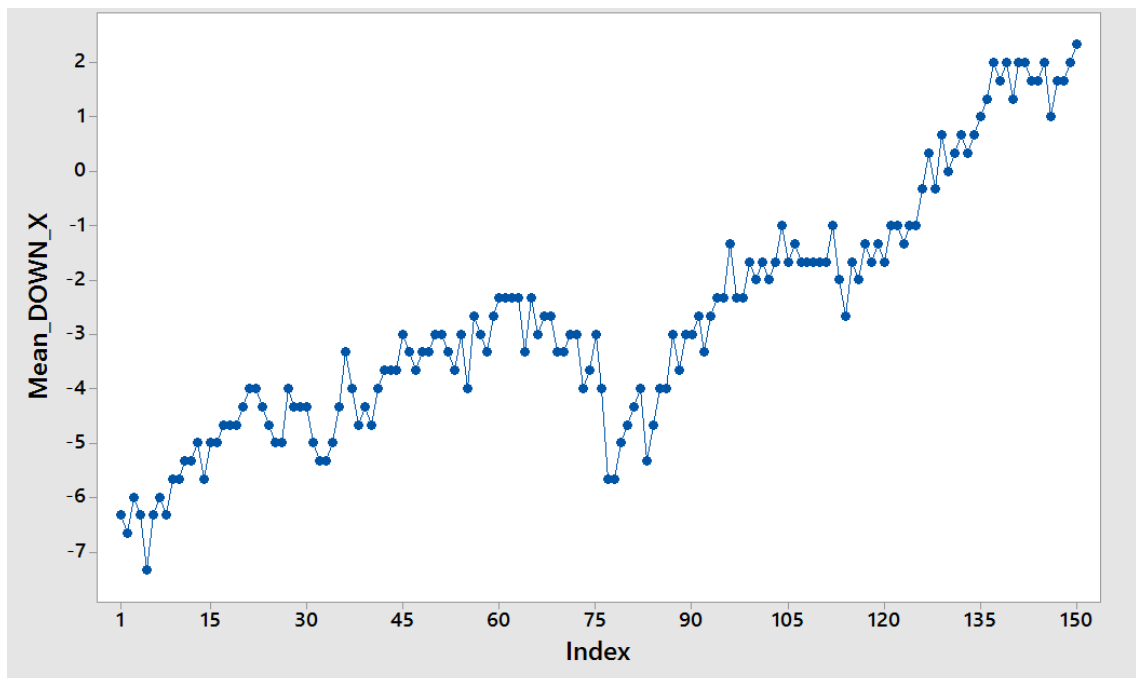
	Poloha_X	x4	x6	x8	Median_DOWN_X	Mean_DOWN_X	Min_DOWN_X	Max_DOWN_X	S_DOWN_X	Mean+3S_DOWN_X	Mean-3S_DOWN_X	R_DOWN_X
1	150	-6	-7	-6	-6	-6,33333	-7	-6	0,57735	-4,60128	-8,06538	1
2	149	-7	-7	-6	-7	-6,66667	-7	-6	0,57735	-4,93462	-8,39872	1
3	148	-6	-6	-6	-6	-6,00000	-6	-6	0,00000	-6,00000	-6,00000	0
4	147	-7	-6	-6	-6	-6,33333	-7	-6	0,57735	-4,60128	-8,06538	1
5	146	-8	-7	-7	-7	-7,33333	-8	-7	0,57735	-5,60128	-9,06538	1
6	145	-7	-6	-6	-6	-6,33333	-7	-6	0,57735	-4,60128	-8,06538	1
7	144	-6	-6	-6	-6	-6,00000	-6	-6	0,00000	-6,00000	-6,00000	0
8	143	-6	-7	-6	-6	-6,33333	-7	-6	0,57735	-4,60128	-8,06538	1
9	142	-6	-5	-6	-6	-5,66667	-6	-5	0,57735	-3,93462	-7,39872	1
10	141	-6	-6	-5	-6	-5,66667	-6	-5	0,57735	-3,93462	-7,39872	1
11	140	-6	-5	-5	-5	-5,33333	-6	-5	0,57735	-3,60128	-7,06538	1
12	139	-5	-6	-5	-5	-5,33333	-6	-5	0,57735	-3,60128	-7,06538	1
13	138	-5	-5	-5	-5	-5,00000	-5	-5	0,00000	-5,00000	-5,00000	0
14	137	-6	-6	-5	-6	-5,66667	-6	-5	0,57735	-3,93462	-7,39872	1
15	136	-6	-5	-4	-5	-5,00000	-6	-4	1,00000	-2,00000	-8,00000	2
16	135	-5	-5	-5	-5	-5,00000	-5	-5	0,00000	-5,00000	-5,00000	0
17	134	-6	-4	-4	-4	-4,66667	-6	-4	1,15470	-1,20257	-8,13077	2
18	133	-5	-5	-4	-5	-4,66667	-5	-4	0,57735	-2,93462	-6,39872	1
19	132	-5	-5	-4	-5	-4,66667	-5	-4	0,57735	-2,93462	-6,39872	1
20	131	-4	-5	-4	-4	-4,33333	-5	-4	0,57735	-2,60128	-6,06538	1
21	130	-4	-4	-4	-4	-4,00000	-4	-4	0,00000	-4,00000	-4,00000	0
22	129	-4	-4	-4	-4	-4,00000	-4	-4	0,00000	-4,00000	-4,00000	0
23	128	-5	-4	-4	-4	-4,33333	-5	-4	0,57735	-2,60128	-6,06538	1
24	127	-5	-5	-4	-5	-4,66667	-5	-4	0,57735	-2,93462	-6,39872	1
25	126	-5	-5	-5	-5	-5,00000	-5	-5	0,00000	-5,00000	-5,00000	0
26	125	-6	-4	-5	-5	-5,00000	-6	-4	1,00000	-2,00000	-8,00000	2
27	124	-4	-5	-3	-4	-4,00000	-5	-3	1,00000	-1,00000	-7,00000	2
28	123	-5	-4	-4	-4	-4,33333	-5	-4	0,57735	-2,60128	-6,06538	1
29	122	-5	-4	-4	-4	-4,33333	-5	-4	0,57735	-2,60128	-6,06538	1
30	121	-5	-4	-4	-4	-4,33333	-5	-4	0,57735	-2,60128	-6,06538	1
31	120	-5	-6	-4	-5	-5,00000	-6	-4	1,00000	-2,00000	-8,00000	2

### 6.2.1 Grafické znázornění – medián



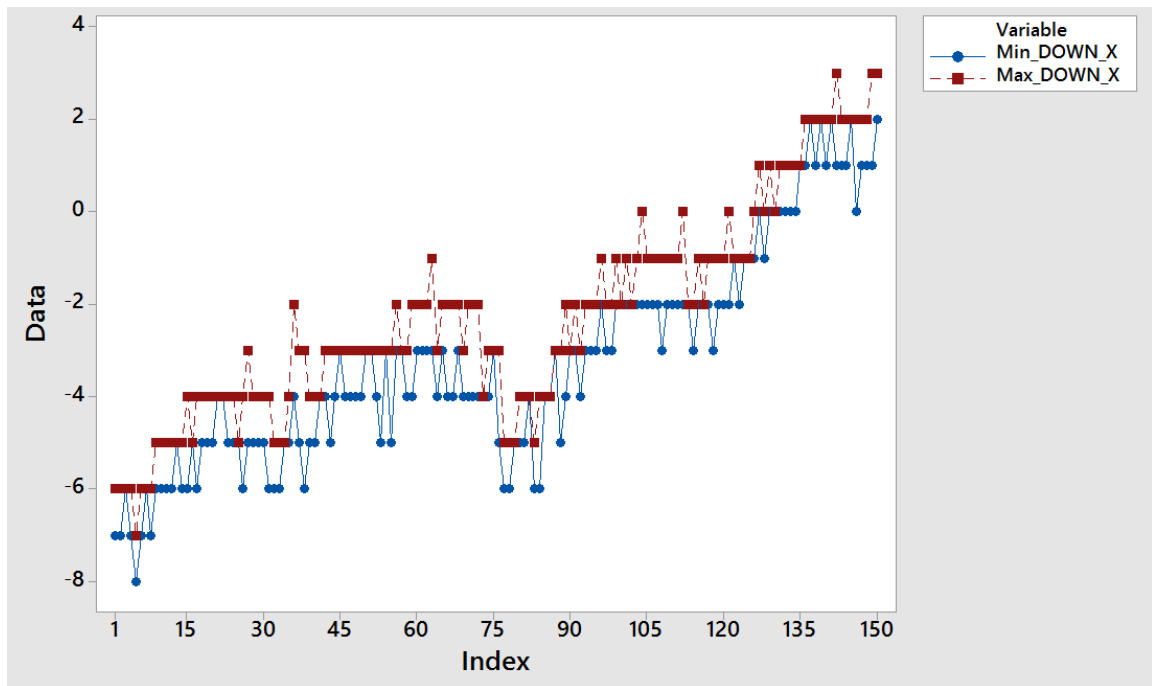
Obr. 42 Medián v ose X

### 6.2.2 Grafické znázornění – průměr



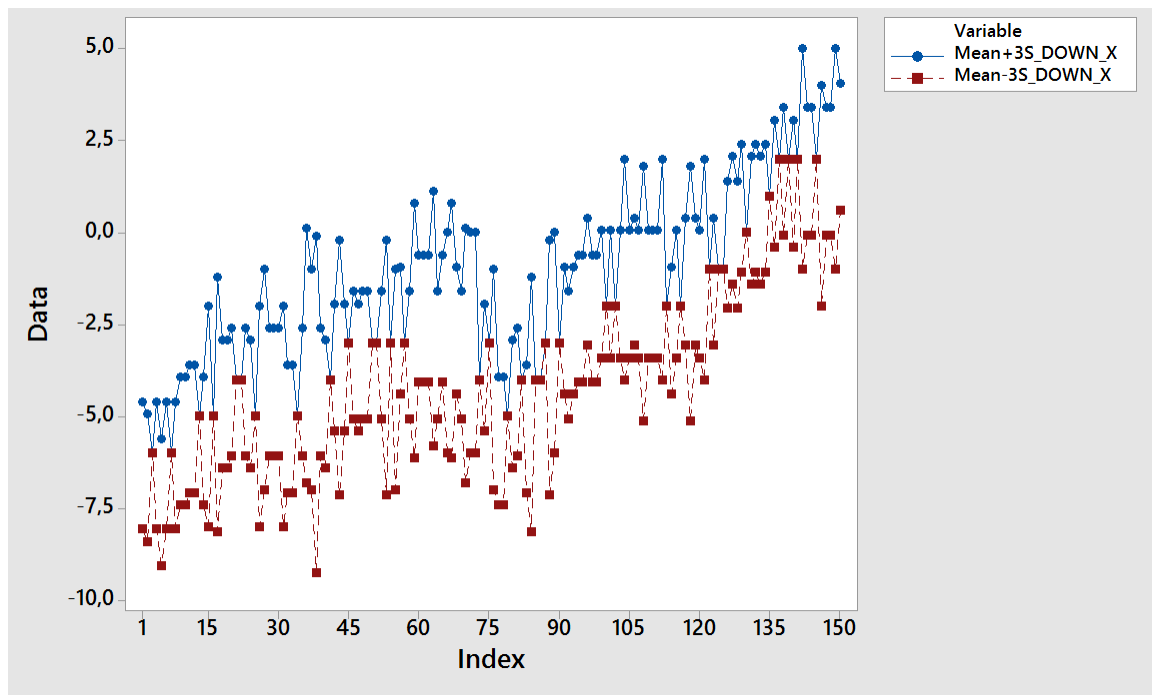
Obr. 43 Průměr v ose X

### 6.2.3 Grafické znázornění – Min, Max



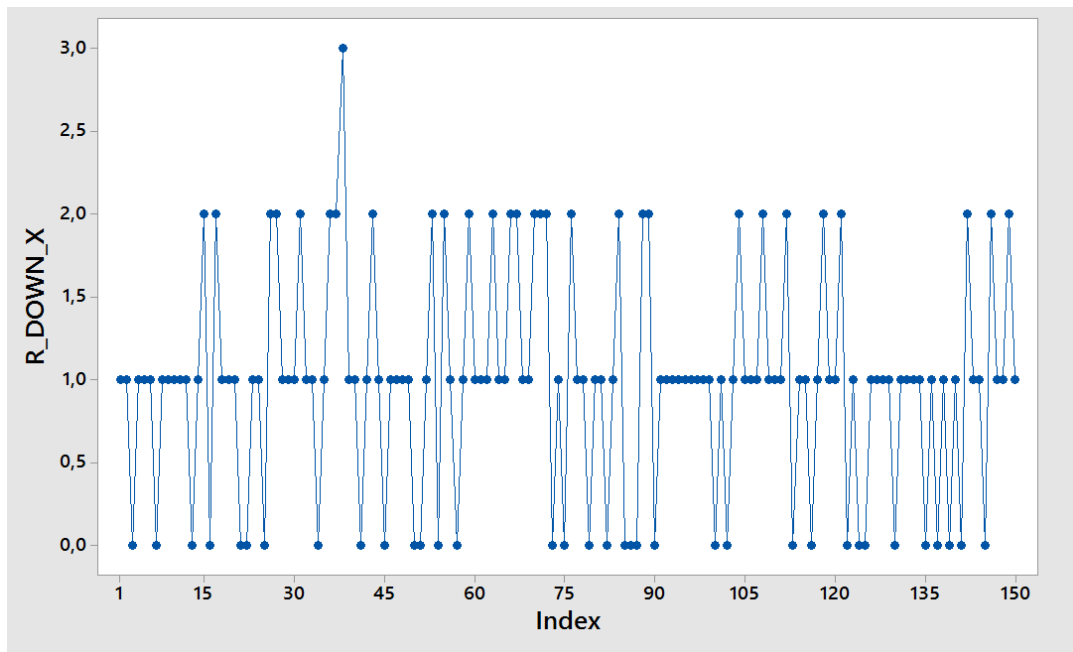
Obr. 44 Min, Max v ose X

### 6.2.4 Grafické znázornění – průměr $\pm 3s$



Obr. 45 Průměr  $\pm 3s$  v ose X

### 6.2.5 Grafické znázornění – rozpětí



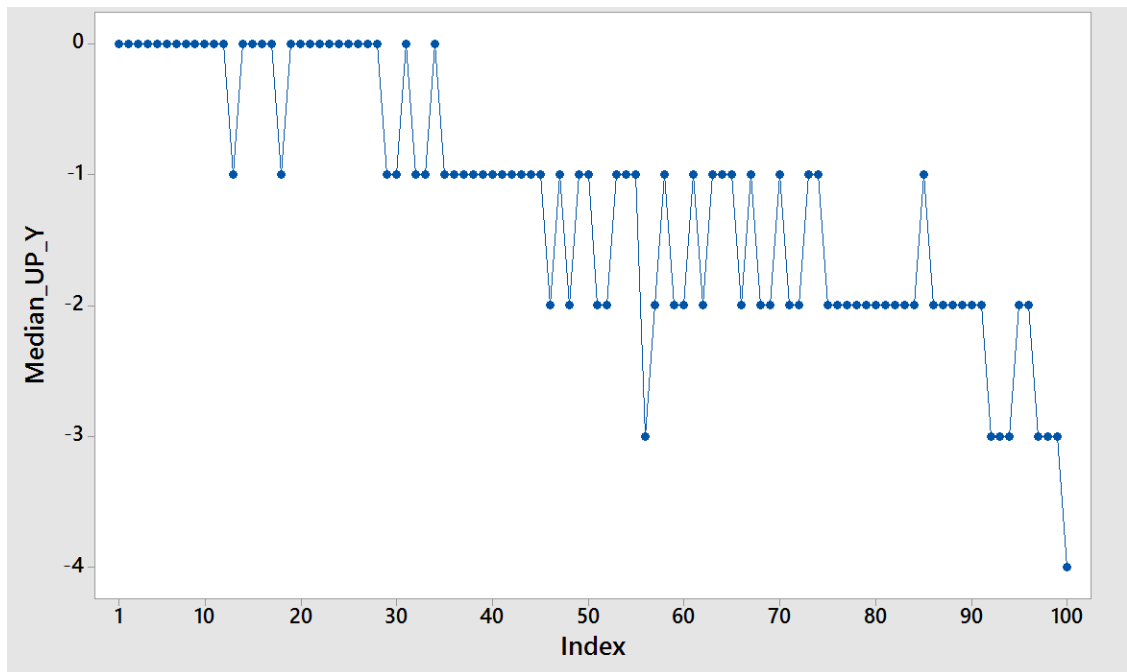
Obr. 46 Rozpětí v ose X

### 6.3 Naměřené hodnoty v ose Y ve směru „↑“

Tab. 3 Měření v ose Y

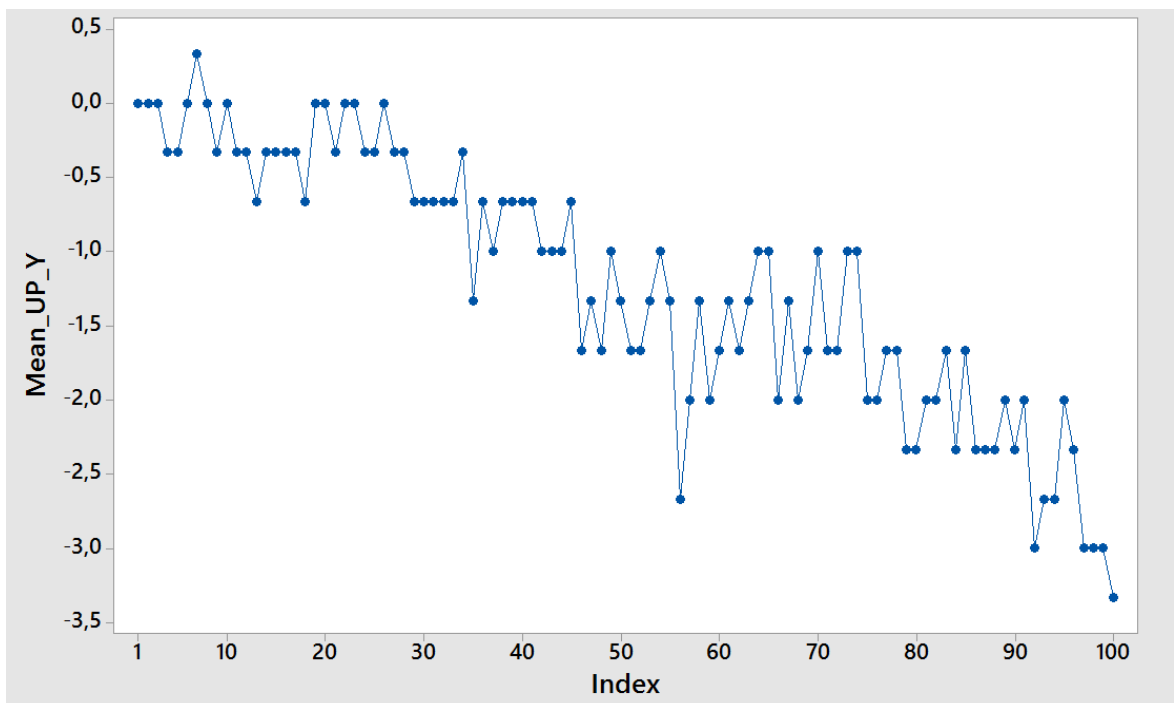
↓	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	y3	y5	y7	Median_UP_Y	Mean_UP_Y	Min_UP_Y	Max_UP_Y	S_UP_Y	Mean+3S_UP_Y	Mean-3S_UP_Y	R_UP_Y
1	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
3	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
4	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
5	0	0	-1	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
6	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
7	1	0	0	0	0,33333	0	1	0,57735	2,06538	-1,39872	1
8	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
9	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
10	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
11	0	-1	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
12	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
13	-1	-1	0	-1	-0,66667	-1	0	0,57735	1,06538	-2,39872	1
14	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
15	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
16	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
17	0	0	-1	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
18	-1	0	-1	-1	-0,66667	-1	0	0,57735	1,06538	-2,39872	1
19	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
20	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
21	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
22	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
23	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
24	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
25	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
26	0	0	0	0	0,00000	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0
27	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
28	-1	0	0	0	-0,33333	-1	0	0,57735	1,39872	-2,06538	1
29	0	-1	-1	-1	-0,66667	-1	0	0,57735	1,06538	-2,39872	1
30	-1	0	-1	-1	-0,66667	-1	0	0,57735	1,06538	-2,39872	1

### 6.3.1 Grafické znázornění – medián



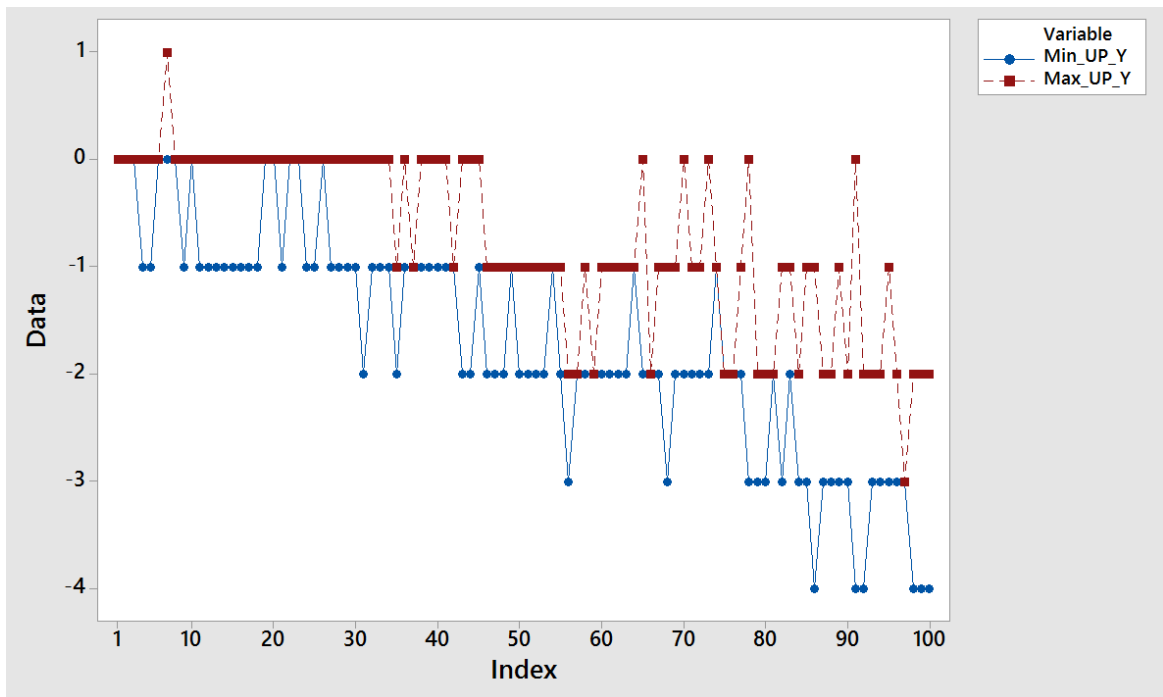
Obr. 47 Medián v ose Y

### 6.3.2 Grafické znázornění – průměr



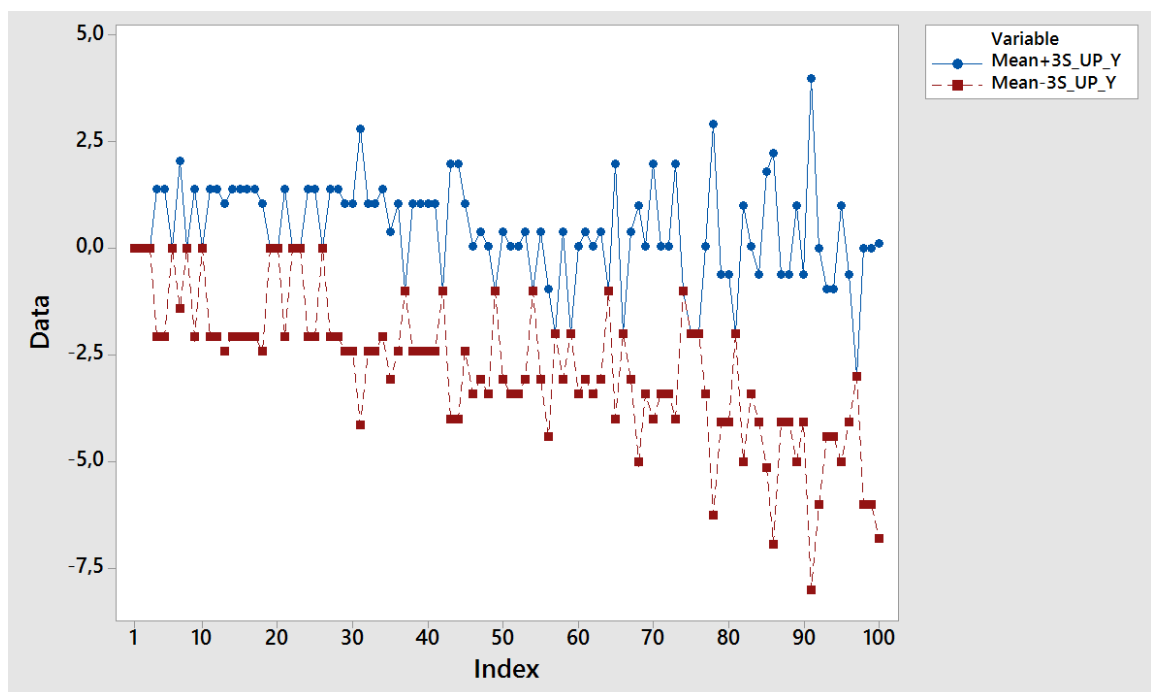
Obr. 48 Průměr v ose Y

### 6.3.3 Grafické znázornění – Min, Max



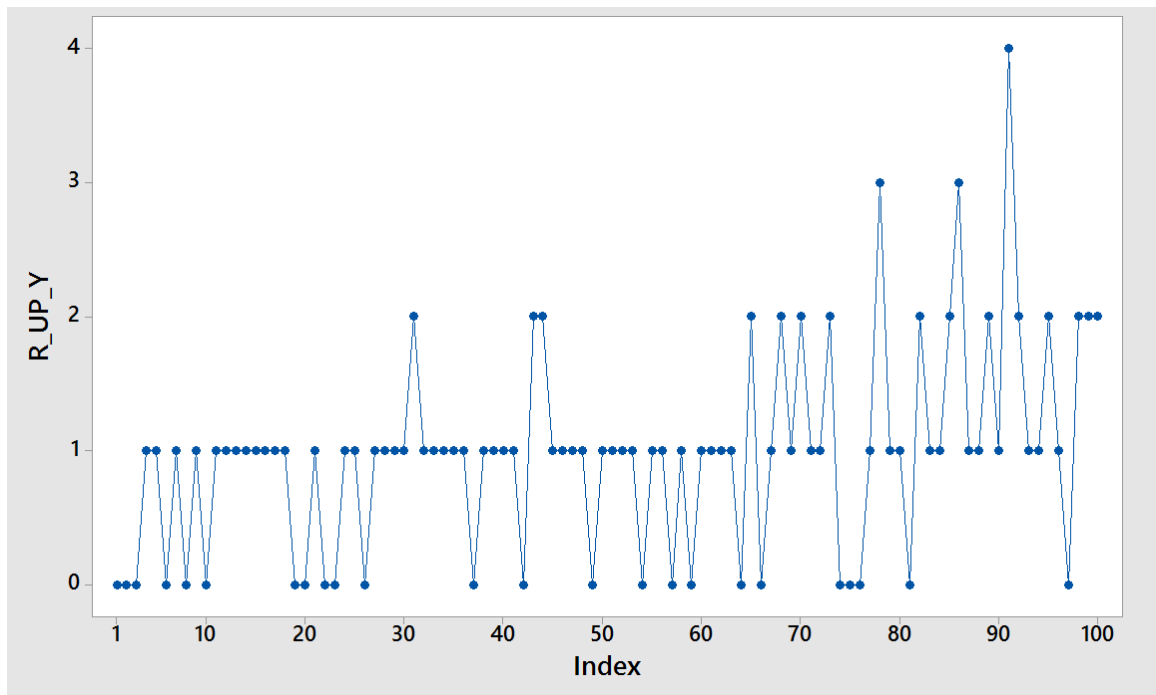
Obr. 49 Min, Max v ose Y

### 6.3.4 Grafické znázornění – průměr ± 3s



Obr. 50 Průměr ± 3s v ose Y

6.3.5 Grafické znázornění – rozpětí



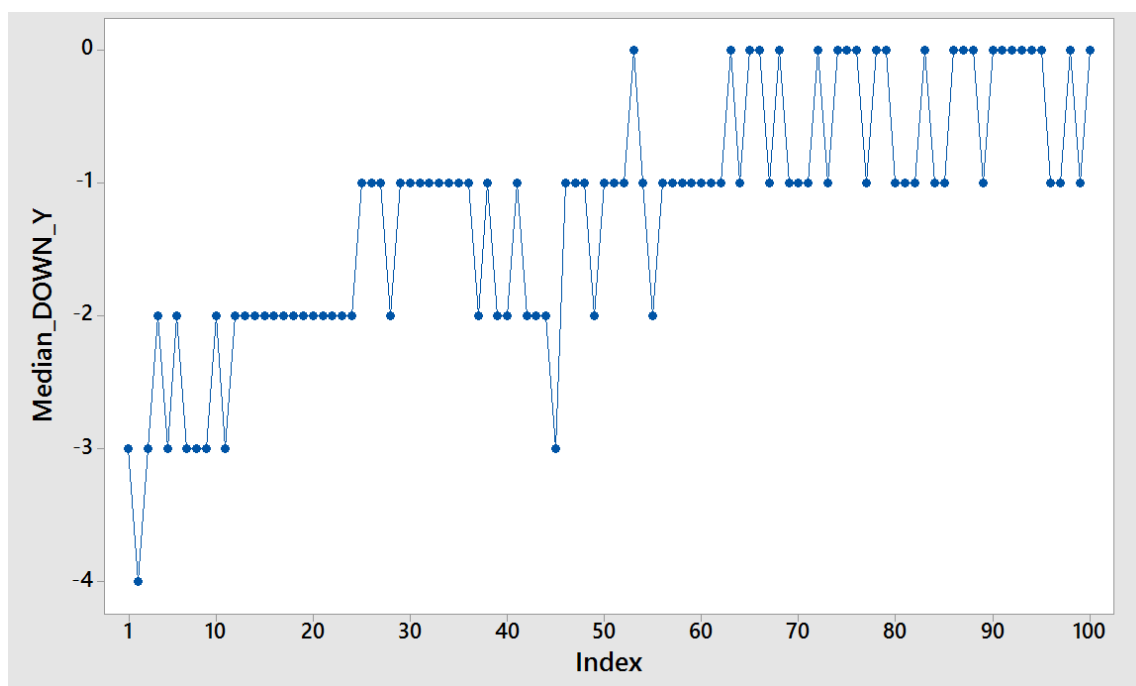
Obr. 51 Rozpětí v ose Y

6.4 Naměřené hodnoty v ose Y ve směru „↓“

Tab. 4 Měření v ose Y

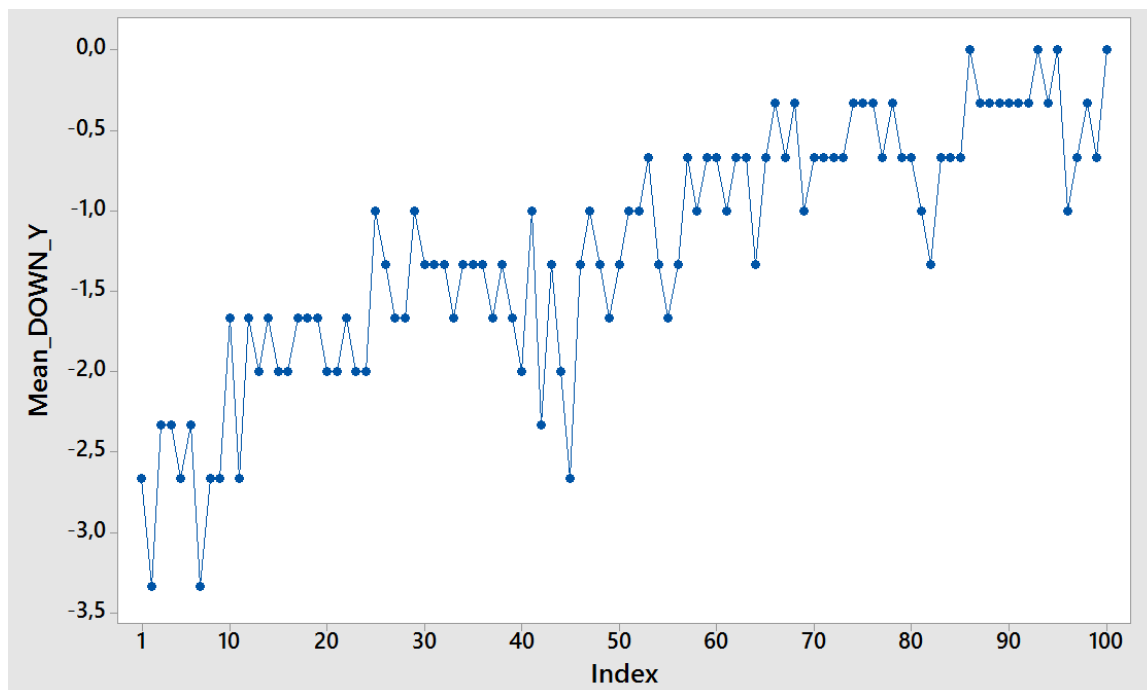
↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	Poloha_Y	y4	y6	y8	Median_DOWN_Y	Mean_DOWN_Y	Min_DOWN_Y	Max_DOWN_Y	S_DOWN_Y	Mean+3S_DOWN_Y	Mean-3S_UP_Y	R_DOWN_Y
1	100	-3	-3	-2	-3	-2,66667	-3	-2	0,57735	-0,93462	-4,39872	1
2	99	-4	-4	-2	-4	-3,33333	-4	-2	1,15470	0,13077	-6,79743	2
3	98	-3	-3	-1	-3	-2,33333	-3	-1	1,15470	1,13077	-5,79743	2
4	97	-3	-2	-2	-2	-2,33333	-3	-2	0,57735	-0,60128	-4,06538	1
5	96	-3	-2	-3	-3	-2,66667	-3	-2	0,57735	-0,93462	-4,39872	1
6	95	-3	-2	-2	-2	-2,33333	-3	-2	0,57735	-0,60128	-4,06538	1
7	94	-3	-4	-3	-3	-3,33333	-4	-3	0,57735	-1,60128	-5,06538	1
8	93	-3	-3	-2	-3	-2,66667	-3	-2	0,57735	-0,93462	-4,39872	1
9	92	-3	-3	-2	-3	-2,66667	-3	-2	0,57735	-0,93462	-4,39872	1
10	91	-2	-2	-1	-2	-1,66667	-2	-1	0,57735	0,06538	-3,39872	1
11	90	-3	-3	-2	-3	-2,66667	-3	-2	0,57735	-0,93462	-4,39872	1
12	89	-2	-2	-1	-2	-1,66667	-2	-1	0,57735	0,06538	-3,39872	1
13	88	-3	-2	-1	-2	-2,00000	-3	-1	1,00000	1,00000	-5,00000	2
14	87	-2	-2	-1	-2	-1,66667	-2	-1	0,57735	0,06538	-3,39872	1
15	86	-2	-2	-2	-2	-2,00000	-2	-2	0,00000	-2,00000	-2,00000	0
16	85	-3	-2	-1	-2	-2,00000	-3	-1	1,00000	1,00000	-5,00000	2
17	84	-2	-2	-1	-2	-1,66667	-2	-1	0,57735	0,06538	-3,39872	1
18	83	-2	-2	-1	-2	-1,66667	-2	-1	0,57735	0,06538	-3,39872	1
19	82	-2	-2	-1	-2	-1,66667	-2	-1	0,57735	0,06538	-3,39872	1
20	81	-3	-2	-1	-2	-2,00000	-3	-1	1,00000	1,00000	-5,00000	2
21	80	-3	-2	-1	-2	-2,00000	-3	-1	1,00000	1,00000	-5,00000	2
22	79	-2	-2	-1	-2	-1,66667	-2	-1	0,57735	0,06538	-3,39872	1
23	78	-3	-2	-1	-2	-2,00000	-3	-1	1,00000	1,00000	-5,00000	2
24	77	-3	-2	-1	-2	-2,00000	-3	-1	1,00000	1,00000	-5,00000	2
25	76	-1	-1	-1	-1	-1,00000	-1	-1	0,00000	-1,00000	-1,00000	0
26	75	-2	-1	-1	-1	-1,33333	-2	-1	0,57735	0,39872	-3,06538	1
27	74	-3	-1	-1	-1	-1,66667	-3	-1	1,15470	1,79743	-5,13077	2
28	73	-2	-1	-2	-2	-1,66667	-2	-1	0,57735	0,06538	-3,39872	1
29	72	-2	0	-1	-1	-1,00000	-2	0	1,00000	2,00000	-4,00000	2
30	71	-2	-1	-1	-1	-1,33333	-2	-1	0,57735	0,39872	-3,06538	1
31	70	-2	-1	-1	-1	-1,33333	-2	-1	0,57735	0,39872	-3,06538	1
32	69	-2	-1	-1	-1	-1,33333	-2	-1	0,57735	0,39872	-3,06538	1
33	68	-3	-1	-1	-1	-1,66667	-3	-1	1,15470	1,79743	-5,13077	2

### 6.4.1 Grafické znázornění – medián



Obr. 52 Medián v ose Y

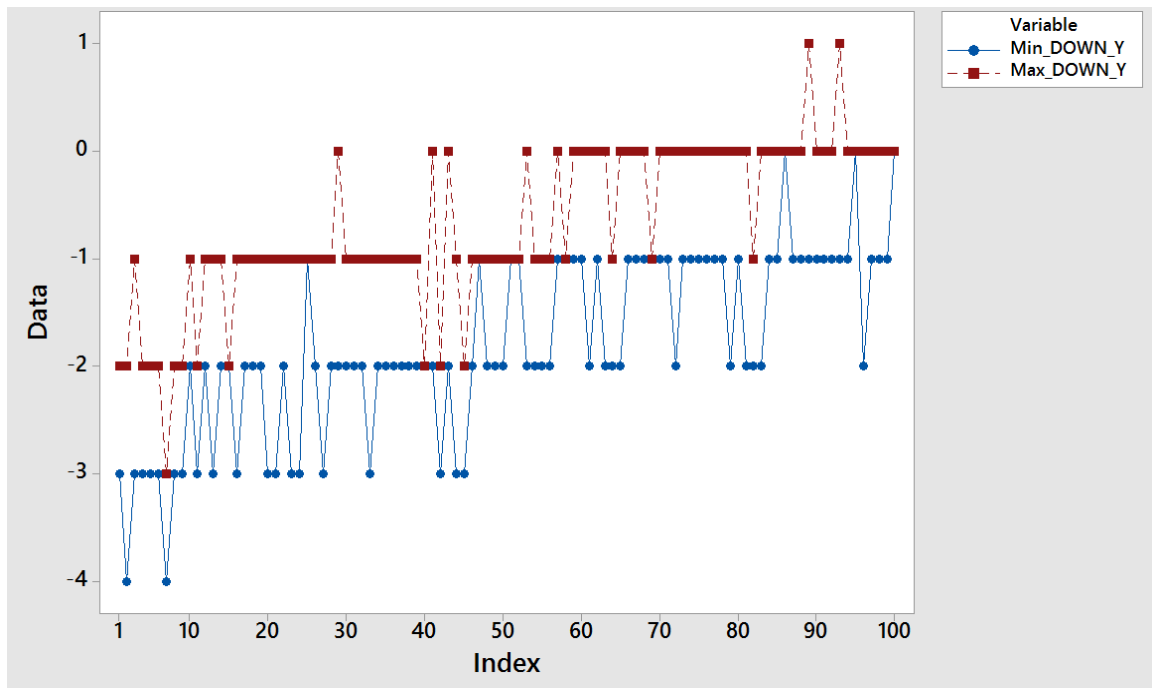
### 6.4.2 Grafické znázornění – průměr



Obr. 53 Průměr v ose Y

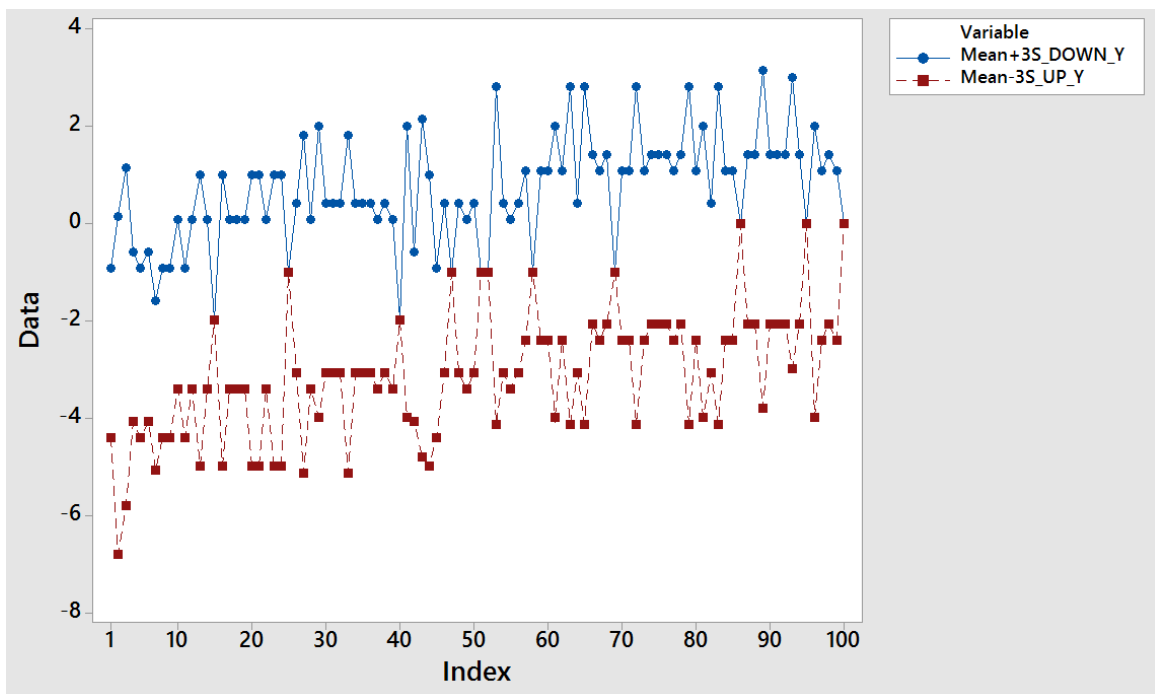


### 6.4.3 Grafické znázornění – Min, Max



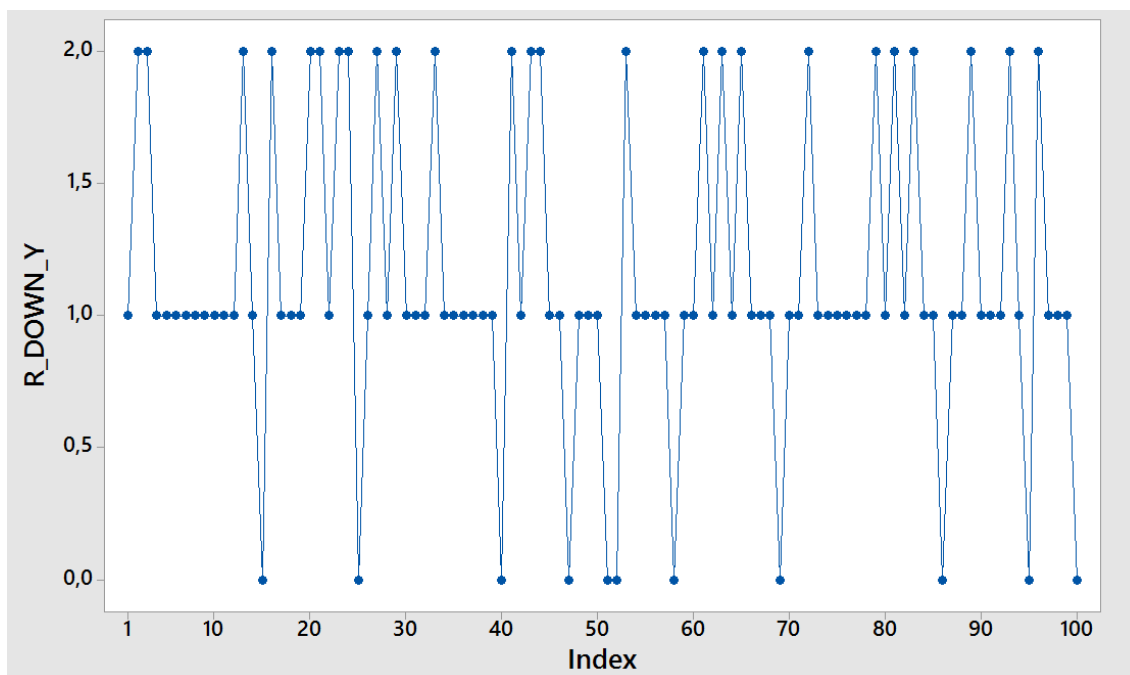
Obr. 54 Min, Max v ose Y

### 6.4.4 Grafické znázornění – průměr $\pm 3s$



Obr. 55 Průměr  $\pm 3s$  v ose Y

## 6.4.5 Grafické znázornění – rozpětí



Obr. 56 Rozpětí v ose Y

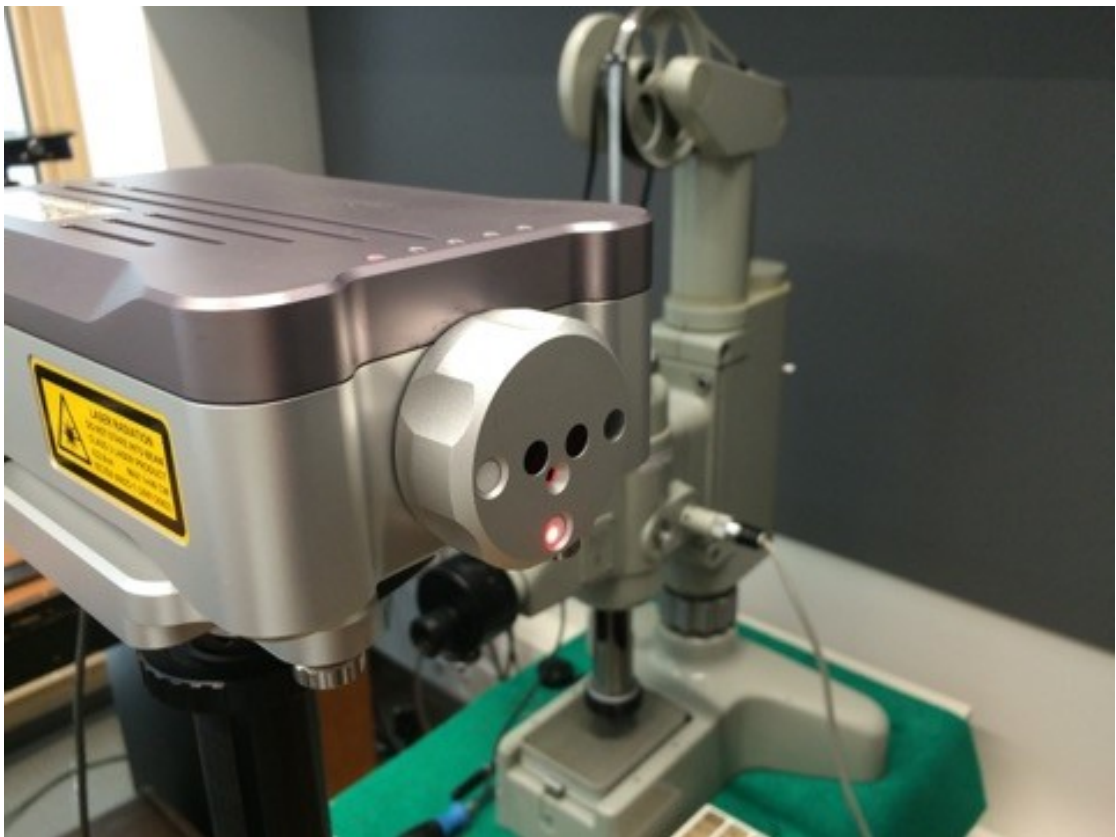
Prvních 15 měření vykazovalo stabilní variabilitu kolem  $+0,001$  mm, v intervalu 17-ti až 30-ti měření se naopak odchylna pohybuje okolo  $-0,001$  mm. Nicméně nárůst odchylny vykazuje interval od 60-tého do 75-tého měření, kde je odchylna již  $0,006$  mm a od 75-tého až 150-tého bodu měření se odchylna již stabilně pohybuje mezi  $0,003$  mm až  $0,007$  mm. Toto zjištění jasně ukazuje na používání především ve střední a koncové části.

Největší rozdíl maximální a minimální hodnoty odchylny vykazuje vzdálenost 64 mm od počátku měření, zde se dá předpokládat původní počátky měření.

## 7 KALIBRAČNÍ POSTUP A KALIBRAČNÍ LIST

### 7.1 Navržení kalibračního postupu

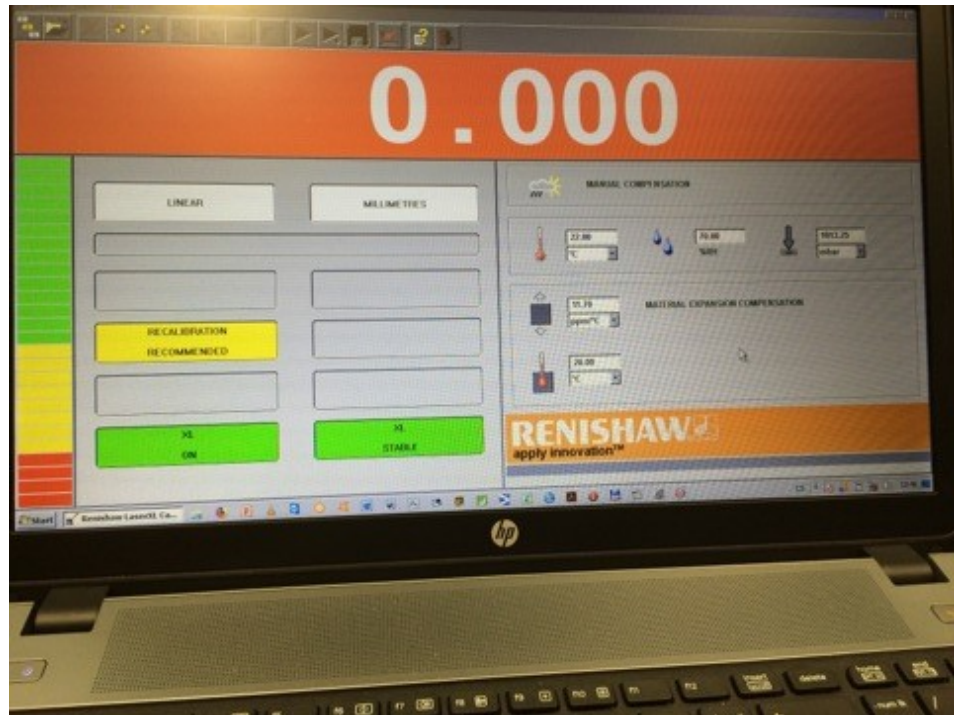
- Laser se ustaví na stativ, nesmí dojít k pohybu stojanu
- Optika a komponenty musí být upnuty
- Na lineární odražeč se nasadí krytka – laserový paprsek se nasměruje do vhodné pozice k odražeči
  - Krytka má bílý terč, na kterém je paprsek jasnější, to usnadňuje namíření paprsku
  - Po namíření paprsku na terč krytku sejmem
- Namíříme paprsek, sejmem krytku a zkontrolujeme správnost nastavení paprsku



Obr. 57 Zacílení paprsku na lineární odražeč

- Ke snímání dat použijeme software Renishaw Laser XL Capture. Komunikace s laserem probíhá prostřednictvím USB

- Lineární odrazeč musí být před začátkem snímání co nejméně vzdálený od interferometru, hodnotu měření na notebooku nastavíme na nulu. Vyhneme se tímto chybě „mrtvé dráhy“



Obr. 58 Vynulování displeje

- Zkontrolujeme, je-li software nastaven správně a snímáme potřebný počet cyklů

## 8 NÁVRH VHODNÉHO KALIBRAČNÍHO LISTU

### KALIBRAČNÍ LABORATOŘ

Firma ABC a. s. Náměstí Míru 1234, 760 01 Zlín

## KALIBRAČNÍ LIST

# 10/2018

Datum vystavení: 5. května 2018

Zákazník: Univerzita Tomáše Bati Zlín

Nám. T. G. Masaryka 5555

760 01 Zlín

Měřidlo: dílenský mikroskop Carl Zeiss Jena

Výrobce: Carl Zeiss Microscopy

Výrobní číslo: Fe 519/II

Materiál: litina

Evidenční číslo: 11261

Rozsah měření: 25 mm

Přesnost: třída 1

Druh etalonu: Laserinterferometr Renishaw

Podmínky měření: 20 °C

Použitá metoda: dle kalibračního postupu

Výsledky kalibrace byly obdrženy za podmínek a za použití postupů, popsanych v tomto kalibračním listě a jsou vztaženy jen k datu a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace: 21. 4. 2018

Kalibraci provedla: Jana Pilarská

Kontrolu provedla: Ing. Milena Kubišová

## 9 ZÁVĚR

Ve své bakalářské práci jsem kalibrovala dílenský mikroskop Carl Zeiss pomocí laserové interferometrie.

V teoretické části jsem popisovala metody měření, zkoušek strojů a vyhodnocování přesnosti pomocí norem ČSN ISO 230-1 a ČSN ISO 230-2. Tyto normy specifikují postup kalibrace, specifikaci metod zkoušek, vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy jednotlivých os. Zároveň jsou v teoretické části uvedeny chyby měření, kterých se musíme při měření vyvarovat.

Praktickou část jsem věnovala ustavení laserinterferometru a způsobu nastavení měření.

Měření bylo uskutečněno na repasovaném univerzálním dílenském mikroskopu Carl Zeiss Jena, číslo 519/II . Tento přístroj byl zkonstruován asi před 70 lety, je vyroben z litiny, jeho hmotnost je okolo 500 kg a umožňuje měření v ose X a v ose Y. Cílem této bakalářské práce bylo provedení kalibrace a zjištění jak přesně bude tento přístroj schopen provádět měření. Informace o přesnosti a chybách měření je potřeba pro případného uživatele.

Kalibraci dílenského mikroskopu Carl Zeiss jsem učinila v ose X i Y. Dále jsem zpracovala kalibrační postup s kalibračním protokolem pro tento mikroskop.

Prvních 15 měření vykazovalo stabilní variabilitu okolo +0,001 mm, v intervalu 17-ti až 30-ti se naopak odchylka pohybuje okolo -0,001 mm. Nicméně nárůst odchylky vykazuje interval od 60-tého do 75-tého měření, kde je odchylka již 0,006 mm a od 75-tého do 150-tého bodu měření se odchylka již stabilně pohybuje mezi 0,003 mm až 0,007 mm. Toto zjištění jasně ukazuje na používání především ve střední a koncové části.

Největší rozdíl maximální a minimální hodnoty odchylky vykazuje vzdálenost 64 mm od počátku měření, zde se dá předpokládat původní počátky měření.

Závěrem lze konstatovat, že i přes značné stáří, je tento mikroskop ve velmi dobrém stavu a jeho schopnost kontroly je poměrně kvalitní. Lze doporučit používání především první části, kde je odchylka pouze  $\pm 0,001$  mm.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] ANDĚL, Jiří. Základy matematické statistiky. Praha: Matfyzpress, 2005.  
ISBN 80-86732-40-1.
- [2] ANTOCH, Jaromír, VORLÍČKOVÁ, Dana. Vybrané metody statistické analýzy dat.  
Praha: Academia, 1992. ISBN 80-200-0204-9.
- [3] MELOUN, Milan a MILITKÝ, Jiří. Statistická analýza experimentálních dat.  
Vyd. 2., upr. a rozš. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1254-0.
- [4] MELOUN, Milan, MILITKÝ, Jiří a HILL, Martin. Počítačová analýza vícerozměrných  
dat v příkladech. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1335-0.
- [5] MELOUN, Milan a MILITKÝ, Jiří. Kompendium statistického zpracování dat: metody  
a řešené úlohy. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: Academia, 2006. ISBN 8020013962.
- [6] Technické meranie: Učebné texty z projektu Metromedia [online]. [Cit. 2017-11-17].
- [7] Redefining the Kilogram, The Present: Artifacts and Uncertainty [online].  
[Cit.2018-11-17]. Dostupné z <https://www.nist.gov/physical-measurement-laboratory/present>
- [8] Lasery, laserové technologie a stroje s laserem [online]. [Cit. 2017-11-11]. Dostupné z:  
<http://firmy.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>
- [9] ŠRŮT, Petr. Využití laserů ve strojírenství, interferometr renishaw. Brno, 2013.  
Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jana Doňarová,  
Ph.D.
- [10] Metrologie geometrických veličin [online]. [Cit. 2017-11-15]. Dostupné z:  
<http://slideplayer.cz/slide/2939366/release/woothee>
- [11] KUBIŠOVÁ, Milena. Návrh kalibrace a renovace dílenského mikroskopu využitím  
laseinterferometru. Zlín, 2014. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.  
Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Vladimír Pata.
- [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.

- [13] Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie: Učební texty k semináři [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-11-17]. Dostupné z:  
[http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_06\\_1110.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf)
- [14] ČSN ISO 230-1: Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění. 1998. Brno: Český normalizační institut, 1998.
- [15] ČSN ISO 230-2: Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. 2010. Brno: Český normalizační institut, 2010.
- [16] Historie mikroskopů. 2008 [online]. [Cit. 2017-11-17].  
Dostupné z: <http://www.levne-mikroskopy.cz/historie-mikroskopu>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[mm]	Oboustranná přesnost nastavení polohy osy
$A_{\uparrow}, A_{\downarrow}$	[mm]	Jednostranná přesnost nastavení polohy osy
$\bar{B}$	[mm]	Necitlivost v ose
$B_i$		Necitlivost v poloze
E	[mm]	Oboustranná systematická polohová úchylka osy
$E_{\downarrow}; E_{\uparrow}$	[mm]	Jednostranná systematická polohová úchylka osy
f	[Hz]	Frekvence
k		Koeficient rovnoměrného rozdělení
kt		Rozšiřující koeficient
M	[mm]	Průměrná oboustranná polohová úchylka osy
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]	Oboustranná opakovatelnost nastavení polohy osy
$R_i$	[mm]	Oboustranná opakovatelnost nastavení polohy osy
$R_{i\uparrow}; R_{i\downarrow}$	[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 u měřidla
$u_{B2}$	[mm]	Standardní nejistota typu B – chyba metrologa
$u_C$	[mm]	Kombinovaná standardní nejistota

---

$\bar{x}_i$	[mm]	Průměrná oboustranná 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
$\delta$	[mm]	Náhodná chyba
$\Delta$	[mm]	Absolutní chyba měření
$\Delta_r$	[%]	Relativní chyba měření
$\Delta_s$	[mm]	Systematická chyba
$\lambda$	[mm]	Vlnová délka paprsku ve vzduchu
$\lambda_0$	[mm]	Vlnová délka paprsku ve vakuu

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Mikroskop Carl Zeiss .....	10
Obr. 2 Etalon metru [7].....	12
Obr. 3 Dosažitelná výrobní přesnost [11].....	14
Obr. 4 Pevnolátkový Nd: YAG laser [8] .....	16
Obr. 5 Znázornění mechanického vlnění [11] .....	17
Obr. 6 Dvousvazková interference a) konstruktivní b) destruktivní [19].....	18
Obr. 7 Michalsonův interferometr [9].....	20
Obr. 8 Machův-Zehnderův interferometr [9].....	21
Obr. 9 Fabryův-Perotův interferometr [9] .....	21
Obr. 10 Interference [9] .....	22
Obr. 11 Laserový interferometr - schéma [10] .....	23
Obr. 12 Chyba vzniklá „mrtvou dráhou“ [11] .....	25
Obr. 13 Chyba Abbého [12] .....	26
Obr. 14 Stacionární lineární dělič s kinematickým odražečem [11].....	27
Obr. 15 Kinematický lineární dělič se stacionárním lineárním odražečem [11] .....	27
Obr. 16 Trojchodý undirekcionální cyklus lineární [11] .....	28
Obr. 17 Dvouchodý bidirekcionální cyklus lineární [11].....	28
Obr. 18 Trojchodý undirekcionální cyklus pendulární [11] .....	29
Obr. 19 Dvouchodý bidirekcionální cyklus pendulární [11] .....	29
Obr. 20 Dvouchodý bidirekcionální cyklus lineární [12] .....	30
Obr. 21 Průměrné polohové úchyly - diagram [12].....	31
Obr. 22 Hranice úchylek - diagram [12].....	32
Obr. 23 Jednostranná opakovatelnost nastavení v ose - diagram [12].....	33
Obr. 24 Jednostranná systém. poloh.úchylka v ose $E\uparrow$ a poloha v ose $A\uparrow$ [12].....	34
Obr. 25 Necitlivost osa-poloha, hranice opakovatelnosti a úchylek [12].....	35
Obr. 26 Dvoustranná poloh. úchylka v ose, systematická polohová úchylka [12].....	36
Obr. 27 Chyby při měření [11] .....	38
Obr. 28 Mikroskop Carl Zeiss Jena .....	41
Obr. 29 Stavitelný šroub .....	42
Obr. 30 Vestavěná libela.....	42
Obr. 31 Ustavování přístroje do roviny .....	43
Obr. 32 Ustavení přístroje.....	43

Obr. 33 Program Laser XL Capture.....	44
Obr. 34 Uspořádání pracoviště .....	44
Obr. 35 Rozložení komponent při měření .....	45
Obr. 36 Výstup z mikrometrické hlavice.....	45
Obr. 37 Medián v ose X.....	47
Obr. 38 Průměr v ose X .....	47
Obr. 39 Min, Max v ose X.....	48
Obr. 40 Průměr $\pm 3s$ v ose x .....	48
Obr. 41 Rozpětí v ose X.....	49
Obr. 42 Medián v ose X.....	50
Obr. 43 Průměr v ose X .....	50
Obr. 44 Min, Max v ose X.....	51
Obr. 45 Průměr $\pm 3s$ v ose X .....	51
Obr. 46 Rozpětí v ose X.....	52
Obr. 47 Medián v ose Y .....	53
Obr. 48 Průměr v ose Y .....	53
Obr. 49 Min, Max v ose Y .....	54
Obr. 50 Průměr $\pm 3s$ v ose Y .....	54
Obr. 51 Rozpětí v ose Y.....	55
Obr. 52 Medián v ose Y .....	56
Obr. 53 Průměr v ose Y .....	56
Obr. 54 Min, Max v ose Y .....	57
Obr. 55 Průměr $\pm 3s$ v ose Y .....	57
Obr. 56 Rozpětí v ose Y.....	58
Obr. 57 Zacílení paprsku na lineární odražeč .....	59
Obr. 58 Vynulování displeje .....	60

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Měření v ose X .....	46
Tab. 2 Měření v ose X .....	49
Tab. 3 Měření v ose Y .....	52
Tab. 4 Měření v ose Y .....	55