

# Kalibrace horizontálního délkoměru Carl Zeiss Jena

Bc. Antonín Beníček

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Antonín Beníček**

Osobní číslo: **T13641**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Řízení jakosti**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Kalibrace horizontálního délkoměru Carl Zeiss Jena**

Zásady pro vypracování:

1. Uvedení přístroje do provozu.
2. Provedení podélné kalibrace včetně horizontálního délkoměru Carl Zeiss Jena.
3. Návrh vlastního kalibračního postupu pro kompletní kalibraci s využitím laserového interferometru RENISHAW XL-80.
4. Prověření možnosti modernizace horizontálního délkoměru Carl Zeiss Jena s využitím moderních elektronických prvků.
5. Závěr včetně doporučení.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. CHUDÝ, V.; PALENČÁR, R.; KUREKOVÁ, E.; HALAJ, M. Meranie technických veličín. Bratislava 1999.
2. BEDÁŇOVÁ, I. a VEČEREK, V. Základy statistiky. Brno 2007.
3. ČSN ISO 230. Zásady zkoušek obráběcích strojů. Brno 2010.
4. ČECH, J.; PERNÍKÁŘ, J.; PODANÝ, K. Strojírenská metrologie. Brno 2005.
5. Manuál k laserovému interferometru RENISHAW XL-80 (modul měření délek).

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Dr. Ing. Vladimír Pata**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**30. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2015**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015

  
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 <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 užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20.4.2015



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

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

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

<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, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či 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 užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá měřením délek pomocí horizontálního délkoměru.

V teoretické části jsou popsány návaznosti délkových měřidel na etalony, použití statistiky pro kalibraci, teorie kalibrace a princip laserové interferometrie.

V praktické části se řeší popis horizontálního délkoměru, renovace přístroje, postup vlastní kalibrace, realizace a výsledky.

Závěrem se pokusíme o možnou modernizaci přístroje.

Klíčová slova: měření délek, kalibrace, statistika, laserinterferometrie.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with measuring the lengths using the horizontal length gauge.

The theoretical section describes the following standards for measuring length, the use of statistics for calibration, calibration theory and the principle of laser interferometry.

The practical part addresses the description of the horizontal length gauge, instrument restoration, self-calibration procedure, implementation and results.

Finally, we will attempt a possible upgrading of the device.

Keywords: distance measurement, calibration, statistics, laserinterferometers.

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za odborné vedení, poskytnuté rady a jeho čas v průběhu vzniku. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Kamile Penčákové za pomoc při doměrování nejdůležitější části horizontálního délkoměru Carl Zeiss Jena.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 MĚŘENÍ DÉLKY</b> .....	<b>11</b>
1.1 METODY MĚŘENÍ DÉLKY .....	11
1.1.1 Základní dělení.....	11
1.1.2 Rozdělení nejpoužívanějších měřidel délky.....	13
1.2 NÁVAZNOST MĚRIDEL DÉLKY.....	13
1.3 OBLAST NÁRODNÍHO ETALONU .....	13
1.3.1 Národní etalon.....	13
1.3.2 Další etalony oblasti národního etalonu.....	14
1.4 REFERENČNÍ A PRACOVNÍ ETALONY .....	15
1.4.1 Referenční etalony 1. až 5. řádu.....	16
1.5 PRACOVNÍ MĚRIDLA A PRACOVNÍ ZDROJE ZÁŘENÍ.....	17
<b>2 STATISTIKA</b> .....	<b>18</b>
2.1 EXPLORATORNÍ STATISTIKA .....	18
2.1.1 Statistický soubor .....	18
2.1.2 Střední hodnoty .....	19
2.1.3 Charakteristiky variability.....	20
2.1.4 Testování normality .....	22
2.2 STATISTICKÁ HYPOTÉZA.....	25
2.2.1 Testování hypotéz .....	25
2.2.2 Studentův <i>t</i> -test.....	28
2.2.3 <i>F</i> -test .....	28
2.2.4 Grubbsův test extrémních odchylek.....	29
<b>3 TEORIE KALIBRACE</b> .....	<b>30</b>
3.1 ZÁKLADNÍ DEFINICE DLE NORMY ČSN ISO 230-2 .....	30
3.2 KONCOVÉ MĚRKY.....	34
3.2.1 Definice koncových měrek dle ČSN EN ISO 3650 .....	36
3.2.2 Kalibrace koncových měrek.....	38
<b>4 LASEROVÁ INTERFEROMETRIE</b> .....	<b>40</b>
4.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI SVĚTELNÉHO PAPERU LASERU .....	40
4.1.1 Princip Michelsonova interferometru .....	40
4.1.2 Konstruktivní a destruktivní interference.....	41
4.1.3 Youngův pokus .....	42
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>43</b>
<b>5 HORIZONTÁLNÍ DÉLKOMĚR ZEISS ULM 450</b> .....	<b>44</b>
5.1 POPIS PŘÍSTROJE.....	44
5.1.1 Základní postup měření délek do 100 mm .....	45
5.1.2 Modernizace přístrojů pro měření délky .....	47
5.2 MAGICKÉ OKO.....	49
<b>6 ZPROVOZNĚNÍ PŘÍSTROJE</b> .....	<b>51</b>



6.1	MECHANICKÁ OPRAVA .....	51
6.2	SEŘÍZENÍ HRÍDELE MĚŘICÍ HLAVICE .....	52
6.3	UVEDENÍ PŘÍSTROJE DO PROVOZU .....	54
<b>7</b>	<b>KALIBRACE DÉLKOMĚRU .....</b>	<b>55</b>
7.1	LASEROVÝ SYSTÉM XL-80.....	55
7.1.1	Laserová hlavice XL-80.....	55
7.1.2	Kompenzátor XC-80 a snímače .....	57
7.1.3	Stativ a stolek .....	57
7.1.4	Software LaserXL .....	58
7.1.5	Měřicí optika .....	59
7.2	SESTAVA LASERINTERFEROMETRU A DÉLKOMĚRU .....	59
7.3	PŘÍPRAVA VLASTNÍ KALIBRACE.....	61
7.3.1	Kalibrační postup .....	61
7.3.2	Vlastní kalibrace.....	62
<b>8</b>	<b>MĚŘENÍ.....</b>	<b>64</b>
8.1	REALIZACE MĚŘENÍ.....	64
8.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	66
8.2.1	Statistika výsledků .....	66
8.2.2	Grafické vyhodnocení .....	68
8.3	VYLEPŠENÍ SESTAVY .....	70
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>78</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>81</b>

## ÚVOD

Měření délek je činnost, která lidi doprovází již od jejich nejstarších dějin, kdy potřeba měření vznikla společně se zavedením směnného obchodu. Často se volila za základní jednotku libovolná část lidského těla, například loket nebo palec a pomocí těchto délek se vyjadřovaly délky ostatních předmětů. S postupným rozvojem vědy se zvolily takové jednotky, které bylo možné využívat jednorázově s velkou přesností, a které jsou založeny na fyzikálním principu.

I přes dnešní moderní techniku, vybavenost měřicích laboratoří a znalostí vyškoleného personálu není možné určit skutečnou hodnotu měřené veličiny. Je téměř jisté, že to ani nikdy možné nebude. V každém případě se dá určit interval, v němž se s danou pravděpodobností skutečná hodnota nalézá. [1]

Metrologie patří mezi činnosti, které mají pro průmyslovou činnost hlavně z pohledu jakosti a technického rozvoje velký význam. Měření a s tím spojená potřeba kalibrace používaných měřidel je pro velkou část podnikatelské sféry nezbytným předpokladem pro zvyšování jakosti produkce s určujícím vlivem na její konkurenční postavení. [2]

Ve své diplomové práci jsem se rozhodl repasovat, zprovoznit a následně kalibrovat velmi letitý horizontální délkoměr. Zmiňovaný přístroj byl nalezen v částečně rozloženém stavu, a proto nás čekal nelehký úkol. Horizontální délkoměr firmy Carl Zeiss Jena je velmi robustní konstrukce a tak je určen pro široké spektrum přesných délkových měření. Tento univerzální délkoměr má velké využití hlavně ve strojírenství ke kalibraci pevných měřidel jako jsou průměrové kalibry vnitřní i vnější, délkové kalibry, kalibry závitové, dále je také vhodný ke kalibraci etalonů apod.

V teoretické části se budu věnovat návaznosti délkových měřidel na etalonáž, zpracováním matematiky pro kalibraci, teorii kalibrace a popíši princip laserové interferometrie, která bude nezbytná pro vlastní kalibraci délkoměru.

Cílem mé diplomové práce je vyhodnocení získaných praktických zkušeností se zprovozněním cca 50. let starého přístroje, dokázat přesnost oproti současné moderní měřicí technice a přínos navržené modernizace horizontálního délkoměru Carl Zeiss Jena.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 MĚŘENÍ DÉLKY

Měření délky patří mezi nejstarší metrologické úkoly v lidské historii. Hlavní oblast použití měřidel délek je měření rozměrů v prostoru definovaných těles, proto v mnoha průmyslových odvětvích patří k základním atributům výroby.

## 1.1 Metody měření délky

Metody a postupy, pomocí kterých se měří délka, poloha, rozměr nebo odchylka rozměru, se dají rozdělovat podle mnoho kritérií.

### 1.1.1 Základní dělení

Za základní rozdělení metody měření délky považujeme měření buď přímé, nebo nepřímé.

Při použití přímé metody se hledaná délková veličina určí přímo měřítkem, například posuvným měřítkem, mikrometrem, koncovou měrkou a podobně. Nepřímou metodou se hledaný rozměr určí z měření jiného rozměru (případně rozměrů) a z následného výpočtu. Takový postup se používá například na zjištění průměru hřídele po změření jeho obvodu.

Podle způsobu snímání se metody na měření délkových veličin rozdělují na:

- dotykové
- bezdotykové

V případě dotykového způsobu snímání se veličina zjišťuje v klidové poloze. Při takovém způsobu snímání je těleso namáháno přitlačnou silou dotykového měřidla. Převážná většina klasických měřidel je dotyková. Bezdotykové snímání délkové veličiny se provádí na dálku. Měřidlo není v přímém styku s tělesem a tedy ho ani nedeformuje. Takové měření se může uskutečnit i na větší vzdálenosti (např. dalekohled) a měřený objekt se může i pohybovat (např. laserový skener).

Podle způsobu zjištění délkové veličiny se měřicí metody dělí na:

- absolutní
- komparační

V případě absolutní metody je velikost hledané délkové veličiny zjištěna přímo odečítáním na měřítku (například na mikrometru). [3]

Komparační metodou se určí hledaný rozměr z odchylky od stanoveného (jmenovitého) rozměru, který se před měřením předem nastaví. Tato metoda se uplatňuje například při zjišťování rozměru pomocí úchylkoměru, pneumatickým měřidlem apod.

Elektrická měřidla se podle vlastností výstupního signálu dělí na:

- analogová
- číslicová

Analogové snímače mají na výstupu spojitý elektrický signál, jehož hodnota je úměrná měřené veličině. Číslicová měřidla mají výstupní signál kvantován, tedy měřená veličina se neměří spojitě, ale diskrétně.

Podle vztahu obsluhy k procesu měření se délkové měřidla dělí na:

- manuální
- automatická

Manuální měřidla si vyžadují obsluhu, která ručně přiloží měřidlo k měřenému objektu, automatická měřidla měří délkové veličiny bez osobního kontaktu člověka s měřidlem.

Podle úrovně zpracování naměřených hodnot se délková měřidla dělí na:

- pasivní
- aktivní

Výsledky měření pomocí pasivních měřidel neovlivňují přímo technologický proces. Slouží pouze pro obsluhu jako podklad pro rozhodování. Aktivní měřidla se používají přímo v technologickém procesu pro sledování délkových veličin. Výstupní signál z aktivních měřidel se využívá na další řízení procesu. Příkladem jsou obráběcí centra, třídící linky a podobně.

Podle měřicího rozsahu se délková měřidla dělí na:

- jednohodnotová
- vícehodnotová

Jednohodnotová délková měřidla (kalibry, koncové měrky) mají definována jeden délkový rozměr, ten se porovnává s neznámým rozměrem objektu měření. Vícehodnotové míry umožňují spojitě zjišťování neznámého délkového rozměru. [3]

### 1.1.2 Rozdělení nepoužívanějších měřidel délky

Měřidla délky, polohy a rozměru se dají rozdělit do těchto skupin:

- mechanická měřidla
- zhmotněné míry
- elektrická měřidla
- pneumatická měřidla
- optická měřidla
- laserové měřicí systémy
- souřadnicové měřicí stroje

## 1.2 Návaznost měřidel délky

Při navazování měřidel délky se vychází z předpisu TPM 0120-94. Ten zahrnuje oblast měřidel délky reprezentovanou hmotnými etalony od 0 mm do 50 m. Schéma návaznosti se kvůli přehlednosti člení na tři části:

- čárková měřidla délky
- koncová měřidla délky
- zdroje záření a měřidla vlnové délky světla

Všechny tři části začínají společným národním etalonem délky. Jednotlivé části schématu návaznosti se dále člení na větve podle druhů měřidel.

## 1.3 Oblast národního etalonu

### 1.3.1 Národní etalon

*Národní etalon* realizuje jednotku délky 1 metru v souladu s její definicí, která říká, že metr je délka dráhy, kterou urazí světlo ve vakuu za čas  $1/299\,792\,458$  sekundy, přičemž se předpokládá stanovená hodnota rychlosti světla ve vakuu  $c = 299\,792\,458$  m/s. Při realizaci jednotky délky se využívají definované zdroje záření se známou vlnovou délkou a stanovenou relativní kombinovanou standardní nejistotou vlnové délky. Rozšířené nejistoty se uvádějí pro  $P = 0,99$  vždy s koeficientem rozšíření  $K_{99} = 3$ .

Uvedená hodnota  $K_{99}$  se přiřazuje k definovaným zdrojům záření, ke stanovené vlnové délce a k stanovené standardní kombinované nejistotě v seznamu doporučených zdrojů. [3]

Národní etalon délky tvoří soubor zařízení, který obsahuje:

- etalonový frekvenčně stabilizovaný laser
- etalonové interferenční zařízení na přímé měření čárkových mír
- etalonové interferenční zařízení na přímé měření koncových měrek porovnáváním hmotných etalonů s vlnovou délkou světla – interferenční komparátory národního etalonu

*Etalonové interferenční zařízení na měření délky čárkových mír a koncových měrek zabezpečují přenos jednotky z frekvenčně stabilizovaného laseru. Obsahují tyto součásti:*

- zdroj světla se známou vlnovou délkou ve vakuu nebo při standardních podmínkách
- interferenční komparátor, vhodný na porovnávání násobku zlomků vlnové délky světla s délkou čárkových mír a koncových měrek
- zařízení na stanovení vlivu prostředí na vlnovou délku
- zařízení na měření teploty zkoušeného etalonu
- zařízení na určení polohy vztažných bodů etalonu (čárek, koncových ploch měrky)

Etalonové interferenční zařízení určené na přímé měření čárkových mír je charakterizováno nejvyšší dovolenou kombinovanou standardní nejistotou (dále nejistotou):

$$u_{C\ do v} = (0,05 + 0,1L)/k_{99} \mu m < (0,02 + 0,04L) \mu m \quad (1)$$

a na měření koncových měrek

$$u_{C\ do v} = (0,02 + 0,1L)/k_{99} \mu m < (0,02 + 0,04L) \mu m \quad (2)$$

kde  $L$  je nominální hodnota etalonu v metrech.

Etalonová interferenční zařízení národního etalonu jsou určena na přímé měření čárkových a koncových referenčních etalonů I. řádu a pracovních měrek třídy přesnosti 00.

### 1.3.2 Další etalony oblasti národního etalonu

*Porovnávací etalony (do 1m)* jsou hmotné etalony nejvyšší metrologické úrovně. Používají se čárkové míry třídy přesnosti 0 a zvláštní etalony třídy M, splňující kritéria vysoké stability. Dále se používají koncové měrky třídy 00 a 0.

*Čárkové a koncové etalony (do 1m)* jsou etalony s vlastnostmi stanovenými výše pro srovnávací etalony. [3]

Čárkové etalony se používají při navazování referenčních a pracovních čárkových mír I. řádu a pracovních čárkových mír třídy přesnosti 0 metodou porovnávání na komparátoru. Používají se také při navazování referenčního zařízení I. řádu na přímé měření pásem. Koncové etalony se používají k navazování pracovních měřicích přístrojů.

*Interferenční komparátor na přímé měření referenčních koncových měrek I. Řádu (do 1 m)* se navazuje prostřednictvím měření porovnávací koncové měrky. Interferenční komparátor je určený na měření referenčních koncových měrek I. řádu do jmenovité hodnoty délky 0,1 metru.

*Frekvenčně stabilizovaný laser.* Používají se laserové zdroje světla, stabilizované na vlnových délkách od 0,4  $\mu\text{m}$  do 11  $\mu\text{m}$  s relativními nejistotami  $1 \cdot 10^{-11}$  až  $3,34 \cdot 10^{-10}$ . Použitý laser je frekvenčně stabilizovaný na vlnové délce 0,633  $\mu\text{m}$  a s laserem národního etalonu délky tvoří dvojici laserů s porovnatelnou blízkou vlnovou délkou světla. Frekvenčně stabilizovaný laser oblasti národního etalonu je určený na navazování referenčních frekvenčně stabilizovaných laserů I. řádu a pracovních laserových zdrojů záření.

#### 1.4 Referenční a pracovní etalony

Referenční a pracovní etalony (dále jen referenční) se člení do řádů přesnosti podle jejich nejvyšší dovolené hodnoty kombinované standardní nejistoty  $u_{C\ do v}$  nebo její relativní hodnoty  $u_{r,C\ do v}$ . Tato nejistota se ve schématu návaznosti vyjadřuje jako podíl rozšířené nejistoty pro konfidentní pravděpodobnost  $P = 0,99$  a koeficient rozšíření  $K_{99}$ . V případě frekvenčně stabilizovaných laserů a spektrálních výbojek se používá koeficient rozšíření  $K_{99} = 3$ .

Zařízení (komparátory, měřicí stroje, přístroje) na navazování měřidel metodou přímého měření jsou ve schématu na stejné úrovni jako hmotný referenční etalon, který schéma předepisuje na navazování daných níže postavených měřidel metodou srovnání. Zařízení pro přímé měření, zařazené mezi referenční etalony se navazují pomocí hmotných etalonů téhož nebo vyššího řádu. Hmotný etalon téhož řádu jako navazované zařízení postačuje tehdy, pokud zařízení měří pomocí vlnové délky světla a použitý hmotný etalon je z téže větve měřidel, pro kterou se zařízení využívá. [3]



### 1.4.1 Referenční etalony 1. až 5. řádu

#### *Referenční etalony 1. řádu:*

- Čárkové měrky do 4 metrů
- Čárkový interferenční komparátor do 1 metru
- Zařízení na měření měřičských pásem do 25 metrů
- Koncové měrky do 1 metru
- Zařízení na měření průměru kroužků do 0,2 metru
- Etalonové frekvenčně stabilizované lasery
- Spektrální výbojky

#### *Referenční etalony 2. řádu:*

- Čárkové měrky do 1 metru
- Měřičské pásma do 25 metrů
- Zařízení na měření měřičských pásem
- Koncové měrky do 1 metru
- Kroužky do 0,2 metru
- Spektrální výbojky a etalony absorpce (filtry)
- Přístroje na měření vlnové délky kontinuálně a impulzně pracujících laserů

#### *Referenční etalony 3. řádu:*

- Čárkové měrky do 1 metru
- Délkoměr na měření čárkových mír
- Měřičské pásma do 25 metrů
- Měřičské pásma do 50 metrů
- Koncové měrky do 1 metru
- Kroužky do průměru 0,2 metru

#### *Referenční etalony 4. řádu:*

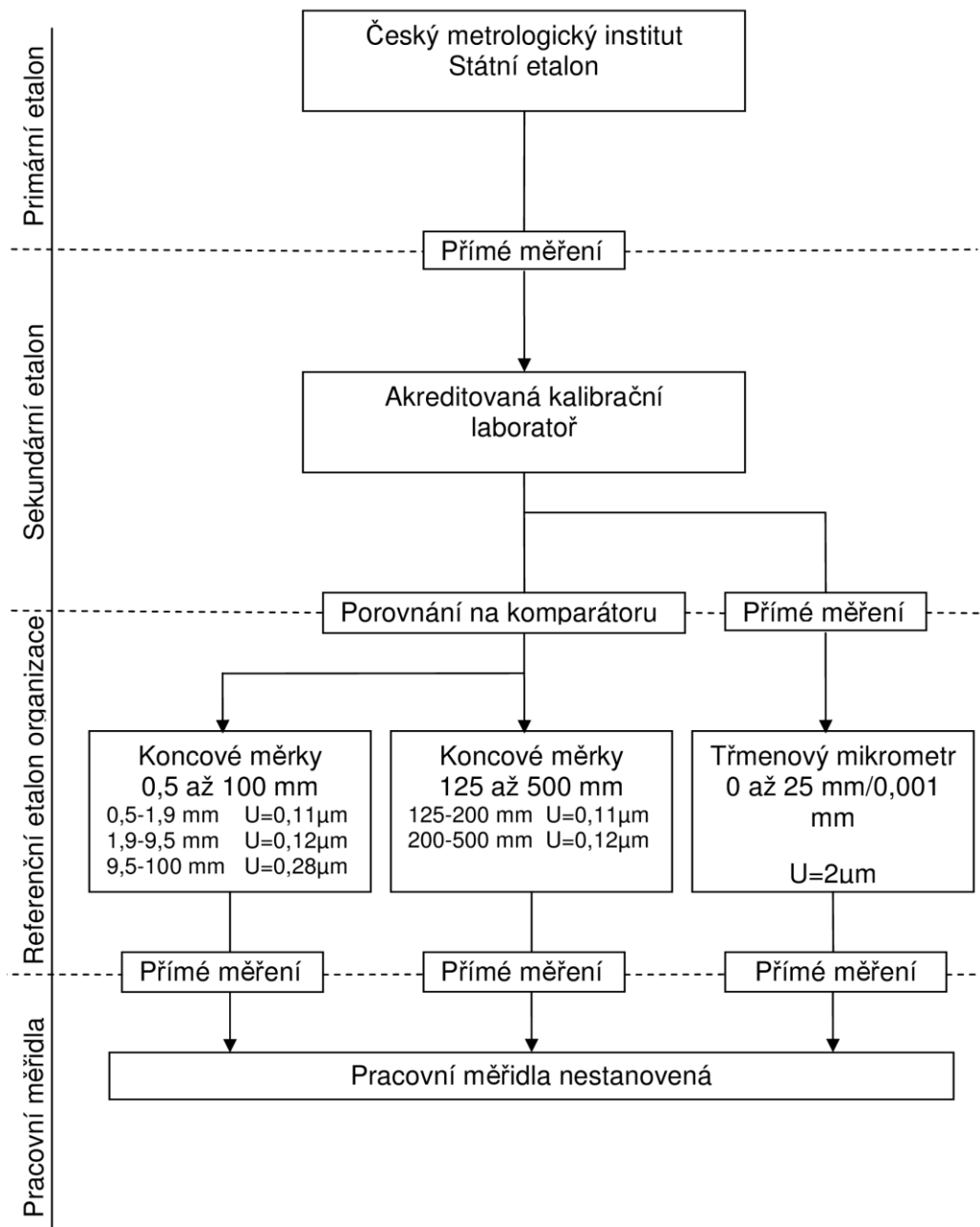
- Čárkové měrky a ploché čárkové měrky do 2 metrů
- Měřičské pásma do 50 metrů
- Koncové měrky do 1 metru
- Kroužky do průměru 0,2 metru [3]

Referenční etalony 5. řádu:

- Koncové měrky do 1 metru

### 1.5 Pracovní měřidla a pracovní zdroje záření

Pracovní měřidla se navazují vhodnou metodou a vhodným druhem etalonu, který odpovídá požadované přesnosti měřidla. [3]



Obr. 1. Schéma návaznosti veličiny délky [1]

## 2 STATISTIKA

Statistika (také statistická věda) je věda a postup jak rozvíjet lidské znalosti použitím empirických dat. Je založena na matematické statistice, která je větví aplikované matematiky. V teorii statistiky jsou náhodnost a neurčitost modelovány pomocí teorie pravděpodobnosti. Do praxe statistiky patří plánování, sumarizace a analýza nepřesných pozorování. Cílem statistiky je najít „nejlepší“ informace z dostupných dat, proto ji někteří autoři označují jako součást teorie rozhodování. [4]

### 2.1 Exploratorní statistika

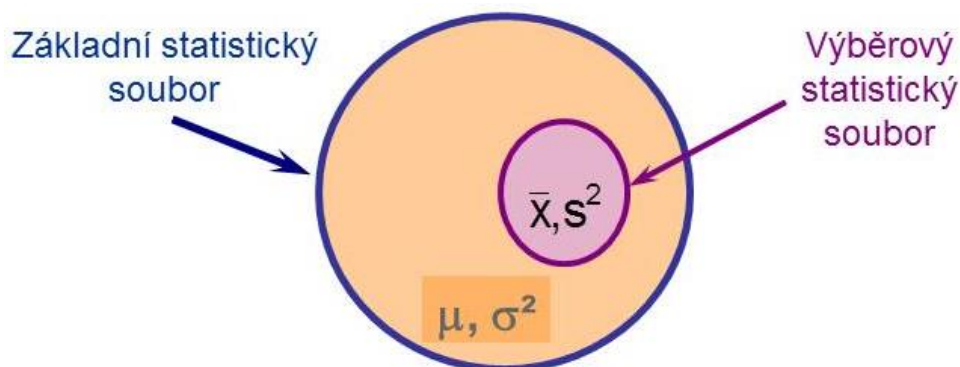
#### 2.1.1 Statistický soubor

##### Základní soubor

tzv. populace, je soubor všech prvků (jedinců), u kterých se sledovaný znak může vyskytovat. Tento soubor představuje vlastní cíl statistického zkoumání. Obsahuje teoreticky všechny hodnoty, které mohou být při sledování dané vlastnosti získány. Jde o oblast sledování, kterou chápeme jako souhrn hodnot, které tuto oblast tvoří. Počet členů v základním souboru (rozsah) označujeme  $N$ .

##### Výběrový soubor

je soubor určitého konečného počtu  $n$  jedinců vybraných ze základního souboru, u kterých je provedeno praktické sledování (měření) zkoumané vlastnosti. Na základě poznání vlastností výběrového souboru se usuzuje na vlastnosti celé populace, proto by měl být výběrový soubor co nejlepším představitelem (reprezentantem) základního souboru. Aby byl výběrový soubor dostatečně reprezentativní, je nutno provádět výběr členů do tohoto souboru zcela náhodně. [5]



Obr. 2. Statistické soubory [10]

## 2.1.2 Střední hodnoty

### Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je statistickou veličinou, která v jistém smyslu vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Aritmetický průměr je asi nejčastěji používaný statistický pojem, který se objevuje také v běžném lidském vyjadřování. S tím ovšem souvisí i ten fakt, že je velice často využíván chybně nebo dokonce záměrně zneužíván.

Aritmetický průměr základního souboru:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3)$$

Aritmetický průměr výběrového souboru:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

### Medián

Definován tak, že polovina hodnot leží pod, a polovina nad mediánem (v nekonečně velkých souborech - pravděpodobnost, že náhodná hodnota leží nad, i pod mediánem je 0,5). V souborech o sudém počtu členů je obvykle za medián považovaná hodnota v půli intervalu mezi dvěma prostředními hodnotami.

### Modus

Modus můžeme definovat jako nejčastěji se vyskytující hodnota proměnné v souboru (hodnota s největší četností). Odpovídá tedy vždy vrcholu křivky rozdělení. V tabulce rozdělení četností se modus určí jednoduše z hodnoty znaku, která má největší četnost. Výhodou modu je, že ho lze snadno použít i pro nominální nebo ordinální data, kde např. aritmetický průměr použít nelze.

Mezi aritmetickým průměrem, mediánem a modem unimodálních rozdělení četností existují určité vztahy, které charakterizují tvar rozdělení četností. U zcela symetrických jednovrcholových četností platí vztah:

$$\bar{x} = \tilde{x} = \hat{x} \quad (5)$$

tj. aritmetický průměr, medián a modus jsou si rovny. Čím ale bude rozdělení četností asymetričtější, tím více se budou tyto tři střední hodnoty od sebe odlišovat. [6]

### 2.1.3 Charakteristiky variability

#### Variační rozpětí

Variační rozpětí  $R$  řady  $n$  čísel můžeme definovat jako rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou řady (rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou znaku v souboru):

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (6)$$

Variační rozpětí není příliš přesnou charakteristikou variability hodnot sledované numerické proměnné, protože je ovlivněno velikostí extrémních hodnot a zároveň neříká nic o tom, jak se chovají hodnoty uvnitř souboru. Tento nedostatek  $R$  překonávají rozpětí kvantilů, z nichž nejčastěji používané je kvartilové rozpětí  $R_q$ :

$$R_q = x_{0,75} - x_{0,25} \quad (7)$$

Je zřejmé, že ani variační rozpětí ani kvartilová rozpětí neberou při charakterizování variability v potaz velikost všech hodnot sledované numerické proměnné a to je mnohdy považováno jako závažný nedostatek.

#### Rozptyl

Rozptyl (jako přesný parametr populace) můžeme definovat jako aritmetický průměr čtverců odchylek jednotlivých hodnot sledované proměnné  $x_i$  od průměru celého souboru.

Rozptyl základního souboru:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N} \quad (8)$$

U výpočtu výběrového rozptylu se ve jmenovateli nachází výraz  $(n-1)$ , který označujeme jako počet stupňů volnosti výběrového souboru. Použitím tohoto výrazu  $(n-1)$  namísto klasické velikosti souboru  $n$  docílíme přesnějšího odhadu skutečné hodnoty populačního rozptylu, zejména při výpočtu na základě malých výběrových souborů. [5]

Rozptyl výběrového souboru:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (9)$$

Vlastnosti rozptylu:

- jestliže jsou všechny hodnoty souboru stejné, pak je variabilita hodnot sledované proměnné v souboru nulová a také výběrový rozptyl  $s^2 = 0$
- velikost rozptylu se zvyšuje při zvětšující se variabilitě hodnot sledované proměnné
- rozptyl je odvozen od součtu čtverců odchylek jednotlivých hodnot od průměru souboru, a proto nemůže nikdy nabývat záporných hodnot.
- přičte-li se ke všem hodnotám (odečte-li se od všech hodnot) proměnné  $X$  libovolná kladná konstanta  $a$ , pak se rozptyl nezmění.
- násobí, či dělí-li se všechny hodnoty proměnné nenulovou konstantou  $g$ , pak je rozptyl znásoben, či vydělen čtvercem této konstanty.

### Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka je definována jako (kladná) druhá odmocnina z rozptylu, tj.

Pro základní soubor:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (10)$$

Pro výběrový soubor:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (11)$$

Vlastnosti směrodatné odchylky:

- směrodatná odchylka má identické měrné jednotky jako sledovaná číselná proměnná ve statistickém souboru
- směrodatná odchylka může nabývat vždycky pouze kladných hodnot (vyplývá to z definice)

### Variační koeficient

Variační koeficient je koeficientem vhodným pro vzájemné srovnávání variability dvou, či více souborů s podstatně odlišnou úrovní hodnot. V těchto případech musíme odstranit vliv obecné úrovně daných hodnot. [5]

Tento vliv odstraníme tak, že směrodatnou odchylku dělíme střední hodnotou, od které byly počítány odchylky pro součet čtverců, obvykle tedy při praktických výpočtech aritmetickým průměrem výběrového souboru. Výsledek se vyjadřuje v procentech.

Variační koeficient je tedy definován pro základní soubor:

$$V = \frac{\sigma \cdot 100}{\mu} \quad (12)$$

Pro výběrový soubor vypočteme variační koeficient podle vzorce:

$$V = \frac{s \cdot 100}{\bar{x}} \quad (13)$$

Vlastnosti variačního koeficientu:

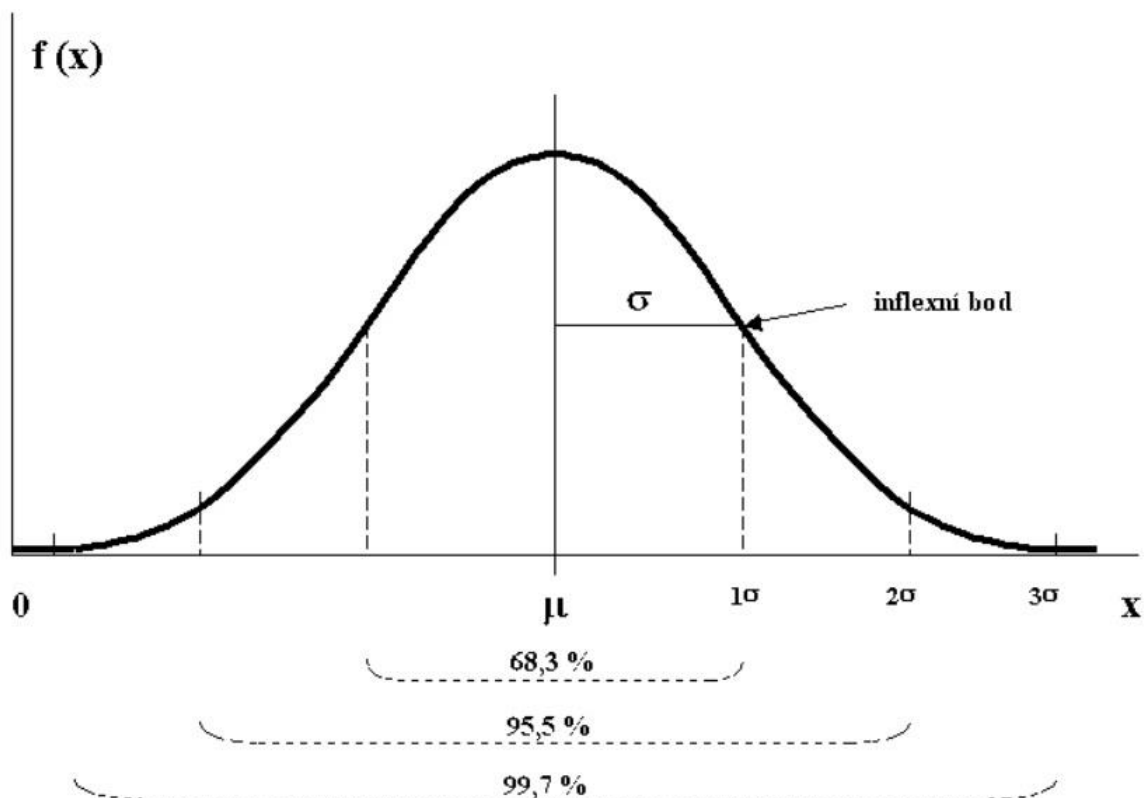
- variační koeficient je relativní mírou variability. Není ovlivněn absolutními hodnotami sledovaného statistického znaku.
- variační koeficient nám udává, z kolika procent se podílí směrodatná odchylka na aritmetickém průměru.

#### 2.1.4 Testování normality

Použití většiny metod a postupů v indukční statistice je specifické pro různé typy statistických dat. Postupy statistického hodnocení se navzájem liší především podle toho, jaké znalosti máme o typu rozdělení sledované náhodné veličiny v základním souboru. Proto je nutné provést jako jeden z prvních kroků při statistickém testování takzvaný test normality, tedy zjištění, zda soubor dat sledované náhodné veličiny odpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení pravděpodobností nebo ne (v tomto případě pak pracujeme s neznámým rozdělením).

##### Gaussovo normální rozdělení

Náhodná veličina  $X$  má v celém základním souboru normální rozdělení závislé na dvou parametrech: na střední hodnotě  $\mu$  a směrodatné odchylce  $\sigma > 0$ , která charakterizuje variabilitu náhodné veličiny  $X$ . Grafickým vyjádřením Gaussova normálního rozdělení je křivka zvonovitého tvaru, symetrická kolem střední hodnoty  $\mu$  („parametr polohy“ – udává polohu křivky na ose  $x$ ). Šířku křivky v tzv. inflexním bodě (bod obratu křivky) udává směrodatná odchylka  $\sigma$  („parametr rozptýlení“). Grafické vyjádření Gaussova normálního rozdělení pro náhodnou veličinu  $X$  vidíme na obrázku 3. [5]



Obr. 3. Gaussovo normální rozdělení pravděpodobností [5]

$X$  = spojitá náhodná veličina

$f(x)$  = hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny  $X$

$\mu$  = střední hodnota náhodné veličiny  $X$

$\sigma$  = směrodatná odchylka náhodné veličiny  $X$

Tvar křivky Gaussova normálního rozdělení je ovlivněn a zcela charakterizován parametry  $\mu$  a  $\sigma$ . Přesnější interpretaci parametru rozptýlení  $\sigma$  přibližují vztahy, které uvádějí pravděpodobnosti různých intervalů kolem středu rozdělení. Pro každé Gaussovo normální rozdělení GNR ( $\mu$ ;  $\sigma$ ) platí:

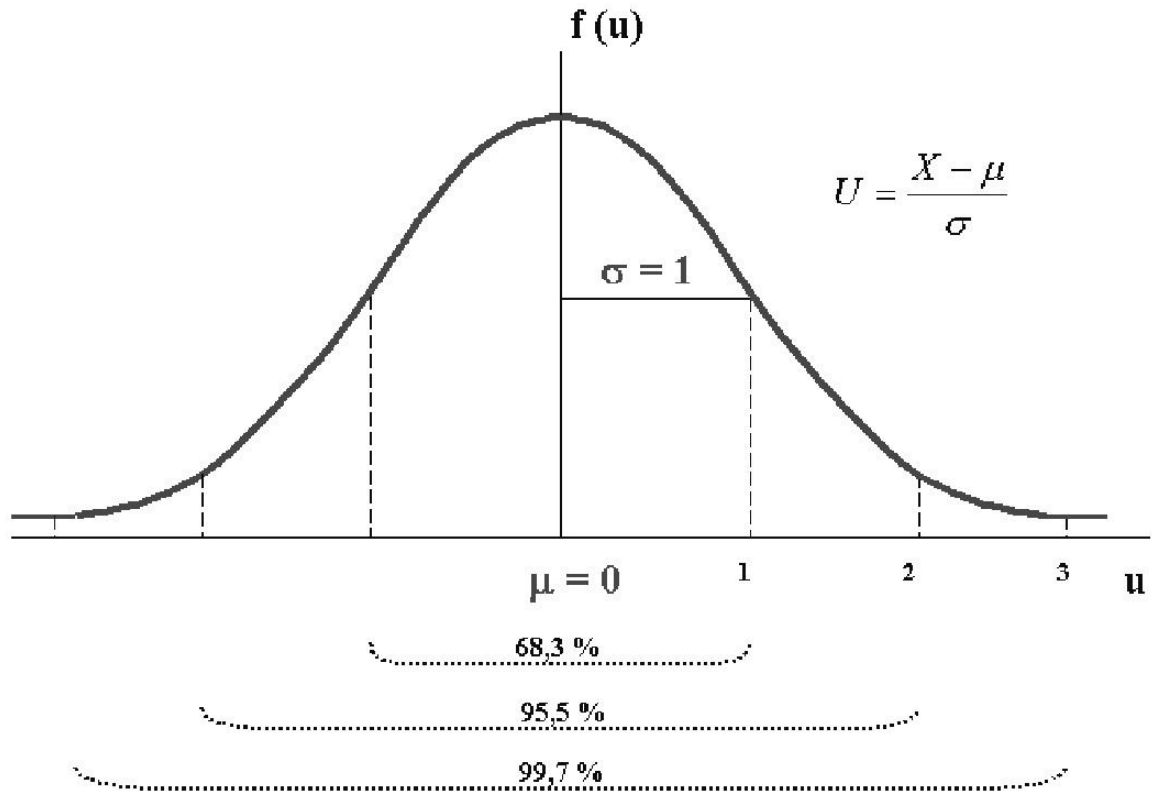
- V rozmezí hodnot  $\mu \pm 1\sigma$  se vyskytuje 68,3 % všech jedinců populace.
- V rozmezí hodnot  $\mu \pm 2\sigma$  se vyskytuje 95,5 % všech jedinců populace.
- V rozmezí hodnot  $\mu \pm 3\sigma$  se vyskytuje 99,7 % všech jedinců populace.

### Normované normální rozdělení

Normované (neboli standardizované) normální rozdělení je normální rozdělení se střední hodnotou, která je rovna 0 a směrodatnou odchylkou, která je vždy rovna 1. [5]



Toto rozdělení se někdy nazývá jako  $U$ -rozdělení (případně  $Z$ -rozdělení), protože je definováno pro teoreticky odvozenou veličinu  $U$ , která vznikne transformací původní náhodné veličiny  $X$  odečtením střední hodnoty celé populace a tento rozdíl se vydělí směrodatnou odchylkou populace (obrázek 4).



Obr. 4. Normované normální rozdělení pravděpodobností [5]

$U$  = normovaná náhodná veličina získaná transformací

$f(u)$  = hustota pravděpodobnosti normované náhodné veličiny  $U$

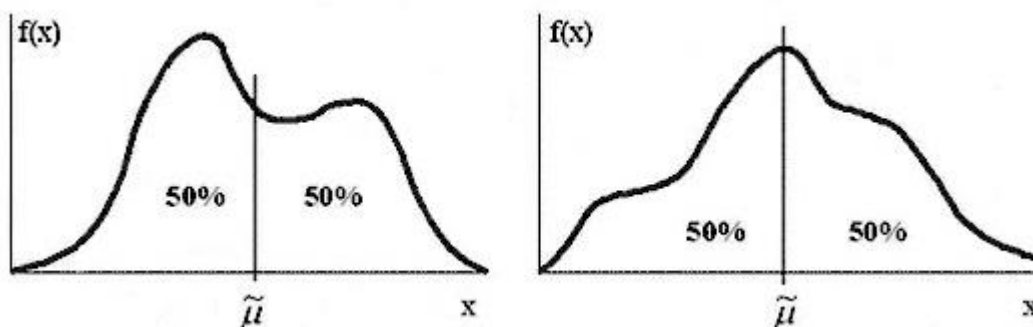
$\mu$  = střední hodnota normované náhodné veličiny  $U$

$\sigma$  = směrodatná odchylka normované náhodné veličiny  $U$

Křivka normovaného rozdělení je také zvonovitá, symetrická kolem střední hodnoty  $\mu$  stejně jako Gaussova křivka. Odlišuje se pouze posunem na ose  $x$  (střed souměrnosti křivky NNR, tzn. střední hodnota  $\mu$  je posunuta do hodnoty 0) a jednotkovou šířkou (směrodatná odchylka  $\sigma = 1$ ). Obdobně platí i shoda v procentuálním zastoupení výskytu hodnot v intervalech daných směrodatnými odchylkami symetricky kolem střední hodnoty  $\mu$ . [5]

### Neznámé rozdělení

Pro popis neznámého rozdělení se používá jediná charakteristika – medián  $\tilde{\mu}$ . Medián je považován za střed neznámého rozdělení, šířku křivky neznámého rozdělení nelze určovat pro její nepravidelnost. Protože je medián definován jako 50 % kvantil, dělí plochu pod křivkou rozdělení na 2 poloviny, symbolicky znázorňující podíl jedinců (50 %) v populaci, kteří mají hodnoty sledovaného znaku nižší než medián a podíl jedinců (50 %) v populaci, mající hodnoty sledovaného znaku vyšší než medián (obrázek 5).



Obr. 5. Příklady neznámého rozdělení pravděpodobnosti [5]

## 2.2 Statistická hypotéza

Úlohou statistické indukce je rozhodnout na základě informací získaných z náhodných výběrů, zda přijmeme nebo zamítneme určitou hypotézu týkající se základního souboru. Statistickou hypotézou rozumíme jakékoliv tvrzení, které se může týkat neznámých parametrů, daných funkcí parametrů, ale také tvaru rozdělení a dalších vlastností základního souboru. [5]

### 2.2.1 Testování hypotéz

Prvním krokem při statistickém testování je vždy formulace statistické hypotézy, tzn. formulace výzkumné otázky v rámci experimentu do formy nulové a alternativní statistické hypotézy, které klademe při testování proti sobě:

**1) nulová hypotéza** (označená  $H_0$ ) – tvrzení, které obvykle vyjadřuje „žádný neboli nulový rozdíl“ mezi testovanými soubory dat. Nulová hypotéza může být např.:  $\mu = konst.$ ,  $\mu_1 = \mu_2$ ,  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$  apod.

**2) alternativní hypotéza** (označená  $H_A$ ) - popírá platnost nulové hypotézy  $H_0$ . Obvykle se vyjadřuje jako „existence difference“ mezi soubory nebo „existence závislosti“ mezi proměnnými. Jedná se o logický opak nulové hypotézy, tzn. např.:  $\mu \neq konst.$ ,  $\mu_1 \neq \mu_2$ ,  $\sigma_1 \neq \sigma_2$ , což je alternativní hypotéza oboustranná (existuje rozdíl směrem k větším i menším hodnotám) nebo alternativní hypotéza jednostranná kde platí pouze např.:  $\mu_1 > \mu_2$  nebo  $\mu_1 < \mu_2$ . Pokud při statistickém testování nedokážeme opak, předpokládáme, že platí nulová hypotéza.

### Hladina významnosti testu

Je třeba mít na paměti, že testovanou hypotézu vždy přijímáme nebo zamítáme na základě výsledků náhodného výběru, a proto může být zamítnutí i nezamítnutí hypotézy  $H_0$  správné, ale také nesprávné. Obecně se můžeme dopustit jedné z těchto dvou chyb:

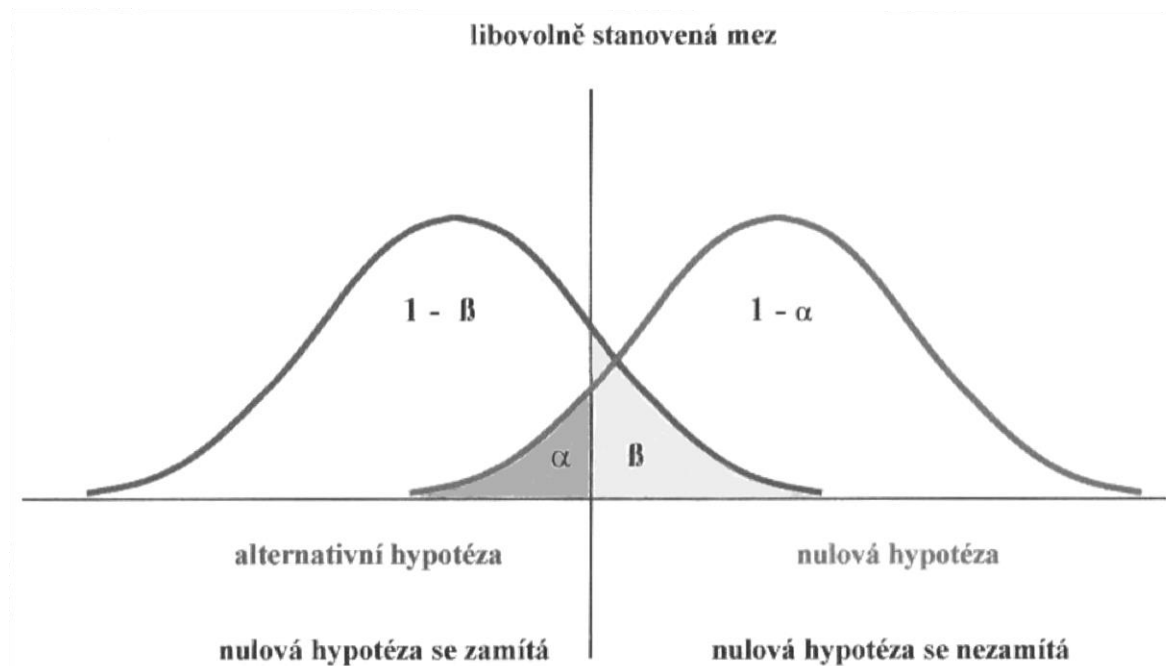
- **chyba 1. druhu  $\alpha$**  - zamítneme hypotézu  $H_0$ , když platí
- **chyba 2. druhu  $\beta$**  - nesprávně přijmeme hypotézu  $H_0$ , když neplatí

Chybu 1. druhu  $\alpha$  a chybu 2. druhu  $\beta$  při testování statistických hypotéz přehledně sumarizuje následující tabulka:

Tab. 1. Chyby  $\alpha$  a  $\beta$  při testování hypotéz [5]

ROZHODNUTÍ SKUTEČNOST	ZAMÍTÁME $H_0$	NEZAMÍTÁME $H_0$
$H_0$ PLATÍ	Chyba I.druhu $\alpha$	SPRÁVNĚ $1 - \alpha$
$H_0$ NEPLATÍ	SPRÁVNĚ $1 - \beta$ (síla testu)	Chyba II.druhu $\beta$

Prakticky při testování statistických hypotéz postupujeme tak, že si předem zvolíme dostatečně nízkou pravděpodobnost chyby 1. druhu  $\alpha$  (hladinu významnosti) a tím zároveň určíme i velikost chyby 2. druhu  $\beta$ , protože obě chyby spolu navzájem souvisí. Vzájemný vztah mezi chybou 1. druhu  $\alpha$  a chybou 2. druhu  $\beta$  v závislosti na předem zvolené hladině významnosti nám znázorňuje také obrázek 6. [5]



Obr. 6. Vzájemný vztah mezi chybou 1. druhu  $\alpha$  a chybou 2. druhu  $\beta$  [5]

### Výpočet testovacího kritéria

Existuje spousta testovacích statistik, výpočet pak závisí na povaze dat a testované hypotéze. Testovací kritéria se řídí různými typy rozdělení (podle toho, jakou hypotézu testujeme). Jako testovací kritérium mohou sloužit např. veličiny:

- $t$  (Studentův **t-test** pro testování rozdílu 2 středních hodnot)
- $F$  (**F-test** pro testování rozdílu 2 rozptylů)
- *Grubbsův* parametrický test extrémních odchylek

### Závěr testování

Posledním krokem při testování statistických hypotéz je formulace závěru testování, které lze to provést dvěma způsoby:

1) srovnáním vypočteného testovacího kritéria s kritickou hodnotou, která se určuje v závislosti na zvolené hladině významnosti  $\alpha$ . Jestliže hodnota vypočtené testovací statistiky překročí kritickou hodnotu, znamená to, že existuje evidence pro zamítnutí nulové hypotézy (tzn. „potvrdili jsme rozdíl“), ale pokud se naopak vypočtená testovací statistika ocitne uvnitř oboru přijetí  $H_0$ , nemůžeme zamítnout nulovou hypotézu a tak předpokládáme, že platí. Nezamítnutí (přijetí) nulové hypotézy však ještě neznamená její důkaz. [5]

2) převedením testovací statistiky do pravděpodobnostní škály a počítáme pravděpodobnost  $p$ , která kvantifikuje pravděpodobnost realizace hodnoty testovací statistiky, pokud nulová hypotéza platí. Takže pravidlo pro formulaci závěru je potom následující:

- Jestliže  $p$ -hodnota je menší než hladina významnosti  $\alpha$  (chyba  $\alpha$ ), zamítáme nulovou hypotézu  $H_0$ . Symbolicky lze použít závěr:

$$p < 0,05 \text{ „statisticky významný rozdíl“ nebo}$$

$$p < 0,01 \text{ „statisticky vysoce významný rozdíl“}$$

- Jestliže je  $p$ -hodnota větší než hladina významnosti  $\alpha$  (chyba  $\alpha$ ), nulovou hypotézu  $H_0$  nemůžeme zamítnout a tedy předpokládáme, že platí. Symbolicky lze také psát:

$$p > 0,05 \text{ „statisticky nevýznamný rozdíl“.}$$

### 2.2.2 Studentův $t$ -test

Studentův  $t$ -test bývá nejčastěji používaným parametrickým testem, který se používá pro testování rozdílu **2 středních hodnot  $\mu$** . Podle statistické významnosti testovaného rozdílu středních hodnot (nejčastěji mezi pokusnou a kontrolní skupinou) usuzujeme na účinnost aplikovaného pokusného zásahu ve sledovaném experimentu.

Výpočet testovacího kritéria  $t$  vychází z odhadů parametrů  $\mu$  a  $\sigma^2$  u výběrových souborů  $\bar{x}$  a  $s^2$ . Pro testování rozdílu středních hodnot použijeme nepárový  $t$ -test pro různé rozptyly:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1 - 1} + \frac{s_2^2}{n_2 - 1}}} \quad (14)$$

Vypočtenou statistiku  $t$  porovnáme s tabulkovou kritickou hodnotou  $t_{1 - \alpha/2}(v)$ , nalezenou podle daného  $v$  a zvolené hladiny významnosti  $\alpha$  (0,05 nebo 0,01). Vyhodnotíme výsledky a provedeme závěr testování.

### 2.2.3 $F$ -test

Parametrický test pro testování rozdílu **dvou rozptylů**. Testem rozhodujeme, zda pokusný zásah má vliv na proměnlivost (rozptyl  $s^2$ ) zkoumané náhodné veličiny v populaci. Je důležitý i pro porovnání přesnosti dvou metod měření. [5]

Nulovou hypotézu v  $F$ -testu můžeme symbolicky vyjádřit zápisem:  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$

Nejprve vypočteme výběrové rozptyly  $s_1^2$  a  $s_2^2$ :

$$s_{1,2}^2 = \frac{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n_{1,2}}}{n_{1,2} - 1} \quad (15)$$

Poté stanovíme počet stupňů volnosti u obou výběrů:  $v_1 = n_1 - 1$  (pro  $s_1^2$ ) a  $v_2 = n_2 - 1$  (pro  $s_2^2$ ) a následně vypočteme testovací kritérium (statistiku)  $F$ :

$$F = \frac{\text{větší z rozptylů } s_{1,2}^2}{\text{menší z rozptylů } s_{1,2}^2} \quad (16)$$

Dále zvolíme hladinu významnosti  $\alpha$  a ve statistických tabulkách (Fisher-Snedecorova rozdělení) vyhledáme odpovídající kritickou hodnotu pro  $F$ -test. Vypočtenou statistiku  $F$  porovnáme s tabulkovou kritickou hodnotou a závěrem hypotézu vyhodnotíme. [5]

#### 2.2.4 Grubbsův test extrémních odchylek

Hodnoty způsobené hrubou chybou je nutno ze souboru vyloučit, pro tyto případy se používají právě testy extrémních odchylek.

Grubbsův test se používá pro objektivní vyřazování extrémních hodnot na základě vypočteného testovacího kritéria u souborů dat, které odpovídají Gaussovu normálnímu rozdělení sledované náhodné veličiny.

- 1) Seřadíme hodnoty výběrového souboru do vzestupné variační řady.
- 2) Vypočteme aritmetický průměr  $\bar{x}$  a směrodatnou odchylku  $s$ , ze všech hodnot souboru.
- 3) Vypočítáme testovací kritérium pro první (případně poslední  $n$ -tou) hodnotu variační řady:

$$T_1 = \bar{x} - x_1/s \quad (T_n = x_n - \bar{x}/s) \quad (17)$$

- 4) Vypočtené testovací kritérium porovnáme s tabulkovou kritickou hodnotou pro příslušné  $n$  výběrového souboru a zvolenou  $\alpha$  pro Grubbsův test.

Pokud  $T_{1(n,\alpha)} > T_{krit.}$  - první (případně poslední) hodnotu variační řady vyloučíme ze souboru a musíme vypočítat nový průměr  $\bar{x}$  a směrodatnou odchylku  $s$  již bez této extrémní hodnoty.

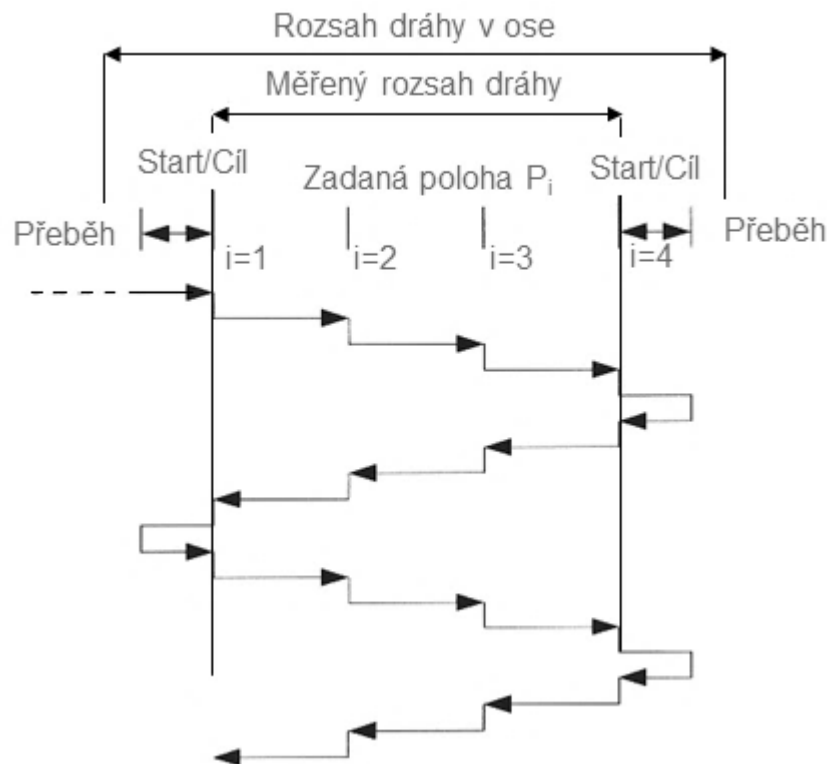
Pokud  $T_{1(n,\alpha)} \leq T_{krit.}$  - první (poslední) hodnota variační řady patří do souboru a vyloučit ji nemůžeme (není extrémní hodnotou). [5]

### 3 TEORIE KALIBRACE

#### 3.1 Základní definice dle normy ČSN ISO 230-2

**Rozsah dráhy v ose** – největší dráha lineární nebo úhlová, v jejímž rozsahu je možno pohyblivou část pomocí číslicového řízení přestavovat.

**Měřený rozsah dráhy** – část rozsahu dráhy, která se používá pro měření, zvolena tak, aby jak do první, tak do poslední zadané polohy bylo možné najet dvousměrně.



Obr. 7. Dvojchodý lineární bidirekcionální cyklus [7]

**Zadaná poloha  $P_i$  ( $i=1$  až  $m$ )** – poloha, do které je naprogramován pohyb pohybující se části. Index  $i$  udává jednu určitou polohu ze všech zadaných poloh v dané ose.

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

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

**Jednosměrný (unidirekcionální)** – výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykonává vždy ve stejném směru pohybu. [7]

Značka  $\uparrow$  značí, že se jedná o parametr odvozený z měření při nastavování polohy v kladném směru, značka  $\downarrow$  se vztahuje k sérii měření prováděných při nastavování polohy v záporném směru např.  $x_{ij} \uparrow$ , nebo  $x_{ij} \downarrow$ .

**Dvousměrný** (bidirekcionální) – výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých je nastavování do zadané polohy v dané ose vykonáno v obou smyslech pohybu.

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

**Koeficient rozšíření** – číselný koeficient používaný jako násobitel běžné nejistoty pro zjištění rozšířené nejistoty.

**Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze  $\bar{x}_{ij} \uparrow$ , nebo  $\bar{x}_{ij} \downarrow$**  - aritmetický průměr polohových úchylek, zjištěných při sérii  $n$  najetí do polohy  $P_i$  v jednom směru.

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (18)$$

a

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (19)$$

**Průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze  $\bar{x}_i$**  - aritmetický průměr průměrných jednosměrných polohových úchylek  $\bar{x}_i \uparrow$  a  $\bar{x}_i \downarrow$  zjištěných při najíždění do polohy  $P_i$  v obou směrech.

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (20)$$

**Odhad jednosměrné standardní nejistoty nastavení v poloze  $s_i \uparrow$  nebo  $s_i \downarrow$**  - odhad běžné nejistoty polohových úchylek zjištěných při sérii  $n$  najetí do polohy  $P_i$  v jednom směru. [7]

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \quad (21)$$

a



$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2} \quad (22)$$

**Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze  $R_i \uparrow$  nebo  $R_i \downarrow$**  - rozsah odvozený z odhadu jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze  $P_i$  při použití koeficientu rozšíření 2.

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \quad (23)$$

a

$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (24)$$

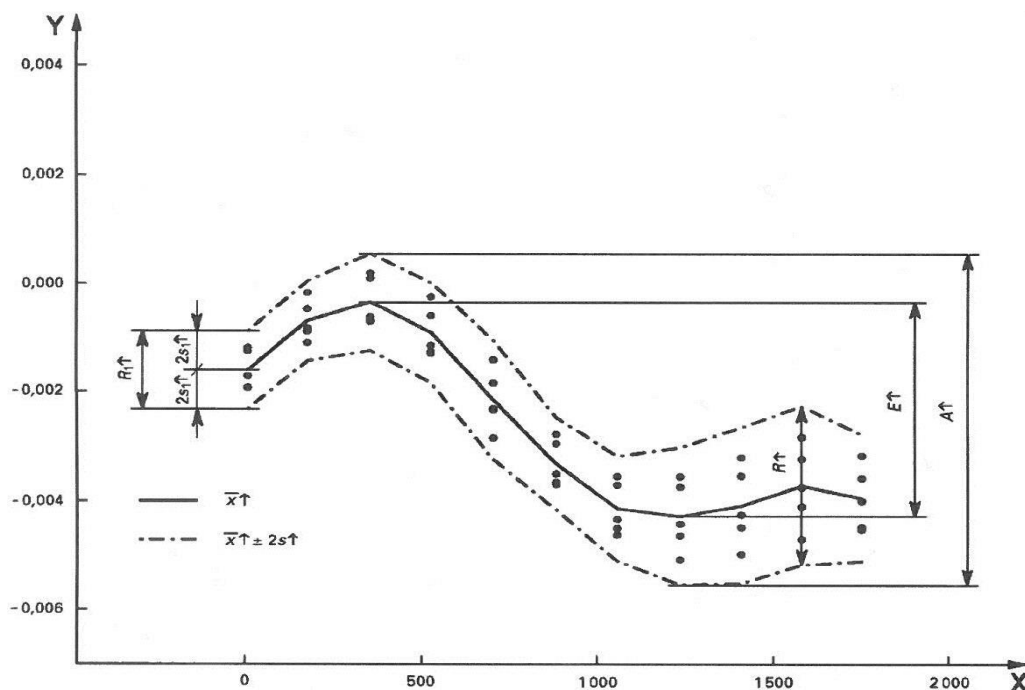
**Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze  $R_i$**

$$R_i = \max. [2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (25)$$

**Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose  $R_i \uparrow$  nebo  $R_i \downarrow$**  - největší hodnota z opakovatelnosti nastavení polohy v kterékoliv poloze  $P_i$  podél nebo okolo dané osy.

$$R \uparrow = \max. [R_i \uparrow] \quad (26)$$

$$R \downarrow = \max. [R_i \downarrow] \quad (27)$$



**Legenda**

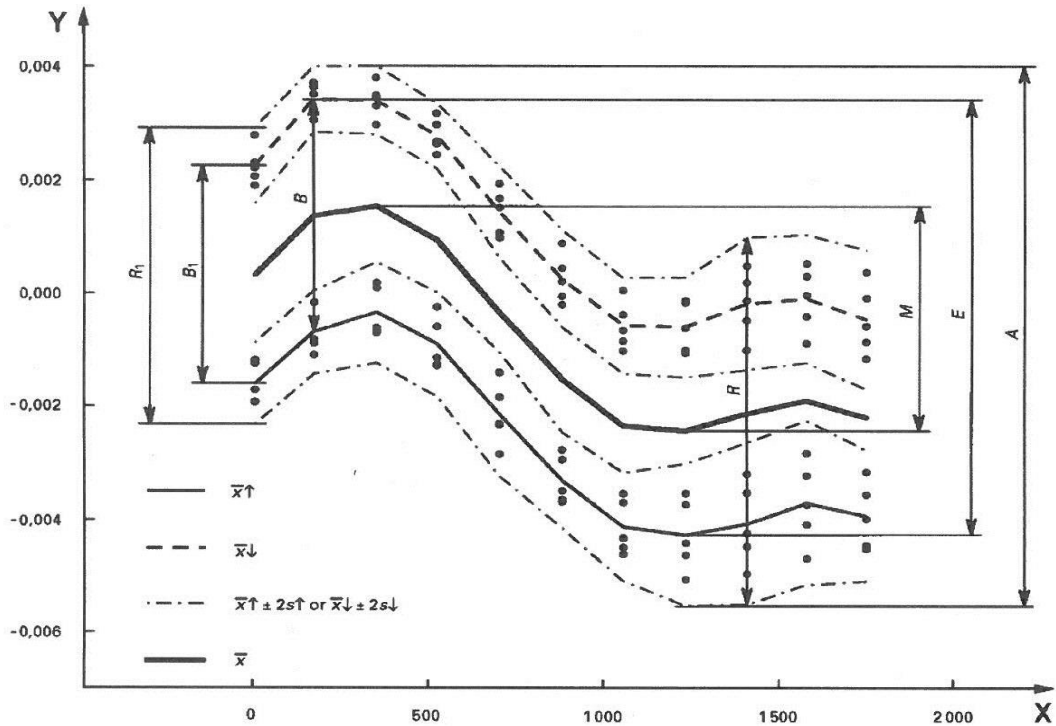
X poloha, mm

Y úchylka, mm

Obr. 8. Jednosměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [7]

**Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose R** – největší hodnota z opakovatelnosti nastavení polohy v kterékoliv poloze  $P_i$  podél nebo okolo dané osy

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



**Legenda**  
 X poloha, mm  
 Y úchylka, mm

Obr. 9. Dvousměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [7]

**Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose  $E \uparrow$  nebo  $E \downarrow$**  - rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednosměrných polohových úchylek při nastavování polohy v jednom směru  $\bar{x}_i \uparrow$  nebo  $\bar{x}_i \downarrow$  v jakékoliv poloze  $P_i$ , které byly zjištěny v kterékoliv poloze podél nebo okolo dané osy. [7]

$$E \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow] \tag{29}$$

a

$$E \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow] \tag{30}$$

**Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose  $E$**  – rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednosměrných polohových úchylek při nastavování polohy v obou směrech  $\bar{x}_i \uparrow$  nebo  $\bar{x}_i \downarrow$ , které byly zjištěny v kterékoliv poloze  $P_i$  podél nebo okolo dané osy.

$$E = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (31)$$

**Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose  $M$**  – rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných dvousměrných polohových úchylek  $\bar{x}_i$ , které byly zjištěny v kterékoliv poloze  $P_i$  podél nebo okolo dané osy.

$$M = \max. [\bar{x}_i] - \min. [\bar{x}_i] \quad (32)$$

**Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose  $A \uparrow$  nebo  $A \downarrow$**  - rozsah je odvozený ze spojení jednosměrných systematických úchylek a odhadu pro opakovatelnost při jednosměrném nastavení polohy při použití koeficientu rozšíření 2 (obrázek 8).

$$A \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2\bar{s}_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2\bar{s}_i \uparrow] \quad (33)$$

a

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

**Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose  $A$**  – rozsah odvozený ze spojení dvousměrných systematických úchylek a odhadu pro opakovatelnost při dvousměrném nastavení polohy při použití koeficientu rozšíření 2 (obrázek 9). [7]

$$A = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2\bar{s}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2\bar{s}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2\bar{s}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2\bar{s}_i \downarrow] \quad (35)$$

### 3.2 Koncové měrky

Pro koncové měrky platí norma ČSN EN ISO 3650 z roku 1999 „Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Etalony délky – Koncové měrky“. Koncové měrky zavedl do měřicí techniky poprvé koncem minulého století Švéd C.E.Johansson, podle něhož se původně nazývaly (měrky Johanssonovy).

Koncové měrky realizují určitou délku jako vzdálenost přesně broušených a lapovaných koncových ploch. Nejčastěji se používají měrky ve tvaru hranolků o průřezu 9x30 mm do jmenovité délky 10,5 mm a 9x35 mm nad 10,5 mm délky. Měřicí plochy jsou opracovány s vysokou přesností rozměrovou, drsností povrchu, rovinností a vzájemné rovnoběžností.

[8]

*Koncové měrky se používají:*

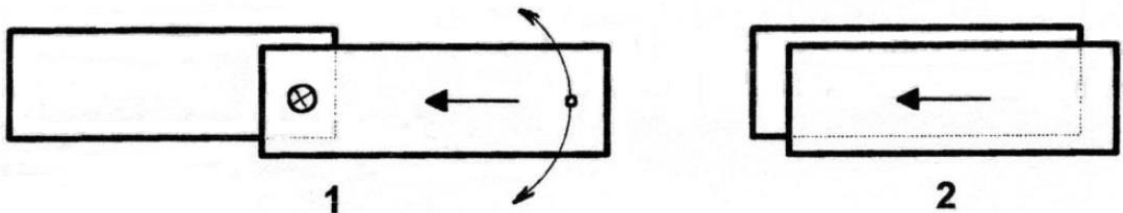
- jako etalony délky
- pro nastavování a ověřování měřicích prostředků
- na přímé ověřování délkových rozměrů průmyslových výrobků

Pro různé způsoby ověřování se jednotlivé měrky nebo bloky měrek doplňují příslušenstvím.

*Požadavky na materiál koncových měrek:*

- vysoká tvrdost
- odolnost proti korozi
- vysoká stabilita rozměr
- malý koeficient délkové roztažnosti
- dobrá nasávatelnost

Jednotlivé měrky je možno spojovat tzv. nasáváním. Očištěné plochy se částečně nasunou na sebe, za stálého tlaku, s případným komíháním se vytlačí vzduch mezi nimi, až začne působit přitažlivá síla molekul jednotlivých ploch (nasátí). Pak se tangenciálně posunou plochy tak, aby byly srovnány (obrázek 10).



*Obr. 10. Postup při nasávání měrek [8]*

Správně nasáté měrky s nepoškozenými funkčními plochami drží při sobě vlivem molekulových přitažlivých sil silou až 1000 N.

Chyba délky způsobená nepřesnostmi ve styku dvou měrek je  $0,1 \div 0,2 \mu\text{m}$ .

Chyba ve styku měrky s plochou stolku komparátoru apod. je  $0,2 \div 0,4 \mu\text{m}$ . [8]

*Používaný materiál:*

- V ČR se nejčastěji používá nástrojová ocel ČSN 19 422. Nevýhodou materiálu této oceli je malá odolnost proti korozi. Proto je nutné používat při práci s ocelovými měrkami rukavice a po ukončení měření provést vždy řádnou konzervaci, obzvláště funkčních ploch.
- Karbid wolframu (WC) - používá se pro svou vysokou tvrdost a otěruvzdornost jako koncové měrky v sestavách kalibrů.
- Oxid keramika, většinou zirkon oxid ( $ZrO_2$ ) - má vynikající vlastnosti, vysokou tvrdost a otěruvzdornost, stálost rozměru a hlavně 100 % odolnost proti korozi.

*Přesnost koncových měrek:*

ČSN EN ISO 3650 definuje 4 třídy přesnosti koncových měrek:

**K** – kalibrační,

**0** – používá se téměř výhradně pro etalony,

**1** – možno používat jako etalon i jako pracovní měřidlo,

**2** – „dílenské“ pro nastavování komparačních měřidel, kontrolu posuvných a mikrometrických měřidel apod.

*Koeficient teplotní délkové roztažnosti ocelových měrek:*

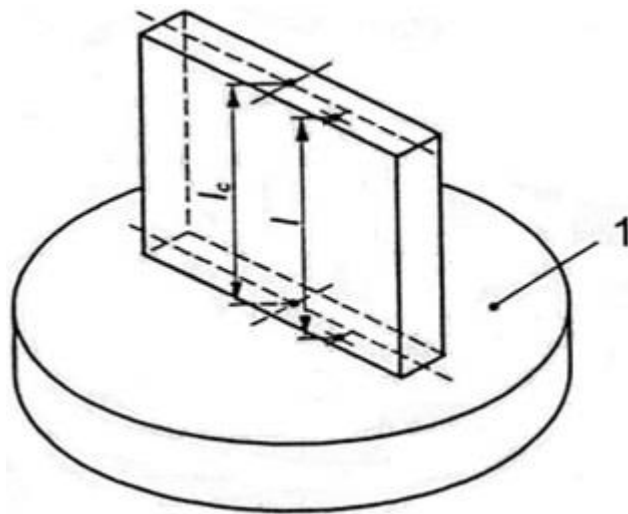
Udává platná norma  $(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  v rozsahu od  $10^\circ$  do  $30^\circ\text{C}$ . Koeficient teplotní délkové roztažnosti musí být dodán s koncovými měrkami včetně odhadu jeho nejistoty pro měrky z oceli i měrky z jiných materiálů.

### **3.2.1 Definice koncových měrek dle ČSN EN ISO 3650**

*Koncová měrka* - ztělesněná míra pravoúhlého průřezu, vyrobená z materiálu odolného proti opotřebení s jedním párem rovinných, navzájem rovnoběžných měřicích ploch, které mají schopnost přilnout k měřicím plochám jiných měrek nebo pomocným rovinným destičkám.

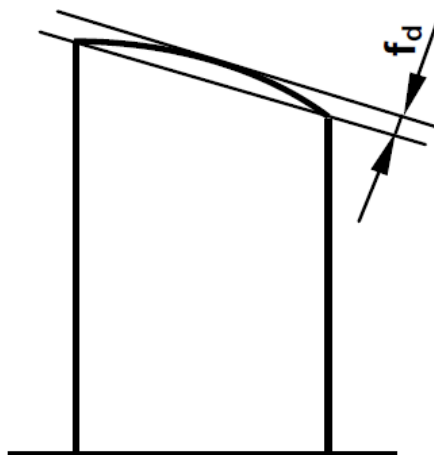
*Délka koncové měrky  $l$*  - kolmá vzdálenost určitého bodu měřicí plochy měrky a plochy pomocné rovinné destičky ze stejného materiálu a se stejnými povrchovými vlastnostmi, na kterou je druhá měřicí plocha měrky přilnuta nasunutím (obrázek 11). [8]

*Středová délka koncové měrky  $l_c$*  - délka koncové měrky ze středu volně přístupné měřicí plochy (obrázek 11).



*Obr. 11. Koncová měrka přilnutá na pomocné rovinné destičce 1. [8]*

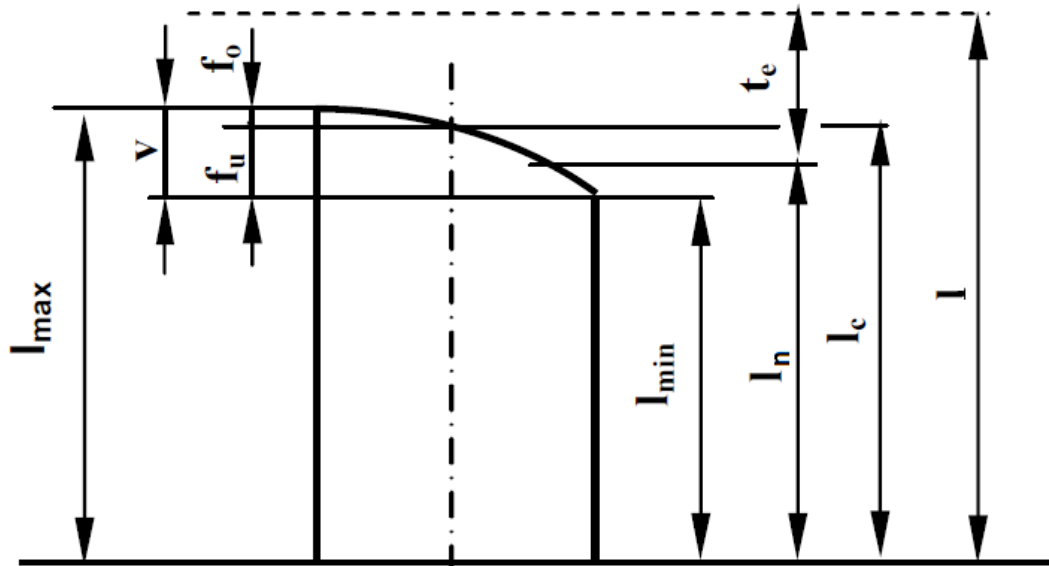
*Úchylka rovinnosti  $f_d$*  - nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými plochami, mezi kterými leží body měřicí plochy (obrázek 12). Takto definovaná úchylka rovinnosti se u funkčních ploch koncových měrek nevyhodnocuje. Přesnost roviny těchto ploch se vyhodnocuje kvalitativně pomocí optických planparalelních skel. [8]



*Obr. 12. Úchylka rovinnosti  $f_d$  [2]*

Rozpětí délek  $v = l_{max} - l_{min}$ , rozdíl mezi největší délkou koncové měrky  $l_{max}$  a nejmenší délkou  $l_{min}$  (obrázek 13). Rozpětí délky je rovno součtu úchylek  $f_o$  a  $f_u$  od středové délky  $l_c$ . Těchto parametrů se však při kalibraci koncových měrek běžně nepoužívá.

Úchylka délky  $t_e$  od jmenovité délky  $l_n$  v libovolném bodě - algebraický rozdíl  $l - l_n$ .



Obr. 13. Základní parametry koncové měrky [2]

### 3.2.2 Kalibrace koncových měrek

*Vizuální kontrola* - kontroluje se především stav funkčních ploch. Norma připouští malé škrábance na funkčních plochách, pokud tato plocha vyhoví při zkoušce přilnavosti.

*Zkouška přilnavosti* je schopnost měřicích ploch koncových měrek přilnout k ploše sousední měrky. Zkouší se pomocí optické destičky, která musí mít zajištěnou úchylku rovinnosti max.  $0,1 \mu\text{m}$ .

*Kontrola rovinnosti funkčních ploch.* Používá se kvalitativní metoda s použitím planparalelního skla, ke kterému přilne kontrolovaná funkční plocha. V případě nerovnosti vzniká mezi sklem a měrkou světelný klín, ve kterém při vzdálenosti větší jak  $0,3 \mu\text{m}$  ( $\mu/2$ ) vznikají interferenční čáry. Přesnost funkčních ploch je řádově vyšší, norma definuje:

- třída přesnosti **K** a **0** - nesmí být vidět barva
- třída přesnosti **1** a **2** - připouští barevné stíny [8]

*Kontrola délky a rozpětí délek*

- Měrky třídy přesnosti K a 0

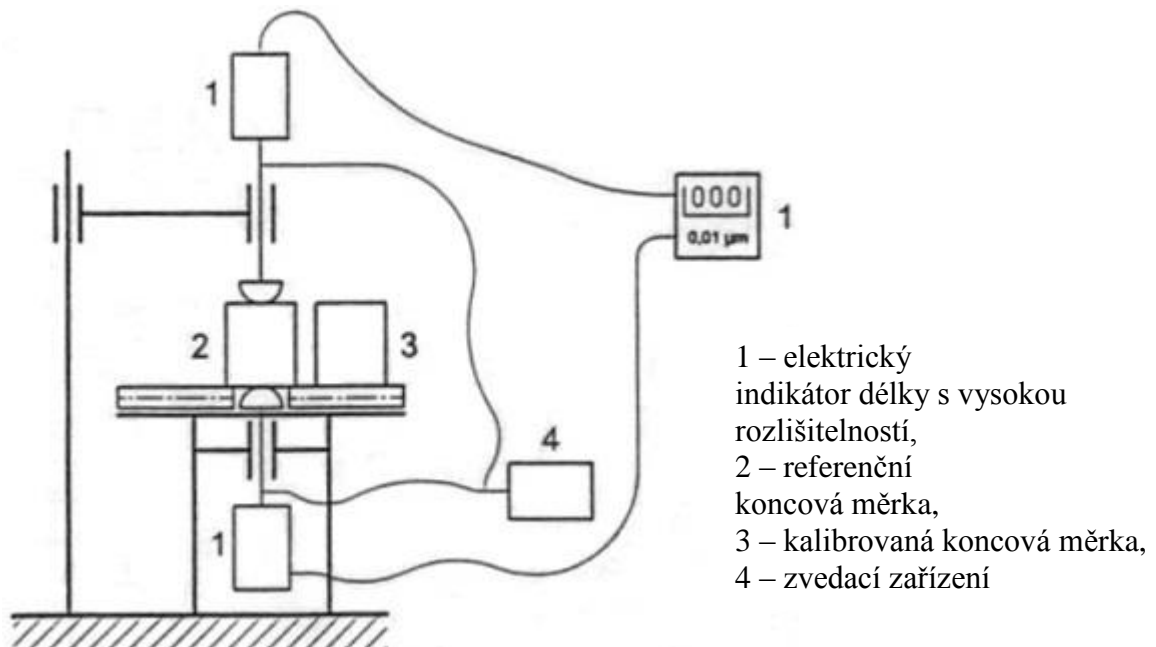
Kalibrace se provádí v souladu s definicí délky měrky jako vzdálenosti bodu na horní ploše od přesné destičky ze stejného materiálu jako měrka přilnutá ke spodní ploše. Jako etalon se používá stabilizovaný laserinterferometr, nebo interferenční komparátor.

- Měrky třídy přesnosti 1 a 2

Menší přesnost těchto měrek umožňuje použití méně přesné komparační metody. Na rozdíl od definice délky dle normy se komparační metodou kontroluje vzdálenost protilehlých bodů funkčních ploch. Jako etalonu se používá měrka stejné jmenovité hodnoty třídy přesnosti minimálně o jeden řád vyšší.

Schéma komparačního zařízení je na obrázku 14. Snímání úchylek délky se provádí pomocí dvou indukčních snímačů proti sobě (rozdílovým způsobem), které mají rozlišitelnost  $0,01 \mu\text{m}$ .

Kalibrační list musí obsahovat výsledky měření, zejména středovou délku koncové měrky  $l_c$  nebo úchylku středové délky od jmenovité délky  $l_c - l_n$ , odhadnuté nejistoty měření a návaznost. [8]



Obr. 14. Příklad zařízení pro porovnávací měření měrek - komparátor pro koncové měrky se jmenovitou délkou do 100 mm [8]



## 4 LASEROVÁ INTERFEROMETRIE

Interferometr je přístroj pro velmi přesná měření, jehož princip je založen na interferenci světla. Interferometry se používají k měření délek (pak se nazývají interferenční komparátory), k určení indexů lomu u plynů a u kapalin (pak se nazývají interferenční refraktometry) a k určení jemné struktury spektrálních čar (pak to jsou interferenční spektroskopy). [9]

### 4.1 Základní vlastnosti světelného paprsku laseru

Jedná se o zesilování světla stimulovanou emisí záření. Světelný svazek vystupující z laseru si můžeme představit jako světelnou vlnu se sinusovým průběhem.

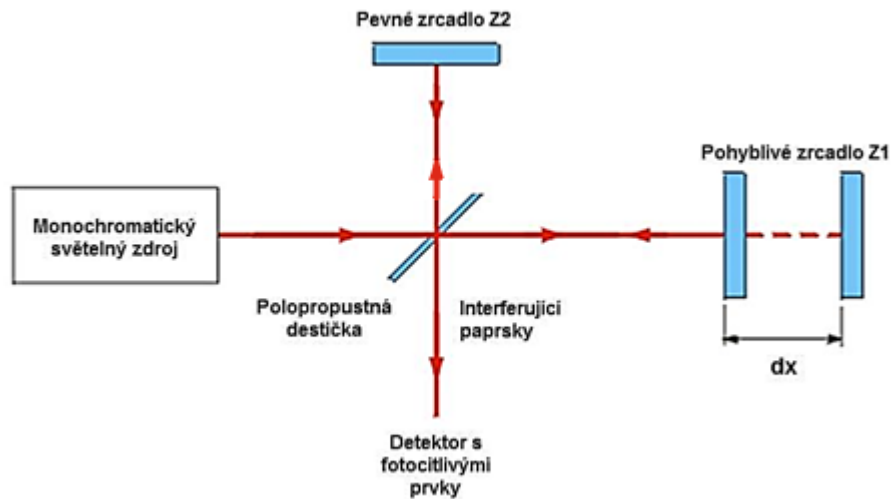
Světelná vlna vystupující z laseru má tři základní vlastnosti:

- Vlnová délka záření je relativně přesně známá a dovoluje provádět relativně přesná měření
- Vlnová délka je velmi malá a umožňuje měřit s vysokým rozlišením
- Všechny světelné vlny mají stejnou fázi a umožňují vznik interference (skládání světelných paprsků)

#### 4.1.1 Princip Michelsonova interferometru

Nejstarší druh interferometru, který v roce 1881 navrhl a sestavil Albert Abraham Michelson.

Paprsek monochromatického světla vychází ze zdroje a dopadá na slabě postříbřenou polopropustnou destičku nastavenou pod úhlem  $45^\circ$  ke směru paprsku. Paprsek se na destičce rozdělí na dva navzájem kolmé paprsky. Paprsek prošlý destičkou dopadá na zrcadlo Z1 (pohyblivé), paprsek odražený dopadá na zrcadlo Z2 (fixní). Po odrazu na zrcadlech se oba paprsky opět vrátí na polopropustnou destičku, kde se opět rozdělí. Část paprsků se vrací do zdroje (nezakresleno) a část paprsků postupuje směrem k detektoru s fotocitlivými prvky, kde se detekuje interference paprsků. Maximum odpovídá světlému interferenčnímu proužku, minimum tmavému interferenčnímu proužku. Počet interferenčních proužků prošlých přes šterbinu fotodetektoru, je mírou změny délky  $d_x$  (obrázek 15). [10]

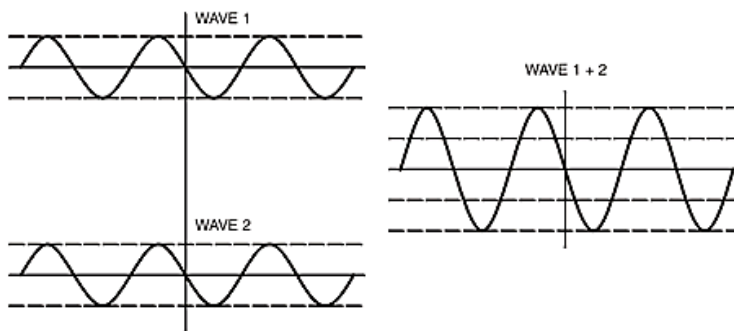


Obr. 15. Princip Michelsonova interferometru [10]

### 4.1.2 Konstruktivní a destruktivní interference

Interference (interferenční jev) znamená vzájemné ovlivňování, prolínání nebo střetání jevů či hmoty. Nejčastěji se jedná o charakteristickou vlastnost vln. Při jejich pohybu a prolínání se v určitém bodě vzájemně zesilují, zatímco v jiných bodech vzájemně ruší. Tyto jevy se zobrazují pomocí interferenčního obrazu (interferenčního obrazce), kde je vidět střídající se projevy zesilování a zeslabování. [10]

*Konstruktivní interference:*

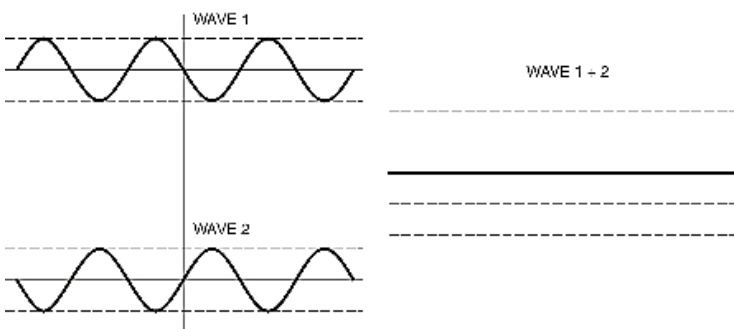


$$\zeta_1 - \zeta_2 = k\lambda$$

Pro  $k = 0, 1, 2, \dots, n$

Kde  $\zeta_1 - \zeta_2$  je fázový rozdíl mezi vlnami 1 a 2

*Destruktivní interference:*



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

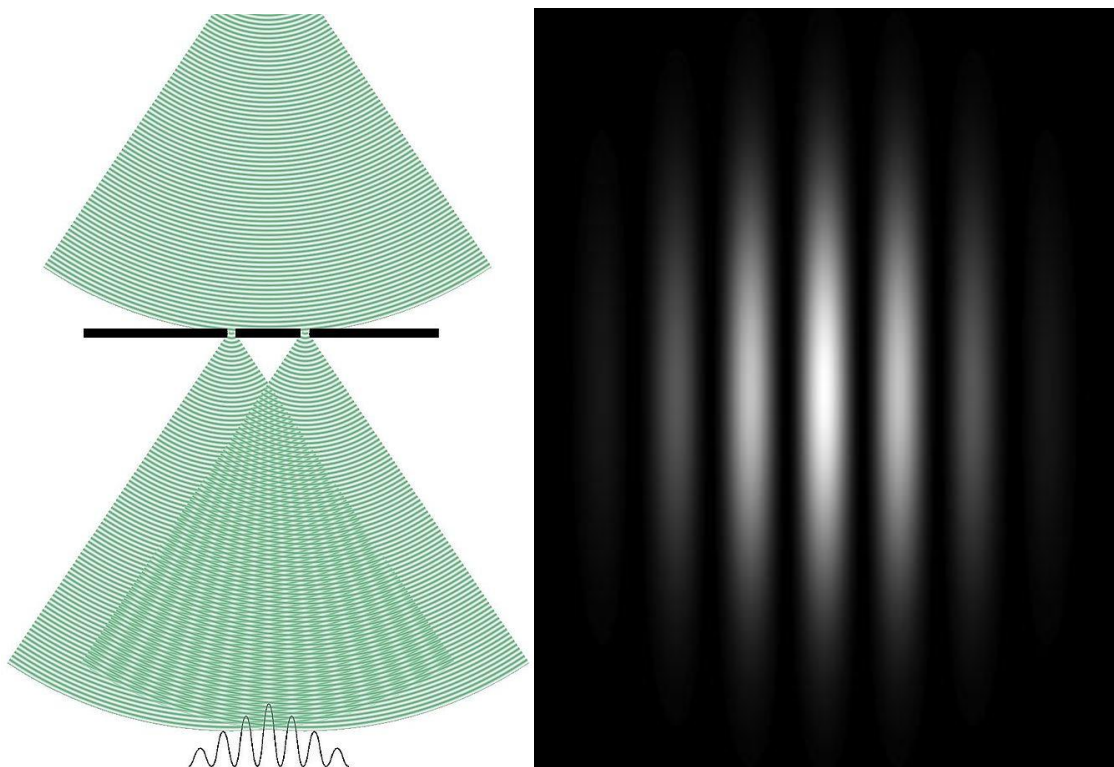
Pro  $k = 0, 1, 2, \dots, n$

Kde  $\zeta_1 - \zeta_2$  je fázový rozdíl mezi vlnami 1 a 2

### 4.1.3 Youngův pokus

Youngův experiment (též dvojštěrbinový experiment (angl. double slit experiment)) je pokus, kterým Thomas Young v roce 1801 experimentálně prokázal, že světlo je vlnění.

Svazek rovnoběžného monochromatického záření dopadá na dvojštěrbinu (dvojice paralelních, úzkých, blízko sebe ležících štěrbin). Vlna, která dopadne, se při průchodu štěrbinami rozdělí na dvě (kmitající ve fázi tzn. jejich dráhový rozdíl je násobkem vlnových délek), které spolu interferují a na stínítku umístěném za štěrbinami vytvářejí interferenční obrazec (obrázek 16).



Obr. 16. Průchod vlnění dvojštěrbinou a pozorovaný obraz po průchodu paprsku [11]

Pokud na dvojštěrbinu vysíláme jednotlivé fotony jeden za druhým, vzniká taktéž interferenční obrazec, jakoby foton procházel oběma štěrbinami současně a interferoval se sebou samým. [11]

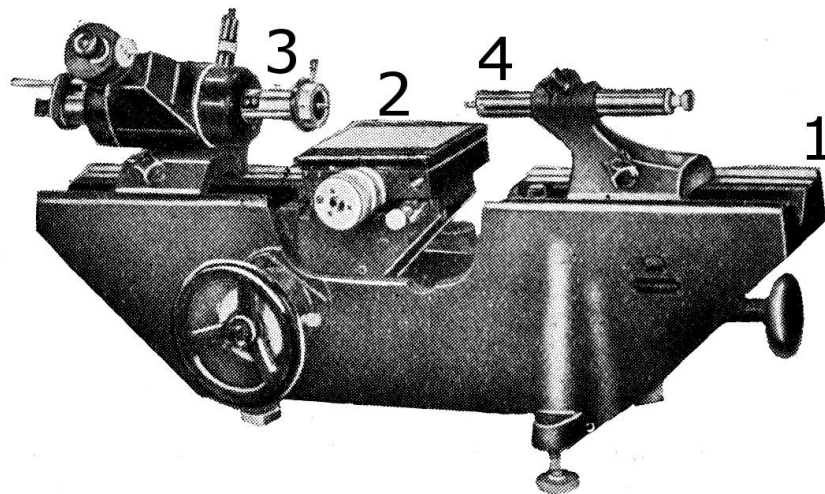
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 HORIZONTÁLNÍ DÉLKOMĚR ZEISS ULM 450

Univerzální délkoměry mají velké využití hlavně ve strojírenství ke kalibraci pevných měřidel jako průměrové kalibry vnitřní i vnější, délkové kalibry, kalibry závitové, dále také ke kalibraci etalonů apod.

### 5.1 Popis přístroje

Univerzální dotykový délkoměr německé firmy Carl Zeiss Jena (obr. 17) se skládá z lože (1), předmětového stolku (2), měřicí hlavice (3) a koníku (4). Předmětový stůlek má veškeré pohyby k exaktnímu měření různých geometrických tvarů součástí. Měřicí hlavice se skládá z měřicí pinoly, lehce pohyblivé na kuličkových lůžkách, se zabudovaným měřítkem délky 100 mm, z odečítacího spirálového mikroskopu, osvětlovače a závaží k nastavení konstantního měřicího tlaku. Měřicí zařízení je uloženo na robustním litinovém loži, dobře tlumícím vibrace. Pro měření rozměrnějších těžších těles je délkoměr vybaven ruční kompenzací hmotnosti.



Obr. 17. Univerzální délkoměr firmy Carl Zeiss Jena [12]

Spirálový mikroskop má v okuláru viditelné dvě destičky: otočnou a pevnou. Na otočné destičce je desetichodá Archimédova spirála jejíž stoupání je 0,1 mm. Otočná destička je uložena excentricky k optické ose mikroskopu, takže v zorném poli okuláru mikroskopu vidíme pouze její část, která se nám jeví jako soustava soustředných kruhů. Dále je na otočné destičce kruhová stupnice ke čtení setin a tisícin milimetru, rozdělená na 100 dílků. Jeden dílek této stupnice, jehož zdánlivá velikost v mikroskopu je 6 mm, představuje hodnotu 1 $\mu$ m. Na pevné destičce je stupnice, na které se čtou desetiny milimetru. [12]

Pohybem točítka se dvojitá čárka libovolného chodu spirály nastaví na čárku milimetrové stupnice měřítka, která je vidět v zorném poli okuláru. Měřená hodnota se pak zjistí z dílčích čtení. V současnosti se v průmyslu univerzální délkoměr Zeiss používá zpravidla v digitalizovaném provedení. [12]

Přesnost je nejméně (spíše větší)  $\pm 2 \mu\text{m}$  pro délky do 100 mm. Lze zvýšit pomocí opravných koeficientů, které jsou přiloženy ke každému délkoměru.

Měření se provádí pomocí pevného a pohyblivého doteku. Poloha pohyblivého doteku je odečítána pomocí mikroskopu na skleněné přesně ryté stupnici. Přístroj je vybaven rozmanitým příslušenstvím umožňujícím měření vnitřních a vnějších rozměrů, závitů, měřením rozdílů rozměrů. Přímé měření je možné do 100 mm. Větší rozměry je možné měřit kombinací přímého a nepřímého měření. Podrobný návod na práci s délkoměrem je uveden v dílenském návodu od firmy Carl Zeiss Jena.

Odečítání se provádí mikroskopem prostřednictvím tří stupnic: milimetrové, desetinové a speciální odečítací spirály s mikronovým dělením (obr. 18).

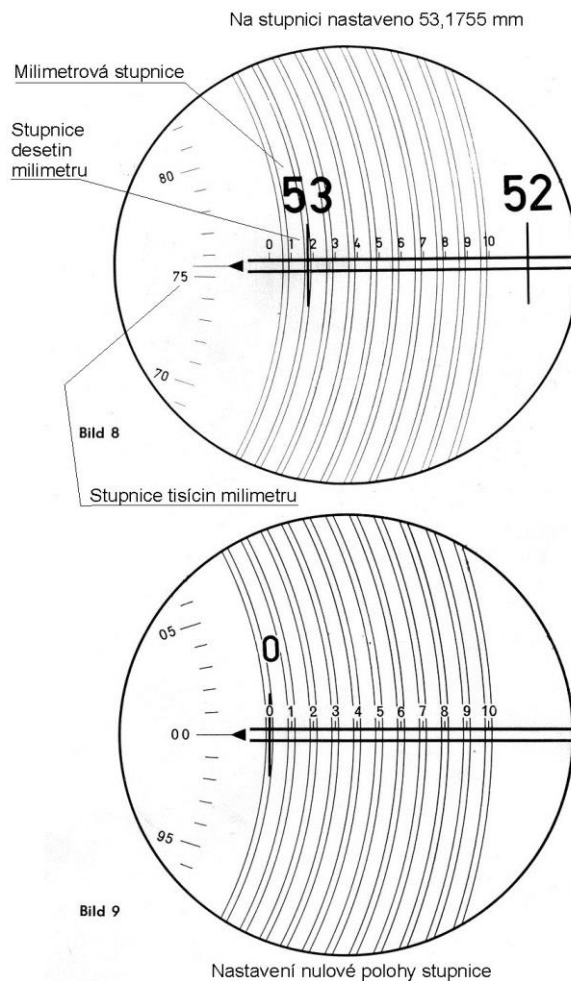
Pro přesná a spolehlivá měření v submikronové oblasti je nutno přístroj přesně vypořadovat do vodorovné polohy. Stačí pohyb obsluhy přístroje a pružná podlaha laboratoře měření vykoná své. Přesto se budeme snažit o vodorovnou polohu přístroje.

Dále je potřeba dbát na kompenzaci délkové roztažnosti těles. Například pouhopouhý krátký dotek měřky délky 100 mm holou rukou způsobí prodloužení o 3 až 5  $\mu\text{m}$ . Proto se používání rukavic, dříve se doporučovaly jelenicové nebo asbestové, dnes se spokojíme s tím, co máme, není to módní výstřelek, ale opatření diktované dvěma důvody: 1. přesnost měření, 2. pot je agresivní a způsobuje korozi a znehodnocování například koncových měrek, což jistě nechceme. [13]

### 5.1.1 Základní postup měření délek do 100 mm

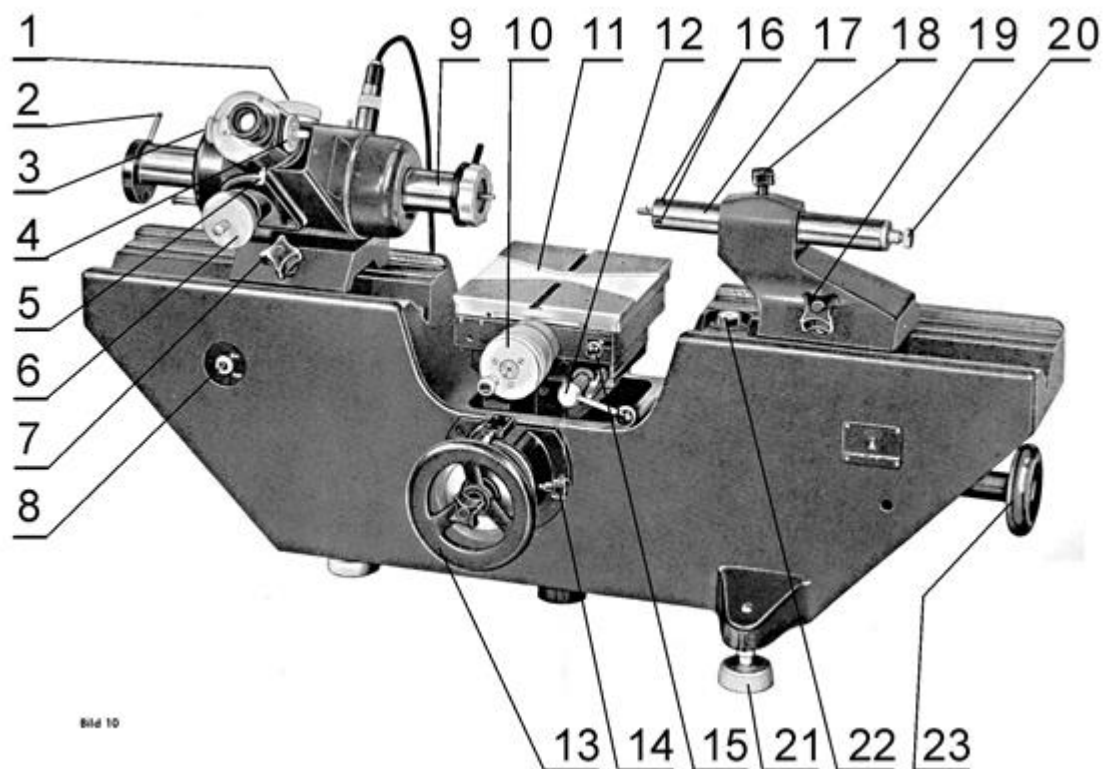
- 1) Nastavení stupnice na nulu (obr. 18). Vypínačem (7) zapneme osvětlení mikrometrické stupnice. Pohyblivou pinolu (9) vysuneme vpravo do krajní polohy. Pevnou pinolu (17) po uvolnění aretačního šroubu (19) posuneme tak, aby se dotýkala pohyblivé pinoly. Pevnou pinolou můžeme pohybovat po uvolnění objímky (18) ve vodícím pouzdře. K jemnému doladění je připraven šroub (20). Rovnoběžnost roviných doteků pinoly seřídíme šrouby (16). [13]

- 2) Otáčíme jimi tak, abychom docílili nejmenší výchylky na měřicí stupnici (podobný princip, jako hledání průměru při měření úchylkoměry). Šroubem (3) nastavíme desetinnou stupnici na nulu (svislá ryska je uprostřed dvojité spirály na nule desetinné stupnice). Šroubem (4) nastavíme mikronovou spirálu na hodnotu 0. Tím je nastavení nulové hodnoty hotové. Ještě zkontrolujeme, zda je vše co má být zajištěno opravdu utaženo. Šrouby (7), (18), (19).



Obr. 18. Odečítací stupnice Abbeho délkoměru [13]

- 3) Šroubem (13) zvedneme měřicí stůl (11) do pracovní polohy a ustavíme jej do vodorovné polohy. Odsuneme pohyblivou měřicí pinolu a měřené těleso uložíme na měřicí stůl. Pomocí mikrometrického šroubu (10) přesně vypořohujeme měřené těleso. Přisuneme měřicí pinolu. Zkontrolujeme oba doteky, pevný a pohyblivý. Mikrometrickým šroubem nastavíme dvojitou spirálu do středu svislé rysky. Odečteme naměřené hodnoty, viz obr. 18. [13]



Obr. 19. Popis jednotlivých částí přístroje [13]

Přesnost měření Abbeho délkoměrem ( $L$  je měřená délka v m):

Při použití oblého dotyku:  $\pm \left( 1,5 + \frac{L}{100} \right) [\mu\text{m}]$

Při použití pevného dotyku:  $\pm \left( 1,8 + \frac{L}{100} \right) [\mu\text{m}]$

Při použití pomocných ramen  $\pm \left( 2 + \frac{L}{100} \right) [\mu\text{m}]$  nebo magického oka. [13]

### 5.1.2 Modernizace přístrojů pro měření délky

Nákup nového přístroje – délkoměru, měřicího mikroskopu anebo profilprojektoru – představuje výdaj řádově statisíců až milionů korun. Starší, ale mechanicky dosud kvalitní přístroj lze modernizovat v cenové hladině desítek tisíc korun. Výsledek měření získaný s použitím staršího „digitalizovaného“ přístroje je přitom rovnocenný výstupu z nového zařízení. Přístroj, který bude modernizován, nemusíte nutně vlastnit: repasovaný přístroj (mikroskop, délkoměr) lze dodat podle požadavků a potřeb uživatele. Názornou ukázkou výhodnosti modernizace je úprava staršího délkoměru Carl Zeiss Jena ULM 450. [14]



Původní optická stupnice přístroje je nahrazena optoelektronickým odměřovacím systémem firmy Numerik (dříve Zeiss), připojeným k digitální indikaci Axoflex. Naměřené hodnoty se zobrazují na zobrazovacím panelu nebo monitoru PC a odpadá jejich pracné odečítání v mikroskopu. Řešení má tyto přednosti:

- jemnější krok měření ( $0,1 \mu\text{m}$ ) při zachování Abbeho principu;
- čtecí hlavice snímače je zabudována uvnitř délkoměru, takže funkce i měřicí rozsah přístroje zůstávají zachovány. [14]

Na obrázku 20. vidíme další příklad modernizace přístroje ULM 450 rumunskou firmou METROMAT.



Obr. 20. Zdigitalizovaný délkoměr Zeiss ULM 450 [15]

Např. také česká firma DEOM nabízí modernizaci manuálních měřicích přístrojů, jako jsou mikroskopy, délkoměry a jiné i speciální přístroje, které vybavují moderní elektronikou, inkrementálními měřítky, indikací a provádí připojení k PC. Původní optická stupnice odečítaná mikroskopem je nahrazena optoelektronickým snímačem s rozlišením až  $0,00005 \text{ mm}$ , který je zabudován přímo do měřicí hlavice nebo do vedení. Odpadá únavné odečítání souřadnic pomocí spirálovitých stupnic a jejich přepočítávání. Měřicí rozsah, tvar i funkce přístrojů zůstávají zachovány. [16]

Firma rovněž dodává několik typů grafického software pro snadnou obsluhu. Užitek této služby je mimořádný - přístroje a jejich úpravy jsou cenově dostupné a mají velmi dobré užité vlastnosti.

Software COMPARATOR je určen pro 1D měřicí přístroje – délkoměry. Má názorné grafické zobrazení měřicí stupnice, po které se pohybuje záměrná ryska. Tato ryska ukazuje okamžitou polohu doteku délkoměru na stupnici a navíc při svém pohybu před sebou "tlačí" značky Maxima nebo Minima a při změně směru pohybu tyto značky zanechává v místě stupnice, kterého již bylo dosaženo. Tím je dosažené maximum či minimum současně vyjádřeno číselně i znázorněno graficky. Tato charakteristika umožňuje velmi jednoduché vyhledávání vratných bodů. Záznam hodnot a jejich export např. do Excelu je samozřejmým doplňkem. Software umožňuje zavést nelineární korekci naměřených hodnot. [16]

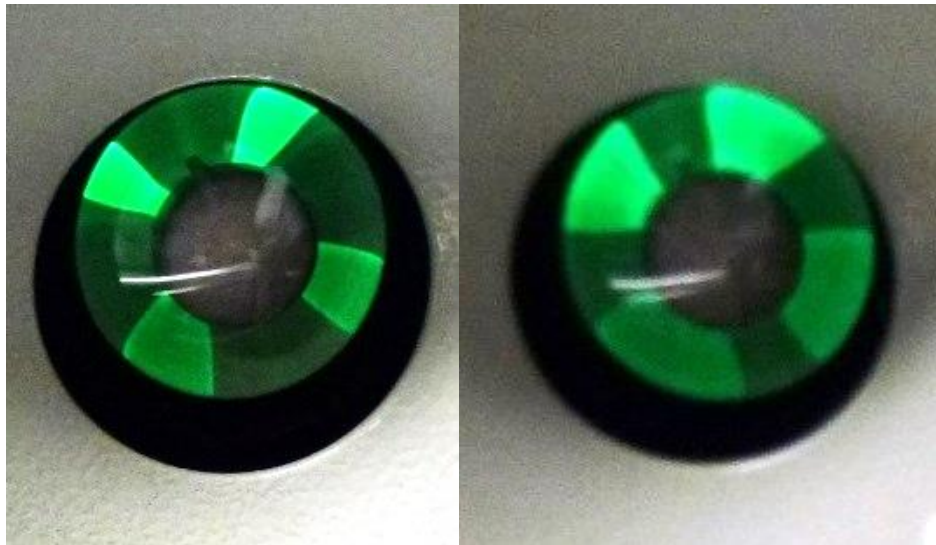


Obr. 21. Software COMPARATOR 6. [16]

## 5.2 Magické oko

Kromě osvětlení optiky délkoměru Zeiss klasickou žárovkou, je na přístroji použit ještě jeden elektrický prvek a tím je takzvané „magické oko“, které slouží k indikaci správného fyzického spojení měřících dotyků s měřeným (kovovým) objektem. Magické oko je v podstatě druh elektronky, který se používal v elektronických přístrojích od poloviny 30tých let do konce 60tých let 20. století k indikaci velikosti signálu. Obvykle se jedná o triodu, v které je umístěno stínítko se zeleně svítícím luminoforem. Princip spočívá v tom, že elektrony vylétající z katody jsou vychylovány pomocnou elektrodou a tím se mění obraz na stínítku.

Na obrázku 22. je názorně vidět vzhled magického oka bez kontaktu a při kontaktu s měřeným objektem.



*Obr. 22. Magické oko na délkoměru*

Protože řešení indikace magickým okem je již zastaralé a přináší řadu nevýhod, jakými jsou špatná funkčnost a také dostupnost elektronky při poruše, pokusili jsme se tento způsob indikace nahradit modernějšími prostředky. Použili jsme elegantního řešení v podobě LED indikátoru kovového spojení od firmy Mitutoyo (obr. 23), kdy nám k indikaci správného kontaktu doteků s měřeným objektem slouží červená svítivá dioda. Tento typ indikátoru funguje bez problémů, nepotřebuje síťové napájení a je také přenositelný, takže ho může používat pro různé aplikace.



*Obr. 23. Indikátor kontaktu Mitutoyo*

## 6 ZPROVOZNĚNÍ PŘÍSTROJE

Horizontální délkoměr firmy Carl Zeiss Jena, typ ULM 450 byl nalezen v částečně rozloženém stavu, takže následovala mravenčí práce dostat jej do provozuschopného stavu.

### 6.1 Mechanická oprava

Mezi hlavní úkony opravy patřilo zprovoznění nejdůležitější části délkoměru, kterou je vedení (pinola) měřicí hlavice. Pinola je původně uložena posuvně v šesti bodech valivých kuličkových ložiscích č.609 (obr. 24). Ložiska byla z neznámých důvodů vymontována, takže jsem se je pokusil nahradit novými, ale s požadovanou velkou přesností jsem je nikde nesehnal. Původní ložiska jsem podrobil leštění, čištění a mazání. Všech šest bylo opět použitelných.



Obr. 24. Ložiska vedení hřídele před a po renovaci

Ještě před uložením hřídele do ložisek se musela také provést renovace speciálních excentrických šroubů a matic (obr. 25), které určují polohu a axiální přesnost pinoly měřicí hlavice. Konstrukční výkresy obou součástí jsou v příloze DP.



Obr. 25. Nosné excentrické šrouby ložisek vedení

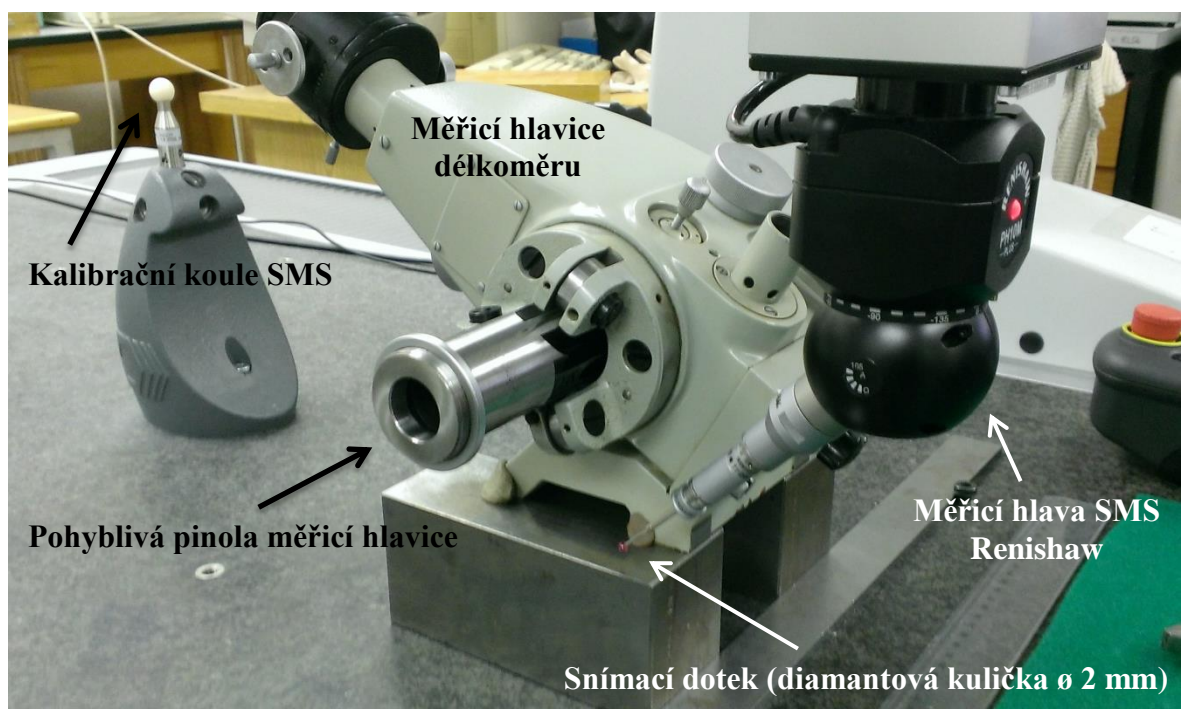
Před konečným sestavením jednotlivých částí délkoměru (hlavně tedy měřicí hlavy) se provedlo také nespočet drobných oprav, ať už mechanických nebo kosmetických (např. tmelení, lakování, černění apod.).

Následně jsme již mohli přistoupit k hlavnímu úkonu, tedy předběžným uložením pinoly do ložisek a pak postupným současným pootáčením všech šesti excentrických šroubů jsme museli dosáhnout 3 důležitých kritérií:

- 1) Vymezit vůli mezi ložisky a pinolou
- 2) Nastavit přesně stanovené hodnoty v ose X a Z
- 3) Vyladit osy X a Z pinoly vůči základnám

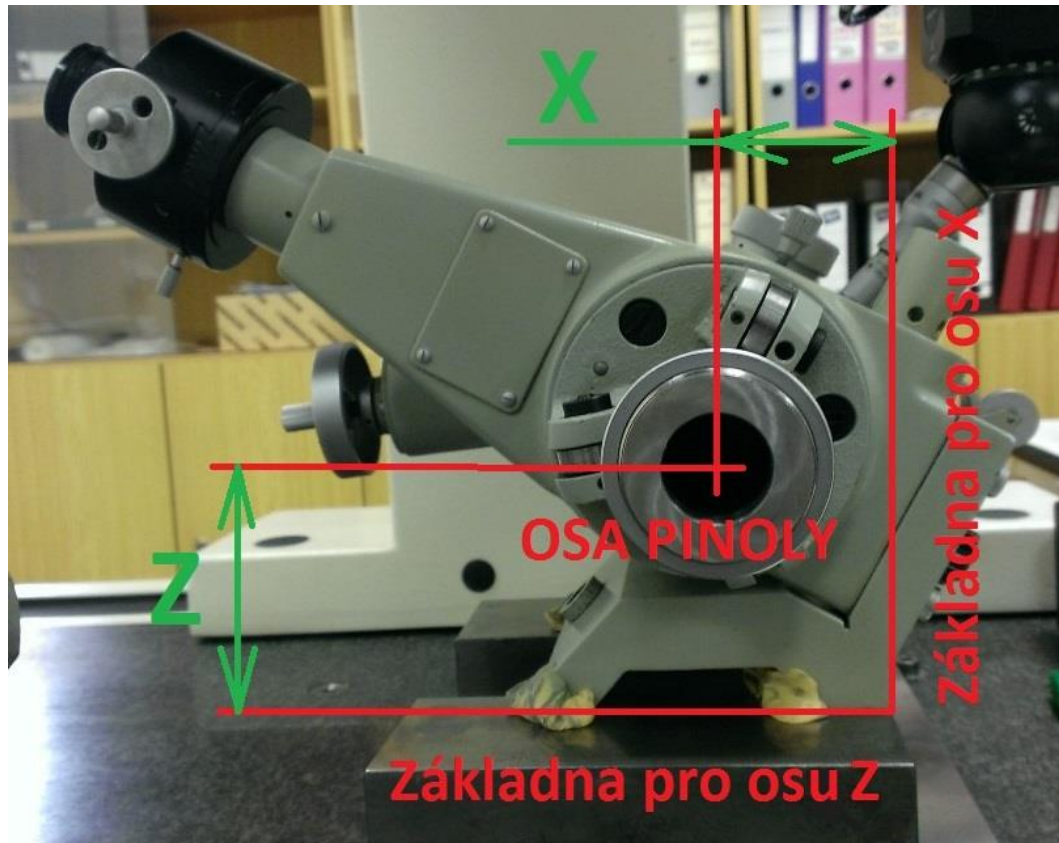
## 6.2 Seřízení hřídele měřicí hlavice

Seřizování probíhalo na přesném 3D měřicím stroji GLOBAL italské firmy DEA v laboratorních podmínkách centrální měřové laboratoře firmy Česká zbrojovka, Uherský Brod.

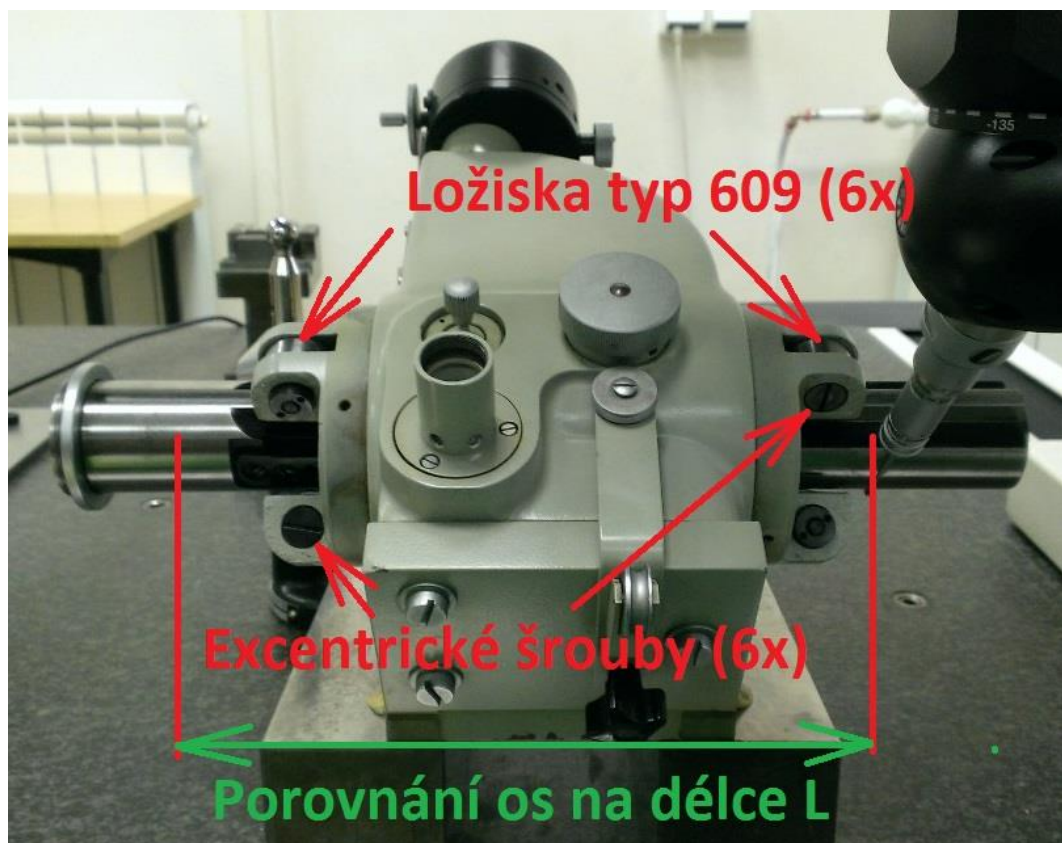


Obr. 26. Sestava měřicí hlavice délkoměru na 3D SMS

Nejprve se provedlo základní vyrovnání ve dvou osách a následovalo doměřování válcových ploch pinoly. Po několika pokusech ladění excentrickými šrouby bylo zjištěno, že takovýto postup bude velmi časově náročný, proto byl pro doměřování polohy osy pinoly vytvořen měřicí program, který po spuštění sám vše potřebné proměří a vyhodnotí. Na obrázcích 27. a 28. vidíme zvolené parametry pro měření a konečné vyladění nejdůležitější části horizontálního délkoměru.



Obr. 27. Základny a osy X, Z



Obr. 28. Měření na délce L a popis nastavovacích prvků

Na obrázku 29. vidíme výpis z měřicího software PC-DMIS, kterým je 3D měřicí systém vybaven. Celý měřicí program ve zdrojovém kódu a s popisem se nachází v příloze DP. Z naměřených výsledků je patrné, že jsme dosáhli velmi dobrých výsledků naladění pohyblivé pinoly, jak proti základním plochám, tak proti oběma stranám hřídele. Rozdíl oproti nominálním hodnotám  $X=50$  mm a  $Z=90$  mm nebyl větší než  $6\ \mu\text{m}$  na délce  $L=250$  mm! Vůle na ložiscích je neměřitelná a pinolou se dá axiálně posunovat volně bez odporu.

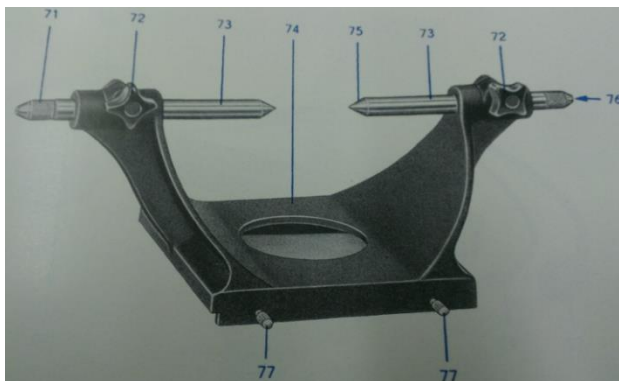
pc-dmis		PART NAME : PINOLA		listopadu 13, 2013	18:02		
REV NUMBER :		SER NUMBER : DÉLKOMÉR		STATS COUNT : 1			
DIM LS= LOCATION OF CIRCLE KRUH1 UNITS=MM							
AX	MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL	
X	-50.001	-50.000	-0.001	0.010	0.010	0.000	----#----
Z	90.003	90.000	0.003	0.010	0.010	0.000	-----#----
D	37.889	37.900	-0.011	0.020	0.020	0.000	-#-----
DIM PS= LOCATION OF CIRCLE KRUH2 UNITS=MM							
AX	MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL	
X	-50.004	-50.000	-0.004	0.010	0.010	0.000	--#-----
Z	90.009	90.000	0.009	0.010	0.010	0.000	-----#
D	37.881	37.900	-0.019	0.020	0.020	0.000	#-----
DIM SOUSOST NA DÉLCE 25 CM= CONCENTRICITY FROM CIRCLE KRUH1 TO CIRCLE KRUH2 UNITS=MM							
AX	MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL	
M	0.014	0.000	0.014	0.020	0.000	0.000	-----#--

- naměřená hodnota  
 - nominální hodnota  
 - odchylka od nominální hodnoty  
 D = průměr pinoly [vše v mm]

Obr. 29. Výpis výsledků z měřicího programu

### 6.3 Uvedení přístroje do provozu

Po dalším důkladném očištění a opravě drobných oděrek měřicí hlavy a také koníku již byly tyto komponenty převezeny na fakultu technologickou UTB ve Zlíně, kde jsme provedli celkové sestavení délkoměru (upevnění na lože se stolkem). Zde bych ještě vzpomenul, že se mi čirou náhodou podařilo získat velmi důležitý komponent délkoměru, který chyběl v příslušenství přístroje (ustavovací hroty pro měření rotačních prvků viz obr. 30). Tento ležel spousta let nepoužíván na centrální měrové laboratoři CZUB a získal jsem ho pro náš projekt.



Obr. 30. Ustavovací hroty délkoměru

## 7 KALIBRACE DÉLKOMĚRU

V této kapitole se již budeme zabývat vlastní kalibrací délkoměru a k tomu nám dobře poslouží laserový interferometr XL-80 s příslušenstvím.

### 7.1 Laserový systém XL-80

Nový laserový systém XL-80 je navržen pro maximální mobilitu, přináší vyšší přesnost a podstatně zlepšené parametry dynamického měření. Systém je rychlejší, snáze se používá, ale přitom si zachoval výhody čistě interferometrického systému, osvědčené technologie, díky které firmy na celém světě dávají přednost laserovým systémům společnosti Renishaw. [17]



Obr. 31. Laserový systém XL-80 [17]

#### 7.1.1 Laserová hlavice XL-80

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

Stabilita frekvence vyzařované vlnové délky je  $\pm 0,05$  ppm za 1 rok a  $\pm 0,02$  ppm za 1 hodinu. Těchto vynikajících hodnot je dosaženo dynamickou teplotní stabilizací délky laserové trubice v řádu několika málo nanometrů. Zaručená přesnost lineárního měření je  $\pm 0,5$   $\mu\text{m/m}$  v celém rozsahu podmínek prostředí, tj. při teplotě  $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $32\text{ }^{\circ}\text{F} - 104\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) a tlaku  $650\text{ mbar} - 1150\text{ mbar}$ . Systém čte hodnoty s frekvencí  $50\text{ kHz}$  i při maximální rychlosti lineárního měření  $4\text{ m/s}$ . Dosahované lineárním rozlišením  $1\text{ nm}$  je zachováno v celém rozsahu rychlostí měření. [17]



Protože systém XL využívá interferometrie při všech druzích měření (nejen při lineárním), můžete důvěřovat přesnosti naměřených dat. Laser XL má zabudovaný USB port a nepotřebujete tedy samostatný interface laser - PC. Laserová hlavice je standardně vybavena konektorem s výstupem pomocného analogového signálu. Z výroby je možno nastavit i výstup obdélníkového signálu. Je také možno připojit signál pro synchronizaci snímání dat. Signalizační LED diody ukazují stav stabilizace laseru a sílu signálu. Tyto diody také slouží jako podpora softwarových informačních návěstí. Díky uvedenému vybavení, době stabilizace kratší než 6 minut a možnosti přepnutí do režimu velkého dosahu (40 m – 80 m) se systém XL-80 snadno a rychle používá.



Obr. 32. Laserová hlavice XL-80 [17]

Tab. 2. Technické parametry laserové hlavice XL-80 [17]

Přesnost kmitočtu	$\pm 0,05 \mu\text{m}/\text{m}$
Přesnost lineárního měření	$\pm 0,5 \mu\text{m}/\text{m}$
Měřicí rozsah	0 až 80 metrů
Rozlišení	1 nm (i při max. rychlosti)
Maximální rychlost posuvu	$\pm 4,0 \text{ m/s}$
Pracovní teplota	0 °C až 40 °C
Provozní vlhkost	0% - 95% nekondenzující
Hmotnost	1,85 kg
Rozměry	214 mm × 120 mm × 70 mm
Napájení	Vnější, 90 VAC – 264 VAC, automatická detekce napětí
Laserový zdroj	Helium-neonový (HeNe) laser (CLASS II)
Výkon laseru	< 1 mW
Vlnová délka ve vakuu	632,8 nm

### 7.1.2 Kompenzátor XC-80 a snímače

Kompenzátor XC-80 je klíčovým prvkem pro zaručení přesnosti měření se systémem XL. Kompenzátor pomocí „inteligentních snímačů“, které umí zpracovat naměřenou hodnotu, měří velmi přesně teplotu vzduchu, tlak vzduchu a relativní vlhkost.



Obr. 33. Kompenzátor XC-80 se snímači [17]

### 7.1.3 Stativ a stolek

Pokud nepoužíváme laserový systém pouze jako součást speciálního zařízení, budeme pravděpodobně potřebovat stativ a stolek pro nastavení polohy laseru vzhledem k požadované ose měření. [17]

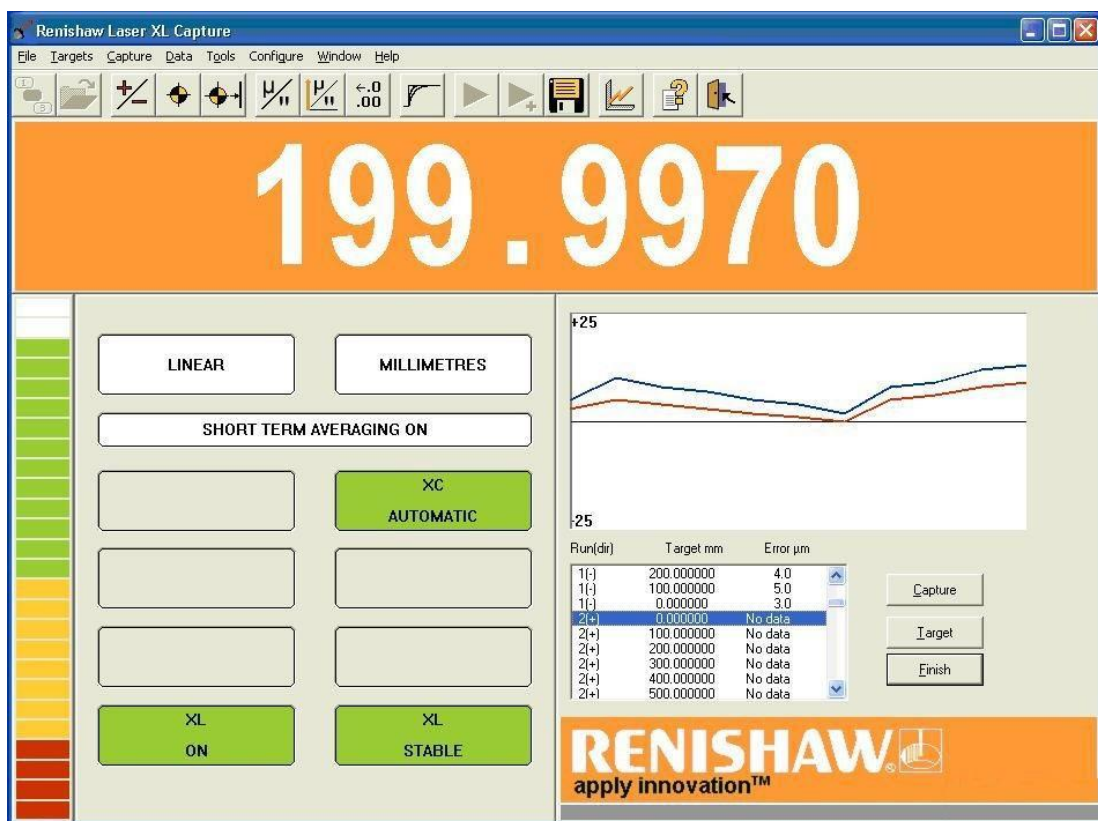


Obr. 34. Stativ a stolek s XL-80 [17]

### 7.1.4 Software LaserXL

K laserovému systému XL-80 jsou dodávány dva počítačové programy - LaserXL a QuickViewXL.

Měřicí software LaserXL (viz obr. 35) umožňuje kalibraci obráběcího stroje. Software obsahuje moduly pro lineární a úhlová měření, měření rotační osy, rovinnosti, přímosti, kolmosti a je možné i dynamické měření. Naměřená data lze analyzovat a tisknout podle mezinárodních norem pro kontrolu přesnosti strojů, např. ISO, ASME, VDI, JIS a GB.



Obr. 35. Software LaserXL [17].

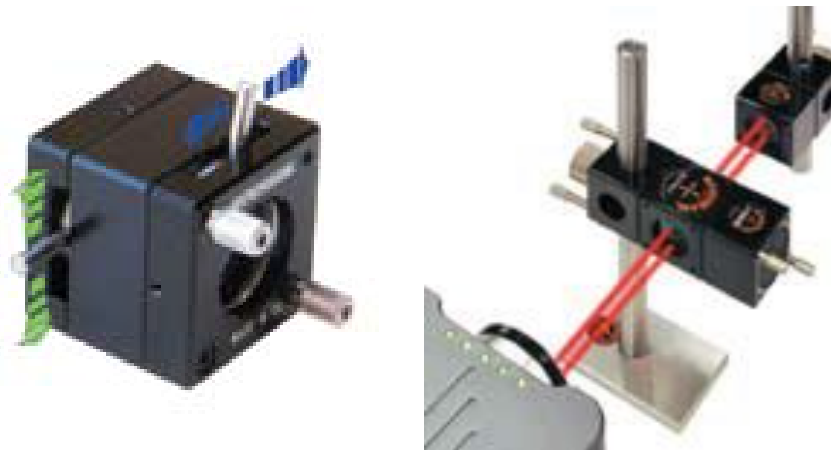
Při vyhodnocování údajů o polohování, rychlosti, zrychlení, vibraci může software pro získávání a analýzu dynamických dat pracovat se vzorkovací frekvencí 10 až 50 kHz. Je přednastaveno 12 hodnot vzorkovací frekvence. Pomocí doplňku programu pro kompenzaci lineárních chyb lze z naměřených dat vytvořit kompenzační hodnoty pro různé řídicí systémy CNC obráběcích strojů. Tím lze zlepšit přesnost polohování a opakovatelnost těchto strojů. [17]

Právě software LaserXL použijeme při kalibraci horizontálního délkoměru Carl Zeiss Jena ULM 450.

### 7.1.5 Měřicí optika

System XL-80 využívá stejné optické prvky jako systém Renishaw ML10. Optiky umožňují provádět lineární a úhlová měření (včetně měření rotačních os), měření přímosti, kolmosti a rovinnosti. Všechna měření jsou interferometrická a používají tedy metrologické návaznosti vlnové délky laserového světla.

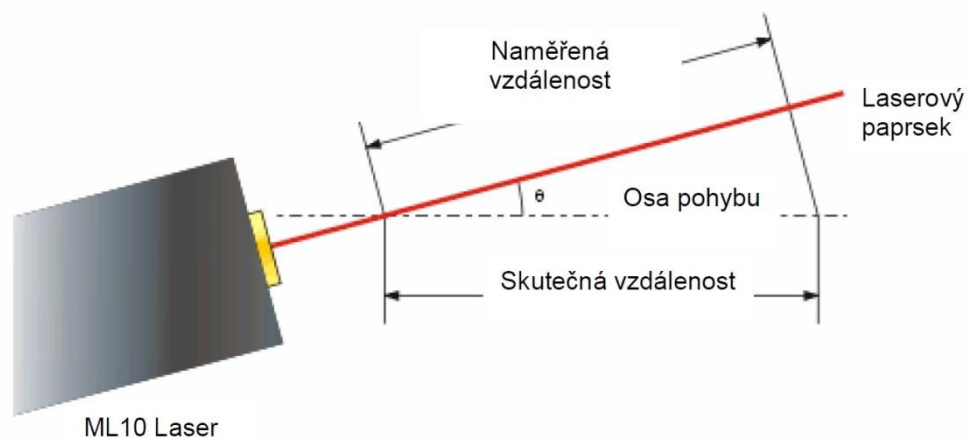
K naší kalibraci bude rovněž potřeba měřicí optiky, konkrétně zaměřovač paprsku LS350 (viz obr. 36).



Obr. 36. Zaměřovač paprsku LS350 a jeho použití [17]

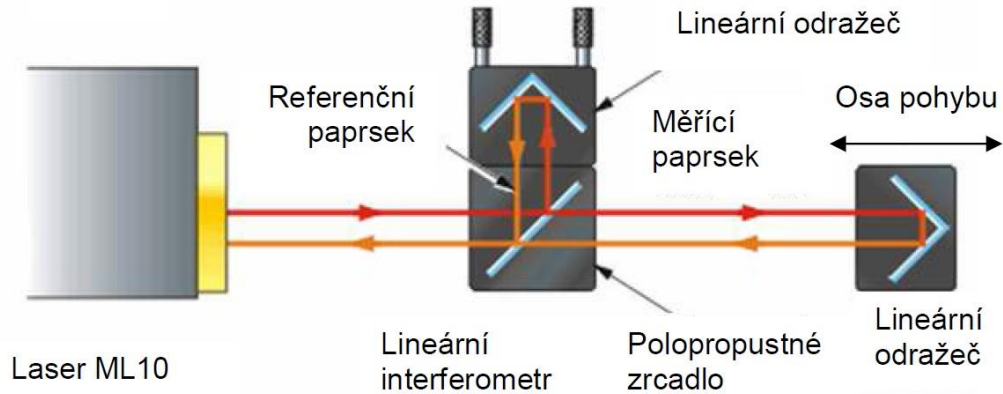
### 7.2 Sestava laserinterferometru a délkoměru

Nyní přistoupíme ke správnému spojení laserinterferometru XL-80 a horizontálního délkoměru Carl Zeiss Jena tak, abychom dosáhli co nejkvalitnějších výsledků a vyvarovali se například vzniku takzvané „Kosinové chyby“.



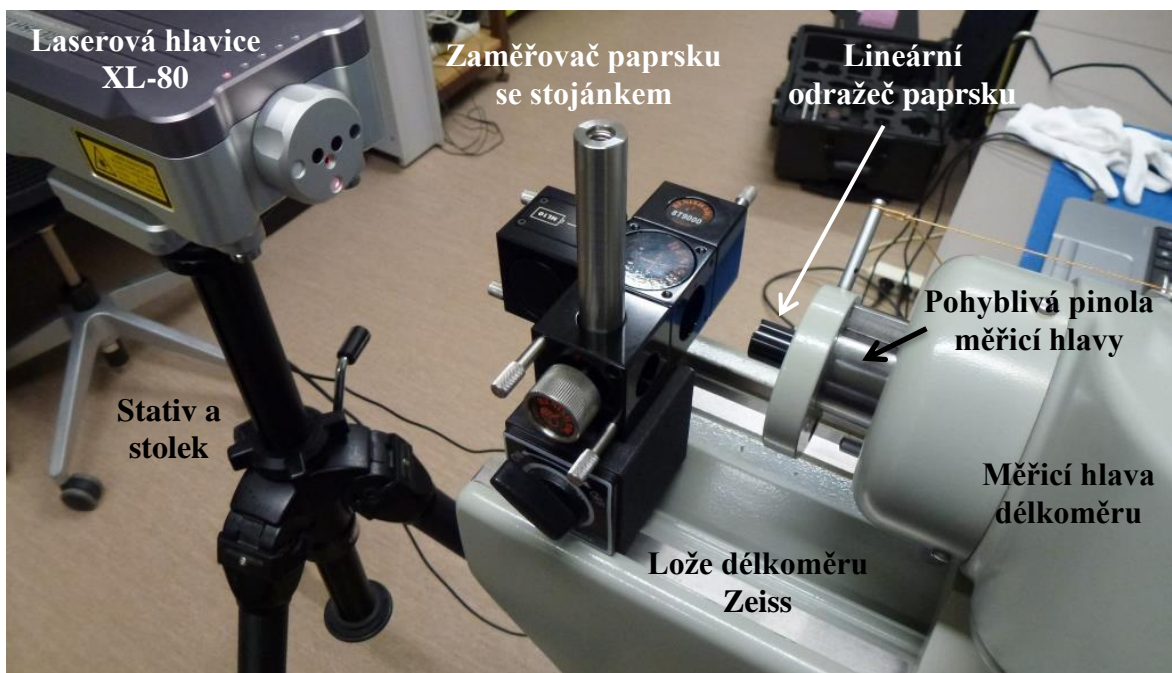
Obr. 37. Kosinová chyba

Poněvadž budeme provádět lineární měření a osa paprsku laserinterferometru bude téměř procházet osou délkoměru, vyloučíme v tomto případě takzvanou „Abbeho chybu“.



Obr. 38. Laserová hlava v ose měření

Na obrázku 39. vidíme konečné sestavení laserového interferometru a horizontálního délkoměru, podotýkám, že vše probíhalo v laboratoři UTB Fakulty technologické v budově U15.



Obr. 39. Laserinterferometr XL-80 instalovaný na délkoměru ULM 450

## 7.3 Příprava vlastní kalibrace

Kalibrační postup jsem vytvořil dle vlastního uvážení a bral jsem také v úvahu zkušenosti metrologů KMS firmy Česká zbrojovka, Uherský Brod.

### 7.3.1 Kalibrační postup

#### 1) Prostředky potřebné ke kalibraci:

- sada koncových měrek,
- teploměr,
- vlhkoměr,
- jemná utěrka, ethylalkohol (benzin), vazelína bez příměsí vody a kyselin
- laserový interferometr XL-80, PC + software

#### 2) Obecné podmínky kalibrace:

Kalibrace universálního délkoměru se provádí za těchto referenčních podmínek:

- teplota přístroje:	$20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,	} Bylo kompenzováno
- změna teploty za 1 hodinu:	max. $0,5^{\circ}\text{C}$ ,	
- relativní vlhkost vzduchu:	max. 75%	

Potřebné měřicí pomůcky se umístí v blízkosti universálního délkoměru a ponechají se temperovat min. 12 hod. Teplota, se měří před zahájením kalibrace, v jejím průběhu i po jejím skončení. Vlhkost se měří před zahájením kalibrace.

#### 3) Vnější prohlídka měřidla:

Všechny funkční plochy přístroje se řádně vyčistí ethylalkoholem a utrou jemnou utěrkou. Vizualně se zkontrolují evidenční a technické náležitosti přístroje (rozsah zjevných mechanických a korozních poškození – funkční plochy nesmí být poškrábány nebo jinak poškozeny a nesmí nést stopy koroze, měřicí nástavce a měřicí pomůcky se kontrolují na universálním mikroskopu). Lehce poškozená místa se upraví, po úpravě se znovu očistí. Při poškození měřicí pomůcky se tato vymění.

#### 4) Funkční zkouška:

Přezkouší se chod měřicí pinoly. Chod měřicí pinoly musí být v celém rozsahu plynulý, bez citelného zadírání. Po odaretování měřicí pinoly nesmí tato samovolně odjíždět na některou stranu. Jestliže pinola odjíždí na některou stranu, je nutno universální délkoměr vodorovně vyrovnat pomocí seřiditelných stavěcích šroubů a krabicové libely, umístěné na přístroji. Přezkouší se správná funkce všech aretačních zařízení.

Zkontroluje se v celém rozsahu bezchybná funkce podkládacího stolu a jeho ovládacího panelu. Zkontroluje se správná funkce všech přídatných zařízení univerzálního délkoměru.

5) **Kontrola metrologických parametrů:**

Kontrola přesnosti odměřovacího systému se provádí v 5 místech odměrného pravitka (0, 25, 50, 75 a 100) mm pomocí měřicího nástavce s kulovou plochou  $R=25$ . Po určení vztažné soustavy se provede kontrola v bodě 0. Počet měření v kontrolovaném bodě je  $n=5$ . Kontrola přesnosti odměřovacího systému v ostatních bodech se provádí přímou metodou měřením koncových měrek, které se měří ve středu měřicí plochy. Průměrné hodnoty měření v těchto bodech se vypočtou stejně jako v bodě 0 (přičtou se nebo odečtou odchylky od jmenovitých hodnot udané v „Kalibračním listě“ použitých měrek). Stanovení skutečných rozměrů měřicích pomůcek se provádí na univerzálním délkoměru pomocí měřicích nástavců s rovinnou plochou. Měřicí pomůcky (závitové drátky, kulové doteky na vnitřní měření) se měří přímou metodou min. ve 3 místech.

6) **Vyhodnocení:**

Naměřené hodnoty pro jednotlivé kontrolované body se porovnají s hodnotou uváděnou výrobcem. Jestliže všechny naměřené hodnoty v jednotlivých kontrolovaných bodech splňují podmínku, je možné možno tento přístroj označit kalibrační značkou a dále používat. Jestliže podmínka není splněna, je nutno zavolat servisní službu a přístroj nepoužívat k jakémukoli měření. Naměřené hodnoty měřicích pomůcek se zaznačí do příslušné tabulky obslužného programu.

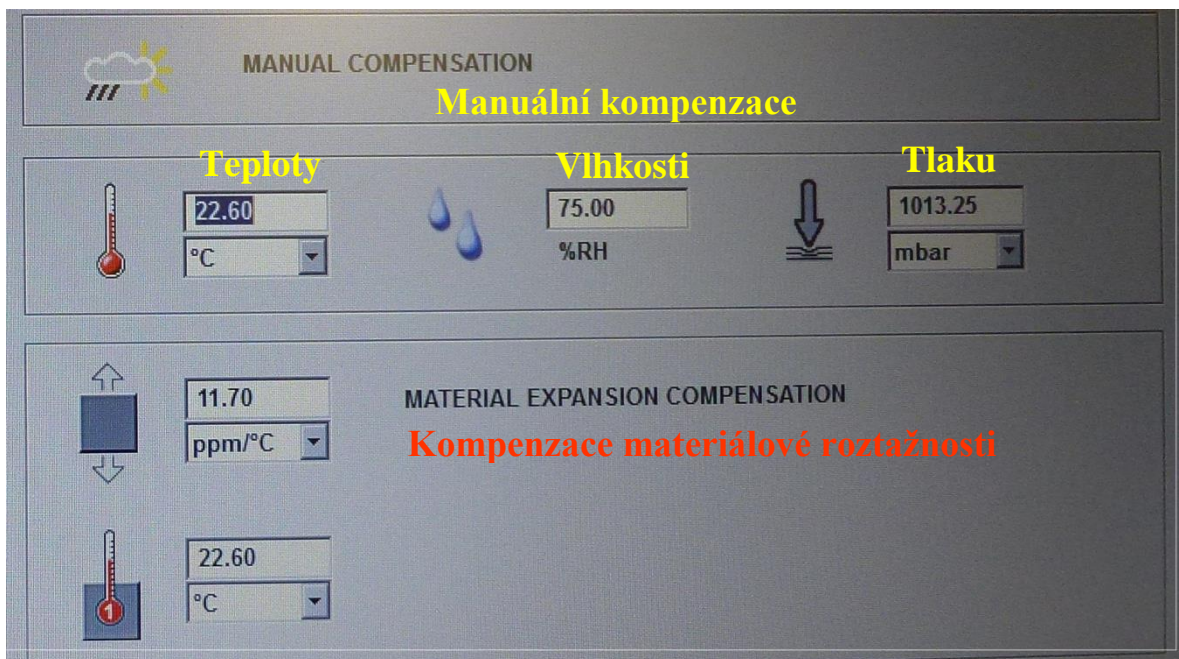
### 7.3.2 Vlastní kalibrace

My jsme se ke kalibraci délkoměru pro měření rozhodli použít 12 kusů kalibrovaných délkových koncových měrek. Zvolili jsme náhodný výběr v rozsahu 1 až 60 mm, takový rozsah nám dovolila zvolená sestava laserového interferometru s horizontálním délkoměrem. Vybrané nakonzervované koncové měrky jsem pečlivě očistil ethylakoholem a připravil k samotnému měření. Na obrázku 40. jsou vybrané koncové měrky s jejich nominálními (konvenčně pravými) hodnotami.



Obr. 40. 12 vybraných koncových měrek a jejich hodnoty v mm

Dále byly zkontrolovány podmínky v laboratoři a nastaveny software LaserXL pro kompenzaci možných vlivů (teplota, tlak, vlhkost). Poté se mohlo přistoupit k samotnému procesu měření (kalibraci) na délkoměru.



Obr. 41. Kompensace teploty, vlhkosti a tlaku v software LaserXL

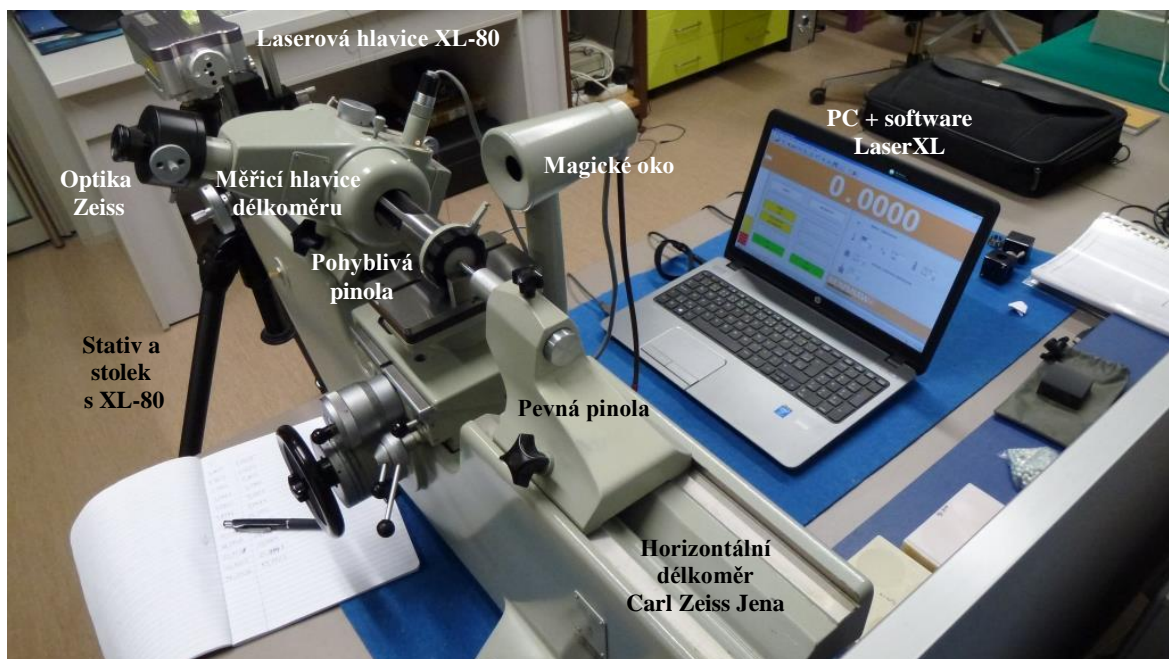


## 8 MĚŘENÍ

Po cca 30 minutách ustálení a vynulování laserinterferometru s délkoměrem, jsem začal s postupným měřením vybraných koncových měrek.

### 8.1 Realizace měření

Zvolili jsme typ měření „dvouchodé lineární bidirekcionální“ viz kapitola 3., tzn., že jsem měřil nejprve od nejmenší hodnoty po největší a poté od největší po nejmenší, tento postup jsem realizoval vícekrát za sebou. Při měření jsme s výhodou využili moderní řešení indikace správného kontaktu měřících dotyků s měřenými koncovými měrkami, kterým jsme nahradili sice efektní, ale zastaralé magické oko, popsáno v kapitole 5.2.



Obr. 42. Celá sestava připravená ke kalibračnímu měření

Celkem byla každá z vybraných koncových měrek změřena 12krát. Tabulka 3. nám ukazuje naměřené hodnoty z měření vzestupného, tedy od nejmenší koncové měrky po největší (měření  $\uparrow$ ) a tabulka 4. zase hodnoty z měření sestupného, od největší měrky po nejmenší (měření  $\downarrow$ ).

Tab. 3. Hodnoty měření koncových měrek vzestupně

Hodnota měřky [mm]	Měření vzestupně (↑) [mm]					
	1	2	3	4	5	6
1,005	1,0066	1,0060	1,0056	1,0057	1,0055	1,0055
1,460	1,4615	1,4607	1,4606	1,4607	1,4604	1,4603
2,000	2,0010	2,0008	2,0006	2,0008	2,0004	2,0004
3,500	3,5011	3,5005	3,5004	3,5005	3,5000	3,5001
7,000	7,0011	7,0007	7,0006	7,0006	7,0003	7,0002
10,000	10,0000	10,0000	10,0001	9,9997	9,9995	9,9996
13,000	13,0028	13,0007	13,0007	13,0005	13,0004	13,0004
15,500	15,5013	15,5008	15,5008	15,5003	15,5003	15,5003
18,000	18,0027	18,0022	18,0015	18,0009	18,0006	18,0010
22,000	22,0010	22,0016	22,0014	22,0009	22,0008	22,0015
25,000	25,0004	25,0010	25,0006	25,0006	25,0001	25,0002
50,000	50,0032	50,0033	50,0025	50,0024	50,0020	50,0026

Tab. 4. Hodnoty měření koncových měrek sestupně

Hodnota měřky [mm]	Měření sestupně (↓) [mm]					
	1	2	3	4	5	6
1,0050	1,0060	1,0057	1,0055	1,0054	1,0054	1,0055
1,4600	1,4607	1,4605	1,4604	1,4603	1,4603	1,4603
2,0000	2,0009	2,0006	2,0005	2,0004	2,0003	2,0004
3,5000	3,5004	3,5003	3,5002	3,5001	3,5001	3,5000
7,0000	7,0016	7,0006	7,0004	7,0003	7,0004	7,0001
10,0000	10,0001	9,9999	9,9996	9,9996	9,9996	9,9993
13,0000	13,0015	13,0004	13,0006	13,0006	13,0004	13,0002
15,5000	15,5018	15,5006	15,5004	15,5005	15,5004	15,5004
18,0000	18,0026	18,0010	18,0010	18,0007	18,0008	18,0009
22,0000	22,0019	22,0013	22,0012	22,0010	22,0009	22,0009
25,0000	25,0017	25,0005	25,0003	25,0007	25,0006	24,9999
50,0000	50,0037	50,0031	50,0022	50,0023	50,0021	50,0023

Z prvních měření (měření 1,2) je patrné, že se zde oproti dalším měření více projevila chyba měření zaviněná obsluhou, tedy lidského faktoru, ale i tak jsou všechny naměřené hodnoty více než uspokojivé a odchylka na největší měřené délce 50 mm se pohybuje pouze kolem 3  $\mu\text{m}$ , to znamená  $\pm 1,5 \mu\text{m}$ !, takže předepsaná maximální chyba při použití pevného dotyku:

$$\pm \left( 1,8 + \frac{0,05}{100} \right) = \pm 1,8005 \mu\text{m}, \text{ je dodržena.}$$



Obr. 43. Měření koncové měrky délky 1,46 mm jako příklad kalibrace

## 8.2 Vyhodnocení výsledků

Naměřené výsledky jsem nejprve přepočítal pouze na odchylky od skutečných hodnot vybraných koncových měrek.

### 8.2.1 Statistika výsledků

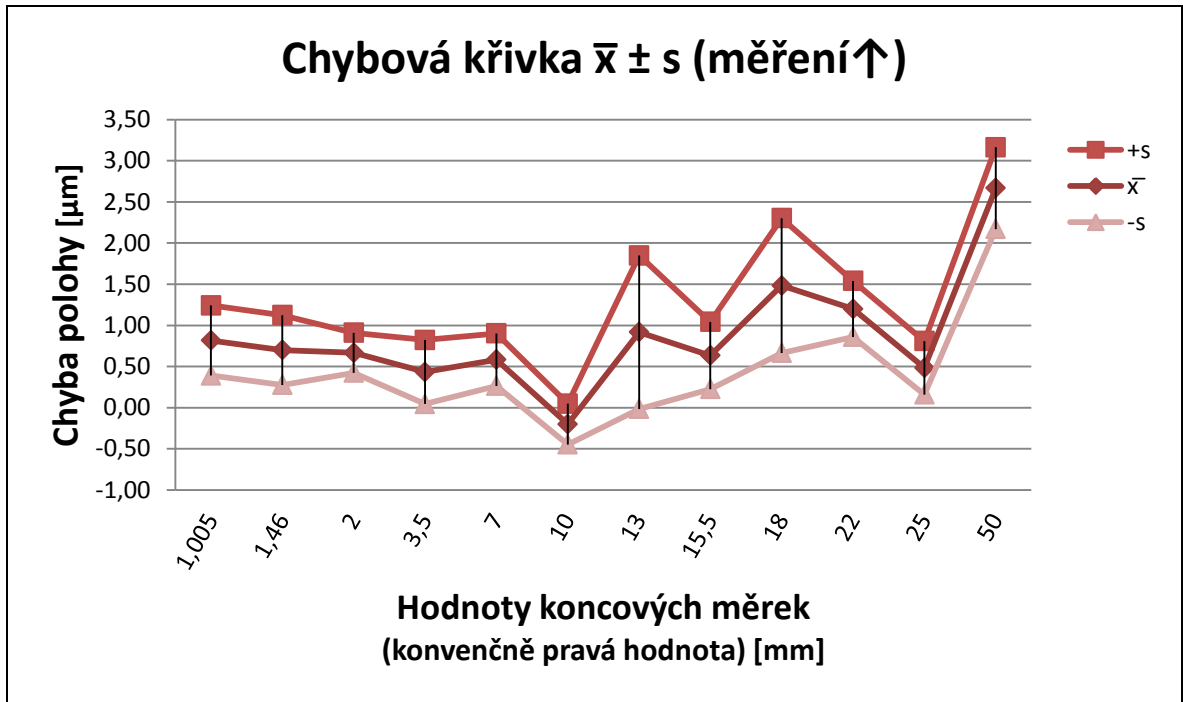
Poté jsem spočetl aritmetický průměry, mediány, směrodatné odchylky, maxima a minima odchylek a také intervaly, což budeme potřebovat pro sestavení chybové křivky jak ve vzestupném ( $\uparrow$ ), tak v sestupném směru ( $\downarrow$ ). V tabulce 5. již vidíme všechny potřebné parametry k sestavení chybových křivek. Následně vytvořené grafy, nám budou lépe vypovídat o úspěšnosti kalibrace horizontálního délkoměru Zeiss.

Tab. 5. Statistika měření kalibrace délkoměru

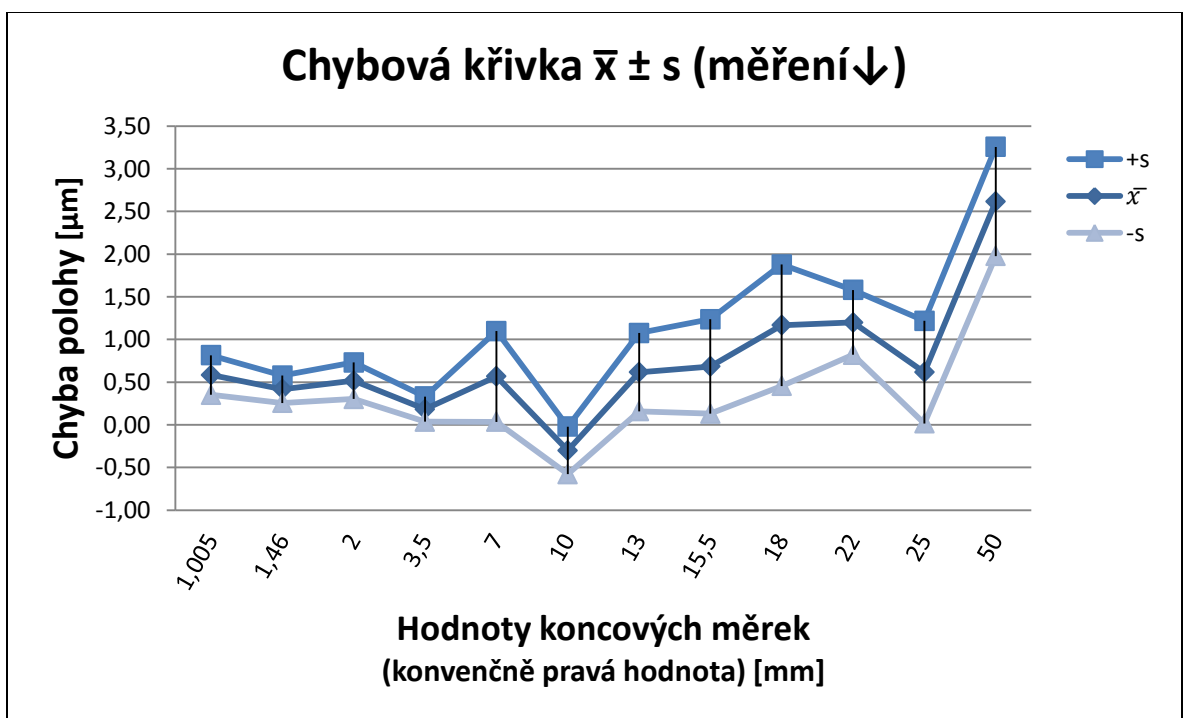
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_i \uparrow$ [mm]	0	1,46	2	3,5	7	10	13	15,5	18	22	25	50
$x_1 \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,6	1,5	1,0	1,1	1,1	0,0	2,8	1,3	2,7	1,0	0,4	3,2
$x_2 \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,0	0,7	0,8	0,5	0,7	0,0	0,7	0,8	2,2	1,6	1,0	3,3
$x_3 \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,6	0,6	0,6	0,4	0,6	0,1	0,7	0,8	1,5	1,4	0,6	2,5
$x_4 \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,7	0,7	0,8	0,5	0,6	-0,3	0,5	0,3	0,9	0,9	0,6	2,4
$x_5 \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,5	0,4	0,4	0,0	0,3	-0,5	0,4	0,3	0,6	0,8	0,1	2,0
$x_6 \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,5	0,3	0,4	0,1	0,2	-0,4	0,4	0,3	1,0	1,5	0,2	2,6
$\bar{x}_i \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,82	0,70	0,67	0,43	0,58	-0,20	0,92	0,63	1,48	1,20	0,48	2,67
$\tilde{x}_i \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,65	0,65	0,70	0,45	0,60	-0,15	0,60	0,55	1,25	1,20	0,50	2,55
$s_i \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,43	0,42	0,24	0,39	0,32	0,25	0,93	0,41	0,82	0,34	0,33	0,50
$x_{\max} \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,60	1,50	1,00	1,10	1,10	0,10	2,80	1,30	2,70	1,60	1,00	3,30
$x_{\min} \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,50	0,30	0,40	0,00	0,20	-0,50	0,40	0,30	0,60	0,80	0,10	2,00
$x_{\max} \uparrow - x_{\min} \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,10	1,20	0,60	1,10	0,90	0,60	2,40	1,00	2,10	0,80	0,90	1,30
$\bar{x}_i \uparrow + s_i \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,24	1,12	0,91	0,82	0,90	0,05	1,85	1,04	2,30	1,54	0,81	3,16
$\bar{x}_i \uparrow - s_i \uparrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,39	0,28	0,42	0,05	0,26	-0,45	-0,02	0,23	0,67	0,86	0,16	2,17
$P_i \downarrow$ [mm]	0	1,46	2	3,5	7	10	13	15,5	18	22	25	50
$x_1 \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,0	0,7	0,9	0,4	1,6	0,1	1,5	1,8	2,6	1,9	1,7	3,7
$x_2 \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,7	0,5	0,6	0,3	0,6	-0,1	0,4	0,6	1,0	1,3	0,5	3,1
$x_3 \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,5	0,4	0,5	0,2	0,4	-0,4	0,6	0,4	1,0	1,2	0,3	2,2
$x_4 \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,4	0,3	0,4	0,1	0,3	-0,4	0,6	0,5	0,7	1,0	0,7	2,3
$x_5 \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,4	0,3	0,3	0,1	0,4	-0,4	0,4	0,4	0,8	0,9	0,6	2,1
$x_6 \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,5	0,3	0,4	0,0	0,1	-0,7	0,2	0,4	0,9	0,9	-0,1	2,3
$\bar{x}_i \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,58	0,42	0,52	0,18	0,57	-0,30	0,62	0,68	1,17	1,20	0,62	2,62
$\tilde{x}_i \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,50	0,35	0,45	0,15	0,40	-0,40	0,50	0,45	0,95	1,10	0,55	2,30
$s_i \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,23	0,16	0,21	0,15	0,53	0,28	0,46	0,55	0,71	0,38	0,60	0,64
$x_{\max} \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,00	0,70	0,90	0,40	1,60	0,10	1,50	1,80	2,60	1,90	1,70	3,70
$x_{\min} \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,40	0,30	0,30	0,00	0,10	-0,70	0,20	0,40	0,70	0,90	0,30	2,10
$x_{\max} \downarrow - x_{\min} \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,60	0,40	0,60	0,40	1,50	0,80	1,30	1,40	1,90	1,00	1,40	1,60
$\bar{x}_i \downarrow + s_i \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,81	0,58	0,73	0,33	1,10	-0,02	1,07	1,24	1,88	1,58	1,22	3,26
$\bar{x}_i \downarrow - s_i \downarrow$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,35	0,26	0,30	0,04	0,04	-0,58	0,16	0,13	0,45	0,82	0,02	1,98

### 8.2.2 Grafické vyhodnocení

V následujících dvou grafech na obrázku 44. a 45. vidíme průběh chybové křivky vyjádřené aritmetickým průměrem naměřených hodnot a +/- směrodatnou odchylkou, vše se pohybuje v řádech mikrometrů a tedy s vynikajícím výsledkem.

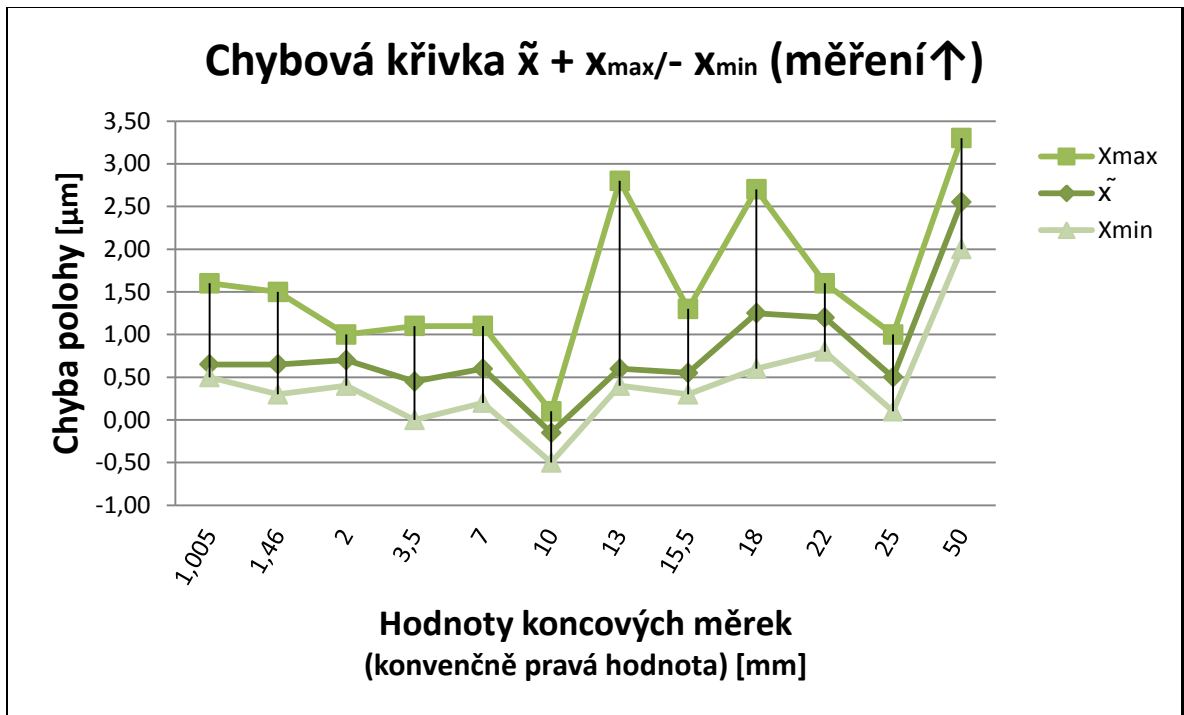


Obr. 44. Chybová křivka arit. průměru +/- směrodatná odchylka, měření ↑

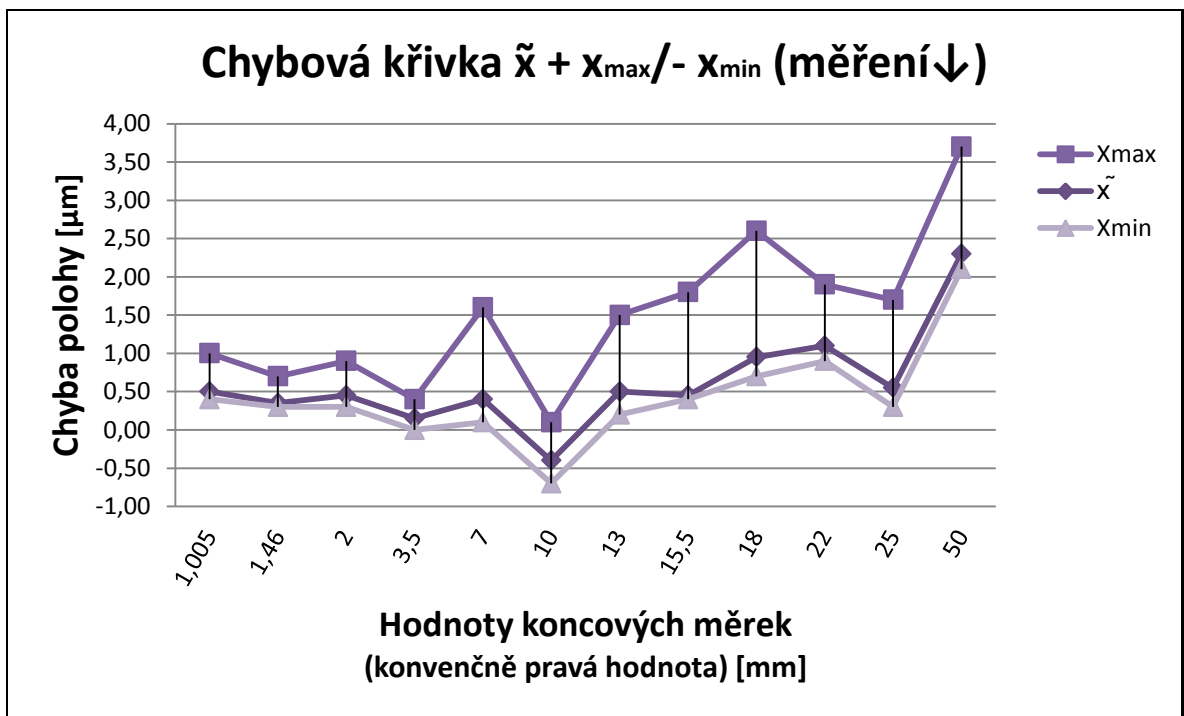


Obr. 45. Chybová křivka arit. průměru +/- směrodatná odchylka, měření ↓

Grafy na obrázku 46. a 47. nám zase ukazují odchylky maxima a minima od mediánu naměřených hodnot při kalibraci délkoměru. Také zde vidíme velmi dobré výsledky.



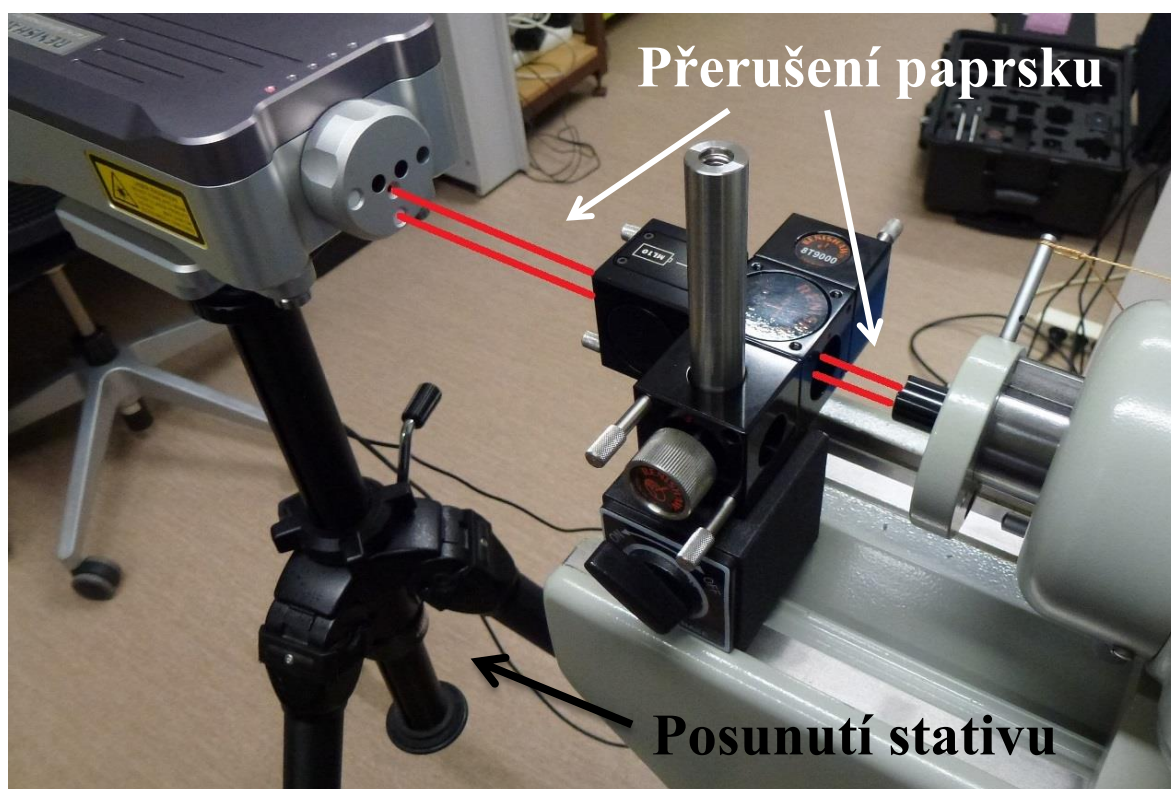
Obr. 46. Chybová křivka mediánu +/- minimum/maximum, měření  $\uparrow$



Obr. 47. Chybová křivka mediánu +/- minimum/maximum, měření  $\downarrow$

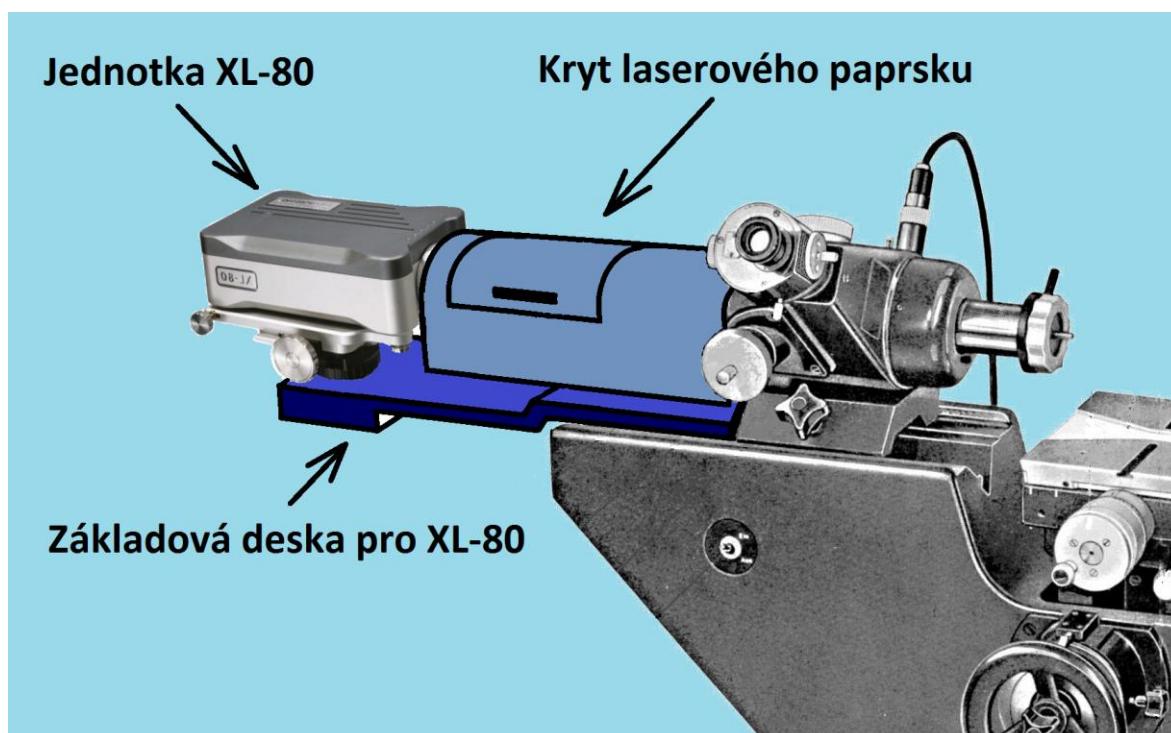
### 8.3 Vylepšení sestavy

I když se předpokládá, že se sestavou délkoměru Zeiss s laserinterferometrem Renishaw bude pracovat zkušený metrolog, může při jakémkoli měření nastat problém s přerušением laserového paprsku, který je volně přístupný anebo také může dojít posunutí jednotky XL-80 s dodávaným stativem, při neočekávaném kontaktu osoby v blízkosti měření a tím k rozladění celého systému a následně ke zkreslení či dokonce znehodnocení výsledků měření (obr. 48).



Obr. 48. Původní řešení měřicí sestavy

Proto, aby nemohl nastat ani jeden z výše uvedených případů, navrhl jsem řešení, jak tyto nežádoucí případy zcela eliminovat. Návrh vidíme v 3D nákresu (obr. 49), jedná se pokud možno o co nejjednodušší a tím i levné řešení, ale zároveň také, aby co nejlépe splnilo svůj účel. Původní stativ dodávaný firmou Renishaw by se nahradil ocelovou základovou deskou, která se ukotví přímo k měřicí hlavě pinoly napevno a laserová jednotka XL-80 se přišroubuje k této desce. Dále by se přidal otevírací kryt, který může být buď plastový, nebo z hliníkové slitiny, který nám zakryje v první řadě citlivý laserový paprsek, ale také zaměřovač paprsku (pro tento můžeme vytvořit také vlastní jednodušší držák) a odrazové zrcátko.



Obr. 49. Návrh nového řešení měřicí sestavy



## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byla oprava a kalibrace více než 50. let starého horizontálního délkoměru Carl Zeiss Jena ULM 450, včetně návrhu a vylepšení odměřování. V teoretické části byly popsány základní metody měření délky, návaznosti měřidel na etalony, dále pak statistika potřebná pro konečné vyhodnocení výsledků praktického měření, také teorie kalibrace délkových měřidel, v které definujeme normu ČSN ISO 230-2, v níž je popsán postup kalibrací, a kterou jsme z části využívali. V závěru teorie je vysvětlen princip laserové interferometrie, tato technologie byla použita při vlastním měření. V praktické části byl detailně popsán horizontální délkoměr ULM 450, dále pak laserový měřicí systém Renishaw XL-80, který byl potřeba k samotné kalibraci a konečně jsme se dostali ke kompletní renovaci délkoměru, jeho zprovoznění a následné kalibraci. Poté se ještě výsledky celé akce zhodnotili a navrhli jsme případnou modernizaci přístroje.

V prvé řadě je potřeba podotknout, že nejtěžším úkolem bylo zprovoznění délkoměru a to zejména její nejdůležitější části, kterou je posuvná pinola zajišťující vlastní délkové měření. Dále byl přístroj celkově dán do stoprocentně funkčního stavu. Délkoměr ULM 450 je sice starší přístroj, ale díky své robustní konstrukci se stal oblíbený hlavně pro modernizaci zdigitalizováním odměřování řadou firem zabývajících se renovací měřicích přístrojů. To ale znamená vynaložení určitých nemalých finančních prostředků a proto jsem navrhl kombinaci staršího horizontálního délkoměru s novým laserovým systémem, kde se náklady celé renovace pohybovaly v řádech desítek korun!, protože rozebraný délkoměr se podařilo získat za zanedbatelnou sumu a laserový systém XL-80 je plně k dispozici v laboratoři na fakultě technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Zde se také nachází zrenovovaný horizontální délkoměr Carl Zeiss Jena ULM 450.

Po kompletním sestavení délkoměru s laserovým interferometrem se přistoupilo ke kalibraci a konečné výsledky ukázali, že přesnost systému je na velmi dobré úrovni a může směle konkurovat i současným moderním přístrojům, takže se měřicí systém může kdykoliv použít k různým délkovým měřením jak přímo pro potřeby UTB, tak i pro potřeby např. externích firem. Další nespornou výhodou je zobrazování naměřených hodnot přímo na monitoru PC oproti původní optice, kde se hodnoty musí odečítat a přepočítávat.

Na úplný závěr jsem doporučil do budoucna elegantnější řešení stativu pro laserový systém a také použití krytování laserového paprsku, aby nemohlo docházet ke zkreslení nebo úplnému znehodnocení naměřených výsledků.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] DOBEŠ, J. *Management jakosti pro kalibraci délkových měřidel* [online]. Brno, 2014. 53 s. Bakalářská práce. VUT, FSI v Brně. Dostupné z WWW: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=86029](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86029)>.
- [2] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie část 1.* [online]. [cit. 2014-11-14]. VŠB, FS, TU Ostrava, 2004. 110 s. Dostupné z WWW: <<http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>>.
- [3] CHUDÝ, V.; PALENČÁR, R.; KUREKOVÁ, E.; HALAJ, M. *Meranie technických veličín.* 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. 672 s. ISBN 80-227-1275-2.
- [4] Statistika. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. Strana naposledy edit. 2014-10-23 [cit. 2014-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Statistika>>.
- [5] BEDÁŇNOVÁ, I. a VEČEREK, V. *Základy statistiky* [online]. [cit. 2014-11-14]. VFU Brno, 2007. 130 s. Dostupné z WWW: <<http://cit.vfu.cz/stat/FVL/Skripta.pdf>>.
- [6] Medián. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. Strana naposledy edit. 2014-06-09 [cit. 2014-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Medián>>.
- [7] ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách.* 1. vyd. Brno: ČMI, 2010. 36 s.
- [8] ČECH, J.; PERNÍKÁŘ, J.; PODANÝ, K. *Strojírenská metrologie.* 4. vyd. Brno: CERM, 2005. 175 s. ISBN 80-214-3070-2.
- [9] Interferometr. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. Strana naposledy edit. 2014-08-09 [cit. 2014-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Interferometr>>.
- [10] PATA, V. *Studijní materiály a podklady z předmětu T7TMR – Technická měření v akademickém roce 2011/2012.*

- [11] Youngův experiment. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. Strana naposledy edit. 2014-06-09 [cit. 2014-11-14]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Youngův\\_experiment](http://cs.wikipedia.org/wiki/Youngův_experiment)>.
- [12] MĚŘENÍ STYČNÉ CHYBY SESTAVENÍ ZÁKLADNÍCH MĚREK NA UNIVERZÁLNÍM DÉLKOMĚRU ZEISS. *Kontrola a měření ve strojírenství* [online]. [cit. 2015-03-07]. SPŠ Teplice. Dostupný z WWW: <[http://sps.watzke.cz/dl/KOM/ULOHA\\_3.1.3\\_MERENI\\_STYCNE\\_CHYBY\\_MEREK\\_NA\\_DELKOMERU\\_ZEISS.pdf](http://sps.watzke.cz/dl/KOM/ULOHA_3.1.3_MERENI_STYCNE_CHYBY_MEREK_NA_DELKOMERU_ZEISS.pdf)>
- [13] Měření Abbeho délkoměrem. *Studijní materiály a podklady školní rok 2007/2008* [online]. [cit. 2015-03-07]. VOŠ SPŠ Kladno. Dostupný z WWW: <<https://www.spskladno.cz/stahuj.php?id=2091>>
- [14] FCC PUBLIC. *Přístroje a systémy pro bezdotykové měření délek*. [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=33659](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33659)>
- [15] METROSTAV. *Prostředky pro kalibraci a opravy* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupný z WWW: <[http://www.loggere.ro/detalii\\_serviciu/intermedieri\\_pentru\\_etalonari\\_si\\_reparatii.html](http://www.loggere.ro/detalii_serviciu/intermedieri_pentru_etalonari_si_reparatii.html)>
- [16] DEOM. *Modernizace* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.deom.cz/modernizace>>
- [17] RENISHAW. *XL-80 Laserový systém* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.renishaw.cz/cs/laserovy-merici-system-xl-80--8267>>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

1D	Jednorozměrný prostor.
3D	Třírozměrný prostor.
$A_{\uparrow\downarrow}$	Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose.
$c$	Rychlost světla.
CNC	Computer Numeric Control.
ČSN	Česká státní norma.
$d_x$	Změna délky.
$E_{\uparrow\downarrow}$	Jednostranná systematická polohová úchylka v ose.
$F$	F-test.
$f_d$	Úchylka rovinnosti.
$H_A$	Alternativní hypotéza.
$H_0$	Nulová hypotéza.
ISO	Mezinárodní norma.
$K_{99}$	Koeficient rozšíření.
KMS	Kontrolní měrové středisko.
L	Měřená délka.
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
$l_c$	Měření délky v jedné ose.
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose.
N	Základní soubor populace.
n	Výběrový soubor populace.
P	Pravděpodobnost.
$P_i$	Zadaná poloha.
$P_{ij}$	Skutečná poloha.

---

ppm	Parts per million.
R	Variační rozpětí.
$R_i \updownarrow$	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze.
$R_q$	Kvartilové rozpětí.
SMS	Souřadnicový měřicí stroj.
$S_i \updownarrow$	Odhad jednostranné standartní nejistoty v poloze.
s	Směrodatná odchylka výběrového souboru.
$s^2$	Rozptyl výběrového souboru.
t	t-test.
T	Testovací kritérium.
$u_c$	Kombinovaná standardní nejistota.
V	Variační koeficient.
X	Osa X.
$\bar{x}$	Aritmetický průměr výběrového souboru.
$\tilde{x}$	Medián.
$\hat{x}$	Modus.
$x_{ij}$	Polohová úchylka.
$\bar{x}_{ij} \updownarrow$	Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze.
$x_{max}$	Maximální změřená hodnota.
$x_{min}$	Minimální změřená hodnota.
Z	Osa Z.
$\alpha$	Chyba 1. druhu.
$\beta$	Chyba 2. druhu.
$\lambda$	Vlnová délka.
$\mu$	Aritmetický průměr základního souboru.

$v$       Rozpětí délek.

$\sigma$       Směrodatná odchylka základního souboru.

$\sigma^2$       Rozptyl základního souboru.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Schéma návaznosti veličiny délky [1]</i> .....	17
<i>Obr. 2. Statistické soubory [10]</i> .....	18
<i>Obr. 3. Gaussovo normální rozdělení pravděpodobností [5]</i> .....	23
<i>Obr. 4. Normované normální rozdělení pravděpodobností [5]</i> .....	24
<i>Obr. 5. Příklady neznámého rozdělení pravděpodobností [5]</i> .....	25
<i>Obr. 6. Vzájemný vztah mezi chybou 1. druhu <math>\alpha</math> a chybou 2. druhu <math>\beta</math> [5]</i> .....	27
<i>Obr. 7. Dvojchodý lineární bidirekcionální cyklus [7]</i> .....	30
<i>Obr. 8. Jednosměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [7]</i> .....	32
<i>Obr. 9. Dvousměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [7]</i> .....	33
<i>Obr. 10. Postup při nasávání měrek [8]</i> .....	35
<i>Obr. 11. Koncová měrka přilnutá na pomocné rovinné destičce 1. [8]</i> .....	37
<i>Obr. 12. Úchylka rovinnosti <math>f_d</math> [2]</i> .....	37
<i>Obr. 13. Základní parametry koncové měrky [2]</i> .....	38
<i>Obr. 14. Příklad zařízení pro porovnávací měření měrek - komparátor pro koncové měrky se jmenovitou délkou do 100 mm [8]</i> .....	39
<i>Obr. 15. Princip Michelsonova interferometru [10]</i> .....	41
<i>Obr. 16. Průchod vlnění dvojtěrbínou a pozorovaný obraz po průchodu paprsku [11]</i> .....	42
<i>Obr. 17. Univerzální délkoměr firmy Carl Zeiss Jena [12]</i> .....	44
<i>Obr. 18. Odečítací stupnice Abbeho délkoměru [13]</i> .....	46
<i>Obr. 19. Popis jednotlivých částí přístroje [13]</i> .....	47
<i>Obr. 20. Zdigitalizovaný délkoměr Zeiss ULM 450 [15]</i> .....	48
<i>Obr. 21. Software COMPARATOR 6. [16]</i> .....	49
<i>Obr. 22. Magické oko na délkoměru</i> .....	50
<i>Obr. 23. Indikátor kontaktu Mitutoyo</i> .....	50
<i>Obr. 24. Ložiska vedení hřídele před a po renovaci</i> .....	51
<i>Obr. 25. Nosné excentrické šrouby ložisek vedení</i> .....	51
<i>Obr. 26. Sestava měřicí hlavičky délkoměru na 3D SMS</i> .....	52
<i>Obr. 27. Základny a osy X, Z</i> .....	53
<i>Obr. 28. Měření na délce L a popis nastavovacích prvků</i> .....	53
<i>Obr. 29. Výpis výsledků z měřicího programu</i> .....	54
<i>Obr. 30. Ustavovací hroty délkoměru</i> .....	54

<i>Obr. 31. Laserový systém XL-80 [17]</i> .....	55
<i>Obr. 32. Laserová hlavice XL-80 [17]</i> .....	56
<i>Obr. 33. Kompenzátor XC-80 se snímači [17]</i> .....	57
<i>Obr. 34. Stativ a stolek s XL-80 [17]</i> .....	57
<i>Obr. 35. Software LaserXL [17].</i> .....	58
<i>Obr. 36. Zaměřovač paprsku LS350 a jeho použití [17]</i> .....	59
<i>Obr. 37. Kosinová chyba</i> .....	59
<i>Obr. 38. Laserová hlava v ose měření</i> .....	60
<i>Obr. 39. Laserinterferometr XL-80 instalovaný na délkoměru ULM 450</i> .....	60
<i>Obr. 40. 12 vybraných koncových měrek a jejich hodnoty v mm</i> .....	63
<i>Obr. 41. Kompenzace teploty, vlhkosti a tlaku v software LaserXL</i> .....	63
<i>Obr. 42. Celá sestava připravená ke kalibračnímu měření</i> .....	64
<i>Obr. 43. Měření koncové měrky délky 1,46 mm jako příklad kalibrace</i> .....	66
<i>Obr. 44. Chybová křivka arit. průměru +/- směrodatná odchylka, měření ↑</i> .....	68
<i>Obr. 45. Chybová křivka arit. průměru +/- směrodatná odchylka, měření ↓</i> .....	68
<i>Obr. 46. Chybová křivka mediánu +/- minimum/maximum, měření ↑</i> .....	69
<i>Obr. 47. Chybová křivka mediánu +/- minimum/maximum, měření ↓</i> .....	69
<i>Obr. 48. Původní řešení měřicí sestavy</i> .....	70
<i>Obr. 49. Návrh nového řešení měřicí sestavy</i> .....	71



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Chyby <math>\alpha</math> a <math>\beta</math> při testování hypotéz [5]</i> .....	26
<i>Tab. 2. Technické parametry laserové hlavice XL-80 [17]</i> .....	56
<i>Tab. 3. Hodnoty měření koncových měrek vzestupně</i> .....	65
<i>Tab. 4. Hodnoty měření koncových měrek sestupně</i> .....	65
<i>Tab. 5. Statistika měření kalibrace délkoměru</i> .....	67

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**P I MĚŘICÍ PROGRAM**

**P II KONSTRUKČNÍ VÝKRESY**

**PIII CD obsahující:**

- **Diplomovou práci**
- **Zpracovaná naměřená data**
- **Fotografie renovace a kalibrace**

# PŘÍLOHA P I: MĚŘICÍ PROGRAM



DATE=14.4.2015 TIME=16:32:18  
PART NAME : Délkoměr  
REV NUMBER :  
SER NUMBER : MĚŘENÍ SOUOSOSTI  
STATS COUNT : 1

**Podmínky měření**

```
STARTUP =ALIGNMENT/START,RECALL:USE_PART_SETUP,LIST=YES
ALIGNMENT/END
MODE/MANUAL - manuální start programu
MOVESPEED/ 150 - pojezdová rychlost
TOUCHSPEED/ 3 - dotyková rychlost
FLY/ON, 3
PREHIT/4 } odjezdová vzdálenost
RETRACT/4 }
FORMAT/TEXT,OPTIONS,ID,HEADINGS,SYMBOLS, ;MEAS,NOM,DEV,TOL,OUTTOL, ,
LOADPROBE/DOTYK 2-40 - použitý dotyk, rubínová kulička Ø 2 mm, délka dotyku 40 mm
TIP/TIA0B0, SHANKIJK=0, 0, 1, ANGLE=90
COMMENT/OPER,NO,FULL SCREEN=NO,AUTOM. POKRAČOVAT=NO,
PRVNÍ BOD
```

**Manuální bod na dílu – start programu**

```
BOD1 =FEAT/POINT,CARTESIAN
THEO/<-190.321,317.329,-445.935>,<0,0,1>
ACTL/<-190.321,317.329,-445.935>,<0,0,1>
MEAS/POINT,1,WORKPLANE
HIT/BASIC,NORMAL,<-190.321,317.329,-445.935>,<0,0,1>,<-190.321,317.329,-445.935>,USE THEO=YES
ENDMEAS/
```

**Bod pro další upřesnění polohy dílu**

```
VYR1 =ALIGNMENT/START,RECALL:STARTUP,LIST=YES
ALIGNMENT/TRANS,XAXIS,BOD1 } předběžné vyrovnání - vynulování 1.
ALIGNMENT/TRANS,YAXIS,BOD1 } bodu ve všech 3. osách
ALIGNMENT/TRANS,ZAXIS,BOD1 }
ALIGNMENT/END
MODE/DCC - automatické provádění programu
CLEARP/ZPLUS,4,ZPLUS,0,ON - obalová rovina
```

**Přímka pro předběžné natočení osy**

```
BOD2 =FEAT/POINT,CARTESIAN
THEO/<2.2,0,-4>,<1,0,0>
ACTL/<2.271,0,-3.8>,<1,0,0>
MEAS/POINT,1,WORKPLANE
MOVE/CLEARPLANE
HIT/BASIC,NORMAL,<2.2,0,-4>,<1,0,0>,<2.271,0,-3.8>,USE THEO=YES
ENDMEAS/
```

```
VYR2 =ALIGNMENT/START,RECALL:VYR1,LIST=YES
ALIGNMENT/TRANS,XAXIS,BOD2
ALIGNMENT/END
```

```
PRIMKA1 =FEAT/LINE,CARTESIAN,UNBOUNDED
THEO/<-5,4,-4>,<-1,0,0>
ACTL/<-4.842,4.096,-4.365>,<-0.9999999,0.0004673,0>
MEAS/LINE,2,ZPLUS
MOVE/CLEARPLANE
HIT/BASIC,NORMAL,<-5,4,-4>,<0.0004673,0.9999999,0>,<-4.842,4.096,-4.294>,USE THEO=YES
E THEO=YES

HIT/BASIC,NORMAL,<-25,4,-4>,<0.0004673,0.9999999,0>,<-23.391,4.104,-4.435>,
USE THEO=YES

ENDMEAS/
```

ROVINA1 =FEAT/PLANE, CARTESIAN, TRIANGLE  
 THEO/<-68.2,-70,-76.79>,<0.0000108,0.0000173,1>  
 ACTL/<-72.06,-71.339,-76.79>,<0.0000083,0.0000177,1>  
 MEAS/PLANE, 5  
 MOVE/CLEARPLANE  
 HIT/BASIC,NORMAL,<-13,30,-76.795>,<0.0000108,0.0000173,1>,<-12.725,27.299,-76.795>,USE THEO=YES  
 HIT/BASIC,NORMAL,<-105,30,-76.792>,<0.0000108,0.0000173,1>,<-102.314,25.734,-76.792>,USE THEO=YES  
 HIT/BASIC,NORMAL,<-105,-60,-76.786>,<0.0000108,0.0000173,1>,<-106.077,-62.537,-76.786>,USE THEO=YES  
 HIT/BASIC,NORMAL,<-105,-175,-76.792>,<0.0000108,0.0000173,1>,<-117.546,-171.347,-76.792>,USE THEO=YES  
 HIT/BASIC,NORMAL,<-13,-175,-76.787>,<0.0000108,0.0000173,1>,<-21.638,-175.845,-76.787>,USE THEO=YES

**Rovina pro  
niveleci  
(základna pro  
osu Z)**

VYR3 =ENDMEAS/  
 =ALIGNMENT/START, RECALL:VYR2, LIST=YES  
 ALIGNMENT/LEVEL, ZPLUS, ROVINA1  
 ALIGNMENT/TRANS, ZAXIS, ROVINA1  
 ALIGNMENT/END  
 MOVE/POINT,NORMAL,<45.000,-175.000,35.000>  
 MOVE/POINT,NORMAL,<150.000,-125.000,35.000>  
 TIP/TIA45B180, SHANKIJK=0.707, 0, 0.707, ANGLE=-89.999 - otočení dotyku na úhel:  
 PRIMKA2 =FEAT/LINE, CARTESIAN, UNBOUNDED A=45°, B=180°  
 THEO/<-0.052,-115,13>,<0.0003466,0.9999999,0>  
 ACTL/<-0.052,-119.379,13.179>,<0.000334,0.9999999,0>  
 MEAS/LINE, 4, ZPLUS  
 MOVE/CLEARPLANE  
 HIT/BASIC,NORMAL,<-0.053,-115,13>,<0.9999999,-0.000334,0>,<-0.053,-119.379,13.179>,USE THEO=YES  
 HIT/BASIC,NORMAL,<-0.047,-105,13>,<0.9999999,-0.000334,0>,<-0.047,-105.632,13.178>,USE THEO=YES  
 HIT/BASIC,NORMAL,<-0.016,-15,13>,<0.9999999,-0.000334,0>,<-0.016,-13.156,13.18>,USE THEO=YES  
 HIT/BASIC,NORMAL,<-0.015,-5,13>,<0.9999999,-0.000334,0>,<-0.015,-4.367,13.18>,USE THEO=YES

**Vyrovnání – nivelece na rovinu  
Z plus a  
Z počátek**

**Přímka ze 4.  
bodů pro  
natočení  
souřadného  
systému  
(základna pro  
osu X)**

VYR4 =ENDMEAS/  
 =ALIGNMENT/START, RECALL:VYR3, LIST=YES  
 ALIGNMENT/ROTATE, YPLUS, TO, PRIMKA2, ABOUT, ZP1  
 ALIGNMENT/TRANS, XAXIS, PRIMKA2  
 ALIGNMENT/END  
 MOVE/POINT,NORMAL,<40.000,25.000,100.000>  
 WORKPLANE/YMINUS - změna pohledu roviny  
 KRUH1 =FEAT/CONTACT/CIRCLE/DEFAULT, CARTESIAN, OUT, MIN\_CIRCSC  
 THEO/<-50,70,90>,<0,1,0>,37.9,0  
 ACTL/<-50,70,90>,<0,1,0>,37.9,0  
 TARG/<-50,70,90>,<0,1,0>  
 START ANG=225.1, END ANG=360  
 ANGLE VEC=<1,0,0>  
 DIRECTION=CCW  
 SHOW FEATURE PARAMETERS=NO  
 SHOW CONTACT PARAMETERS=YES  
 NUMHITS=8, DEPTH=0, PITCH=0  
 SAMPLE METHOD=SAMPLE\_HITS  
 SAMPLE\_HITS=0, SPACER=0

**Natočení přímky 2. do osy Y  
plus a počátek osy X**

**Vyrovnání  
Ø 37,9 mm  
z pravé strany  
pinoly  
(z 8-mi bodů)**

**HIT BASIC – úder bodem, jeho souřadnice XYZ a vektory IJK**

PART NUMBER=Délkoměr DATE=14.4.2015 TIME=16:32:18 PAGE#=3  
 AUTO MOVE=NO, DISTANCE=6  
 FIND HOLE=DISABLED, ONERROR=NO, READ POS=NO  
 SHOWHITS=YES  
 HIT/BASIC, <-62.9, 70, 103.882>, <-0.6807209, 0, 0.7325429>, <-62.9, 70, 103.882>  
 HIT/BASIC, <-57.768, 70, 107.285>, <-0.409923, 0, 0.9121201>, <-57.768, 70, 107.285>  
 5>  
 HIT/BASIC, <-51.816, 70, 108.863>, <-0.0958458, 0, 0.9953962>, <-51.816, 70, 108.863>  
 HIT/BASIC, <-45.673, 70, 108.449>, <0.2283509, 0, 0.9735789>, <-45.673, 70, 108.449>  
 HIT/BASIC, <-39.986, 70, 106.088>, <0.5284383, 0, 0.8489717>, <-39.986, 70, 106.088>  
 HIT/BASIC, <-35.357, 70, 102.028>, <0.7727336, 0, 0.6347305>, <-35.357, 70, 102.028>  
 HIT/BASIC, <-32.273, 70, 96.698>, <0.935444, 0, 0.3534748>, <-32.273, 70, 96.698>  
 HIT/BASIC, <-31.062, 70, 90.661>, <0.9993908, 0, 0.0348995>, <-31.062, 70, 90.661>  
 ENDMEAS/

DIM PRŮMĚR 37.9 VPRAVO= LOCATION OF CIRCLE KRUH1 UNITS=MM, \$ **Výpis polohy Ø 37,9 mm**

AX	MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
X	-50.000	-50.000	0.000	0.010	0.010	0.000 ----#----
Z	90.000	90.000	0.000	0.010	0.010	0.000 ----#----
D	37.900	37.900	0.000	0.020	0.020	0.000 ----#----

END OF DIMENSION PRŮMĚR 37.9 VPRAVO  
 DIM CIRTY1= CIRCULARITY OF CIRCLE KRUH1 UNITS=MM, \$ **Kruhovitost Ø 37,9 mm**

AX	MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
M	0.000	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000 #-----

MOVE/POINT, NORMAL, <40.000, 70.000, 70.000>  
 MOVE/POINT, NORMAL, <40.000, 70.000, 230.000>  
 MOVE/POINT, NORMAL, <40.000, -195.000, 230.000> } přejezdové body

KRUH2 =FEAT/CONTACT/CIRCLE/DEFAULT, CARTESIAN, OUT, MIN CIRCSC

THEO/<-50, -170, 90>, <0, 1, 0>, 37.9, 0  
 ACTL/<-50, -170, 90>, <0, 1, 0>, 37.9, 0  
 TARG/<-50, -170, 90>, <0, 1, 0>  
 START ANG=225.1, END ANG=360  
 ANGLE VEC=<1, 0, 0>  
 DIRECTION=CCW

**Ø 37,9 mm  
 z levé strany  
 pinoly  
 (z 8-mi bodů)**

SHOW FEATURE PARAMETERS=NO  
 SHOW CONTACT PARAMETERS=YES  
 NUMHITS=8, DEPTH=0, PITCH=0  
 SAMPLE METHOD=SAMPLE\_HITS  
 SAMPLE\_HITS=0, SPACER=0  
 AUTO MOVE=NO, DISTANCE=6  
 FIND HOLE=DISABLED, ONERROR=NO, READ POS=NO  
 SHOWHITS=YES  
 HIT/BASIC, <-62.9, -170, 103.882>, <-0.6807209, 0, 0.7325429>, <-62.9, -170, 103.882>  
 HIT/BASIC, <-57.768, -170, 107.285>, <-0.409923, 0, 0.9121201>, <-57.768, -170, 107.285>  
 HIT/BASIC, <-51.816, -170, 108.863>, <-0.0958458, 0, 0.9953962>, <-51.816, -170, 108.863>  
 HIT/BASIC, <-45.673, -170, 108.449>, <0.2283509, 0, 0.9735789>, <-45.673, -170, 108.449>

PART NUMBER=Délkoměr DATE=14.4.2015 TIME=16:32:18 PAGE#=4  
HIT/BASIC,<-39.986,-170,106.088>,<0.5284383,0,0.8489717>,<-39.986,-170,106.088>

HIT/BASIC,<-35.357,-170,102.028>,<0.7727336,0,0.6347305>,<-35.357,-170,102.028>

HIT/BASIC,<-32.273,-170,96.698>,<0.935444,0,0.3534748>,<-32.273,-170,96.698>

HIT/BASIC,<-31.062,-170,90.661>,<0.9993908,0,0.0348995>,<-31.062,-170,90.661>

ENDMEAS/

DIM PRŮMĚR 37.9 VLEVO= LOCATION OF CIRCLE KRUH2 UNITS=MM , \$ **Výpis polohy Ø 37,9 mm**

AX	MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
X	-50.000	-50.000	0.000	0.010	0.010	0.000 ----#----
Z	90.000	90.000	0.000	0.010	0.010	0.000 ----#----
D	37.900	37.900	0.000	0.020	0.020	0.000 ----#----

END OF DIMENSION PRŮMĚR 37.9 VLEVO

DIM SOUSOST NA DÉLCE 250 MM= CONCENTRICITY FROM CIRCLE KRUH1 TO CIRCLE KRUH2 UNITS=MM , \$

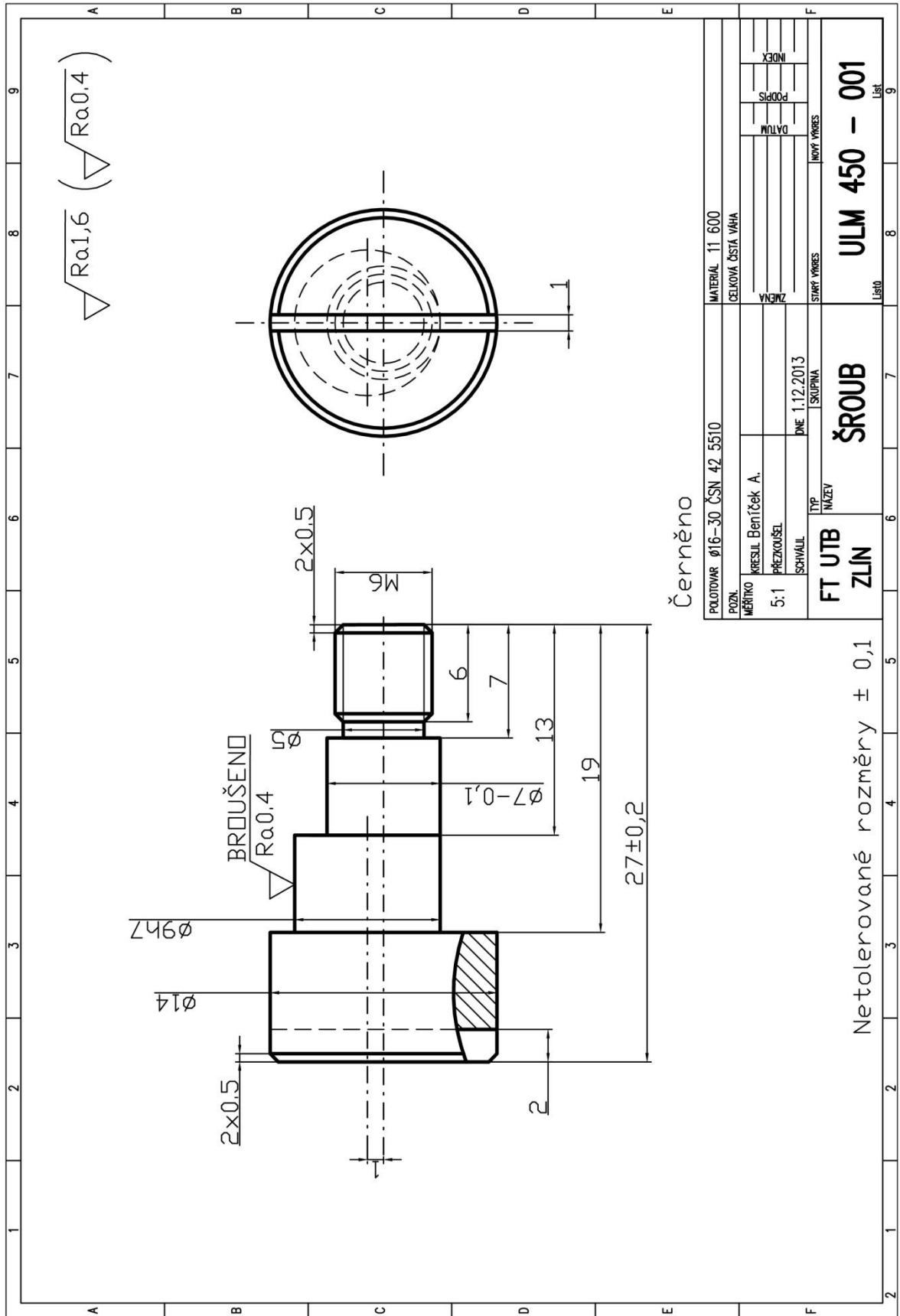
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH **Spočtená sousost obou Ø 37,9 mm**

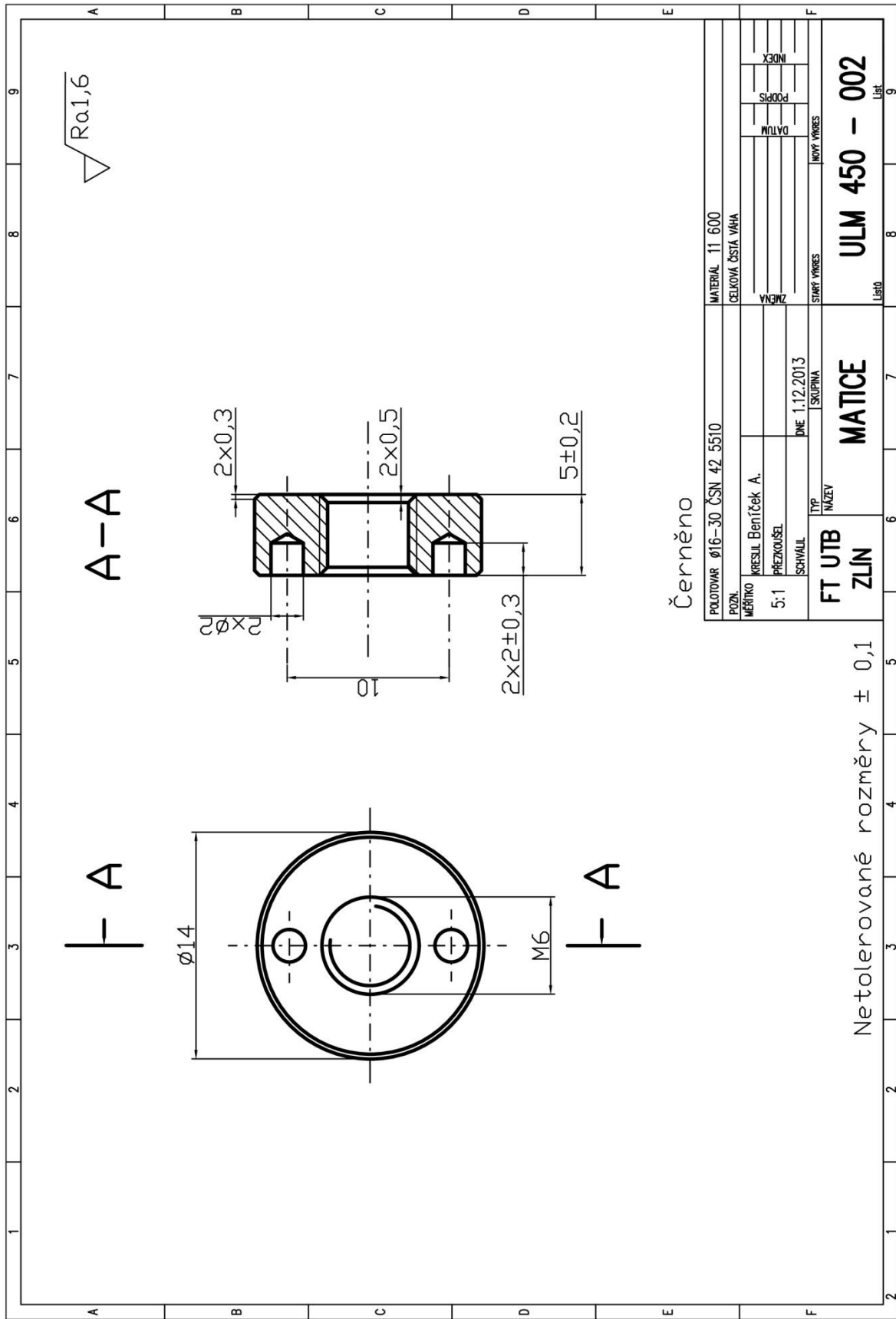
AX	MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
M	0.000	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000 #-----

END OF MEASUREMENT FOR

PN=Délkoměr DWG= SN=MĚŘENÍ SOUSOSTI  
TOTAL # OF MEAS =0 # OUT OF TOL =0 # OF HOURS =00:00:00

# PŘÍLOHA P II: KONSTRUKČNÍ VÝKRESY





Černěno

POLOTOVAR Ø16-30 ČSN 42 5510		MATERIAL 11 600	
POZN. CELKOVÁ ČISTÁ VÁHA			
MĚŘÍTKO	KRESLIL Bentčěk A.	ZNAČKA	INDEX
5:1	PŘEZKOUSEL		PODPIS
	SCHVÁLIL	DNE 1.12.2013	DATUM
		SKUPINA	INDY VÝKRES
FT UTB	TYP	ULM 450 - 002	
ZLÍN	NÁZEV	MATICE	
		LISTO	LIST
		8	9

Netolerované rozměry ± 0,1