

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV METROLOGIE A ZKUŠEBNICTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF METROLOGY AND QUALITY ASSURANCE TESTING

# VUŽITÍ LASERINTERFEROMETRU RENISHAW PRO MĚŘENÍ PŘÍMOSTI A ROVINNOSTI

USING OF LASERINTERFEROMETER RENISHAW FOR STRAIGHTNESS AND FLATNESS  
MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN LEŠANOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR PATA, Dr.

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav metrologie a zkušebnictví  
Akademický rok: 2007/08

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Lešanovský Jan

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Řízení jakosti (3911T023)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Využití laserinterferometru Renishaw pro měření přímosti a rovinosti**

v anglickém jazyce:

#### **Using of laserinterferometer Renishaw for straightness and flatness measurement**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měření přímosti a rovinnosti univerzálního měřicího mikroskopu s využitím laserinterferometru.

Cíle diplomové práce:

1. Aplikace norem čady ČSN ISO 230 se zvláštním zaměřením na měření přímosti a rovinnosti
2. Praktická měření přímosti i rovinnosti
3. Vyhodnocení výsledků dle ČSN ISO norem
4. Zpracování výukové prezentace

Seznam odborné literatury:

J.Perníkář - Jakost a metrologie, CERM 2001

ČSN P ISO/TS 12780-1, ČSN P ISO/TS 12780-2 Geometrické požadavky na výrobky -  
Přímost

ČSN P ISO/TS 12781-1, ČSN P ISO/TS 12781-2 Geometrické požadavky na výrobky -  
Rovinnost

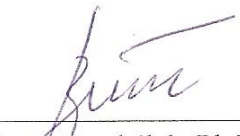
ČSN ISO 230-1


Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Pata, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 3.12.2007



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Leoš Bumbálek, Ph.D.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

Abstrakt:

Jan Lešanovský

Tato diplomová práce se zabývá měřením přímosti a rovinnosti a jeho vyhodnocením. K měření je použit laserinterferometr firmy Renishaw. Cílem této práce je naměřit hodnoty přímosti na pojezdu měřicího mikroskopu, dále rozkódovat výpočetní metody vedoucí ke grafům přímosti, přepočítat z naměřených hodnot dle ČSN a porovnat výsledky softwaru a výsledky dosažené dle ČSN. Měření rovinnosti je aplikováno na desce před lapováním (povrchová úprava) a po něm a tyto výsledky jsou vzájemně porovnány.

Klíčová slova: přímost, rovinnost, laserinterferometr,

Abstract:

Jan Lešanovský

This diploma dissertation deals with straightness and flatness measurement and data evaluation. For all measurements laserinterferometer Renishaw is used. The main purpose of this diploma work is to get values of straightness on the travel of microscope, decrypt computing methods leading to graphs of straightness, re-count it by ČSN standards and compare both sets of graphs. Flatness measurement is performed on a desk before and after lapping and these results are compared.

Key words: straightness, flatness, laserinterferometer,

**Bibliografická citace VŠKP:**

LEŠANOVSKÝ, J. *Využití laserinterferometru Renishaw pro měření přímosti a rovinosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Pata, Dr.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování diplomové práce a že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny zdroje informací a literaturu.

V Brně dne 24.5. 2008

.....  
Jan Lešanovský

**Poděkování:**

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vladimír Patovi, Dr. za odbornou pomoc, spolupráci, cenné rady a připomínky, které přispěly ke zkvalitnění této práce a pomoc při provádění experimentů. Stejně tak bych chtěl poděkovat všem, kteří přispěli ke zdárnému dokončení této práce.

## OBSAH:

1. ÚVOD .....	10
2. PŘÍMOST .....	10
2.1. Přímost čáry v rovině nebo prostoru .....	10
2.2. Metody měření přímosti .....	11
2.2.1. Metody měření přímosti založené na měření délek .....	11
2.2.1.1. Metoda měření pravítkem .....	12
2.2.1.2. Metoda měření strunou a mikroskopem .....	14
2.2.1.3. Metoda měření zaměřovacím dalekohledem .....	15
2.2.1.4. Metoda měření zaměřovacím laserem .....	16
2.2.1.5. Laserinterferometrická metoda .....	16
2.2.2. Metody měření přímosti založené na měření úhlů .....	17
2.2.2.1. Metoda měření vodováhou .....	18
2.2.2.2. Autokolimační metoda .....	19
2.3. Přímost součástí .....	20
2.3.1. Vodící plochy .....	21
2.3.2. Prizmatické plochy .....	21
2.3.3. Válcové plochy .....	22
2.3.4. Jednotlivé svislé plochy .....	22
2.3.5. Šikmé lože .....	23
2.4. Přímost pohybu .....	23
2.4.1. Lineární úchylky .....	24
2.4.2. Úhlové úchylky .....	24
2.4.3. Metody měření .....	24
2.4.3.1. Metoda měření pravítkem a číselníkovým úchylkoměrem .....	24
2.4.3.2. Metoda měření strunou a mikroskopem .....	24
2.4.3.3. Metoda měření zaměřovacím dalekohledem .....	25
2.4.3.4. Metoda měření laserem .....	25
2.4.3.5. Metoda založená na měření úhlů .....	25
2.4.3.6. Metody měření úhlových úchylek .....	26
2.4.3.7. Metoda měření vodováhou .....	26
2.4.3.8. Metoda měření autokolimátorem .....	26
2.4.3.9. Metoda měření laserem .....	26
3. LASEROVÝ MĚŘÍCÍ SYSTÉM ML10 .....	26
3.1. Měření přímosti laserinterferometrem Renishaw .....	27

3.2. Optika potřebná pro měření přímosti.....	28
3.3. Základní principy měření přímosti.....	29
3.4. Faktory ovlivňující přesnost měření .....	29
4. ANALÝZA HODNOT PŘÍMOSTI.....	30
4.1. Metoda nejmenších čtverců - Least squares fit .....	30
4.2. Metoda koncových bodů – End point fit .....	31
4.3. Porovnání grafů .....	34
4.4. Porovnání hodnot získaných z programu Renishaw a ručně vypočítaných hodnot.....	46
4.4.1. Analýza přímosti osy X vzhledem k ose Y metodou nejmenších čtverců.....	46
4.4.1.1. Přesnost přímosti .....	46
4.4.1.2. Jednosměrná opakovatelnost .....	47
4.4.1.3. Bidirekcionální opakovatelnost .....	47
4.4.1.4. Průměrná odchylka obráceného chodu .....	48
4.4.1.5. Úchylka přímosti .....	49
4.4.2. Analýza přímosti osy X vzhledem k ose Y metodou koncových bodů.....	49
4.4.2.1. Přesnost přímosti .....	49
4.4.2.2. Jednosměrná opakovatelnost .....	50
4.4.2.3. Bidirekcionální opakovatelnost .....	50
4.4.2.4. Průměrná odchylka obráceného chodu .....	51
4.4.2.5. Úchylka přímosti .....	52
4.4.3. Analýza přímosti osy Y vzhledem k ose X metodou nejmenších čtverců .....	52
4.4.3.1. Přesnost přímosti .....	52
4.4.3.2. Jednosměrná opakovatelnost .....	53
4.4.3.3. Bidirekcionální opakovatelnost .....	53
4.4.3.4. Průměrná odchylka obráceného chodu .....	54
4.4.3.5. Úchylka přímosti .....	55
4.4.4. Analýza přímosti osy Y vzhledem k ose X metodou koncových bodů.....	55
4.4.4.1. Přesnost přímosti .....	55
4.4.4.2. Jednosměrná opakovatelnost .....	56
4.4.4.3. Bidirekcionální opakovatelnost .....	56
4.4.4.4. Průměrná odchylka obráceného chodu .....	57
4.4.4.5. Úchylka přímosti .....	58
4.5 Intervaly spolehlivosti regresní křivky.....	58
5. ROVINNOST .....	61
5.1. Metody měření .....	61
5.1.1. Měření rovinnosti průměrnou deskou .....	61

5.1.2. Měření příměrnou deskou a číselníkovým úchylkoměrem .....	61
5.1.3. Měření rovinností pravítkem (pravítka) .....	62
5.1.3.1. Měření pomocí soustavy přímek přemíst'ováním pravítka .....	62
5.1.3.2. Měření pravítka, vodováhou a číselníkovým úchylkoměrem .....	63
5.1.4. Měření rovinnosti vodováhou .....	64
5.1.5. Měření rovinnosti optickými metodami .....	66
5.1.5.1. Měření autokolimátorem .....	66
5.1.5.2. Měření rozkladovým optickým hranolem .....	67
5.1.5.3. Měření zaměřovacím laserem .....	68
5.1.5.4. Měření laserovým měřicím systémem .....	68
5.1.5.5. Měření souřadnicovým měřicím strojem .....	69
6. MĚŘENÍ ROVINNOSTI LASERINTERFEROMETREM RENISHAW .....	69
6.1. Standardní metody hodnocení rovinnosti .....	71
6.1.1. Moodyho Metoda .....	72
6.1.2. Mřížková a polo-mřížková metoda .....	72
6.2. Faktory ovlivňující přesnost měření rovinnosti .....	73
6.2.1. Chyba polohy paprsku .....	73
6.2.2. Diferenciální prodloužení základny .....	73
6.2.3. Podmínky opakovatelnosti měření .....	74
7. ANALÝZA HODNOT ROVINNOSTI .....	74
7.1. Hodnoty naměřené mřížkovou metodou před lapováním .....	75
7.1.1. Měření hodnot podél osy X .....	75
7.1.2. Měření hodnot podél osy Y .....	76
Závěr .....	77
Použitá literatura .....	78
Seznam použitých znaků a symbolů .....	79
Seznam obrázků .....	81
Seznam tabulek .....	84
Seznam příloh .....	84
Seznam použitého softwaru .....	84

## 1. ÚVOD

Laserové měření patří mezi dynamicky se rozvíjející metody. V současnosti jsou zpracovány přesné metodologie postupů, které jsou dokonce zakotveny v příslušných technických normách. Velikou výhodou laserového měření je samozřejmě fakt, že tento typ měření patří k nejpřesnějším způsobům měření. Mezi další výhody patří zkrácení seřizovacích časů, zvýšení přesnosti a bezpečnosti, snížení počtu nedokonalých výrobků a snížení výrobních nákladů.

Daní za to je poněkud vyšší cena a nutnost provádět tyto metody osobou mající příslušné znalosti pro jejich provádění a vyhodnocování.

## 2. PŘÍMOST

Geometrické zkoušky, týkající se přímosti, jsou tyto:

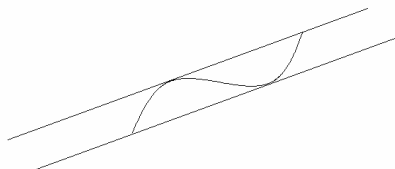
- **přímost čáry v rovině nebo prostoru**
- **přímost součástí**
- **přímost pohybu**

### 2.1. Přímost čáry v rovině nebo prostoru

Podle definice dle ČSN ISO 230-1 je čára ležící v rovině považována za přímou v určené délce, pokud všechny její body leží mezi dvěma přímkami, rovnoběžnými s hlavním směrem čáry, jejichž vzdálenost je rovna toleranci.

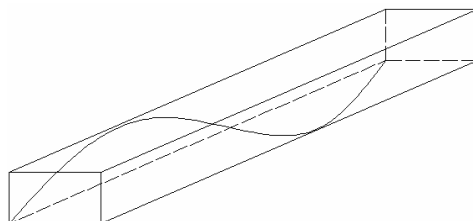
Hlavní směr čáry, resp. reprezentativní přímka, musí být určen tak, aby byla minimalizována úchylka přímosti. Může však být určena následujícími běžnými metodami:

- buď dvěma body vhodně zvolenými blízko konců měřené čáry (ve většině případů části čáry těsně u konců nelze brát v úvahu, neboť velmi často obsahují malé nezávažné místní vady)
- nebo výpočtem ze zaznamenaných bodů (např. metodou nejmenších čtverců)



obr. 2.1 – přímost čáry v rovině

Čára ležící v prostoru je považována za přímou v určené délce, pokud každý z jejích průmětů do dvou určených, vzájemně kolmých rovin, rovnoběžných s hlavním směrem čáry, je přímý. [1]



obr. 2.2 – přímost čáry v prostoru

## 2.2. Metody měření přímosti

Existují dva druhy metod založených:

- na měření délek
- na měření úhlů

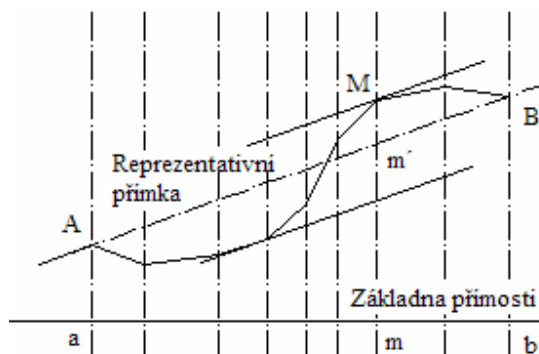
Praktická základna přímosti může být hmotná (pravítko, struna), nebo v podobě základních přímek daných vodováhou, světelným paprskem, atd.

Doporučuje se použití podle délek:

- do 1600mm: vodováhy nebo hmotné základny (pravítko)
- nad 1600mm: základních přímek (pomocí vodováhy, optických přístrojů, eventuálně struny) [1]

### 2.2.1. Metody měření přímosti založené na měření délek

Použitá praktická základna musí být umístěna do vhodné relativní polohy vzhledem k měřené čáře (viz obr. 2.3), která umožňuje použití vhodného měřidla.



obr. 2.3 – umístění reprezentativní přímky

Měřidlo zajišťuje odečítání úchylek měřené čáry od základny přímosti; odečítat lze v různých bodech (rozložených pravidelně či nepravidelně) po celé délce měřené čáry (vzdálenosti zvolených bodů jsou nezávislé na použitých měřidlech).

Doporučuje se umístit základnu přímosti tak, aby odečty na obou koncích byly přibližně stejné. Odečty se pak přímo vynášejí graficky při použití vhodných měřitek.

Výsledky jsou zpracovány pomocí definované reprezentativní přímky. Korigované úchytky odpovídají hodnotám představovaným úsečkami  $Mm'$ .

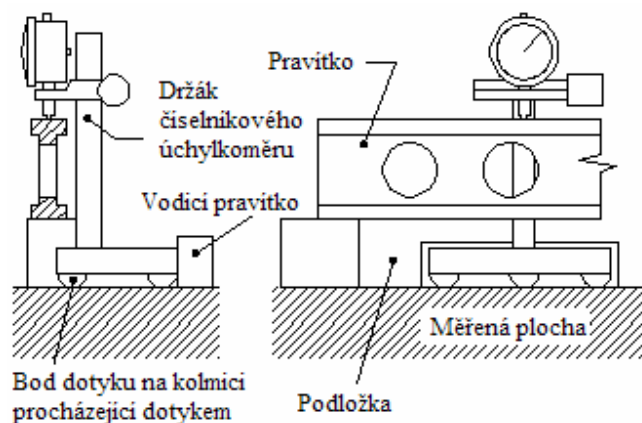
Úchylka přímosti je definována jako vzdálenost dvou přímek, rovnoběžných s reprezentativní přímkou, které se dotýkají nejvyššího a nejnižšího bodu úchylek.[1]

### 2.2.1.1. Metoda měření pravítkem

#### Měření ve svislé rovině:

Pravítko má být ustanoveno na dvou podložkách umístěných, pokud je to možné, v bodech odpovídajících nejmenšímu průhybu vlastní hmotností.

Měření musí být provedeno tak, že se podél pravítka posouvá držák číselníkového úchylkoměru se třemi opěrnými body. Jeden z těchto bodů spočívá na čáře plochy, která má být měřena a dotek číselníkového úchylkoměru je na kolmici k této ploše, procházející uvedeným opěrným bodem a dotýká se pravítka (viz obr. 2.4).



obr. 2.4 – číselníkový úchylkoměr

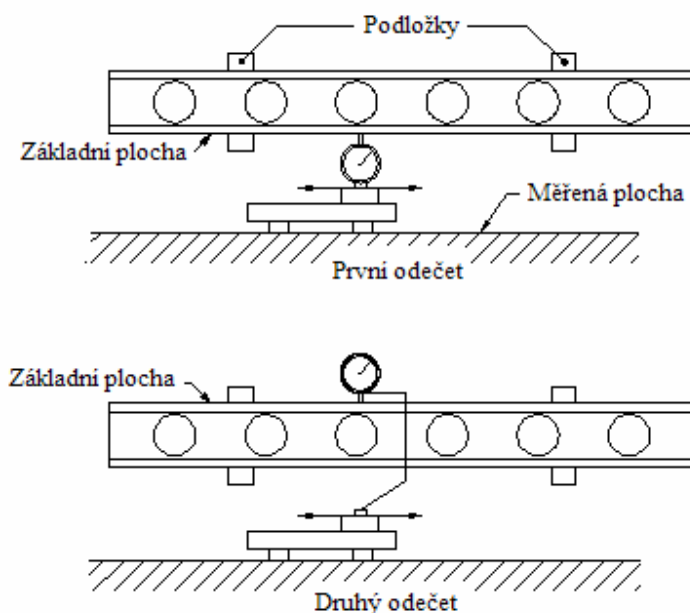
Musí být zajištěn pohyb držáku po přímce (vodící pravítka).

Je-li požadováno mohou být při zpracování výsledků vzaty v úvahu známé úchylny přímoty pravítka.

### Měření ve vodorovné rovině:

V tomto případě se doporučuje použití pravítka s rovnoběžnými plochami, položeného naplocho.

Číselníkový úchylkoměr se dotýká základní plochy pravítka a pohybuje se v kontaktu s měřenou plochou (viz obr. 2.5). Pravítko je ustanoveno tak, aby na obou koncích čáry byly stejné odečty; úchylny čáry oproti přímce, spojující oba koncové body čáry, lze odečítat přímo.



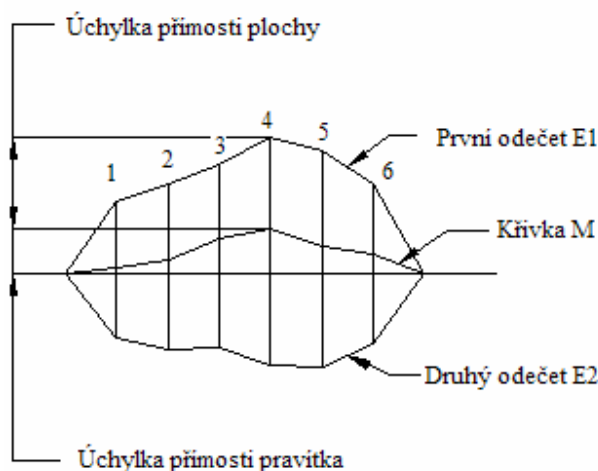
obr. 2.5 – znázornění využití číselníkového úchylkoměru

Je nutno poznamenat, že ať je průhyb pravítka na opěrkách jakýkoli, není přímota základní plochy tímto průhybem vlastní hmotností prakticky ovlivněna.

Další vlastností metody měření přímoty pravítkem ve vodorovné rovině je, že umožňuje měření úchylek přímoty jak měřené plochy, tak základní plochy pravítka.

Pro tento účel se použije tzv. metody převrácení. Ta spočívá v tom, že po prvním měření, popsaném výše, se pravítka otočí o 180° okolo jeho podélné osy a stejným úchylkoměrem, také otočeným a spočívajícím na měřené ploše, se pohybuje podél stejné základní plochy, která je na opačné straně.

Obě takto získané křivky úchylek  $E_1$  a  $E_2$ , vynesené na obrázku 2.6, jsou prvním případem součtem úchylek pravítka a úchylek plochy a v druhém případě rozdílem těchto úchylek.



obr. 2.6 – křivky úchylek

Křivka průměrných hodnot  $M$  je úchylka základní plochy pravítka. Úchylka  $ME_1$  (nebo  $ME_2$ ) je pak úchylkou přímosti měřené plochy. [1]

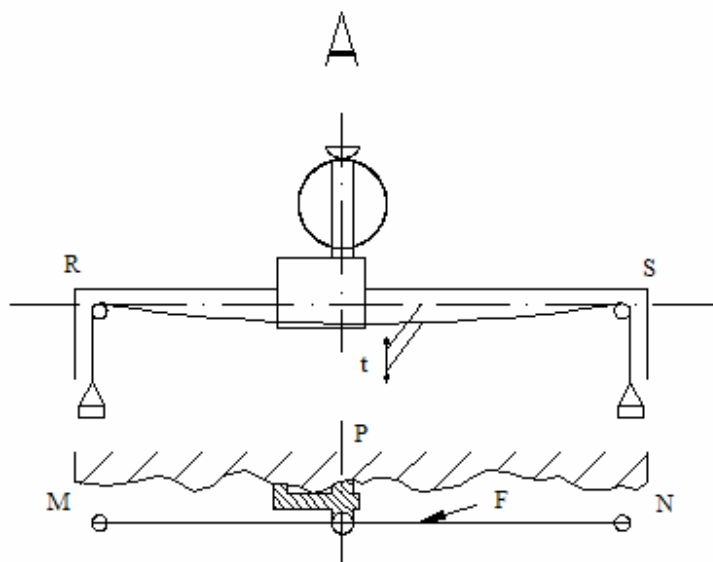
### 2.2.1.2. Metoda měření strunou a mikroskopem

Ocelová struna o průměru 0,1mm je napnutá přibližně rovnoběžně s kontrolovanou čarou (viz obr. 2.7). Např. v případě čáry  $MN$ , ležící ve vodorovné rovině, lze svisle umístěným mikroskopem, vybaveným vodorovným mikroskopickým posuvným zařízením, odečítat úchylky čáry vůči struně, reprezentující základnu měření ve vodorovné rovině měření  $XY$ .

Struna  $F$  a měřená čára musí být ve společné rovině kolmé k uvažované ploše, obsahující měřenou čáru  $MN$ .

Držák mikroskopu spočívá dvěma body na ploše, v které leží kontrolovaná čára, z nichž jeden bod  $P$  leží v rovině kolmé k uvažované ploše a prochází optickou osou mikroskopu (viz obr.2.7).

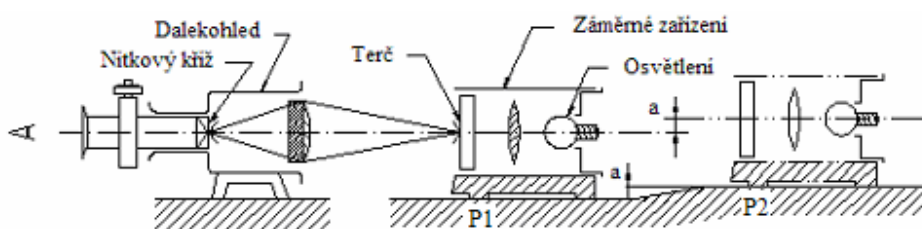
Metoda měření strunou nemá být použita v případech, kdy je nutno brát v úvahu průvès  $f$  struny  $F$ . Například v případě uvedeném na obrázku 2.7 lze mikroskopem umístěným vodorovně měřit přímost čáry  $RS$  ve svislé rovině, pokud je znám průvès struny v každém bodě; určit průvès s dostatečnou přesností je však velmi obtížné. [1]



obr. 2.7 – měření přímosti strunou

### 2.2.1.3. Metoda měření zaměřovacím dalekohledem

Při použití zaměřovacího dalekohledu (viz obr.2.8) se přímo na nitkovém kříži nebo pomocí optického mikrometru odečítá rozdíl úrovně  $a$ , odpovídající vzdálenosti mezi optickou osou dalekohledu a záměrnou značkou na terči.



obr. 2.8 – měření přímosti dalekohledem

Optická osa dalekohledu tvoří základnu měření.

Natáčením celého dalekohledu a terče lze měřit přímost čáry v libovolné rovině.

Držák terče má spočívat na ploše, obsahující měřenou čáru, v tolika bodech, kolik je požadováno pro zaručení stability terče a jeho směrové vedení.

Jeden z opěrných bodů P držáku terče musí spočívat na měřené čáře.

Terč musí být v bodě P kolmý na plochu obsahující měřenou čáru.

Je nutno zajistit, aby přemísťování pohyblivého členu bylo přiměřeně přímočaré a rovnoběžné s optickou osou.

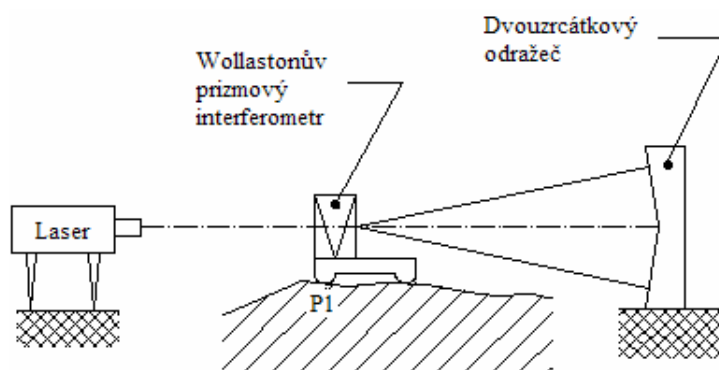
Při měření větších délek je přesnost ovlivněna změnami indexu lomu vzduchu, které přispívají k vychýlení světelného paprsku. [1]

#### 2.2.1.4. Metoda měření zaměřovacím laserem

Jako základna měření je použit laserový paprsek. Paprsek je směřován na čtyřkvadrantový fotodiodový detektor, kterým se pohybuje ve směru osy laserového paprsku. Jsou snímány a k záznamovému přístroji vedeny vodorovné a svislé úchyly středu detektoru vůči paprsku. Mají být vzaty v úvahu pokyny výrobce měřicího zařízení. [1]

#### 2.2.1.5. Laserinterferometrická metoda

Základnu měření určuje dvouzrcátkový odražeč.

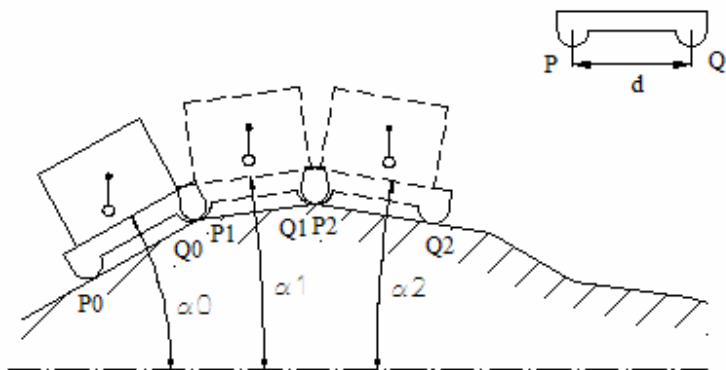


obr. 2.9 – dvouzrcátkový odražeč

Laserinterferometr, spolu se speciální optickou výbavou, se používá pro zjištění změn polohy ohniska vůči ose symetrie dvouzrcátkového odražeče. Optická výbava a správné měřicí metody jsou různé a proto mají být vzaty v úvahu pokyny výrobce přístroje. [1]

### 2.2.2. Metody měření přímosti založené na měření úhlů

U těchto metod je přemísťovaný prvek ve styku s kontrolovanou čarou ve dvou bodech P a Q, které jsou od sebe vzdáleny  $d$  (viz obr. 2.10.). Přemísťovaný prvek se přemísťuje tak, že v sousedních polohách  $P_0Q_0$  a  $P_1Q_1$  je  $P_1$  shodný s  $Q_0$ . Přístrojem, umístěným v rovině kolmé na plochu obsahující měřenou čáru, se měří úhly  $\alpha_0$  a  $\alpha_1$  přemísťovaného prvku vzhledem k základně měření.



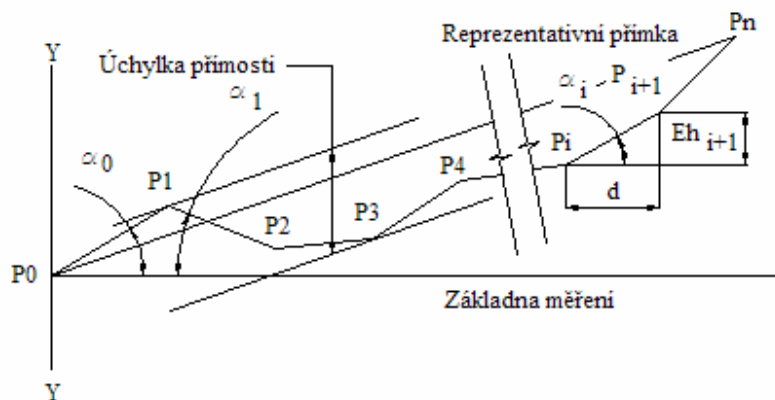
obr. 2.10 – měření přímosti na základě měření úhlů

Část mezi dotykovými body představovaného prvku není touto metodou měřena. Měření této části může být provedeno pomocí pravítka vhodné délky.

Výsledky se zpracují dále uvedeným způsobem (viz obr. 2.11). Ve vhodném měřítku se graficky vynesou následující parametry:

- velikosti kroků  $d$  jako souřadnice odpovídající měřené čáře
- relativní rozdíly sklonu od základny měření jako pořadnice. Relativní rozdíly sklonu se vypočítají následovně:

$$Eh_{i+1} = d \cdot tg\alpha_i \tag{2.1}$$



obr. 2.11 – zpracování výsledků

Jednotlivé body  $P_0, P_1, P_2, \dots, P_i \dots P_n$  měřené čáry mohou být vynášeny v potřebném měřítku.

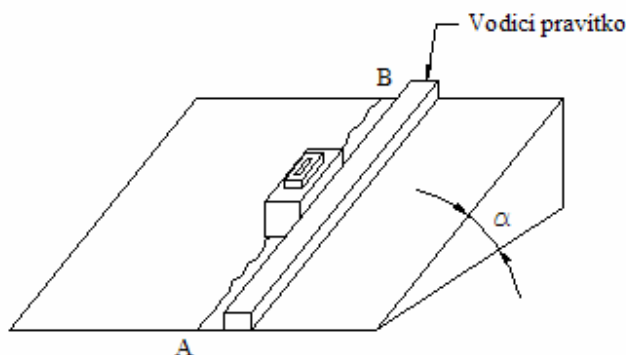
Reprezentativní přímka je určena samotnou čarou, např. jejími koncovými body  $P_0, P_n$ .

Úchylka přímosti je definována stejně, jak je uvedeno výše (sekce „Metody založené na měření délek“), vzdáleností ve směru osy  $YY$  mezi dvěma přímkami rovnoběžnými s reprezentativní přímkou, které se dotýkají křivky v nejvyšším a nejnižším bodě. [1]

### 2.2.2.1 Metoda měření vodováhou

Měřidlem je vodováha, která se postupně přemísťuje podél měřené čáry (viz Metody měření přímosti založené na měření úhlů). Základnou měření je vodorovná poloha měřidla, které měří malé úhly ve svislé rovině (viz obr.2.10).

Není-li měřená čára vodorovná, umísťuje se vodováha na můstek s vhodným sklonem (viz obr.2.12).



obr. 2.12 – měření vodováhou

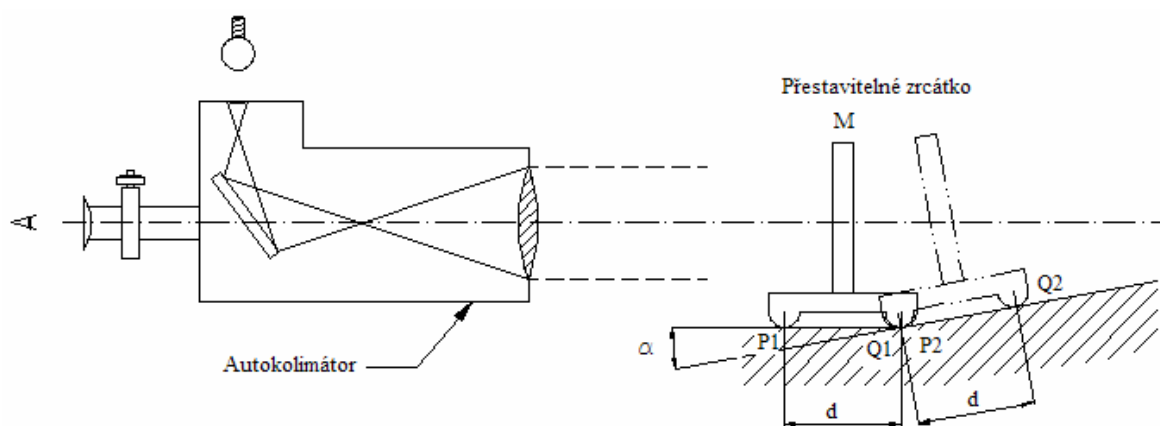
Při měření čáry AB má vodováha spolu s můstkem zachovat stálou orientaci (např. pomocí vodícího pravítka – viz obr. 2.12).

Vodováha umožňuje měření přímosti pouze ve svislé rovině, pro měření čáry v druhé rovině by měla být použita jiná metoda (např. struna a mikroskop). [1]

### 2.2.2.2 Autokolimační metoda

U této metody, využívající souose namontovaný autokolimátor (viz obr. 2.13), způsobí jakékoliv natočení přestavitelného zrcátka M kolem vodorovné osy svislou změnu polohy obrazu nitkového kříže v ohniskové rovině. Změření této změny polohy pomocí okulárového mikrometru umožní určit úhlovou úchylku držáku zrcátka.

Základna je tvořena optickou osou dalekohledu, určenou středem nitkového kříže.

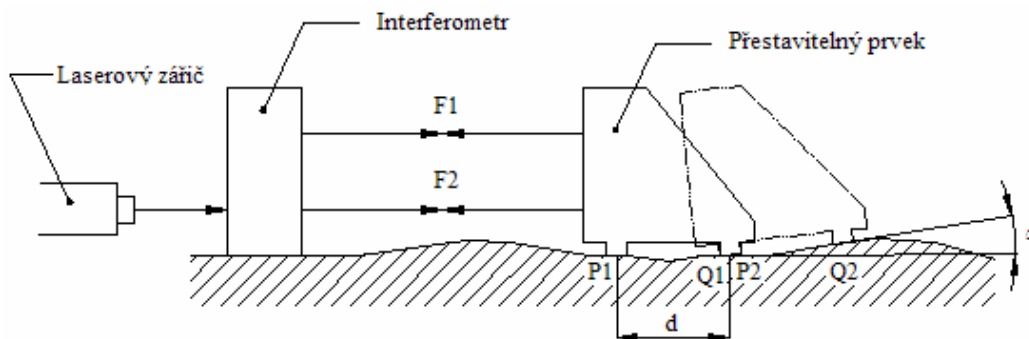


obr. 2.13 - autokolimátor

Při natočení okulárového mikrometru o  $90^\circ$  lze též měřit úhel natočení zrcátka kolem svislé osy. Existují přístroje, umožňující současné měření obou úhlů.

Tato metoda je zvláště vhodná pro větší délky měření, neboť proti zaměřovacímu dalekohledu je, vzhledem ke zdvojené dráze světelného paprsku, méně ovlivněna změnami indexu lomu vzduchu.

Při použití této metody se má autokolimátor přednostně umístit na součást, na které se nachází měřená čára.



obr. 2.14 – laserinterferometrická metoda

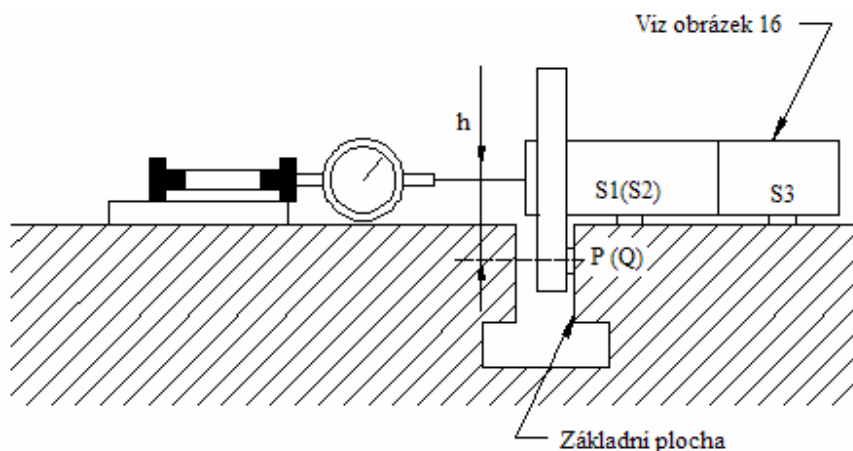
Měření přímosti laserem spočívá ve zjištění odchylek tvaru měřeného předmětu od přímého světelného paprsku. Po předem určené dráze ve směru paprsku se posouvá odražeč a laserový interferometr, do kterého se paprsek vrací, vyhodnocuje jednotlivé hodnoty. Výsledkem je průběh hodnot vč. maximální a minimální odchylky. [1]

### 2.3. Přímost součástí

Podmínky pro přímost součástí jsou totožné s podmínkami pro přímost čáry (viz kapitola 1.1).

Měřicí postupy jsou stejné jako pro měření přímosti čáry (viz. kapitola 1.4).

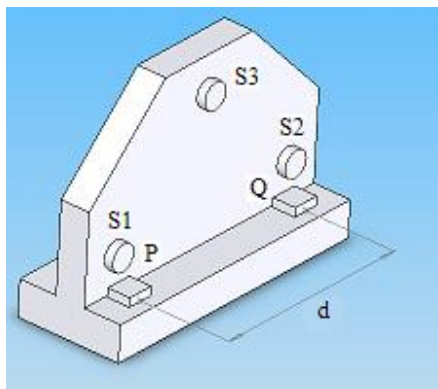
Při přímém měření úchylek musí přístroj odměřovat úchylky v rovině kolmé na čáru pomocí bodů P nebo Q tak, aby  $h$  bylo co nejmenší (viz obr 2.15).



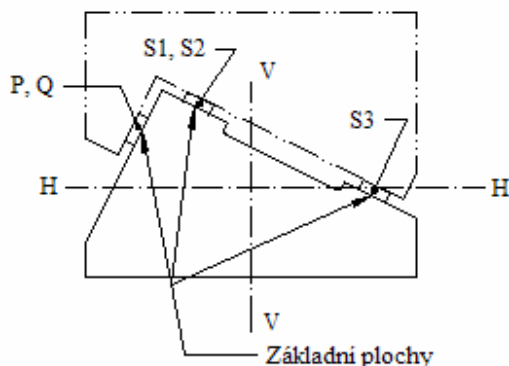
obr. 2.15 – měření přímosti součástí

Při měření úhlových úchylek je vzdáleností  $d$  určena rozteč bodů měření (viz obr. 2.16).

Přemísťovaný prvek musí ležet na vodorovné ploše stolu (přednostně opřen na třech vhodně umístěných ploškách  $S_1, S_2, S_3$ ) a musí mít dvě funkční nosné plochy P a Q na měřené čáře (viz obr. 2.16).



obr. 2.16 - rozteč bodů



obr. 2.17 – přímost sdužených základních ploch

Úchylky přímosti více sdužených základních ploch (viz obr. 2.17) se měří ve funkčních rovinách vedení (čáry HH a VV) a ne kolmo na základní rovinu. [1]

### 2.3.1. Vodící plochy

Vedení je zajištěno vodícími plochami nebo více sduženými zařízeními, která nelze demontovat bez porušení geometrie stroje. Měření vodících ploch zahrnuje měření přímosti a má být provedeno pouze tehdy, je-li součást přístupná. Více sdužených vodících ploch musí být měřeno pomocí měření přímocharosti pohybu pohyblivé části.

Úchylka přímosti má být vždy měřena ve funkční rovině. Za tu může být obecně považována buď vodorovná (obr. 2.18, čára AA), nebo svislá rovina (obr. 2.18, čára BB), i když se u určitého uspořádání stroje mohou vyskytnout výjimky.

Je nutno poznamenat, že podélný tvar vodící plochy nemusí být nutně přímý, neboť může představovat ve funkční rovině zvláštní tvar, určený výrobcem. [1]

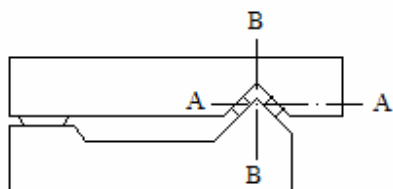
Vodící povrchy mohou být složeny:

- a) z jedné roviny nebo z více malých spolu spojených sekcí
- b) z více úzkých rovinných sekcí, z válcových ploch nebo z kombinací těchto dvou

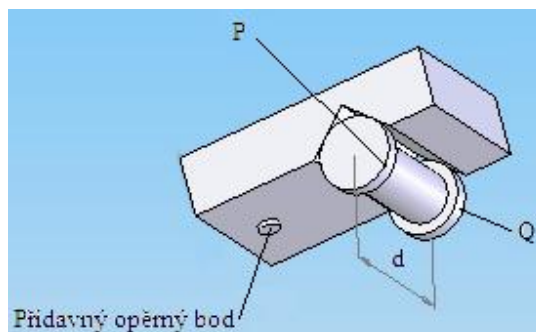
### 2.3.2. Prizmatické plochy

Přemísťované těleso má na vodících plochách spočívat ve čtyřech dotykových bodech. Aby bylo stabilní, musí být také opřeno v přidavném bodě na jiné vodící ploše.

Obrázek 2.19 ukazuje použití odlehčeného válce, obr. 2.18 použití negativního odlehčeného prizmatu. [1]



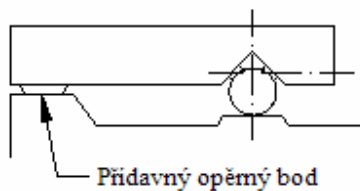
obr. 2.18 - negativní odlehčený prizmat



obr. 2.19 – odlehčený válec

### 2.3.3. Válcové plochy

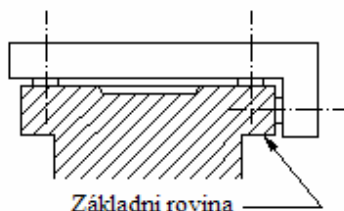
Přemísťované těleso má na válci spočívat čtyřmi opěrnými ploškami. To je umožněno použitím negativního prizmatu (obr. 2.20).



obr.2.20 – měření válcových ploch

### 2.3.4. Jednotlivé svislé plochy

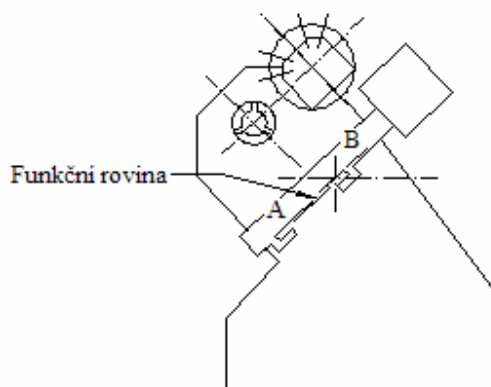
Přemísťované těleso se měřené plochy dotýká se v bodech P a Q. Pro vedení přemísťovaného tělesa je zapotřebí tři přídavných opěrných bodů. Ty musí být zvoleny tak, aby zajistily vedení, aniž by ovlivnily polohu dvou funkčních dotykových bodů (viz obr. 2.21). [1]



obr. 2.21 – měření svislých ploch

### 2.3.5. Šikmé lože

V tomto případě svírá funkční rovina přemísťovaného prvku s vodorovnou rovinou určitý úhel. Úchylka přímosti se měří v této funkční rovině (čára AB) a v rovině k ní kolmé. [1]



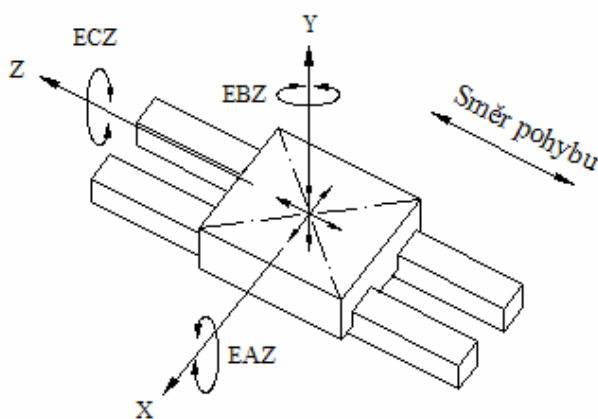
obr. 2.22 – šikmé lože

### 2.4. Přímota pohybu

Měření přímočarého pohybu části obráběcího stroje jsou požadována nejen proto, aby se zjistilo, zda stroj bude produkovat přímé nebo rovinné obrobky, ale rovněž proto, že na přímočarém pohybu je závislá přesnost polohy bodu obrobku. [1]

Přímota pohybu pohybuující se části zahrnuje vždy šest složek úchylek:

- jednu úchylku polohy ve směru pohybu
- dvě lineární úchylky dráhy bodu na pohybuující se části
- tři úhlové úchylky pohybuující se části



obr. 2.23 – možné úchylky pohybu

Úchylky při pohybu ve směru Z:

EXZ: Lineární úchylka	EAZ: Klopení	\
EYZ: Lineární úchylka	EBZ: Natáčení	úhlové úchylky
EZZ: Úchylka polohy	ECZ: Naklánění	/

### 2.4.1. Lineární úchylky

Lineární úchylka přímočarého pohybu je určena přímostí dráhy funkčního bodu anebo reprezentativního bodu pohybující se části. Funkčním bodem je poloha nástroje, jestliže pohybující se část stroje nese nástroj. Pokud pohybující se část nese obrobek, pak za reprezentativní bod může být považován střed stolu. [1]

### 2.4.2. Úhlové úchylky

Kdykoliv se část stroje pohybuje, vždy dochází k úhlovým úchylkám. Tyto úhlové úchylky jsou nazývány naklánění, klopení a natáčení podle obrázku 2.23.

Všechny tyto úchylky ovlivňují přímočarý pohyb. Při měření přímočarého pohybu dráhy reprezentativního bodu zahrnují změřené výsledky všechny vlivy úhlových úchylek. Je-li však poloha bodu pohybující se části rozdílná od polohy reprezentativního bodu, jsou vlivy těchto úhlových úchylek různé, a proto musí být provedeno jejich samostatné měření. Hodnota každé úhlové úchylky je rovna největšímu úhlu, o který se součást v průběhu celého pohybu natočí. [1]

### 2.4.3. Metody měření

Pro měření dráhy funkčního bodu pohybující se části se používají tyto následující metody.[1]

#### 2.4.3.1. Metoda měření pravítkem a číselníkovým úchylkoměrem

Při použití pravítka a číselníkového úchylkoměru je obvykle pravítko upevněno k součásti, použité jako základna (stoly pracovních frézek, obráběcích center, lože soustruhu, atd.). Číselníkový úchylkoměr je upevněn do bodu umístění nástroje tak, aby jeho dotek byl co nejbližší pracovnímu místu nástroje. [1]

#### 2.4.3.2. Metoda měření strunou a mikroskopem

Situace je shodná jako při použití pravítka a úchylkoměru, struna nahrazuje pravítko a mikroskop úchylkoměr. [1]

### 2.4.3.3. Metoda měření zaměřovacím dalekohledem

Při použití zaměřovacího dalekohledu je nitkový kříž spojen se základní přímkou a terč je spojen s držákem nástroje tak, aby jeho střed byl co nejbližší pracovnímu místu nástroje. [1]

### 2.4.3.4. Metoda měření laserem

Při použití laseru (přímé měření při použití interferometru pro měření přímosti), musí být zařízení určující základnu měření pevně spojena s částí, zvolenou základnou. Pohybující se prvek je připevněn k držáku nástroje a jeho střed je umístěn co nejbližší k pracovnímu místu nástroje. [1]

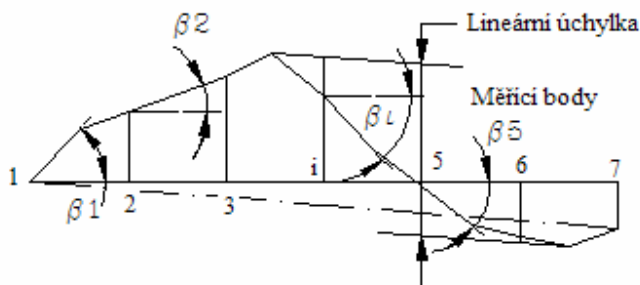
### 2.4.3.5. Metoda založená na měření úhlů

Tato metoda se pro měření lineárních úchylek nedoporučuje. Při měření přímosti vodících ploch má pohybující se prvek dvě opěry P a Q vzdálené  $d$  a vodící plocha je měřena postupně po přírůstcích  $d$ .

V tomto případě nemá pohybující se součást, obecně, takovéto opěry a spočívá na ploše celou svou délkou.

Získané výsledky mohou být poněkud odlišné od skutečné dráhy. Za předpokladu, že povrch je bez nerovnosti a že pohybující se část se pohybuje jako obálka plochy, může být lineární úchylka odhadnuta postupem podle obrázku 2.24.

V  $i$ -tém měřicím bodě je úhlová úchylka  $Q_i$ . Předpokládá se, že úhlová úchylka  $Q_i$  je platná od středního bodu mezi  $i - 1$  a  $i$  do středního mezi  $i$  a  $i + 1$ . Dojde-li k výrazné změně  $Q$ , musí se vzdálenost měření změnit. [1]



obr. 2.24 – měření úhlových odchylek

#### **2.4.3.6. Metody měření úhlových úchylek**

Pokud se pohyb uskutečňuje ve vodorovné rovině, lze vodováhou měřit klopení a naklánění, zatímco autokolimátorem a laserem lze měřit klopení a natáčení. [1]

#### **2.4.3.7. Metoda měření vodováhou**

Při měření vodováhou je tato upevněna na pohybující se části. Část je přesunována po krocích a údaje vodováhy jsou zapisovány po každém přesunutí. [1]

#### **2.4.3.8. Metoda měření autokolimátorem**

Při použití autokolimátoru je odrazové zrcátko umístěno na pohybující se části a autokolimátor na základní přímce. [1]

#### **2.4.3.9. Metoda měření laserem**

Při použití laseru může být oddělený interferometr a dělič paprsku umístěn na základní přímce a laserové odražeče na pohybující se části nebo naopak. [1]

### **3. LASEROVÝ MĚŘÍCÍ SYSTÉM ML10**

Laserové zařízení ML10 Gold Standard představuje vrchol mezi nástroji pro diagnostiku obráběcích strojů a souřadnicových měřicích strojů (CMM). Jeho přesnost 0,7 ppm poskytuje takové výsledky měření dokladovatelné podle mezinárodních norem. Laserový systém od společnosti Renishaw je nejpřesnější systém, který je v současné době k dispozici. [3]

Laser, který je použit u systému Renishaw, vyzařuje viditelný červený paprsek s vlnovou délkou 650 nm a výstupním výkonem nepřesahujícím hodnotu 1 mW za normálního provozu, může však tyto hodnoty překročit při extrémních poruchových podmínkách. Lineární měření lze provádět na osách o délce až 80 metrů s možností simultánního měření dvou rovnoběžných os. [3]

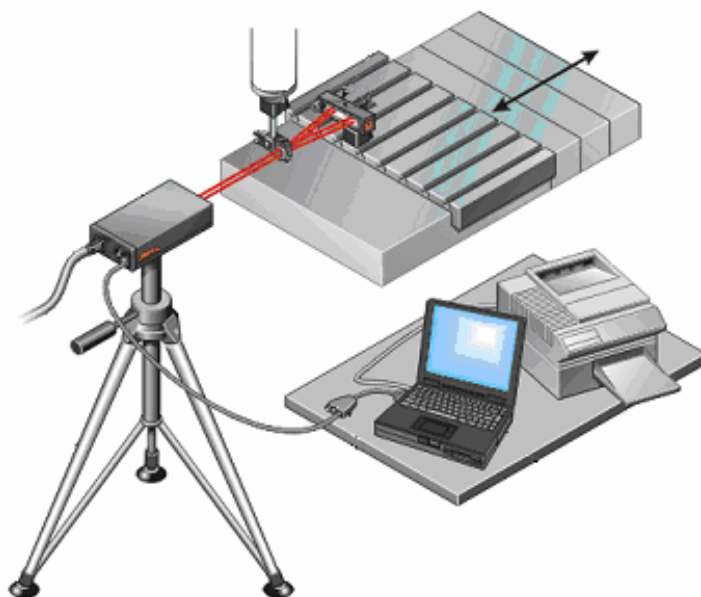
### 3.1. Měření přímosti laserinterferometrem Renishaw

Měřením přímosti zjistíme ohyb nebo celkové vyosení vodících lišt přístroje. Toto může být výsledkem opotřebování těchto lišt, následek nehody (např. nárazu), který je mohl poškodit, nebo špatnou podporou stroje, které zapříčiní prohnutí osy. Chyba přímosti bude mít přímý vliv na zaměření polohy nebo přesnosti stroje.

Laserový systém měří přesnost a reprodukovatelnost přímosti stroje pomocí pohybu stroje do mnoha cílových pozic a následném měření úchylek přímosti v těchto pozicích. Tato měření musí být opakována pro 2 měřící roviny tj. měření svislé a vodorovné roviny, když se měří přímost vodorovné osy. [2]

Kroky potřebné pro měření přímosti jsou tyto:

1. Nastavení laseru ML10 a optiky pro měření přímosti.
2. Nasměrování laserového paprsku ve směru osy, ve které se stroje pohybuje.
3. Zapsání dat přímosti.
4. Analýza těchto dat. Analýze předchází průzkum dat pomocí grafu pro odhalení případných chyb měření.



obr. 3.1 - typické nastavení systému pro měření odchylek přímosti

### 3.2. Optika potřebná pro měření přímosti

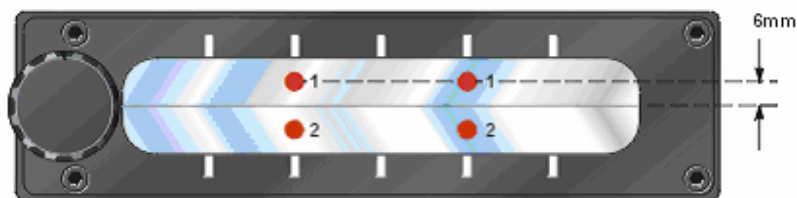
Optiky pro měření přímosti jsou použity pro měření odchylky v přímosti osy. Odchylky přímosti jsou posuvy v osách kolmých na směr pohybu. Prvky potřebné na tento druh měření jsou vyobrazené na obr 3.2.



obr. 3.2 – interferometr a odražeč

Interferometr používaný pro měření přímosti je hranol, který rozděluje paprsek vycházející z laseru ML10 na 2 vzájemně se oddalující paprsky. Výstupní paprsek z laseru ML10 a zpětný paprsek vracející se od odražeče projdou otvorem v interferometru pro měření přímosti.

Odražeč vrací dva rozbíhající se paprsky zpět do interferometru. Odražeč zobrazený na obr. 3.6 je symetrický podle středu. Musí být svisle vyrovnán vzhledem k měřené ose s dvěma rozbíhajícími se vstupními paprsky ve stejné vzdálenosti od centra a asi 6mm nad centrální linií. Na povrchu odražeče je polohová značka, která má pomoci dosáhnout symetrie paprsku. [2]

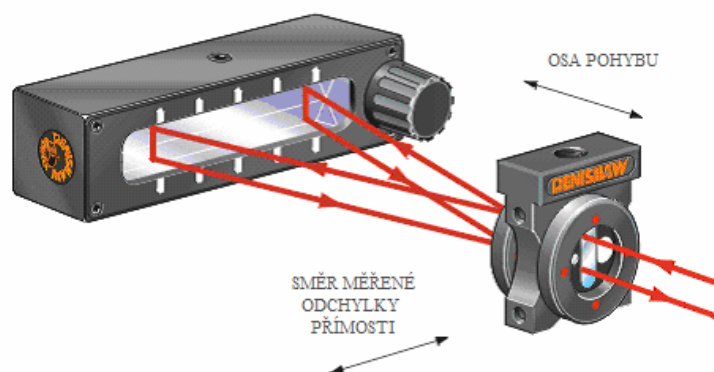


obr. 3.3 – odražeč v orientaci pro měření vodorovných odchylek  
1 – vstupní paprsky  
2 – výstupní paprsky

### 3.3. Základní principy měření přímosti

K provedení měření přímosti, umístíte interferometr mezi laserovou hlavu a odražeč.

Výchozí paprsek z laseru projde skrz interferometr, který ho rozdělí na 2 paprsky, které se rozcházejí pod malým úhlem a směřují do odražeče. Oba paprsky jsou odraženy a vracejí se po nové trase do interferometru (viz obr. 3.4). V interferometru dochází ke spojení obou paprsků do jednoho a tento paprsek se vrací do laserové hlavy.



obr. 3.4 – základní schéma měření přímosti

Přesnost je měřena detekcí změny optické trasy paprsku z relativního bočního posunu mezi interferometrem a odražečem. Přesnost se může měřit jak ve vodorovné, tak ve svislé rovině. To záleží na postavení jak interferometru, tak odražeče. Na obrázku 2.15. je zobrazeno nastavení pro vodorovné měření přímosti.

Kompensátor prostředí není nutný, protože při měření přímosti oba dva paprsky jsou prostředím ovlivněny stejně.

### 3.4. Faktory ovlivňující přesnost měření

Přesnost měření může být ovlivněna následujícími faktory:

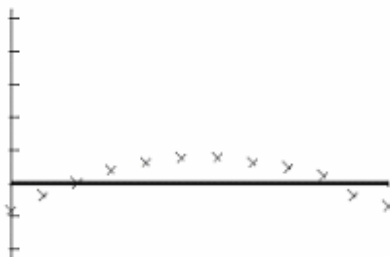
- Víření vzduchu
- Mechanické vibrace
- Sinusová chyba
- Optická chyba
- Optika není připevněna na správném místě
- Optika není připevněna pevně
- Lokální zdroje tepla

K dosažení maximální možné přesnosti měření, by mělo být měření opakováno v souladu s procedurou optické obrácenosti. Tj. měření by mělo být opakováno s odražečem obráceným o 180°, takže dojde k prohození levé a pravé strany.

## 4. ANALÝZA HODNOT PŘÍMOSTI

### 4.1. Metoda nejmenších čtverců - Least squares fit

Metoda nejmenších čtverců slouží k nalezení takového řešení, aby součet druhých mocnin chyb nalezeného řešení byl minimální.



obr. 4.1 - data zpracovaná metodou nejmenších čtverců

Výpočet střední čáry nejmenších čtverců (least squares reference line) podle následujícího vzorce pro přímky:

$$f(x) \equiv y = ax + b \quad (4.1)$$

Symbol  $y$  označuje závisle proměnnou veličinu,  $x$  označuje veličinu nezávisle proměnnou,  $a$  je směrnice přímky a  $b$  vyjadřuje hodnotu  $y$  při nulové hodnotě  $x$ .

Pro výpočet parametrů  $a$  a  $b$  je možné odvodit následující vztahy.

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.2)$$

$$b = \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.3)$$

Výpočet prvních 2 chodů (negativní a pozitivní smysl měření) podle těchto vzorců, následné porovnání s funkcí lineární regrese programu Excel.

Směrnice přímky (a):

$$=INDEX(LINREGRESE(Y_1:Y_n;X_1:X_n);1) \quad (4.4)$$

Směrnice je tangens úhlu, který svírá daná přímka s kladným směrem osy x.

Průsečík s osou y při nulové hodnotě x (b).

$$=INDEX(LINREGRESE(Y_1:Y_n;X_1:X_n);2) \quad (4.5)$$

V obou vzorcích je  $X_1..X_n$  hodnota posuvu a  $Y_1..Y_n$  je naměřená hodnota výchyly v daném bodě.

Porovnáním výsledků z obecných vzorců s výsledky z lineární regrese na 30 desetinných míst byla zjištěna naprostá shoda a následně bylo pokračováno jen s výsledky z lineární regrese z důvodu jednoduchosti a rychlosti zpracování výsledků a také z důvodu přehlednosti zpracovaných dat.

Vzdálenost bodu od přímky:

Obecná rovnice přímky P:  $ax+by+c=0$

Souřadnice bodu A [  $x_a, y_a$  ]

$$v = \frac{a \cdot x_a + b \cdot y_a + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4.6)$$

## 4.2. Metoda koncových bodů – End point fit

Metoda koncových bodů je, jak už název napovídá, vytvoření střední čáry spojením prvního a posledního bodu. Všechny úchyly jsou vyobrazeny vzhledem k přímce, která spojuje tyto dva body.



obr. 4.2 – data zpracovaná metodou koncových bodů

## Měření přímosti osy X vzhledem k ose Y

Podle výše uvedených vzorců byly vypočítány rovnice střední čáry a to nejen pro pozitivní a negativní, ale i pro oba smysly měření najednou.

### Metoda nejmenších čtverců:

Bidirekcionální:

$$y=0,0026044919x-0,0021686775$$

Pozitivní:

$$y=0,0026011749x-0,0010287719$$

Negativní:

$$y=0,0026078089x-0,0033085830$$



obr. 4.3 – měření přímosti osy X  
na mikroskopu

### Metoda koncových bodů:

Bidirekcionální:

$$y=0,0025962632x-0,0009113158$$

Pozitivní:

$$y=0,0025956842x-0,0003984211$$

Negativní:

$$y=0,0025968421x-0,0014242105$$

Měření přímosti osy Y vzhledem k ose X

Metoda nejmenších čtverců:

Bidirekcionální:

$$y = -0,0021679299x + 0,2205674459$$

Pozitivní:

$$y = -0,0021646753x + 0,2193918615$$

Negativní:

$$y = -0,0021711844x + 0,2217430303$$



obr. 4.4 – měření přímosti osy Y na mikroskopu

Metoda koncových bodů:

Bidirekcionální:

$$y = -0,0021713x + 0,220210$$

Pozitivní:

$$y = -0,0021692x + 0,219920$$

Negativní:

$$y = -0,0021692x + 0,219920$$

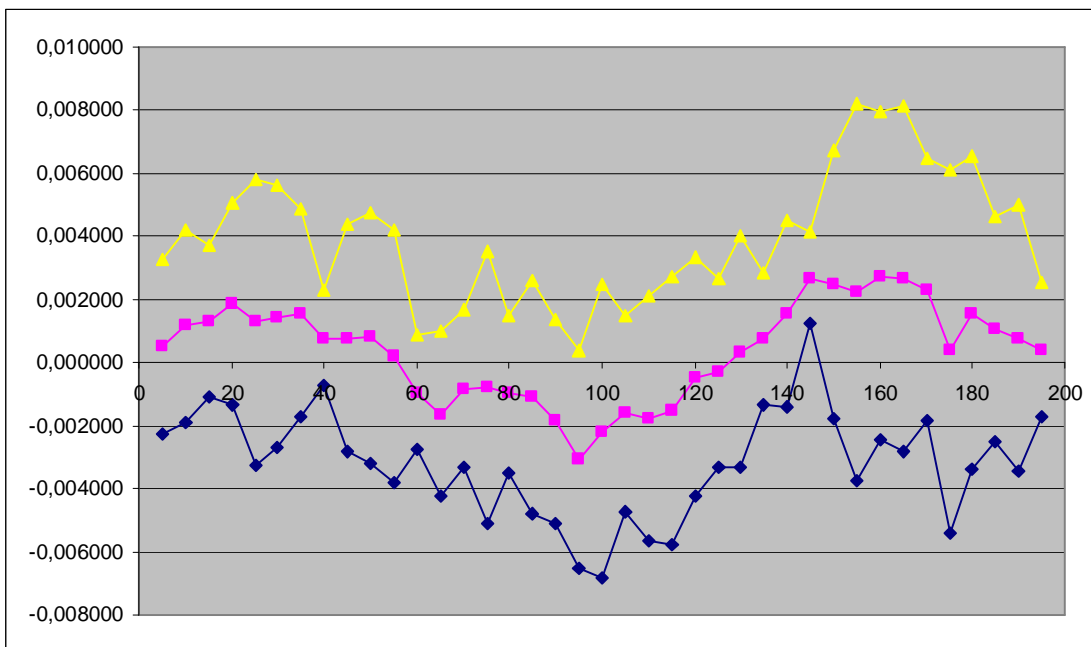
Následně byly podle vzorců pro výpočet vzdálenosti bodu od přímky (viz výše) vypočítány jednotlivé úchytky.

Pro porovnání výsledků vypočtených podle této metody a vypočtených programem firmy Renishaw (dodavatelem měřicího laserinterferometru) následují grafy.

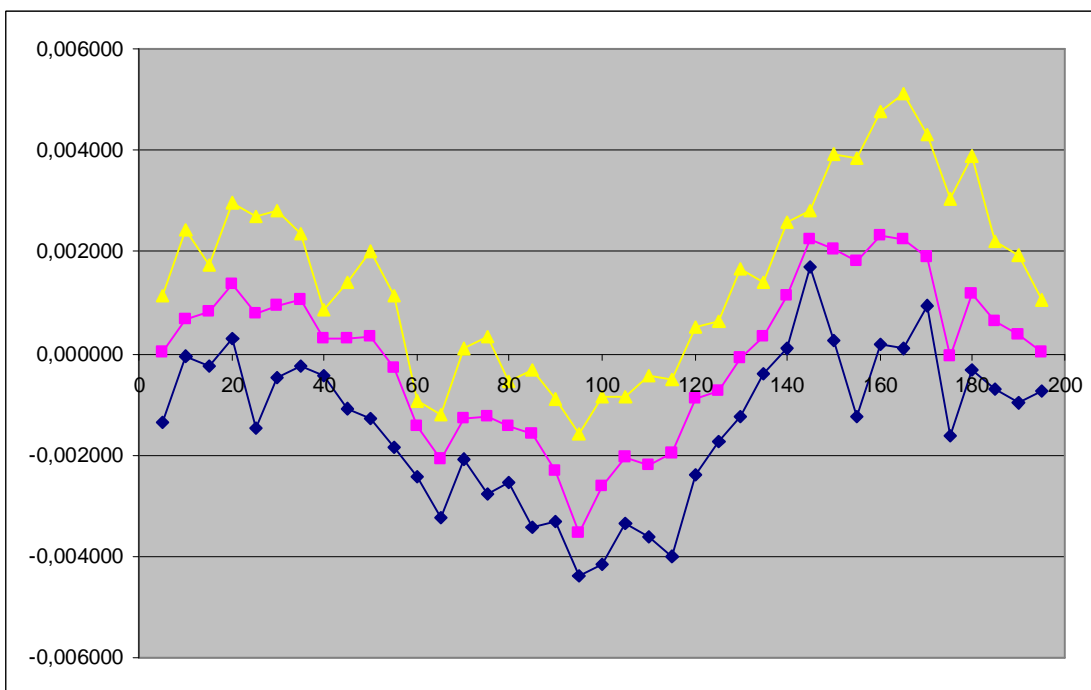
Tabulky hodnot pro detailnější porovnání jsou v příloze.

### 4.3. Porovnání grafů

GRAF ÚCHYLEK OSY X VZHLEDEM K OSE Y VYKRESLENÝ METODOU KONCOVÝCH BODŮ, POZITIVNÍ SMĚR

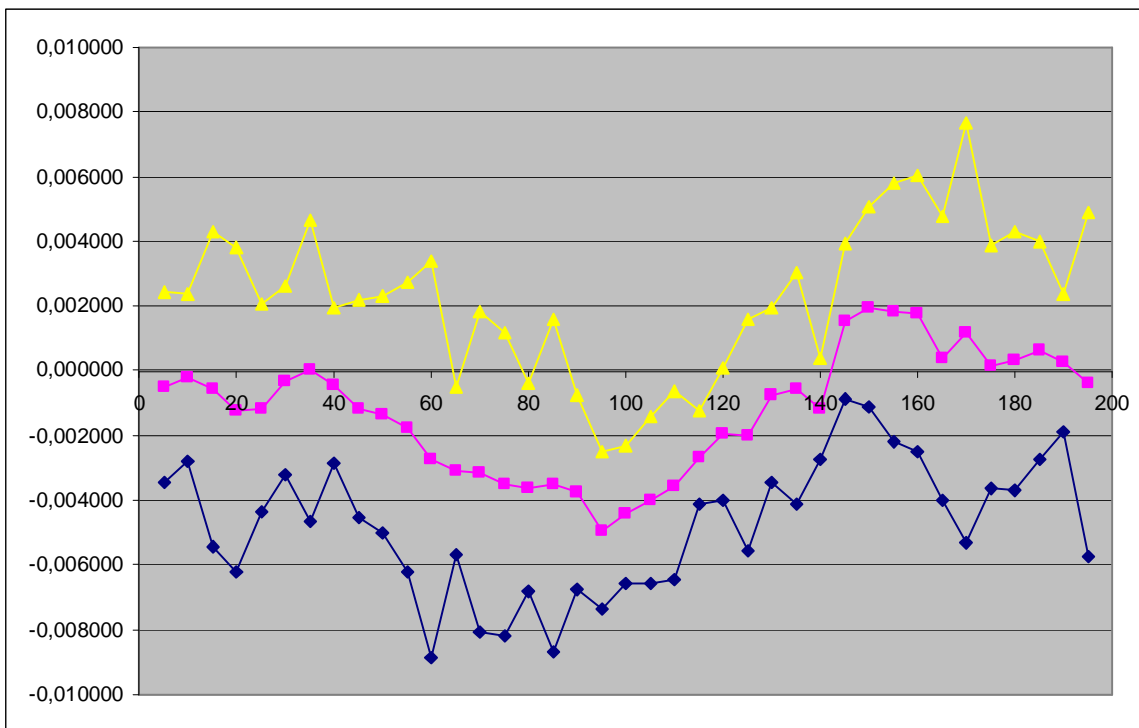


obr. 4.5 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, pozitivní směr

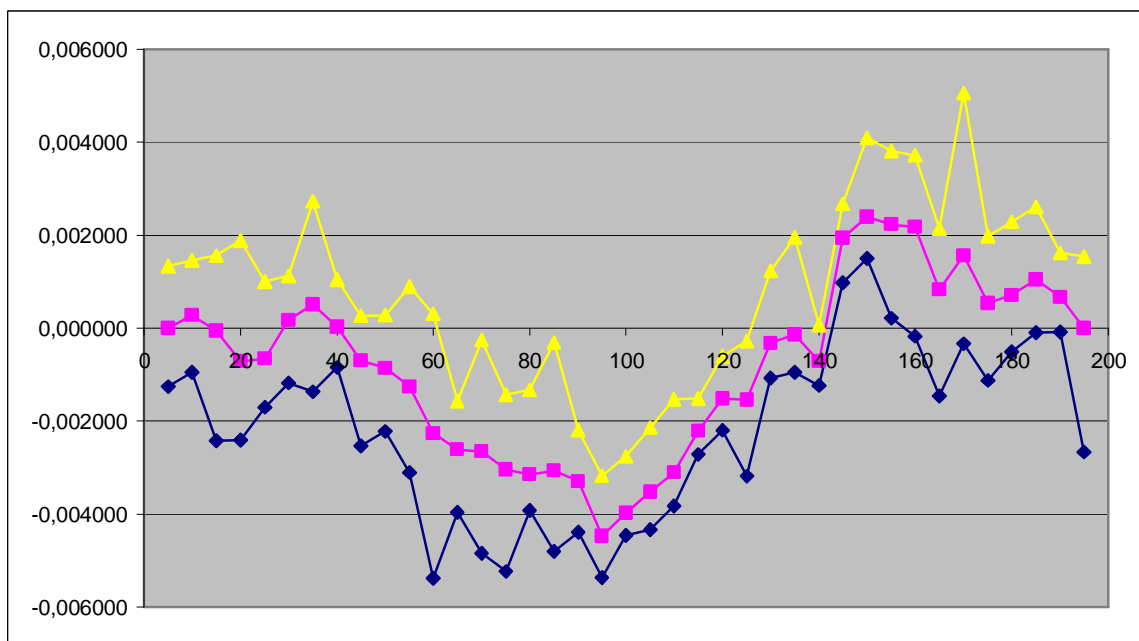


obr. 4.6 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, pozitivní směr

### GRAF ÚCHYLEK OSY X VZHLEDEM K OSE Y VYKRESLENÝ METODOU KONCOVÝCH BODŮ, NEGATIVNÍ SMĚR

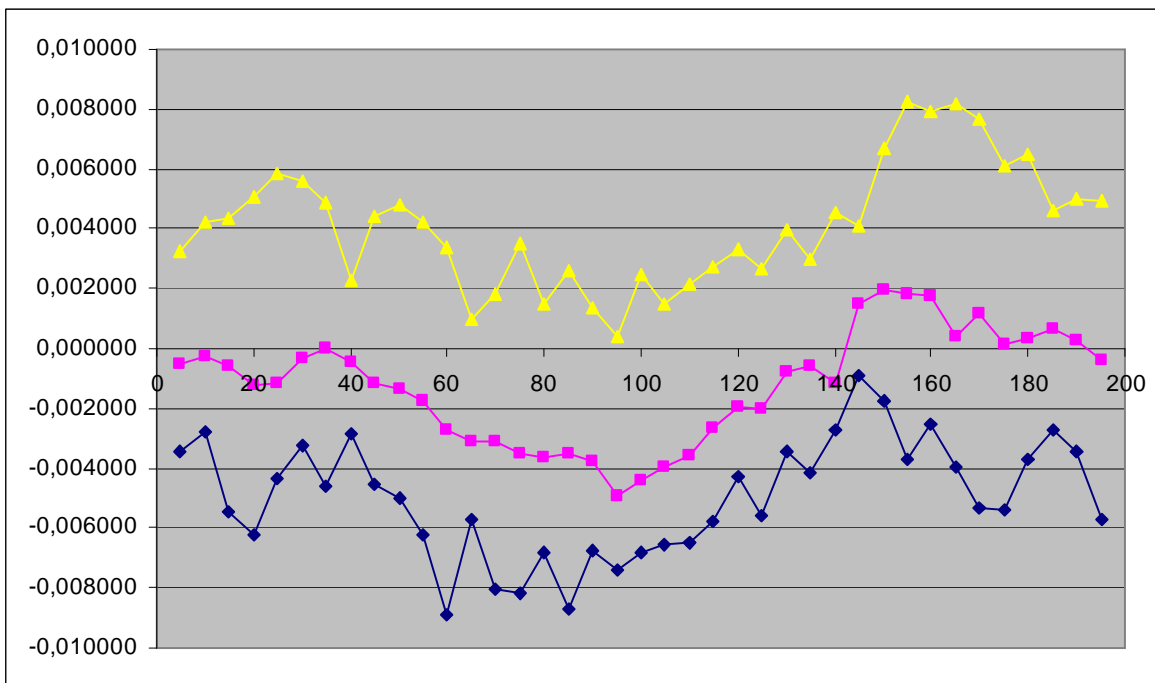


obr. 4.7 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, negativní směr

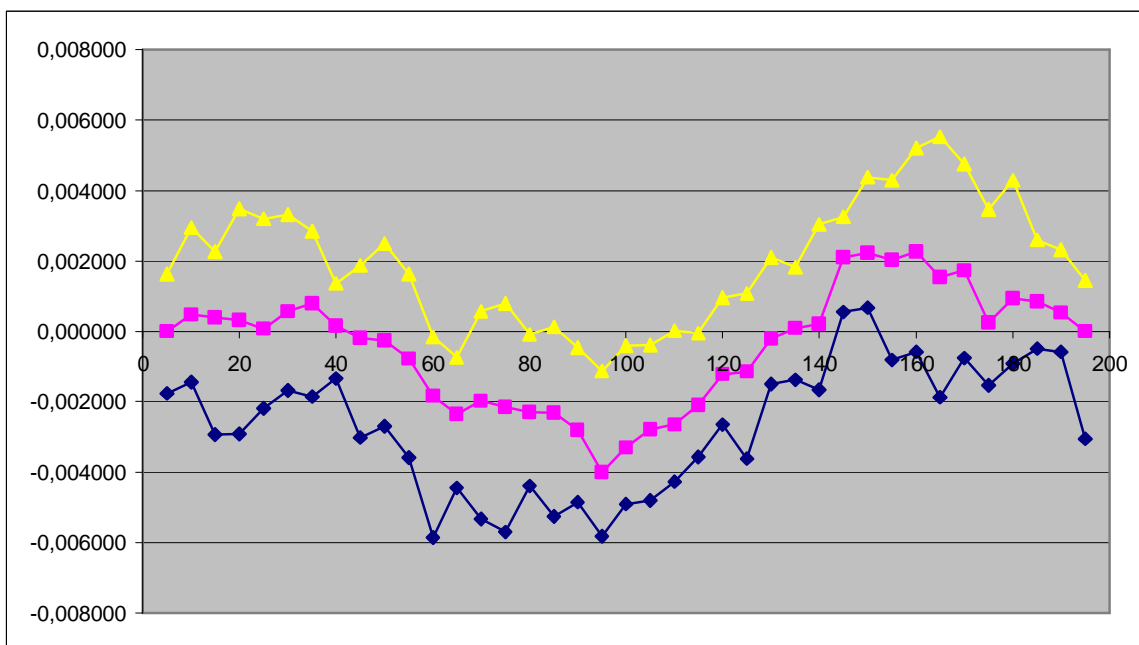


obr. 4.8 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, negativní směr

### GRAF ÚCHYLEK OSY X VZHLHEDEM K OSE Y VYKRESLENÝ METODOU KONCOVÝCH BODŮ, OBA SMĚRY

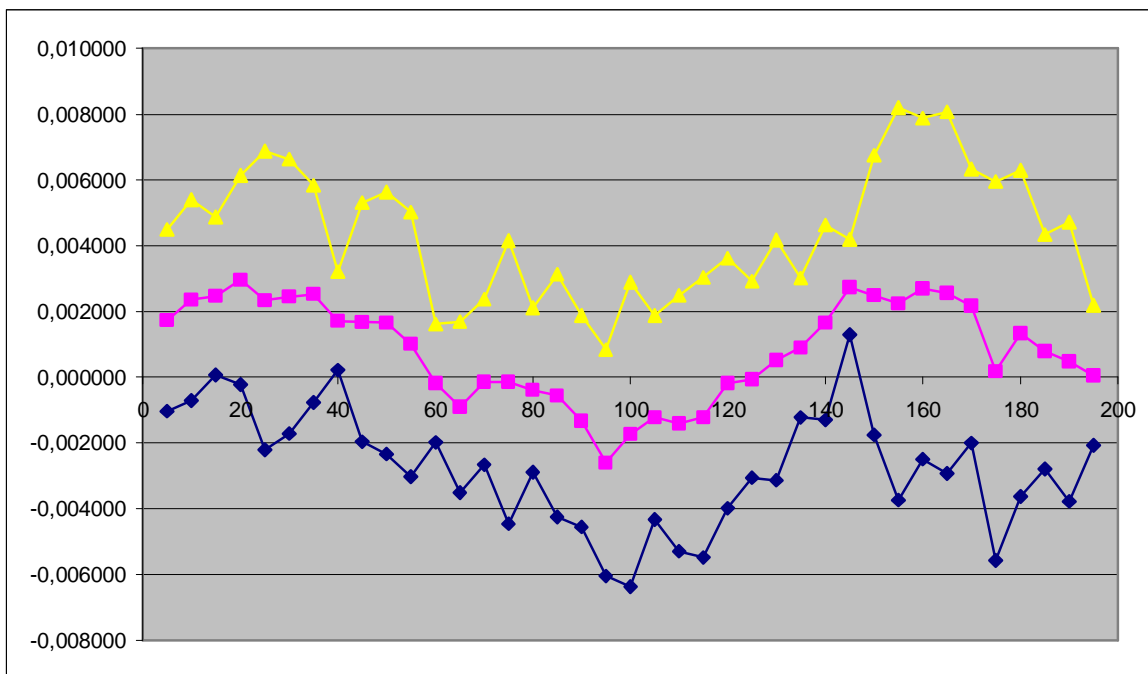


obr. 4.9 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, oba směry

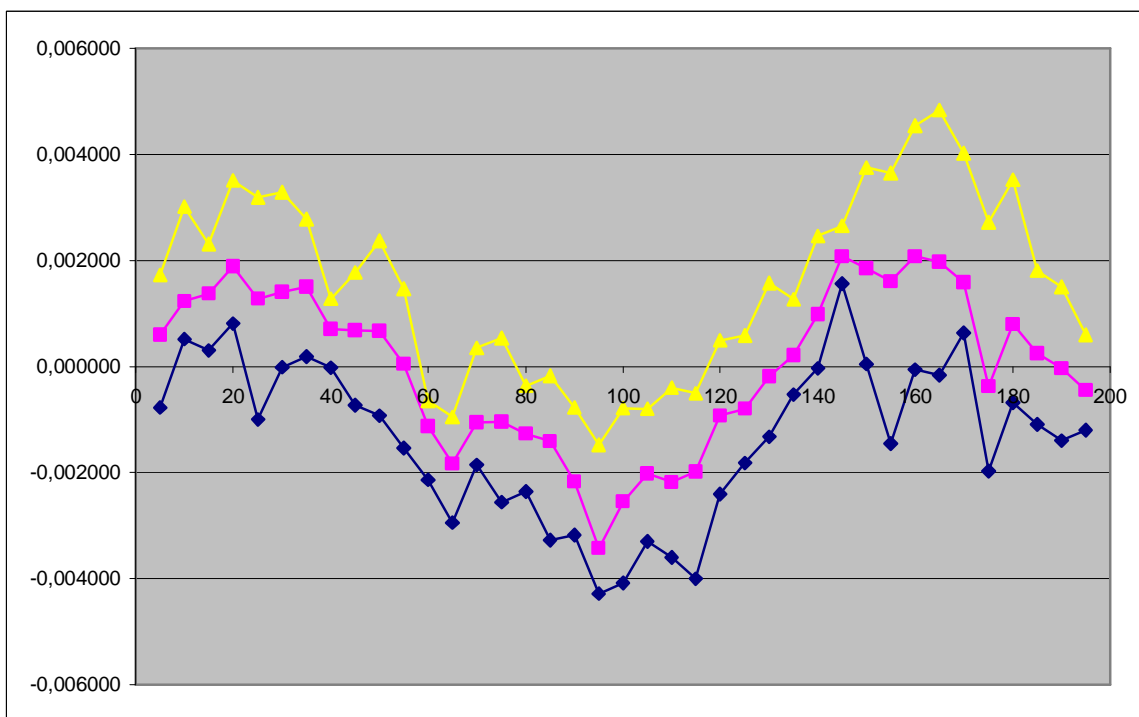


obr. 4.10 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, oba směry

GRAF ÚCHYLEK OSY X VZHLEDEM K OSE Y VYKRESLENÝ METODOU NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ, POZITIVNÍ SMĚR

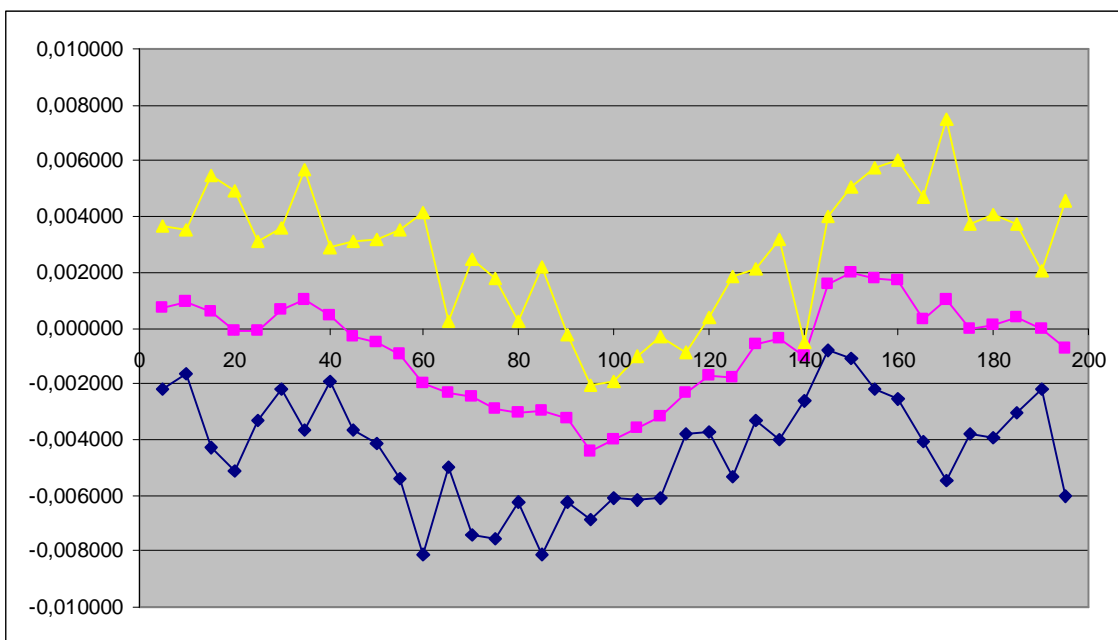


obr. 4.11 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, pozitivní směr

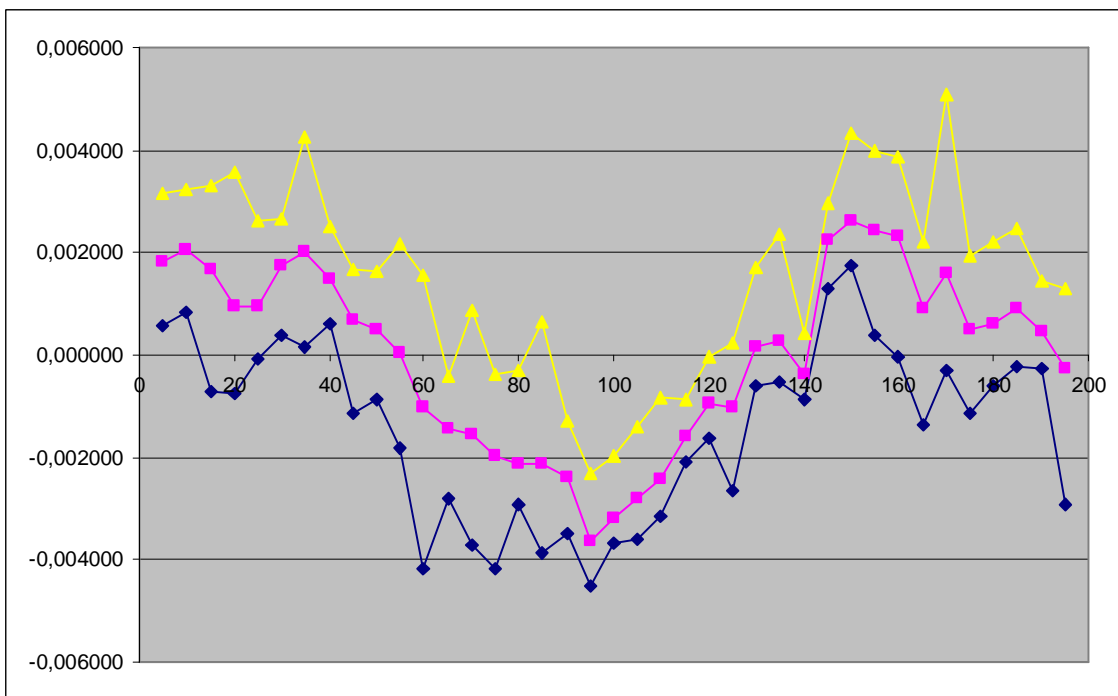


obr. 4.12 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, pozitivní směr

### GRAF ÚCHYLEK OSY X VZHLEDEM K OSE Y VYKRESLENÝ METODOU NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ, NEGATIVNÍ SMĚR

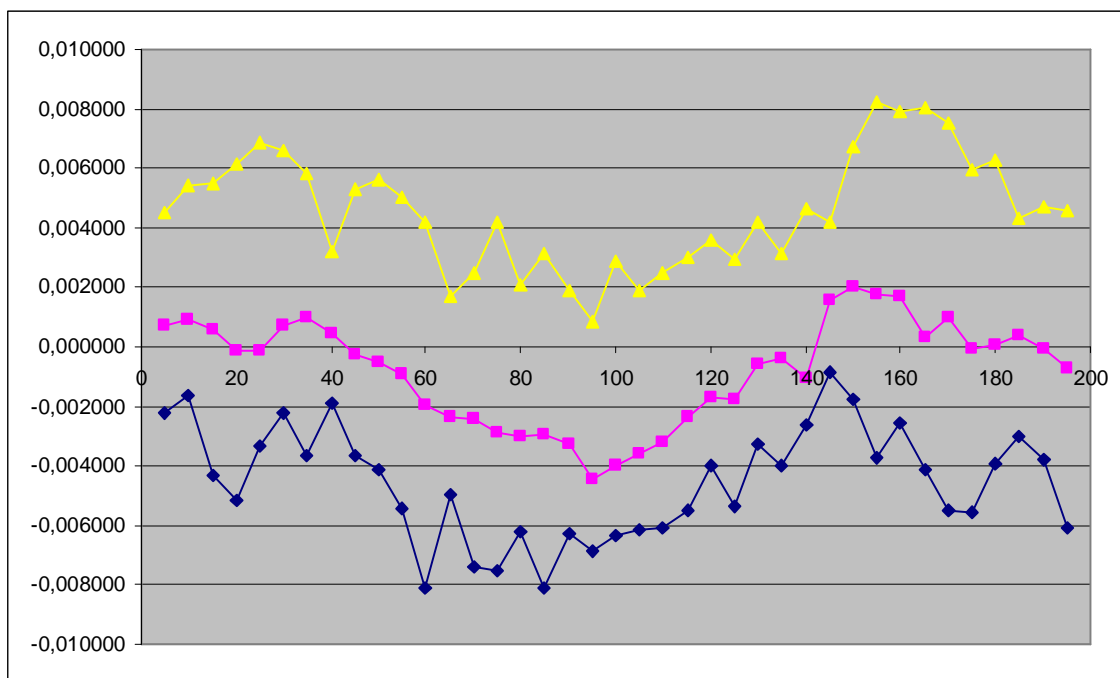


obr. 4.13 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, negativní směr

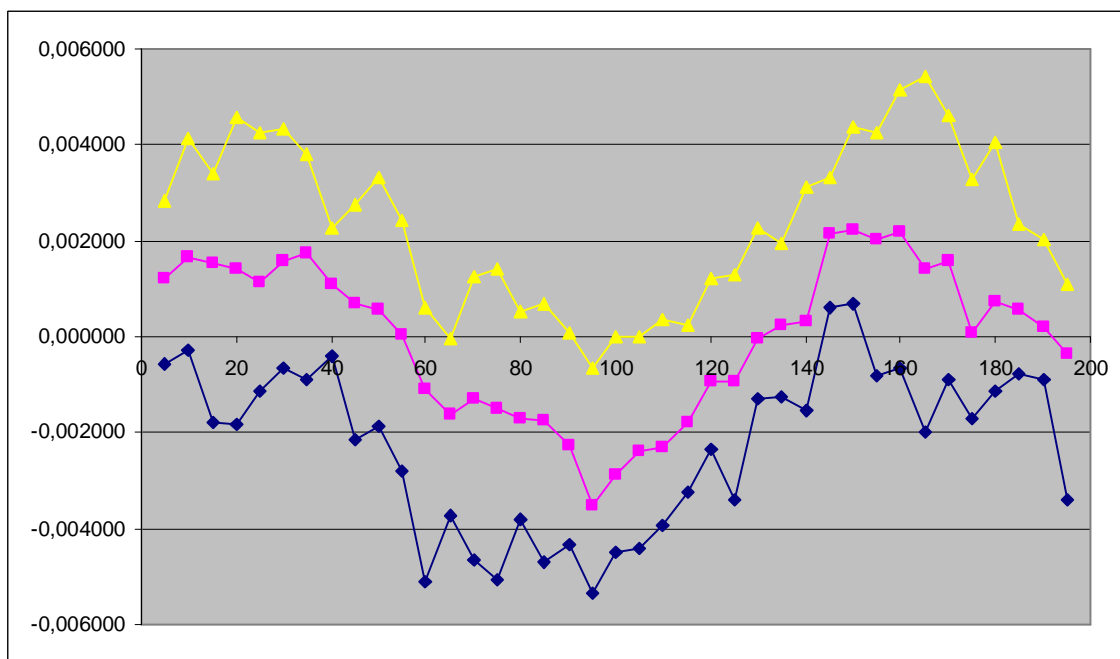


obr. 4.14 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, negativní směr

### GRAF ÚCHYLEK OSY X VZHLEDEM K OSE Y VYKRESLENÝ METODOU NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ, OBA SMĚRY

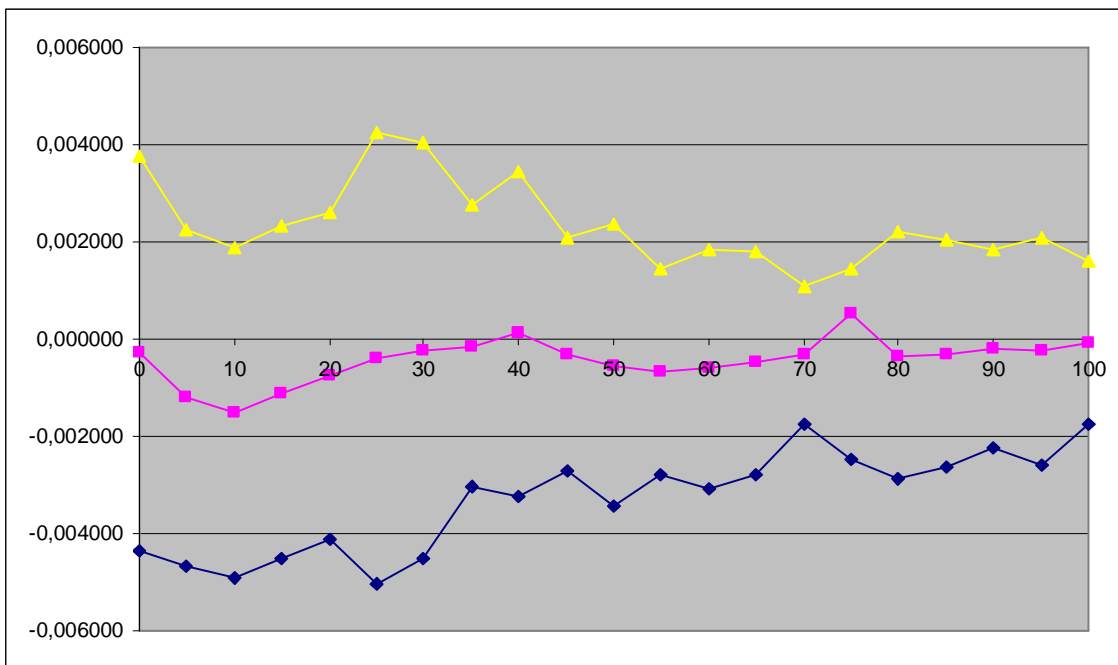


obr. 4.15 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, oba směry

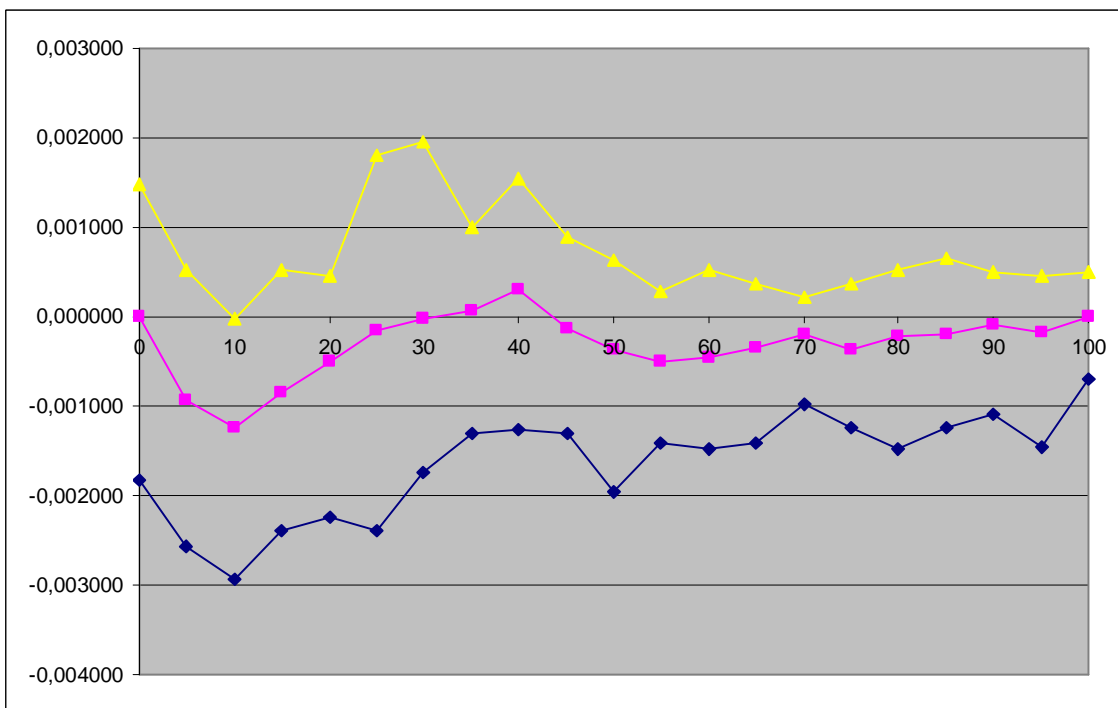


obr. 4.16 – graf úchylek osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, oba směry

GRAF ÚCHYLEK OSY Y VZHLEDEM K OSE X VYKRESLENÝ METODOU KONCOVÝCH BODŮ, POZITIVNÍ SMĚR

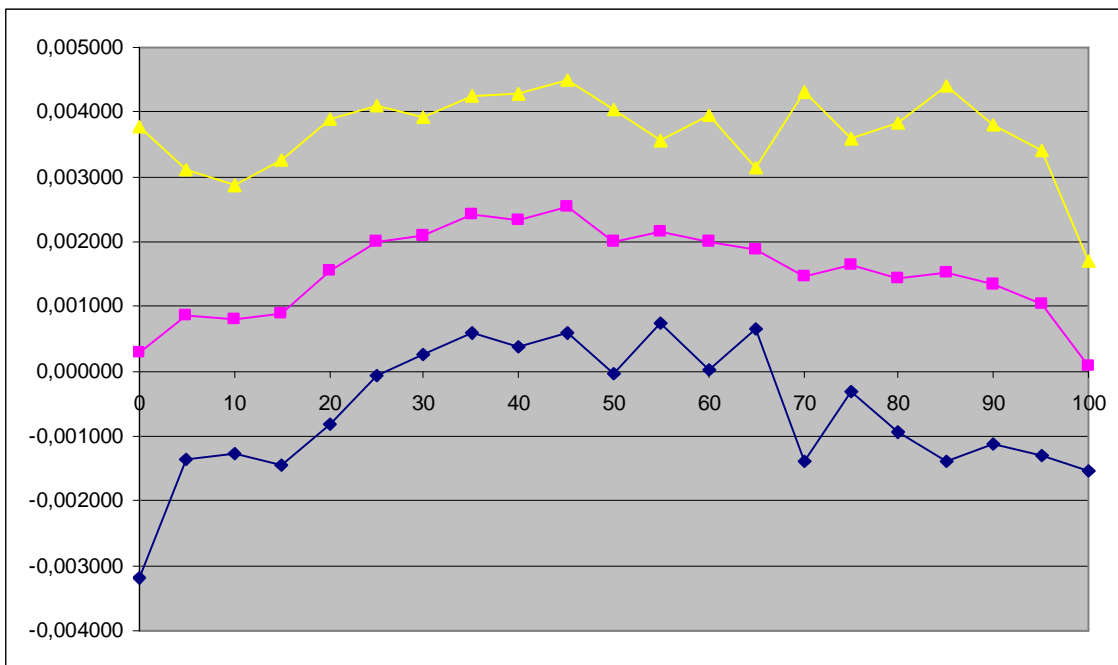


obr. 4.17 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, pozitivní směr

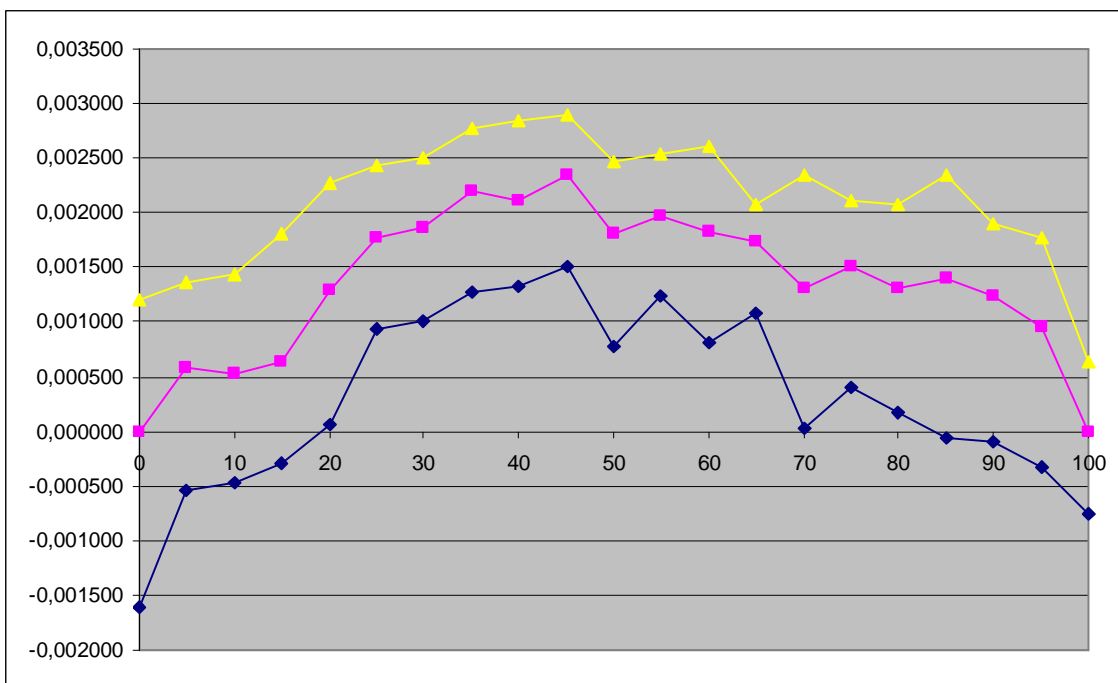


obr. 4.18 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, pozitivní směr

### GRAF ÚCHYLEK OSY Y VZHLEDEM K OSE X VYKRESLENÝ METODOU KONCOVÝCH BODŮ, NEGATIVNÍ SMĚR

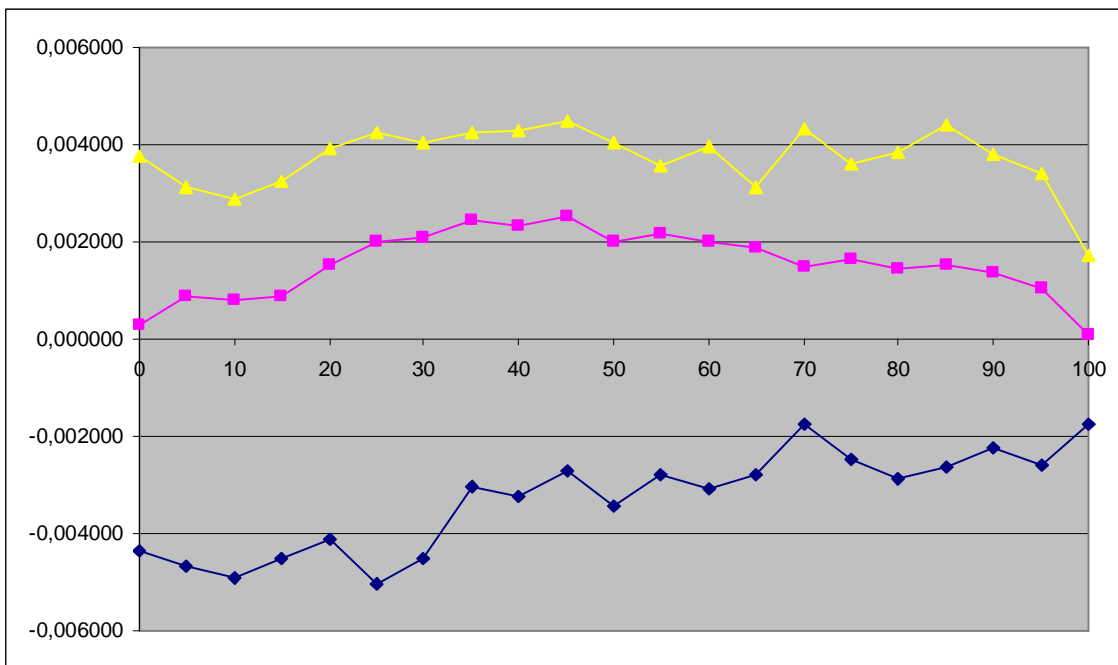


obr. 4.19 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, negativní směr

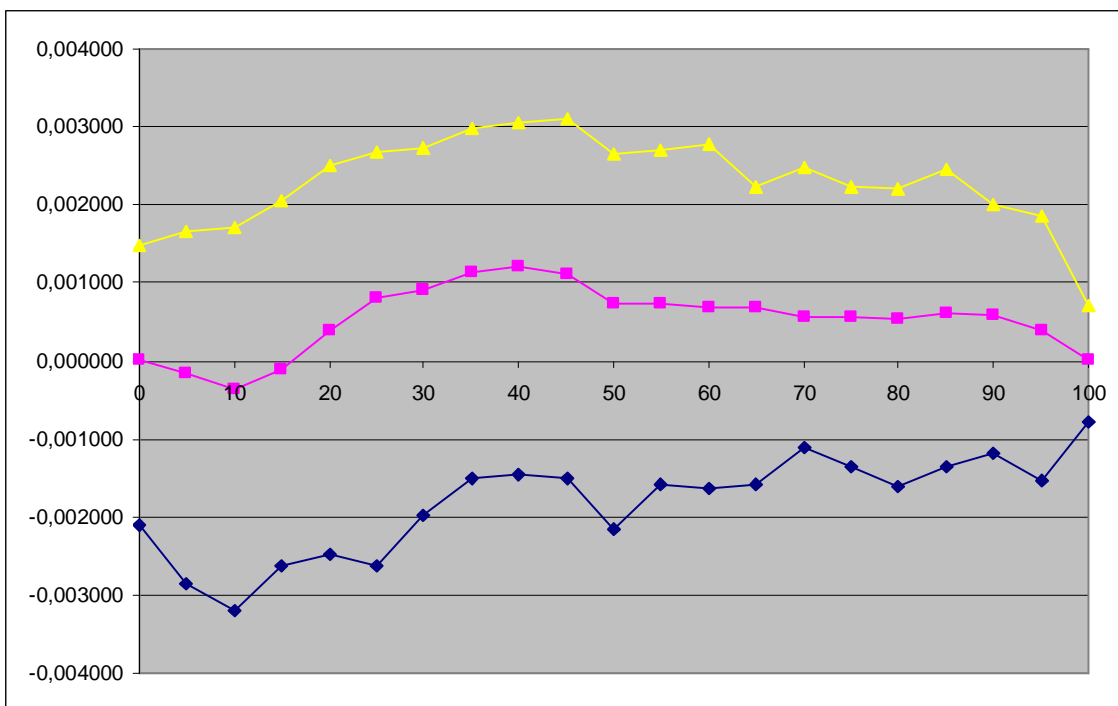


obr. 4.20 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, negativní směr

### GRAF ÚCHYLEK OSY Y VZHLIDEM K OSE X VYKRESLENÝ METODOU KONCOVÝCH BODŮ, OBA SMĚRY

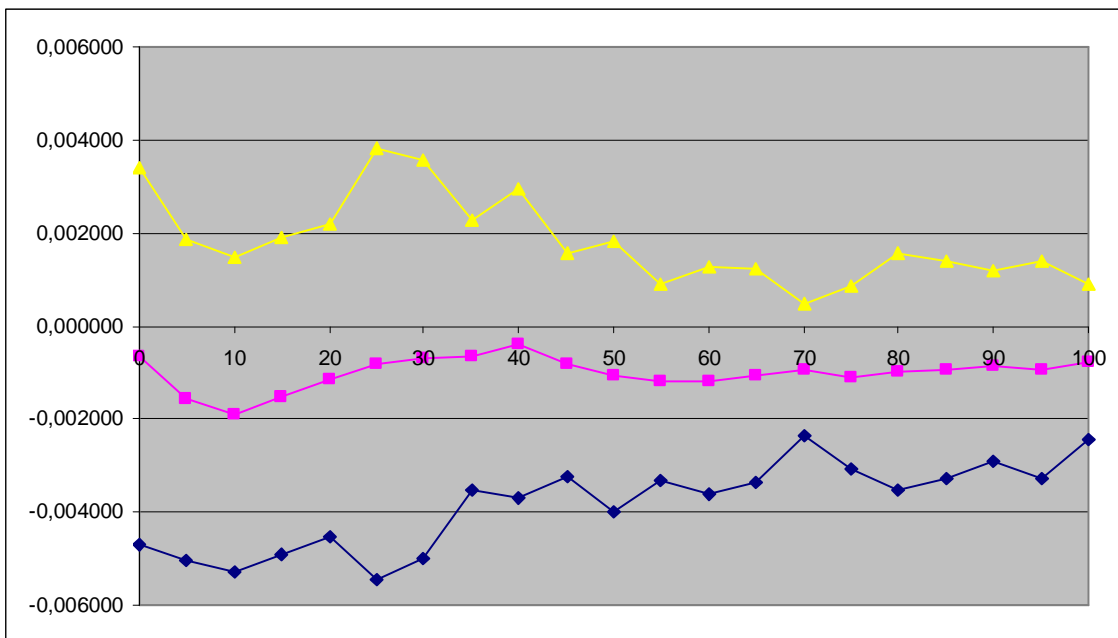


obr. 4.21 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, oba směry

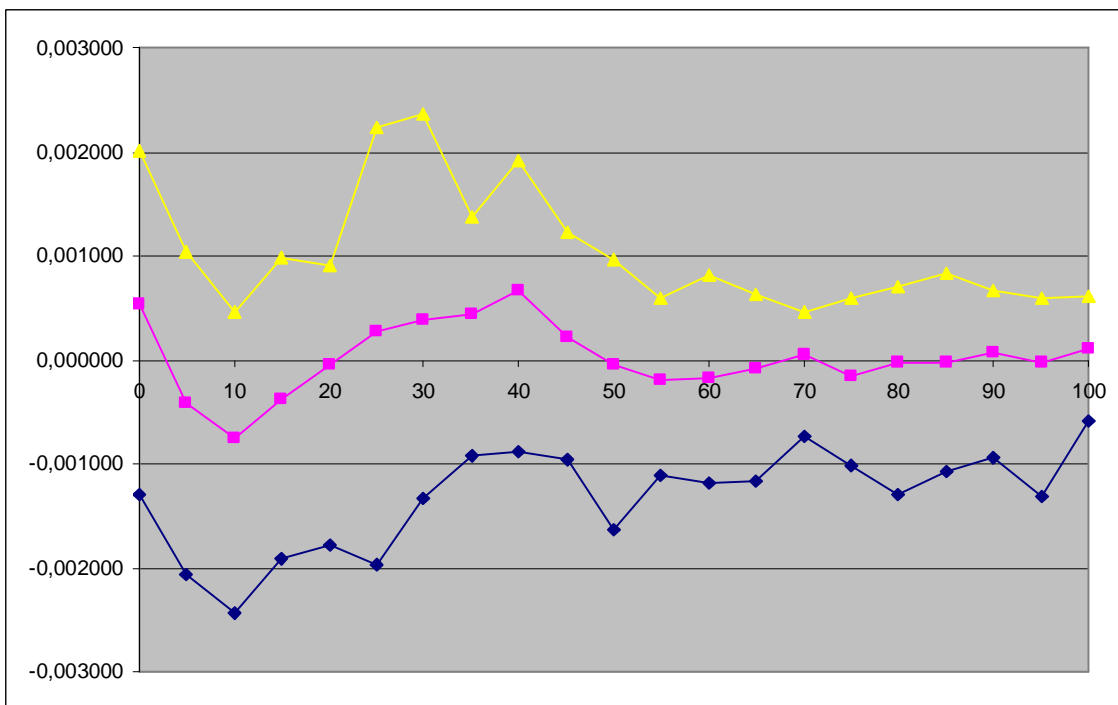


obr. 4.22 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, oba směry

### GRAF ÚCHYLEK OSY Y VZHLEDEM K OSE X VYKRESLENÝ METODOU NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ, POZITIVNÍ SMĚR

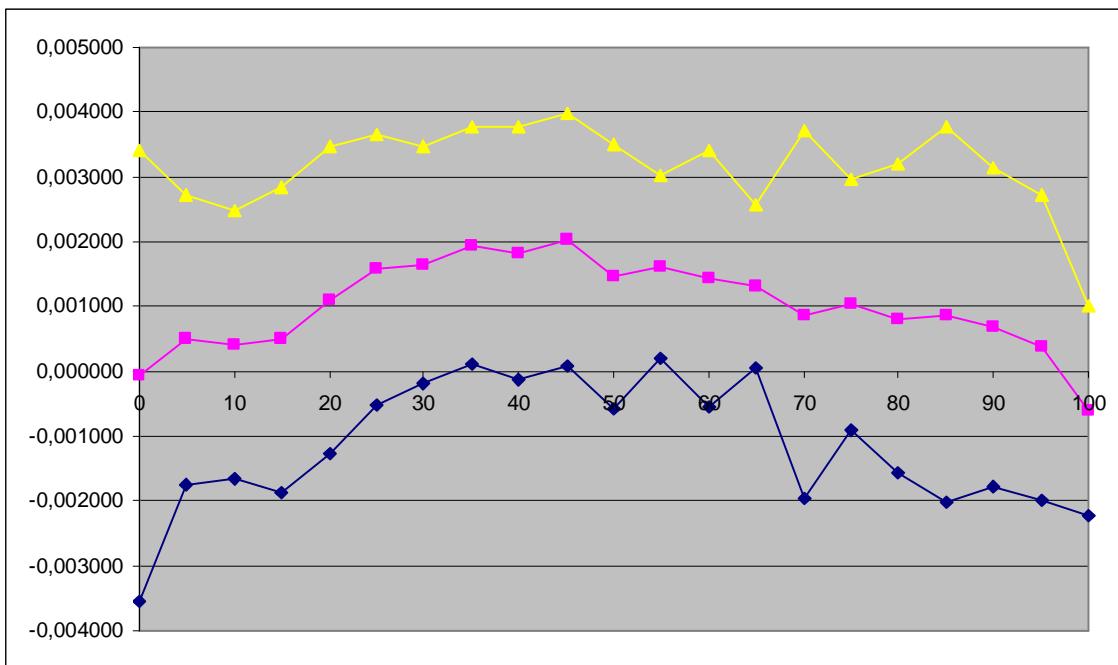


obr. 4.23 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, pozitivní směr

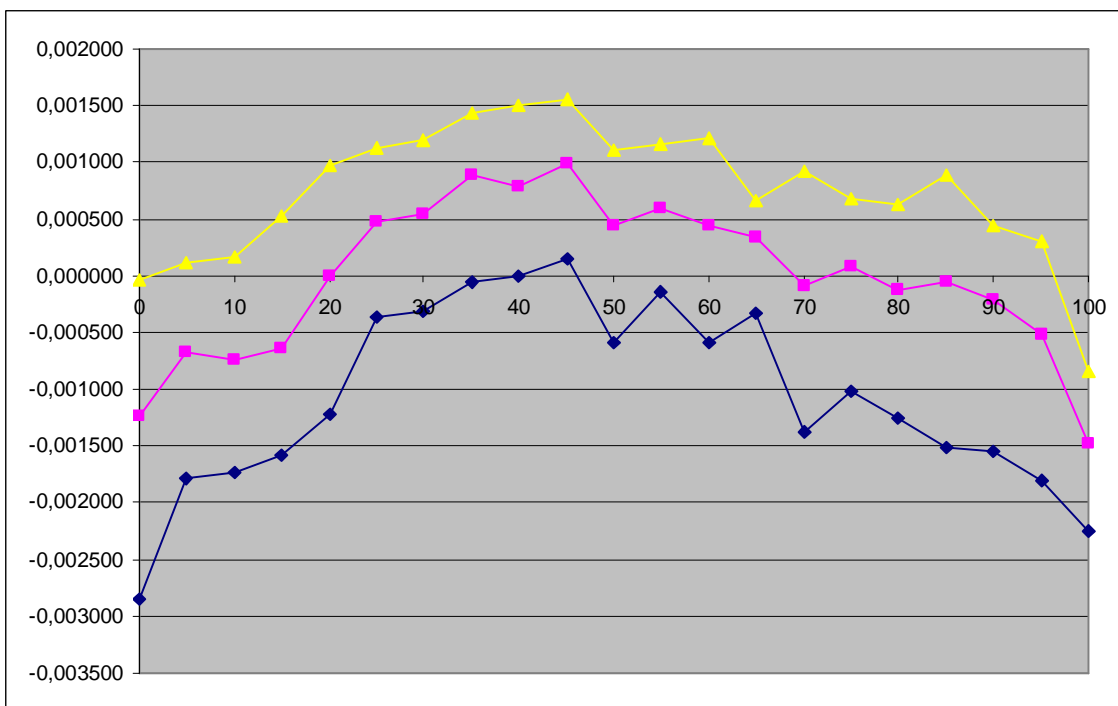


obr. 4.24 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, pozitivní směr

### GRAF ÚCHYLEK OSY Y VZHLEDEM K OSE X VYKRESLENÝ METODOU NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ, NEGATIVNÍ SMĚR

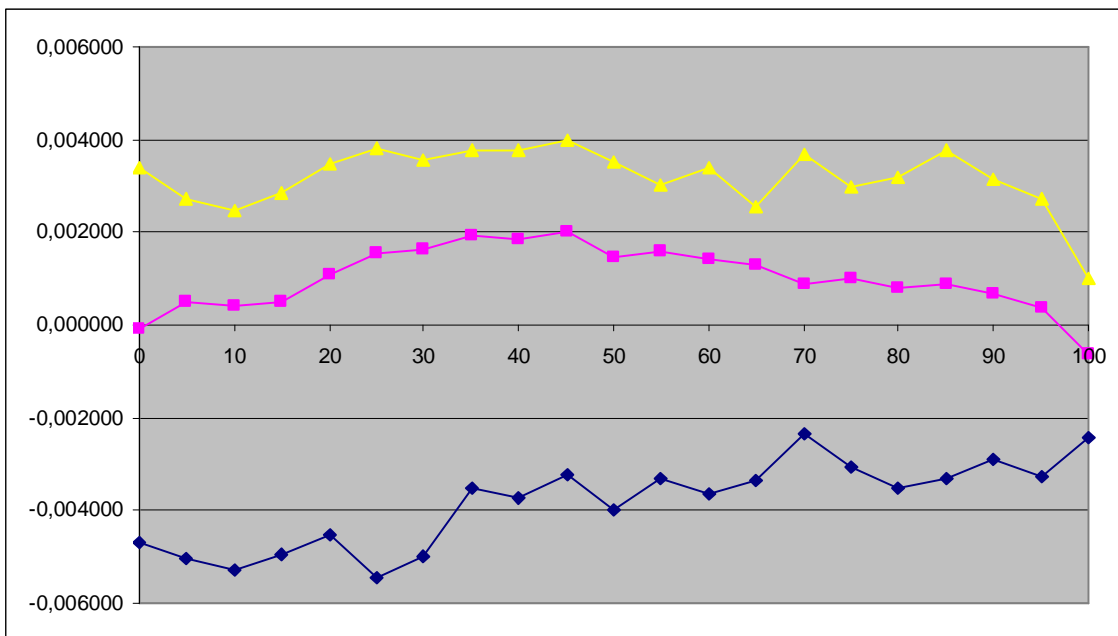


obr. 4.25 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, negativní směr

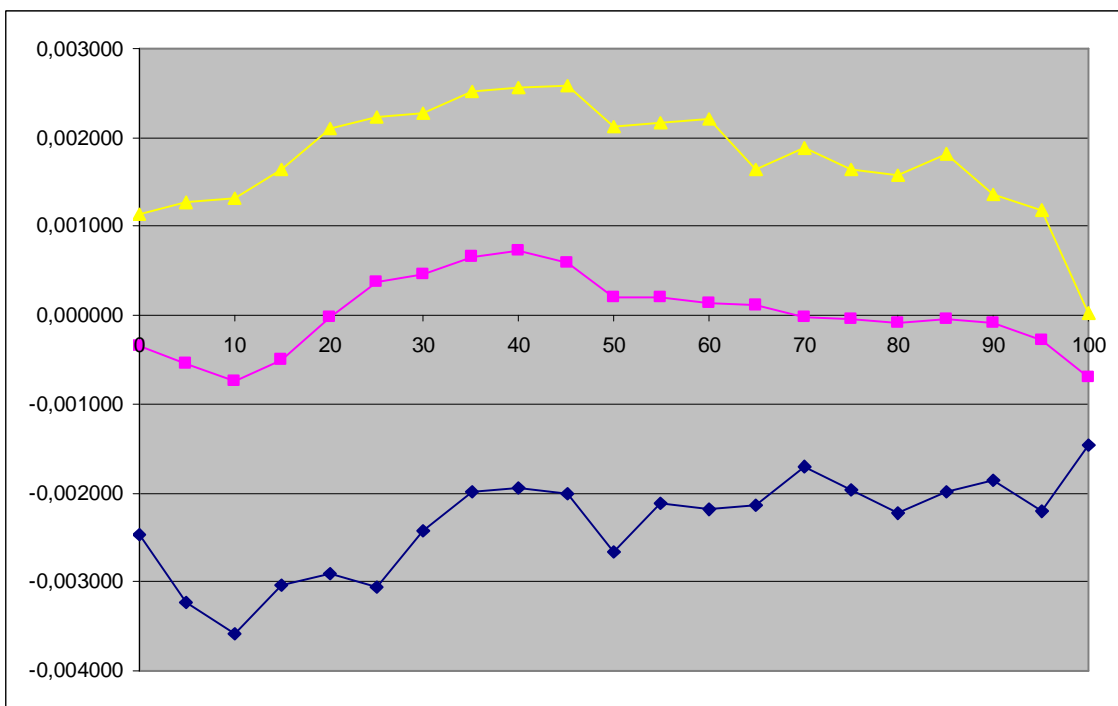


obr. 4.26 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, negativní směr

### GRAF ÚCHYLEK OSY Y VZHLEDEM K OSE X VYKRESLENÝ METODOU NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ, OBA SMĚRY



obr. 4.27 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, oba směry



obr. 4.28 – graf úchylek osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, oba směry

## 4.4. Porovnání hodnot získaných z programu Renishaw a ručně vypočítaných hodnot.

### 4.4.1. Analýza přímosti osy X vzhledem k ose Y metodou nejmenších čtverců

#### 4.4.1.1. Přesnost přímosti

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

$$\mathbf{0,01633\mu m}$$

Přesnost přímosti je rozdíl mezi maximálními a minimálními hodnotami  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$ , nezávisle na směru měření.

$$A = (\bar{x} + 3\sigma)_{\max} - (\bar{x} - 3\sigma)_{\min} \quad (4.7)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  mohou být vzaty z rozdílných směrů měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

Výpočet  $\sigma$ :

$$\sigma^2 = (n/(n-1)) \cdot s^2 \quad (4.8)$$

$$s^2 = (1/(n-1)) \cdot \sum (x - \bar{x})^2 \quad (4.9)$$

kde n je počet hodnot (v tomto případě se n=10)

$$A = (0,002817 + 3 \cdot 0,001731) - (-0,001419 - 3 \cdot 0,002206)$$

$$A = 0,008064 - (-0,008037)$$

$$A = 0,016101$$

Došlo zde k použití odlišných hodnot  $\sigma$  z toho důvodu, že jsou vypočítané z hodnot, naměřených na jiných hodnotách posuvu X.

$$\mathbf{0,01610\mu m}$$

Odchylka: 1,43 %

#### 4.4.1.2. Jednosměrná opakovatelnost

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

**0,01298 $\mu$ m**

To je maximální hodnota rozdílu mezi  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  v libovolném bodě a v libovolném směru měření.

$$U_{rep} = [ (\bar{x} + 3\sigma)_i - (\bar{x} - 3\sigma)_i ] \max \quad (4.10)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)_i$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)_i$  musejí být vzaty ze stejného směru měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$U_{rep} = (-0,001419 + 3 \cdot 0,002206) - (-0,001419 - 3 \cdot 0,002206)$$

$$U_{rep} = 0,005199 - (-0,008037)$$

$$U_{rep} = 0,013236$$

**0,01324 $\mu$ m**

Odchylka: 2,00 %

#### 4.4.1.3. Bidirekcionální opakovatelnost

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

**0,01298 $\mu$ m**

To je maximální hodnota rozdílu mezi  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  v libovolném bodě, v obou směrech měření.

$$B_{rep} = [ (\bar{x} + 3\sigma)_j - (\bar{x} - 3\sigma)_j ] \max \quad (4.11)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)_j$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)_j$  mohou být vzaty z rozdílných směrů měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$U_{rep} = (-0,001419 + 3 \cdot 0,002206) - (-0,001419 - 3 \cdot 0,002206)$$

$$U_{rep} = 0,005199 - (-0,008037)$$

$$U_{rep} = 0,013236$$

**0,01324μm**

Odchylka: 2,00 %

#### 4.4.1.4. Průměrná odchylka obráceného chodu

To je průměrná hodnota rozdílů mezi průměrnými úchylkami přímosti pro dva směry měření.

$$MRV = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow) \quad (4.12)$$

Kde n je počet chodů.

Hodnota z programu Renishaw:

**0,00162μm**

chod	odchylka	rozdíl	chod	odchylka	rozdíl
1	-0,0044390	0,0034000	3	-0,0025467	0,0042410
2	-0,0010390		4	0,0016944	

chod	odchylka	rozdíl	chod	odchylka	rozdíl
5	-0,0009210	0,0026564	7	-0,0008031	0,0028615
6	0,0017354		8	0,0020585	

chod	odchylka	rozdíl
9	0,0006277	0,0030051
10	0,0036328	

Suma hodnot rozdílů mezi průměrnými úchylkami přímosti vypočtených dle ČSN:

**0,00162μm**

Odchylka: 0,00 %

#### 4.4.1.5. Úchylka přímosti

Úchylka přímosti může být definována jako vzdálenost dvou rovnoběžných přímek, které obsahují všechny body podél osy a jsou rovnoběžné s hlavním směrem osy.

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

**0,00742 μm**

Je suma maximálních a minimálních odchylek průměrů chyb přímosti získaných z dat přímosti definovaných analýzou.

$$\text{Úchylka přímosti} = \left| \bar{x}_{\max} \right| + \left| \bar{x}_{\min} \right| \quad (4.13)$$

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

Podle tohoto vztahu nebyl nalezen adekvátní ekvivalent.

#### 4.4.2. Analýza přímosti osy X vzhledem k ose Y metodou koncových bodů

##### 4.4.2.1. Přesnost přímosti

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

**0,01711 μm**

Přesnost přímosti je rozdíl mezi maximálními a minimálními hodnotami  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$ , nezávisle na směru měření.

$$A = (\bar{x} + 3\sigma)_{\max} - (\bar{x} - 3\sigma)_{\min} \quad (4.14)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  mohou být vzaty z rozdílných směrů měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$A = (0,002148 + 3 \cdot 0,002121) - (-0,001538 - 3 \cdot 0,002072)$$

$$A = 0,008511 - (-0,007754)$$

$$A = 0,016265$$

**0,01627 μm**

Odchylka: 5,16 %

#### 4.4.2.2. Jednosměrná opakovatelnost

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

**0,01298μm**

To je maximální hodnota rozdílu mezi  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  v libovolném bodě a v libovolném směru měření.

$$U_{rep} = [ (\bar{x} + 3\sigma)_i - (\bar{x} - 3\sigma)_i ] \max \quad (4.15)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)_i$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)_i$  musejí být vzaty ze stejného směru měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$U_{rep} = (-0,000326 + 3 \cdot 0,002206) - (-0,000326 - 3 \cdot 0,002206)$$

$$U_{rep} = 0,006292 - (-0,006945)$$

$$U_{rep} = 0,013237$$

**0,01324μm**

Odchylka: 2,00 %

#### 4.4.2.3. Bidirekcionální opakovatelnost

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

**0,01298μm**

To je maximální hodnota rozdílu mezi  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  v libovolném bodě, v obou směrech měření.

$$B_{rep} = [ (\bar{x} + 3\sigma)_j - (\bar{x} - 3\sigma)_j ] \max \quad (4.16)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)_j$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)_j$  mohou být vzaty z rozdílných směrů měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$U_{rep} = (-0,000326 + 3 \cdot 0,002206) - (-0,000326 - 3 \cdot 0,002206)$$

$$U_{rep} = 0,006292 - (-0,006945)$$

$$U_{rep} = 0,013237$$

**0,01324μm**

Odchylka: 2,00 %

#### 4.4.2.4. Průměrná odchylka obráceného chodu

To je průměrná hodnota rozdílů mezi průměrnými úchylkami přímosti pro dva směry měření.

$$MRV = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow) \quad (4.17)$$

Kde n je počet chodů.

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

**0,00162μm**

chod	odchylka	rozdíl	chod	odchylka	rozdíl
1	-0,0035700	0,0034000	3	-0,0016777	0,0042410
2	-0,0001700		4	0,0025633	
chod	odchylka	rozdíl	chod	odchylka	rozdíl
5	-0,0000520	0,0026564	7	0,0000659	0,0028615
6	0,0026044		8	0,0029274	
chod	odchylka	rozdíl			
9	0,0014967	0,0030051			
10	0,0045018				

Suma hodnot rozdílů mezi průměrnými úchylkami přímosti vypočtených dle ČSN:

**0,00162μm**

Odchylka: 0,00 %

#### 4.4.2.5. Úchylka přímosti

Úchylka přímosti může být definována jako vzdálenost dvou rovnoběžných přímek, které obsahují všechny body podél osy a jsou rovnoběžné s hlavním směrem osy.

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

$$\underline{0,00768\mu\text{m}}$$

Je suma maximálních a minimálních odchylek průměrů chyb přímosti získaných z dat přímosti definovaných analýzou.

$$\text{Úchylka přímosti} = \left| \bar{x}_{\max} \right| + \left| \bar{x}_{\min} \right| \quad (4.18)$$

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

Podle tohoto vztahu nebyl nalezen adekvátní ekvivalent.

#### 4.4.3. Analýza přímosti osy Y vzhledem k ose X metodou nejmenších čtverců

##### 4.4.3.1. Přesnost přímosti

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

$$\underline{0,00945\mu\text{m}}$$

Přesnost přímosti je rozdíl mezi maximálními a minimálními hodnotami  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$ , nezávisle na směru měření.

$$A = (\bar{x} + 3\sigma)_{\max} - (\bar{x} - 3\sigma)_{\min} \quad (4.19)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  mohou být vzaty z rozdílných směrů měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$A = (0,000599 + 3 \cdot 0,001747) - (-0,000748 - 3 \cdot 0,001591)$$

$$A = 0,005840 - (-0,005521)$$

$$A = 0,011361$$

$$\underline{0,01136\mu\text{m}}$$

Odchylka: 20.21 %

#### 4.4.3.2. Jednosměrná opakovatelnost

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

**0,00928μm**

To je maximální hodnota rozdílu mezi  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  v libovolném bodě a v libovolném směru měření.

$$U_{rep} = [ (\bar{x} + 3\sigma)_i - (\bar{x} - 3\sigma)_i ] \max \quad (4.20)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)_i$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)_i$  musejí být vzaty ze stejného směru měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$U_{rep} = (0,000371 + 3 \cdot 0,001788) - (0,000371 - 3 \cdot 0,001788)$$

$$U_{rep} = 0,005735 - (-0,004993)$$

$$U_{rep} = 0,010730$$

**0,01073μm**

Odchylka: 15.63 %

#### 4.4.3.3. Bidirekcionální opakovatelnost

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

**0,00928μm**

To je maximální hodnota rozdílu mezi  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  v libovolném bodě, v obou směrech měření.

$$B_{rep} = [ (\bar{x} + 3\sigma)_j - (\bar{x} - 3\sigma)_j ] \max \quad (4.21)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)_j$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)_j$  mohou být vzaty z rozdílných směrů měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$U_{rep} = (0,000371 + 3 \cdot 0,001788) - (0,000371 - 3 \cdot 0,001788)$$

$$U_{rep} = 0,005735 - (-0,004993)$$

$$U_{rep} = 0,010730$$

**0,01073μm**

Odchylka: 15.63 %

#### 4.4.3.4. Průměrná odchylka obráceného chodu

To je průměrná hodnota rozdílů mezi průměrnými úchylkami přímosti pro dva směry měření.

$$MRV = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow) \quad (4.22)$$

Kde n je počet chodů.

Hodnota z programu Renishaw:

**-0,00203μm**

chod	odchylka	rozdíl	chod	odchylka	rozdíl
1	-0,0046943	-0,0046286	3	-0,0028181	-0,0044286
2	-0,0000657		4	0,0016105	
chod	odchylka	rozdíl	chod	odchylka	rozdíl
5	-0,0018086	-0,0040762	7	-0,0002848	-0,0031524
6	0,0022676		8	0,0028676	
chod	odchylka	rozdíl			
9	-0,005229	-0,0039714			
10	0,0034486				

Suma hodnot rozdílů mezi průměrnými úchylkami přímosti vypočtených dle ČSN:

**-0,00203μm**

Odchylka: 0.00 %

#### 4.4.3.5. Úchylka přímosti

Úchylka přímosti může být definována jako vzdálenost dvou rovnoběžných přímek, které obsahují všechny body podél osy a jsou rovnoběžné s hlavním směrem osy.

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

$$\underline{0,00394\mu\text{m}}$$

Je suma maximálních a minimálních odchylek průměrů chyb přímosti získaných z dat přímosti definovaných analýzou.

$$\text{Úchylka přímosti} = \left| \bar{x}_{\max} \right| + \left| \bar{x}_{\min} \right| \quad (4.23)$$

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

Podle tohoto vztahu nebyl nalezen adekvátní ekvivalent.

#### 4.4.4. Analýza přímosti osy Y vzhledem k ose X metodou koncových bodů

##### 4.4.4.1. Přesnost přímosti

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

$$\underline{0,00952\mu\text{m}}$$

Přesnost přímosti je rozdíl mezi maximálními a minimálními hodnotami  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$ , nezávisle na směru měření.

$$A = (\bar{x} + 3\sigma)_{\max} - (\bar{x} - 3\sigma)_{\min} \quad (4.24)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  mohou být vzaty z rozdílných směrů měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$A = (0,001108 + 3 \cdot 0,001747) - (-0,000357 - 3 \cdot 0,001591)$$

$$A = 0,006349 - (-0,005130)$$

$$A = 0,011479$$

$$\underline{0,01148\mu\text{m}}$$

Odchylka: 20.59 %

#### 4.4.4.2. Jednosměrná opakovatelnost

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

$$\underline{0,00928\mu\text{m}}$$

To je maximální hodnota rozdílu mezi  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  v libovolném bodě a v libovolném směru měření.

$$U_{\text{rep}} = [ (\bar{x} + 3\sigma)_i - (\bar{x} - 3\sigma)_i ] \max \quad (4.25)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)_i$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)_i$  musejí být vzaty ze stejného směru měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$U_{\text{rep}} = (0,000812 + 3 \cdot 0,001788) - (0,000812 - 3 \cdot 0,001788)$$

$$U_{\text{rep}} = 0,006176 - (-0,004552)$$

$$U_{\text{rep}} = 0,010728$$

$$\underline{0,01073\mu\text{m}}$$

Odchylka: 15.63 %

#### 4.4.4.3. Bidirekcionální opakovatelnost

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

$$\underline{0,00928\mu\text{m}}$$

To je maximální hodnota rozdílu mezi  $(\bar{x} + 3\sigma)$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)$  v libovolném bodě, v obou směrech měření.

$$B_{\text{rep}} = [ (\bar{x} + 3\sigma)_j - (\bar{x} - 3\sigma)_j ] \max \quad (4.26)$$

kde hodnoty  $(\bar{x} + 3\sigma)_j$  a  $(\bar{x} - 3\sigma)_j$  mohou být vzaty z rozdílných směrů měření.

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

$$U_{rep} = (0,000812 + 3 \cdot 0,001788) - (0,000812 - 3 \cdot 0,001788)$$

$$U_{rep} = 0,006176 - (-0,004552)$$

$$U_{rep} = 0,010728$$

**0,01073μm**

Odchylka: 15.63 %

#### 4.4.4.4. Průměrná odchylka obráceného chodu

To je průměrná hodnota rozdílů mezi průměrnými úchylkami přímosti pro dva směry měření.

$$MRV = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow) \quad (4.27)$$

Kde n je počet chodů.

Hodnota z programu Renishaw:

**-0,00203μm**

chod	odchylka	rozdíl	chod	odchylka	rozdíl
1	-0,0036424	-0,0046286	3	-0,0017662	-0,0044286
2	0,0009862		4	0,0026624	
chod	odchylka	rozdíl	chod	odchylka	rozdíl
5	-0,0007567	-0,0040762	7	0,0007671	-0,0031524
6	0,033195		8	0,0039195	
chod	odchylka	rozdíl			
9	0,0005290	-0,0039714			
10	0,0045005				

Suma hodnot rozdílů mezi průměrnými úchylkami přímosti vypočtených dle ČSN:

**-0,00203μm**

Odchylka: 0.00 %

#### 4.4.4.5. Úchylka přímosti

Úchylka přímosti může být definována jako vzdálenost dvou rovnoběžných přímek, které obsahují všechny body podél osy a jsou rovnoběžné s hlavním směrem osy.

Hodnota vypočítaná programem Renishaw:

$$\underline{0,00406\mu\text{m}}$$

Je suma maximálních a minimálních odchylek průměrů chyb přímosti získaných z dat přímosti definovaných analýzou.

$$\text{Úchylka přímosti} = \left| \bar{x}_{\max} \right| + \left| \bar{x}_{\min} \right| \quad (4.29)$$

Hodnota vypočítaná podle ČSN:

Podle tohoto vztahu nebyl nalezen adekvátní ekvivalent.

#### 4.5 Intervaly spolehlivosti regresní křivky

Jednou z mála statistických metod, kterou se dají získané grafy porovnat je metoda pásu spolehlivosti kolem regresní křivky. Postupuje se tak, že se kolem regresní křivky vypočítá na základě naměřených hodnot tzv. pás spolehlivosti. Pokud křivka vypočítaná podle metod ČSN vyjde v rozmezí limitních křivek, pak můžeme říct, že obě křivky jsou z hlediska statistiky na 95 % shodné.

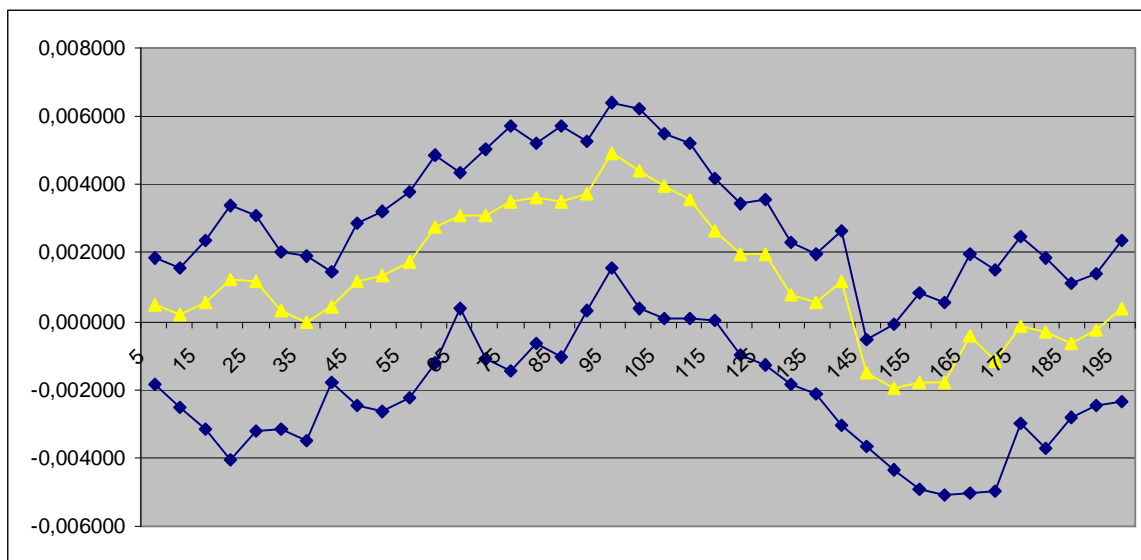
Pás spolehlivosti:

$$\left\langle y - t \left( 1 - \frac{\alpha}{2}, r \right) \cdot \sqrt{D(y)} + t \left( 1 - \frac{\alpha}{2}, r \right) \cdot \sqrt{D(y)} \right\rangle, \quad (4.30)$$

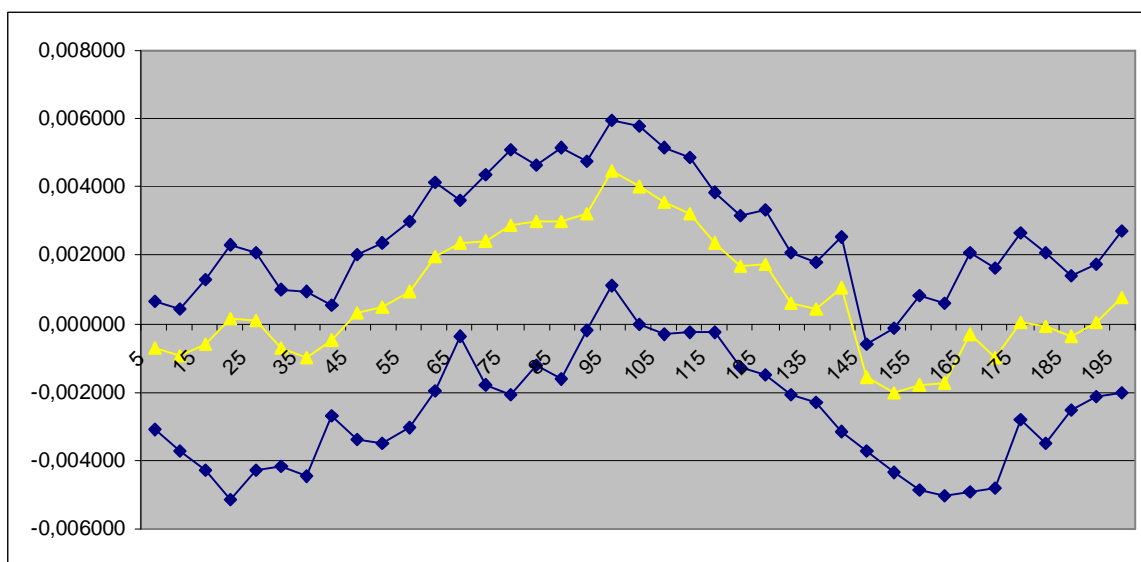
$$r = \sum_i n_i - 2 \quad (4.31)$$

kde  $t$  je hodnota kvantilů  $t$ -rozdělení pro  $r$  stupňů volnosti a  $D(y)$  je rozptyl vypočtené hodnoty.

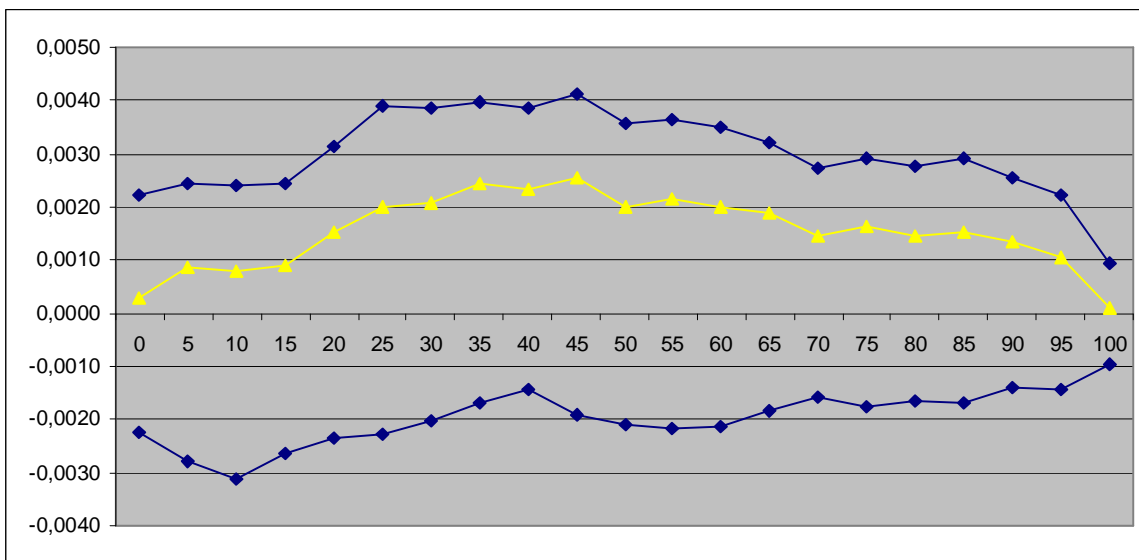
Na následujících grafech je zobrazen pás spolehlivosti pro hodnoty spočítané softwarem firmy Renishaw a křivku, která byla spočítána podle metod ČSN. Pás spolehlivosti je ohraničen modrými křivkami. Žlutá křivka znázorňuje střední křivku grafů vypočtených podle metod ČSN.



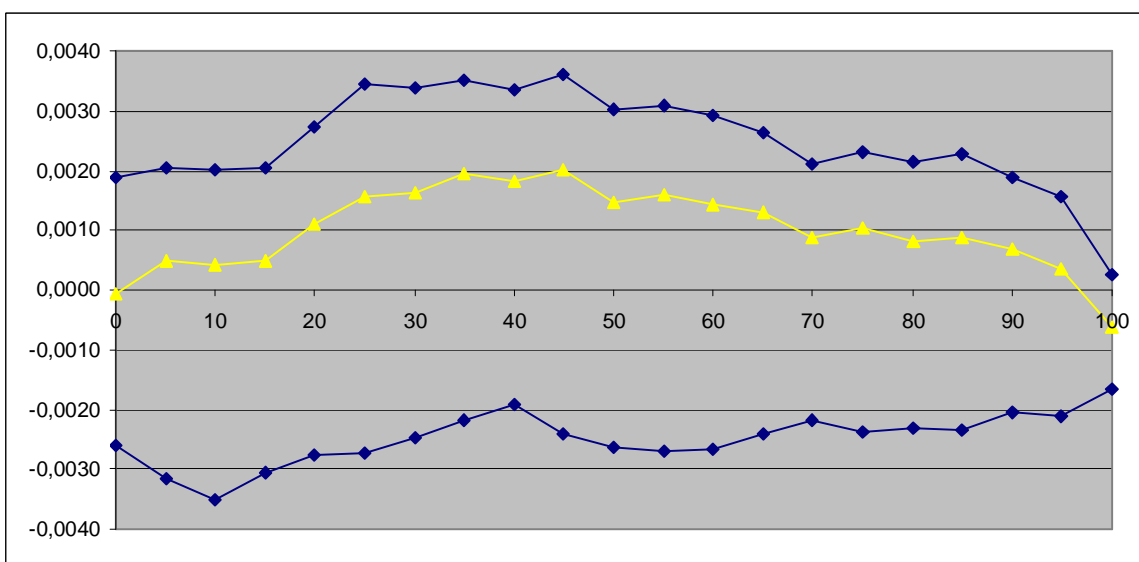
obr. 4.29 – porovnání hodnot přímosti osy X vzhledem k ose Y získané metodou koncových bodů



obr 4.30 – porovnání hodnot přímosti osy X vzhledem k ose Y získané metodou nejmenších čtverců



obr. 4.31 – porovnání hodnot přímosti osy Y vzhledem k ose X získané metodou koncových bodů



obr 4.32 – porovnání hodnot přímosti osy Y vzhledem k ose X získané metodou nejmenších čtverců

Na všech čtyřech grafech je žlutá křivka v intervalu daném pásem spolehlivosti a tudíž můžeme konstatovat, že výsledky, tj hodnoty přepočítané metodou ČSN jsou s hodnotami vypočítané softwarem firmy Renishaw z hlediska statistiky na 95% shodné.

## 5. ROVINNOST

Plocha je považována za rovinnou v daném rozsahu měření, když všechny její body leží mezi dvěma rovinami vzájemně vzdálenými o určenou hodnotu a rovnoběžnými s hlavním směrem plochy. [1]

Hlavní směr plochy nebo reprezentativní rovina plochy je určena buď tak, aby minimalizovala úchylku rovinnosti, nebo následujícími běžnými metodami:

- buď třemi body vhodně zvolenými na měřené ploše (části blízké hranám s místními malými vadami nemusejí být obvykle brány v úvahu)
- nebo rovinou vypočítanou z vynesných bodů metodou nejmenších čtverců.

### 5.1. Metody měření

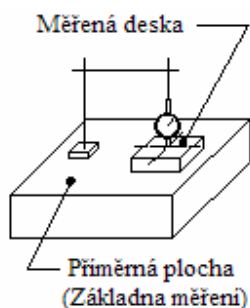
#### 5.1.1. Měření rovinnosti průměrnou deskou

Při měření pomocí průměrné desky je na průměrnou desku nanesena anglická červeň nebo chromoxid rozředěný lehkým olejem. Takto připravená průměrná deska je pak položena na měřenou plochu. Deskou se lehce posune tam a zpět. Deska se sejme a pozoruje se rozložení styčných bodů na ploše. Toto rozložení by mělo být rovnoměrné po celé ploše a mělo by být rovno předepsané hodnotě. Tato metoda je použitelná pouze pro plochy malých rozměrů s poměrně jemným opracováním povrchu (zaškrabané nebo broušené plochy). [1]

#### 5.1.2. Měření průměrnou deskou a číselníkovým úchylkoměrem

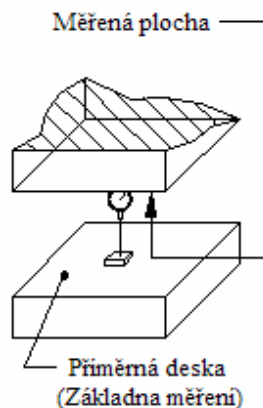
Měřicí zařízení sestává z průměrné desky a úchylkoměru upnutého na stojánku s broušenou základnou, který se pohybuje po průměrné desce:

- a) měřená součást je umístěna na průměrné desce (profil stojánku úchylkoměru a rozměry průměrné desky musejí být dostatečně velké, aby umožnily měření celé plochy) viz obr 5.1.
- b) Průměrná deska je umístěna čelně proti kontrolované ploše. V tomto případě je měření možné takovou průměrnou deskou, jejíž rozměry jsou blízké rozměrům měřené plochy (viz obr. 5.2.).



obr. 5.1 – přiměrná deska a úchylkoměr I

II



obr. 5.2 - přiměrná deska a úchylkoměr

Pro určení měřicích bodů je vyznačena čtvercová síť.

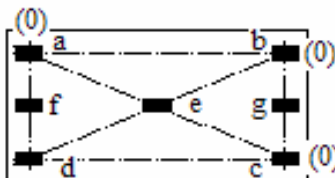
Chybám odečtených hodnot, způsobených povrchovými vadami, lze předejít:

- a) použitím číselníkového úchylkoměru s nepatrně zaobleným dotekem, který není ovlivněn drsností povrchu
- b) položením malých kostek s rovnoběžně broušenými čely mezi měřenou plochu a dotek úchylkoměru k vyloučení povrchových vad (zaškrabané plochy, hoblované plochy, atd.)

### 5.1.3. Měření rovinností pravítkem (pravítka)

#### 5.1.3.1. Měření pomocí soustavy přímek přemíst'ováním pravítka

Nejdříve je určena teoretická rovina se základními body. Pro tento účel se na kontrolované ploše zvolí tři body  $a$ ,  $b$  a  $c$  jako nulové body (viz obr. 5.3). Do těchto tří bodů se umístí základní měřky stejné tloušťky, takže horní plochy těchto měrek definují základní rovinu, ke které se plocha měří. [1]



obr. 5.3 – měření rovinnosti pravítkem

Čtvrtý bod  $d$ , ležící v základní rovině, se pak získá pomocí sestavovaných základních měrek následujícím způsobem: pravítko se umístí na  $a$  a  $c$  a sestavené měrky se umístí do bodu  $e$  plochy a vedou se do styku se spodní plochou pravítka. Tím jsou horní plochy měrek  $a, b, c$  a  $e$  ve stejné rovině.

Úchylka bodu  $d$  se pak zjistí umístěním pravítka na body  $b$  a  $e$ ; do bodu  $d$  se umístí sestavené měrky a jejich horní plocha se výškově vyrovná do roviny horních ploch měrek již ustavených.

Položením pravítka na  $a$  a  $d$  a poté na  $b$  a  $c$  lze zjistit úchylky všech bodů plochy, ležících mezi  $a$  a  $d$  a mezi  $b$  a  $c$ . Stejným způsobem lze zjistit úchylky bodů ležících mezi  $a$  a  $b$  a mezi  $c$  a  $d$  (mají být uvažovány všechny nutné ohledy na průhyb pravítka).

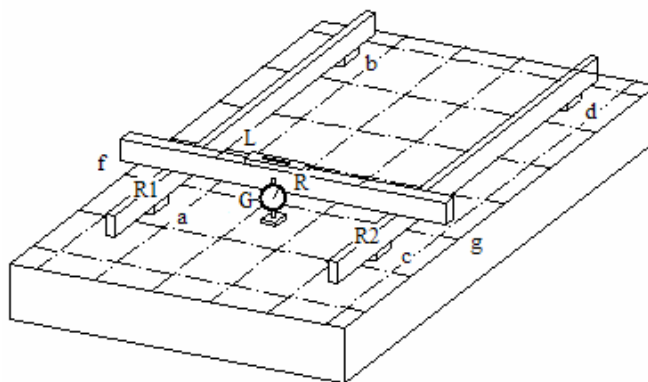
Aby se získaly odečty uvnitř takto definovaného obdélníku nebo čtverce, je pouze nutno umístit např. v bodech  $f$  a  $g$ , jejichž úchylky již budou známy, základní měrky sestavené na správnou výšku. Na tyto měrky se pak položí pravítko a pomocí základních měrek mohou být měřeny úchylky mezi měřeným povrchem a pravítkem. Je možné použít přístroj pro měření přímosti, jak je např. ukázáno na obr. 2.4. [1]

### 5.1.3.2. Měření pravítka, vodováhou a číselníkovým úchylkoměrem

U této metody je základna měření určena dvěma pravítky umístěnými rovnoběžně pomocí vodováhy.

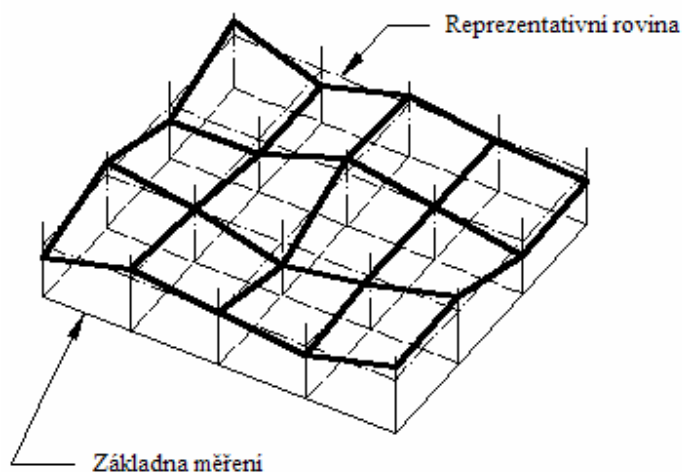
Dvě pravítka  $R_1$  a  $R_2$  uložená na opěrách  $a, b, c$  a  $d$  z nichž tři jsou stejné výšky a jedna je nastavitelná, jsou pomocí vodováhy vyrovnána tak, že jejich horní přímé plochy jsou rovnoběžné. Tím dvě přímky  $R_1$  a  $R_2$  leží v jedné rovině. Jedno referenční pravítko  $R$ , umístěné  $R_1$  a  $R_2$  nad kteroukoliv přímkou  $fg$  čtvercové mřížky, umožňuje pomocí měřidla  $G$  (nebo základních měrek) přímo odečítat úchylky.

Pravítka  $R_1$  a  $R_2$  musejí být dostatečně tuhá, aby průhyb, způsobený hmotností referenčního pravítka, byl zanedbatelný. [1]



obr. 5.4 – měření pravítka, vodováhou a úchylkoměrem

Je určena základna a jsou změřeny a graficky vyneseny úchyly od této základny. Grafické vynesení může být provedeno v jednotlivých bodech odpovídajících čtvercové síti, viz obr. 5.5, která pokrývá celý povrch měřené plochy. Volba vzdáleností bodů měření je nezávislá na použitých měřidlech. [1]



obr. 5.5 – čtvercová síť na vynášení úchylek

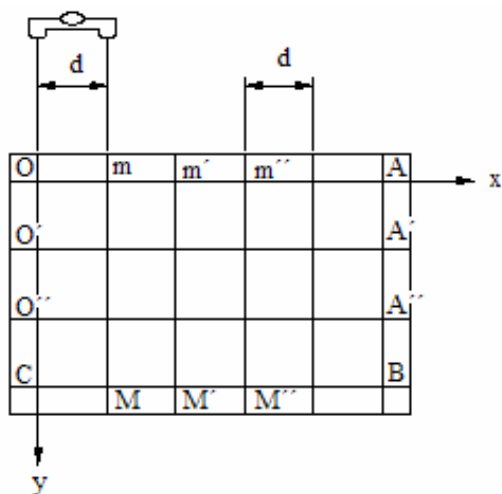
#### 5.1.4. Měření rovinnosti vodováhou

Toto je v současnosti jediná známá metoda, která umožňuje při přemístování přístroje do jednotlivých měřicích poloh zachovat stálý směr měřicí základny (vodorovný). [1]

Základem tohoto měření je měření přímosti čáry pomocí metody úhlových úchylek.

##### Měření pravoúhelníkové plochy

Základní rovina je určena přímkami  $OmX$  a  $OO'Y$ , přičemž  $O,m$  a  $O'$  jsou tři body měřené plochy (viz obr. 5.6).



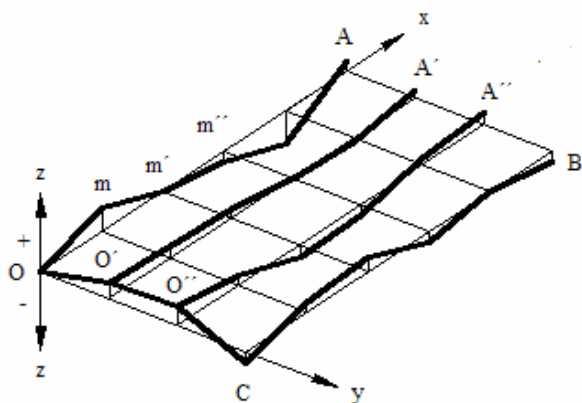
obr. 5.6 – měření pravoúhelníkové plochy

Přímky OX a OY jsou přednostně zvoleny jako vzájemně kolmé a pokud možno rovnoběžné s obrysy měřené plochy. Měření se začne v jednom z rohů O plochy ve směru OX. Profil každé čáry OA a OC se určí metodou uvedenou v sekci Metoda měření vodováhou. Dále jsou určeny profily podélných čar O'A', O''A'' a CB tak, aby byla zkontrolována celá plocha. [1]

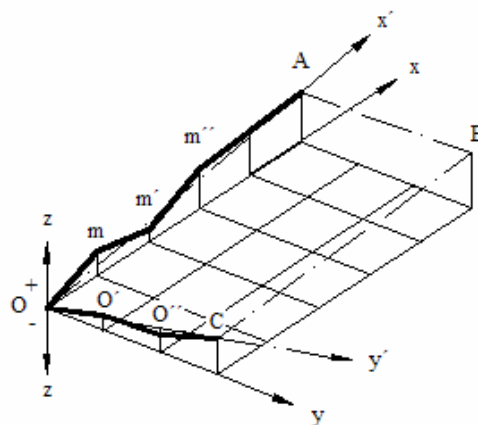
Pro ověření předcházejících měření lze provést doplňková měření po čarách mM', m'M' atd.

Není-li šířka měřené plochy příliš odlišná od délky, je pro kontrolu vhodné provést také měření po úhlopříčkách.

Vyhodnocení naměřených hodnot (viz obr. 5.7 a 5.8)



obr. 5.7 – vyhodnocení hodnot I

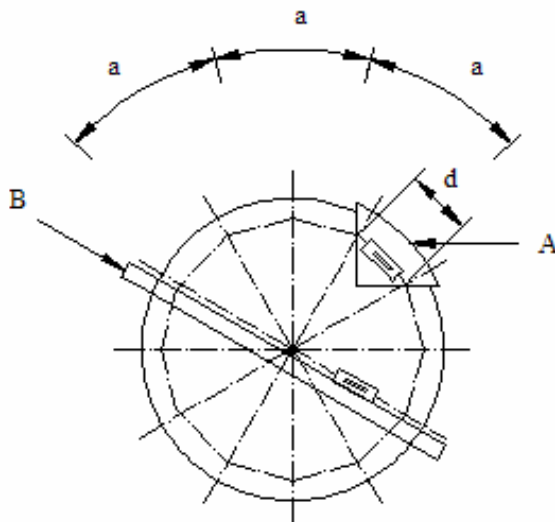


obr. 5.8 – vyhodnocení hodnot II

Z hodnot naměřených na čarách  $Omm'A$  a  $OO'O''C$  se za použití postupu, uvedeného na obrázku 2.11, nakreslí topografická znázornění  $Omm'A$  a  $OO'O''C$ . Při vynášení čar  $O'A'$ ,  $O''A''$  a  $CB$  musejí být počáteční body  $O'$ ,  $O''$  a  $C$ . V případě podle obrázku 5.7 jsou všechny vynesené tvary velmi blízko základně měření, kterou je možno označit za reprezentativní rovinu, ale v případě podle obrázku 5.8 mají reprezentativní přímky  $Omm'A$  a  $OO'O''C$  a směry  $OX'$  a  $OY'$ . V tomto případě bude patrně reprezentativní rovinou rovina obsahující  $OX'$  a  $OY'$ , tj. rovina  $OABC$ . [1]

### Měření rovných ploch kruhového obrysu

Velké plochy kruhového obrysu se nehodí pro pravoúhlu čtvercovou mříž, která nechává určité části plochy neměřené. Proto se dává přednost vynést topografickou síť s použitím obvodové kružnice a průměrů (viz obr. 5.9). [1]



obr. 5.9 – měření ploch kruhového průřezu

## **5.1.5. Měření rovinnosti optickými metodami**

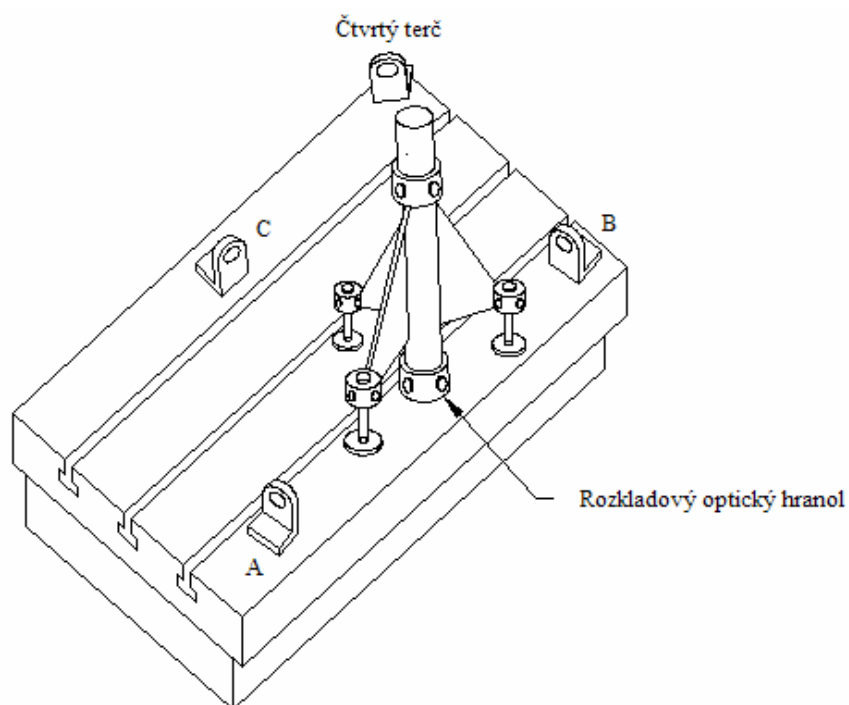
### **5.1.5.1. Měření autokolimátorem**

Přímky  $OX$  a  $OY$ , definující základní rovinu, jsou určeny optickými osami autokolimátoru ve dvou polohách, pokud možno svírající úhel  $90^\circ$ .

Základní rovina měření je určena směry optických os autokolimátoru  $OX$  a  $OY$ . Při měřeních  $O'A'$  a  $O''A''$  a  $CB$  musí být tedy optická osa autokolimátoru rovnoběžná s  $OX$  (viz obr. 5.6). [1]

### 5.1.5.2. Měření rozkladovým optickým hranolem

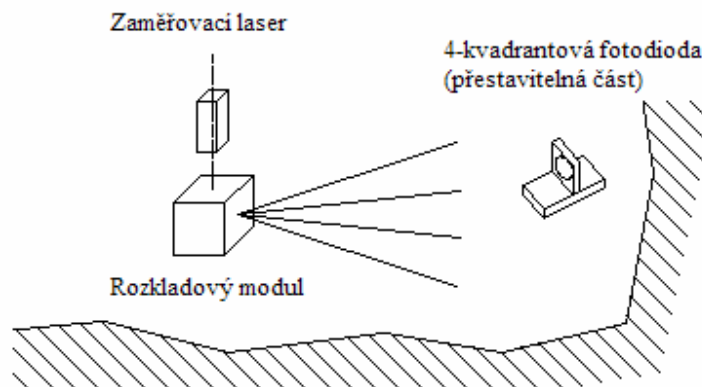
Jako další možnost je použití rozkladového optického hranolu (pentagonálního hranolu). Základní rovina je určena středy tří nulových terčů (A, B a C), umístěných na obvodu plochy (viz obr. 5.10). Hranol se vyrovná tak, že optická osa dalekohledu je kolmá k základní rovině a pro měření polohy libovolného bodu na ploše se použije optický terč. [1]



obr. 5.10 – měření optickým rozkladovým hranolem

### 5.1.5.3. Měření zaměřovacím laserem

U této metody se ve spojení se zaměřovacím laserem použije rozkladový modul, který určí základní rovinu měření pomocí svazku přímých základen (viz obr. 5.11). [1]

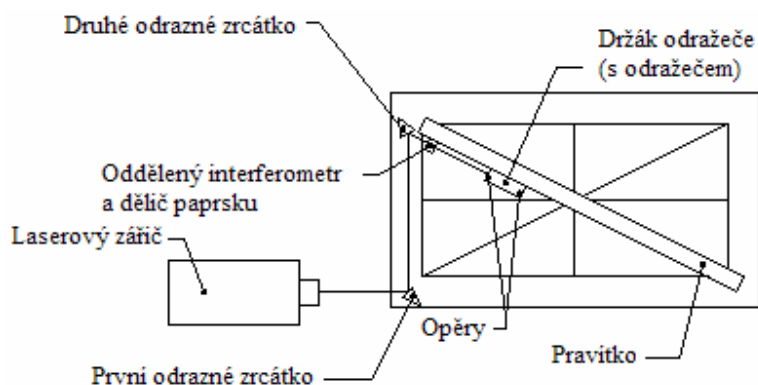


obr. 5.11 – měření zaměřovacím laserem

### 5.1.5.4. Měření laserovým měřicím systémem

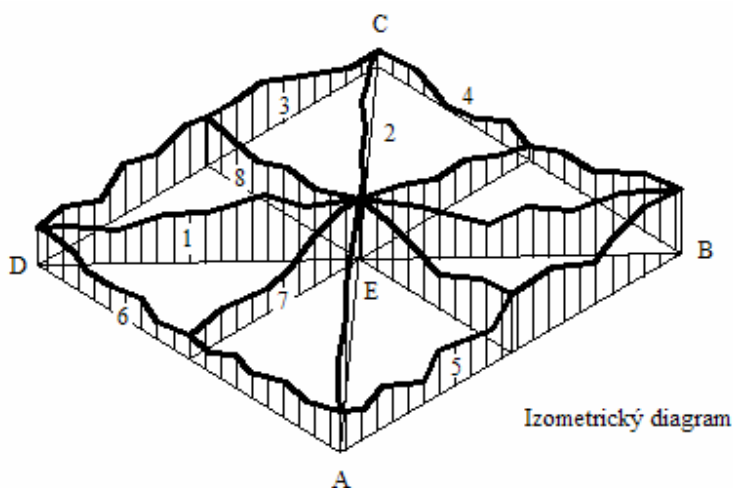
Topografie plochy se sestojí z výsledků měření přímosti různých čar pomocí měření úhlových úchylek. [1]

Typický postup měření je zobrazen schematicky, tj. čarami 1 až 8 na obr. 5.12.



obr. 5.12 – měření laserovým měřicím systémem

Měří se postupně po čarách 1 až 8. Výsledné odečty dávají po zpracování dat diagram rovinnosti desky v izometrické formě (viz obr. 5.13). [1]



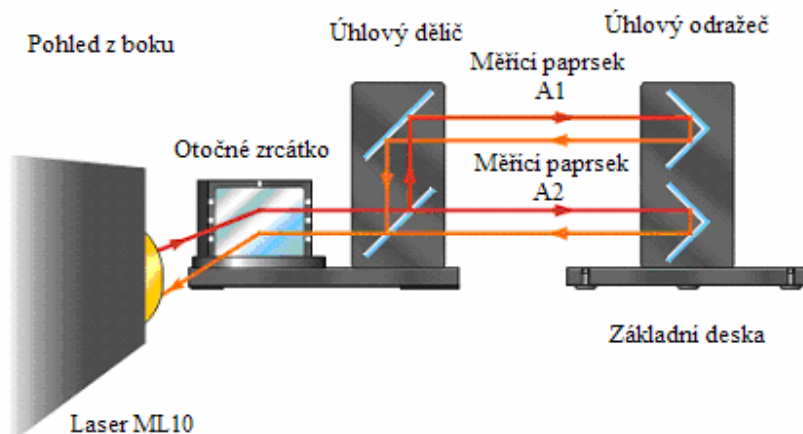
obr. 5.13 – zpracované hodnoty do izometrického diagramu

#### 5.1.5.5. Měření souřadnicovým měřicím strojem

Rovinnost plochy může být měřena souřadnicovým měřicím strojem (CMM). Základní rovina, pomocí které je úchylka rovinnosti stanovena, může být určena pomocí software souřadnicového měřicího stroje (viz obr 5.5). [1]

## 6. MĚŘENÍ ROVINNOSTI LASERINTERFEROMETREM RENISHAW

Laserový paprsek se uvnitř interferometru rozdělí na dva. Jedna část paprsku (měřicí paprsek  $A_1$ ) projde interferometrem a odrazí se v jednom z dvojice odražečů v úhlovém odražeči zpět interferometrem do laserové hlavy. Druhý paprsek (měřicí paprsek  $A_2$ ) projde skrz periskopovou částí do úhlového interferometru do druhého odražeče, odkud se vrátí přes interferometr do laserové hlavy.

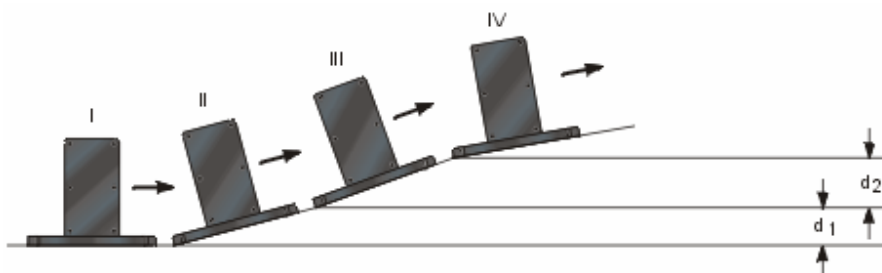


obr. 6.1 - princip měření

Úhlové měření je založeno na porovnávání dráhového rozdílu mezi oběma paprsky  $A_1$  a  $A_2$  (tj. měření je nezávislé na vzdálenosti mezi laserem a interferometrem). Výklad rovinnosti zobrazený softwarem je založen na výšce přírůstku mezi přední a zadní stranou základní desky, na které je úhlový odražeč připevněn. Výše přírůstku je spočítána na základě úhlového měření a na základě známé vzdálenosti mezi přední a zadní částí základní desky. Tato vzdálenost musí být zadána do kalibračního softwaru před začátkem měření.

Při měření každé čáry úhlový interferometr (připevněný na stejné základní desce jako otočné zrcátko) zůstává na místě, zatímco odražeč (umístěný na samostatné základní desce) se pohybuje podél přímky v předem stanovených krocích.

Měření rovinnosti je uskutečněno na základně série snímání přírůstků podle toho, jak je úhlovým odražečem pohybováno podle měřené čáry.



obr. 6.2 - zobrazení změn měřených přírůstků

Na obr 6.2 je zobrazeno:

- Pozice I je výchozí pozice, ve které je záznam interferometru normálně zaznamenán.
- Pozice II je posunuta o vzdálenost, která se rovná délce základní desky oproti pozici I. Záznam interferometru je přírůstek vzdálenosti  $d_1$ , což je rozdíl “výšek“ (se zřetelem k základní čáře) mezi přední a zadní částí základní desky.
- Pozice III je posunuta o vzdálenost, která se rovná délce základní desky oproti pozici II. Záznam interferometru je  $d_2$ , tj. rozdíl výšek mezi přední a zadní částí základní desky v této nové pozici.
- Podobně jako v předchozích případech je záznam z pozice IV  $d_3$  a tak dále pro další měřené pozice na měřené čáře.
- Faktická rovinnost měřené čáry je algebraická suma měření  $d_1, d_2$  atd. (plus hodnota z pozice I, pokud nebyla na začátku měření vynulována).

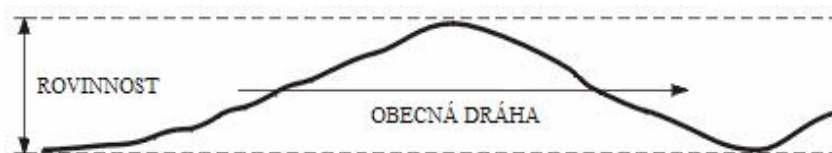
**Pozn:** Jednotka na kompenzaci vlivů prostředí není nutná na měření rovinnosti, protože rozdíly v délkách drah mezi dvěma paprsky je tak malá, že chyba způsobená vlivem prostředí je zanedbatelná.

## 6.1. Standardní metody hodnocení rovinnosti

K měření rovinnosti povrchu je potřeba udělat na povrchu množství očíslovaných čar. Tyto dvě metody jsou standardní metody k uskutečnění měření rovinnosti.

- Moodyho metoda
- Mřížková metoda

Rovinnost povrchu může být definována jako oddělení dvou rovin, které jsou rovnoběžné s obecným směrem povrchu a který jen vymezuje měřený povrch, viz obr. 6.3.

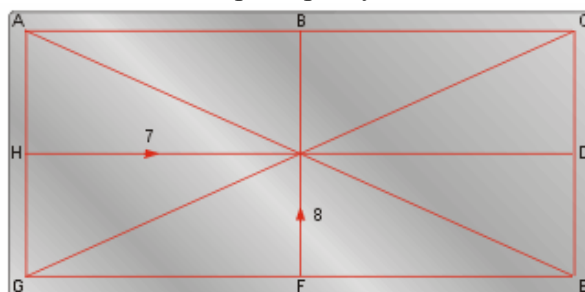


obr. 6.3 – určení rovinnosti

Úchylky rovinnosti pro povrch roviny určité velikosti mohou být porovnány s národními standardy povolených úchylek.

### 6.1.1. Moodyho Metoda

S touto metodou je měření omezeno na 8 předepsaných čar, viz obr. 6.4.



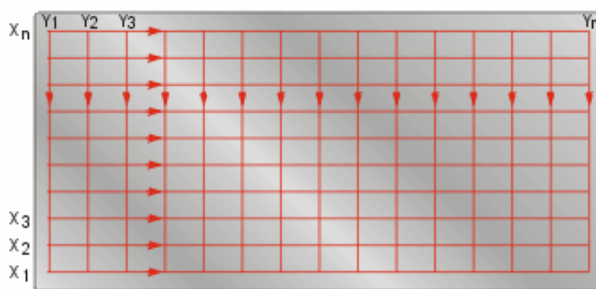
obr. 6.4 – Moodyho metoda

Moodyho Metoda byla poprvé navrhnutá J.C. Moodym v roce 1955 a následně dosáhla širokého přijetí. Tato metoda poskytuje relativně rychlou metodu kalibrace povrchové roviny, s výsledky prezentovanými jako tvarový náčrt na 8mi měřených testovaných čarách, ve formátu přijatelném pro certifikaci.

Tato metoda má jednu nevýhodu – všechny body na všech čarách musejí být změřeny a zakresleny. To může zapříčinit problém s definicí délky měřeného kroku, které by odpovídalo tomuto požadavku. Obzvláště na povrchu s drážkami/štěrbinami se může pozice jedné nebo více štěrbin krýt s potřebnou pozicí na umístění základové desky.

### 6.1.2. Mřížková a polo-mřížková metoda

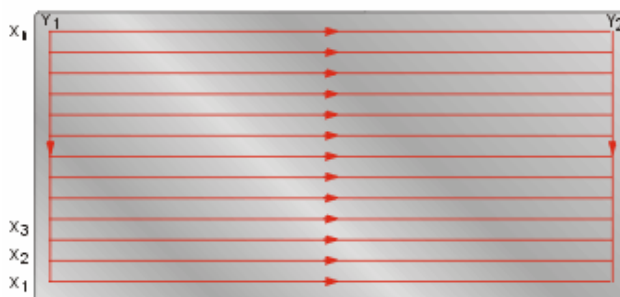
U mřížkové metody může být měřeno na libovolném počtu čar ve dvou vzájemně kolmých směrech napříč povrchem, jak je vyobrazeno na obr. 6.5.



obr. 6.5 – mřížková metoda

Zatímco přírůstková povaha měřicí techniky vyžaduje změření všech bodů na zadané čáře, u mřížkové metody není nutné měřit na všech čarách. To umožňuje nastavení měřících čar tak, aby se dalo vyhnout “obstrukcím“ (např. štěrbinám) nebo aby mohlo být dosaženo větších detailů měřené oblasti.

Polo-mřížková metoda (viz obr. 6.6) je speciální případ mřížkové metody, kde počet měřících čar je brán pouze v jednom směru (např. ve směru osy X), ale pouze obvodové čáry jsou vzaty v potaz v kolmém směru.



obr. 6.6 – polo-mřížková metoda

Nevýhoda obou mřížkových metod je, že k definování vyžadují referenční rovinu. Alternativní technika, jako např. Moodyho metoda je potřeba k definování referenční roviny.

## 6.2. Faktory ovlivňující přesnost měření rovinnosti

Následující faktory mohou ovlivnit přesnost přímosti:

- Chyba polohy paprsku
- Úhlová chyba optiky
- Diferenciální prodloužení základny
- Podmínky opakovatelnosti měření

### 6.2.1. Chyba polohy paprsku

Chyba polohy mezi laserovým paprskem a přímkou měření ovlivní přímost měření. Maximální povolené chyby polohy paprsku, které nám zaručí danou přesnost měření jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Tab. 6.1 – maximální povolené chyby polohy paprsku

Základna	Maximální chyba polohy
50 mm	81 úhlových min
100 mm	54 úhlových min
150 mm	27 úhlových min

### 6.2.2. Diferenciální prodloužení základny

Diferenciální prodloužení přední a zadní části základny způsobí určitou odchylku. Stejně tak jako s krytem úhlového odražeče, stejně tak i s měřicí základnou by během měření mělo být manipulováno co možno nejméně. Všechny části by měly být vzdáleny od vyhřívaných nebo chlazených povrchů tak, aby teplota během měření zůstala konstantní.

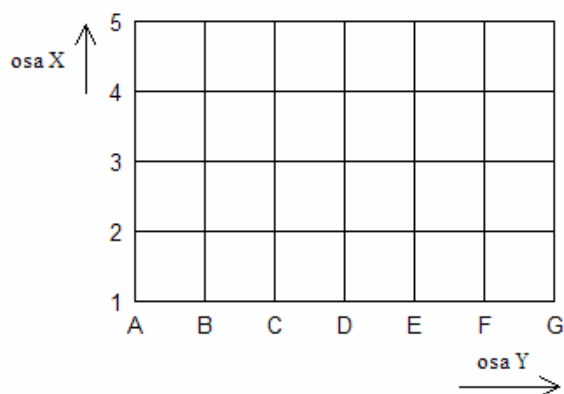
### 6.2.3. Podmínky opakovatelnosti měření

Jakýkoliv nárůst nečistot nebo částeczek prachu pod patkami základní desky může způsobit odchylku v měření. Chyby měření jsou často označovány jako velká uzavřená chyba. K redukování odchylek měření na minimum by měl být odražeč umístěn doprostřed měřicí čáry a laserový systém by měl být vynulován. Odražečem by mělo být několikrát pohybováno od začátku ke konci podél měřicí čáry, zatímco probíhá záznam hodnot z laseru. Tyto hodnoty by měly být opakovatelné do hodnoty  $0.5 \mu\text{m}$  na čistém povrchu a na povrchu s dobrou kvalitou povrchu.

## 7. ANALÝZA HODNOT ROVINNOSTI



obr. 7.1 – měření rovinnosti



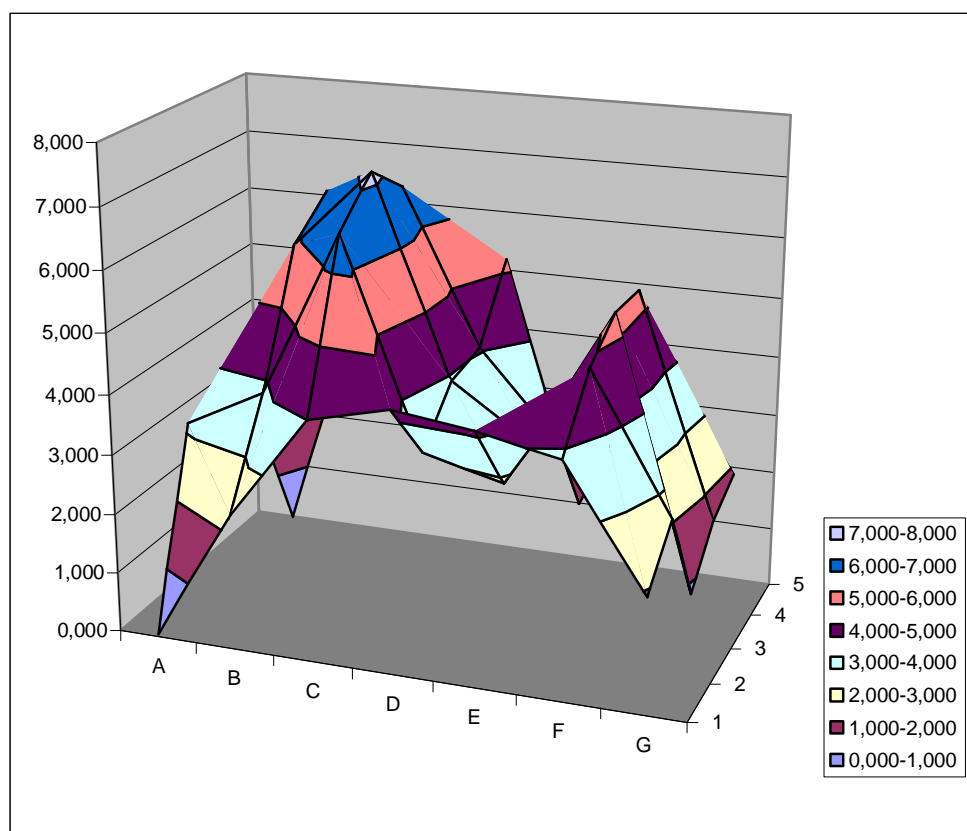
obr. 7.2 – nákres měřicí sítě

## 7.1. Hodnoty naměřené mřížkovou metodou před lapováním

### 7.1.1. Měření hodnot podél osy X

Tab. 7.1 – hodnoty rovinnosti naměřené podél osy X

	1	2	3	4	5
A	0,044	3,158	0,972	2,286	0,000
B	2,273	6,170	2,468	6,998	4,195
C	4,002	8,082	4,463	8,110	4,391
D	4,330	8,394	3,758	7,422	5,186
E	4,159	7,906	3,154	8,234	0,981
F	3,888	6,318	3,549	6,646	3,877
G	1,916	2,630	0,844	1,156	1,872

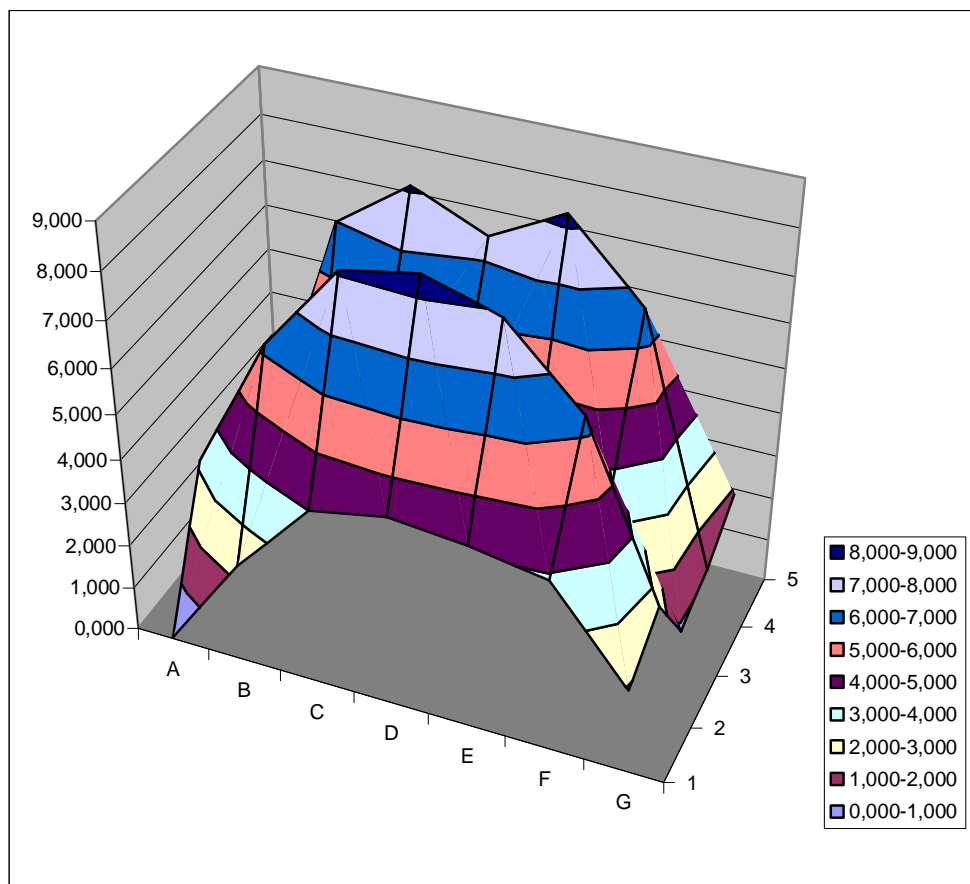


obr. 7.3 – hodnoty rovinnosti naměřené podél osy X

### 7.1.2. Měření hodnot podél osy Y

Tab. 7.2 – hodnoty rovinnosti naměřené podél osy Y

	1	2	3	4	5
A	0,044	3,158	0,972	2,286	0,000
B	2,273	6,170	2,468	6,998	4,195
C	4,002	8,082	4,463	8,110	4,391
D	4,330	8,394	3,758	7,422	5,186
E	4,159	7,906	3,154	8,234	0,981
F	3,888	6,318	3,549	6,646	3,877
G	1,916	2,630	0,844	1,156	1,872



obr. 7.4 – hodnoty rovinnosti naměřené podél osy Y

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo pochopení problematiky měření přímosti a rovinnosti, analýza principu výpočtů, které jsou použity softwarem firmy Renishaw a následná aplikace získaných poznatků na přepočítání hodnot, naměřených na posuvu mikroskopu, dle ČSN a jejich vzájemné porovnání. Porovnávány byly výsledky metod koncových bodů a nejmenších čtverců. Rovnice základních přímek byly získány metodou lineární regrese. Poté byly podle příslušných vzorců vypočteny průběhy grafů a ty následně porovnány s průběhy grafů, získaných z programu Renishaw. Při zřejmém porovnání byl nalezen společný charakter a podobné průběhy příslušných dvojic grafů. Dále jsme porovnali charakteristické hodnoty příslušných průběhů ( přesnost přímosti, jednosměrná a bidirekcionální opakovatelnost, průměrná odchylka obráceného chodu a úchylka přímosti ). Maximální odchylky dosahovali výjimečně hodnot 20 % ( většinou to bylo v řádu desítek procent ), což je uspokojivý výsledek. Pro detailnější analýzu byla použita metoda pásů spolehlivosti kolem regresní křivky. Po vykreslení pásů spolehlivosti bylo zjištěno, že základní křivky grafů vypočtených metodou ČSN se nalézají v mezích vypočtených z hodnot z programu Renishaw. Můžeme tedy konstatovat, že obě sady grafů jsou z pohledu statistiky na 95 % shodné.

Rovinnost byla měřena na desce před lapováním a po něm a byla porovnána data z obou měření.

## Použitá literatura

- [1] ČSN ISO 230-1, Zásady obráběcích strojů, Část 1: Geometrická přesnost strojů – pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění, únor 1998
- [2] Renishaw laser calibration system user guide. Version 6.1, 11 Jan 2002
- [3] Renishaw, 2007, <http://www.renishaw.cz>
- [4] Doc RNDr. Bohumil Maroš, CSc., RNDr Marie Marošová - Základy numerické matematiky, PC-DIR Real s.r.o., Brno, 1997, ISBN 80-214-1494-4
- [5] Doc RNDr. Bohumil Maroš, CSc. – Empirické modely I, Analýza inženýrského procesu, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, říjen 2001, ISBN 80-214-1984-9
- [6] Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta pedagogická, Katedra matematiky, Plzeň, [www.kmt.zcu.cz](http://www.kmt.zcu.cz)

## Seznam použitých znaků a symbolů

### Vzorec 2.1:

$E_h$	[mm]	rozdíl výšky počátečního a koncového bodu přímky
$D$	[mm]	velikost kroku
$\alpha$	[°]	velikost úhlu, který svírají dvě sousední přímky

### Vzorec 4.1

$y$	[mm]	závisle proměnná veličina
$x$	[mm]	nezávisle proměnná veličina
$a$	[-]	směrnice přímky
$b$	[-]	hodnota $y$ při nulové hodnotě $x$

### Vzorce 4.2, 4.3

$N$	[-]	počet hodnot
$x_i$	[mm]	hodnota posuvu $x$
$y_i$	[ $\mu$ m]	příslušná naměřená hodnota $y$

### Vzorce 4.4, 4.5

$X_1: X_n$	[mm]	všechny hodnoty $X$ v daném výběru v daném pořadí
$Y_1: Y_n$	[ $\mu$ m]	všechny hodnoty $Y$ v daném výběru v daném pořadí

### Vzorec 4.6

$V$	[ $\mu$ m]	vzdálenost bodu od přímky
$a$	[-]	konstanta (pro $a=0$ je přímka rovnoběžná s osou $x$ )
$b$	[-]	konstanta (pro $b=0$ je přímka rovnoběžná s osou $y$ )
$c$	[-]	konstanta (pro $c=0$ přímka prochází počátkem)
$x_a$	[ $\mu$ m]	$x$ -ová souřadnice bodu $A$
$y_a$	[ $\mu$ m]	$y$ -ová souřadnice bodu $A$

### Vzorec 4.7

$\bar{x}$	[mm]	průměr $x$ -ových hodnot
$\sigma$	[mm]	směrodatná odchylka

### Vzorec 4.8

$\sigma^2$	[mm <sup>2</sup> ]	rozptyl pro základní soubor
$n$	[-]	počet hodnot
$s^2$	[mm <sup>2</sup> ]	rozptyl pro výběrový soubor

### Vzorec 4.9

$s^2$	[mm <sup>2</sup> ]	rozptyl pro výběrový soubor
$n$	[-]	počet hodnot
$\bar{x}$	[mm]	průměr $x$ -ových hodnot

Vzorce 4.10, 4.11, 4.14, 4.15, 4.16, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26

$\bar{x}$	[mm]	průměr x-ových hodnot
$\sigma$	[mm]	směrodatná odchylka

Vzorce 4.12, 4.17, 4.22, 4.27,

$\bar{x}_i \uparrow$	[mm]	průměr x-ových hodnot ( pozitivní směr měření )
$\bar{x}_i \downarrow$	[mm]	průměr x-ových hodnot ( negativní směr měření )

Vzorec 4.30

$Y$	[ $\mu\text{m}$ ]	hodnota $y$
$T$	[-]	hodnota kvantilů t-rozdělení
$\alpha$	[-]	hodnota spolehlivosti
$r$	[-]	počet stupňů volnosti
$D(y)$	[ $\text{mm}^2$ ]	rozptyl vypočtené hodnoty

Vzorec 4.31

$r$	[-]	počet stupňů volnosti
$n$	[-]	počet hodnot

## Seznam obrázků

- 2.1 přímost čáry v rovině
- 2.2 přímost čáry v prostoru
- 2.3 umístění reprezentativní přímky
- 2.4 číselníkový úchylkoměr
- 2.5 znázornění využití číselníkového úchylkoměru
- 2.6 křivky úchylek
- 2.7 měření přímosti strunou
- 2.8 měření přímosti dalekohledem
- 2.9 dvouzrcátkový odražeč
- 2.10 měření přímosti na základě měření úhlů
- 2.11 zpracování výsledků
- 2.12 měření vodováhou
- 2.13 autokolimátor
- 2.14 laserinterferometrická metoda
- 2.15 měření přímosti
- 2.16 rozteč bodů
- 2.17 přímost sdružených základních ploch
- 2.18 negativní odlehčený prizmat
- 2.19 odlehčený válec
- 2.20 měření válcových ploch
- 2.21 měření svislých ploch
- 2.22 šikmé lože
- 2.23 možné úchyly pohybu
- 2.24 měření úhlových odchylek
- 3.1 typické nastavení systému pro měření odchylek přímosti
- 3.2 interferometr a odražeč
- 3.3 odražeč v orientaci pro měření vodorovných odchylek
- 3.4 základní schéma měření přímosti
- 4.1 data zpracovaná metodou nejmenších čtverců
- 4.2 data zpracovaná metodou koncových bodů
- 4.3 měření přímosti osy X na mikroskopu
- 4.4 měření přímosti osy Y na mikroskopu
- 4.5 graf úchyly osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, pozitivní směr
- 4.6 graf úchyly osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, pozitivní směr
- 4.7 graf úchyly osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, negativní směr
- 4.8 graf úchyly osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, negativní směr

- 4.9 graf úchytky osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, oba směry
- 4.10 graf úchytky osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, oba směry
- 4.11 graf úchytky osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, pozitivní směr
- 4.12 graf úchytky osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, pozitivní směr
- 4.13 graf úchytky osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, negativní směr
- 4.14 graf úchytky osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, negativní směr
- 4.15 graf úchytky osy X vzhledem k ose Y vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, oba směry
- 4.16 graf úchytky osy X vzhledem k ose Y vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, oba směry
- 4.17 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, pozitivní směr
- 4.18 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, pozitivní směr
- 4.19 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, negativní směr
- 4.20 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, negativní směr
- 4.21 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou koncových bodů, oba směry
- 4.22 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou koncových bodů, oba směry
- 4.23 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, pozitivní směr
- 4.24 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, pozitivní směr
- 4.25 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, negativní směr
- 4.26 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, negativní směr
- 4.27 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený programem fy Renishaw metodou nejmenších čtverců, oba směry
- 4.28 graf úchytky osy Y vzhledem k ose X vykreslený podle ČSN metodou nejmenších čtverců, oba směry
- 4.29 hodnoty přímosti osy X vzhledem k ose Y získané metodou koncových bodů
- 4.30 hodnoty přímosti osy X vzhledem k ose Y získané metodou nejmenších čtverců
- 4.31 porovnání hodnot přímosti osy Y vzhledem k ose X získané metodou koncových bodů
- 4.32 porovnání hodnot přímosti osy Y vzhledem k ose X získané metodou nejmenších čtverců

- 5.1 průměrná deska a úchylkoměr I
- 5.2 průměrná deska a úchylkoměr II
- 5.3 měření rovinnosti pravítkem
- 5.4 měření pravítka, vodováhou a úchylkoměrem
- 5.5 čtvercová síť na vynášení úchylek
- 5.6 měření pravoúhelníkové plochy
- 5.7 vyhodnocení hodnot I
- 5.8 vyhodnocení hodnot II
- 5.9 měření ploch kruhového průřezu
- 5.10 měření optickým rozkladovým hranolem
- 5.11 měření zaměřovacím laserem
- 5.12 měření laserovým měřícím systémem
- 5.13 zpracované hodnoty do izometrického diagramu
- 6.1 princip měření
- 6.2 zobrazení změn měřených přírůstků
- 6.3 určení rovinnosti
- 6.4 Moodyho metoda
- 6.5 mřížková metoda
- 6.6 polo-mřížková metoda
- 7.1 měření rovinnosti
- 7.2 nákres měřicí sítě
- 7.3 hodnoty rovinnosti naměřené podél osy X
- 7.4 hodnoty rovinnosti naměřené podél osy Y

## **Seznam tabulek**

- 7.1 hodnoty rovinnosti naměřené podél osy X
- 7.2 hodnoty rovinnosti naměřené podél osy Y

## **Seznam příloh**

Příloha A - Tabulky hodnot naměřených odchylek

Příloha B - Porovnání hodnot úchylek přímosti vypočítaných programem Renishaw a vypočítaných podle ČSN metodou nejmenších čtverců a metodou koncových bodů

## **Seznam použitého softwaru**

Microsoft Office 2003  
Renishaw Calibration System ver. 10.06.01