

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

## AKTUÁLNÍ TRENDY A PRINCIPY MĚŘENÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ A JEJICH DÍLCŮ

CURRENT TRENDS AND MEASURING PRINCIPLES OF MACHINE TOOLS AND THEIR PARTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Nedbal

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Merenus

BRNO 2016



## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>David Nedbal</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Ondřej Merenus</b>
Akademický rok:	2015/16

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 bakalářské práce:

### **Aktuální trendy a principy měření obráběcích strojů a jejich dílců**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Obsahem práce by měla být rešerše z oblasti měření obráběcích strojů. Rozebrání různých metod a typů měření kompletních strojů či jen dílců v procesu výroby. Výsledkem by mělo být celkové zhodnocení rozebíraných metod.

#### **Cíle bakalářské práce:**

- rešerše v oblasti měřících zařízení
- popis jednotlivých metod
- celkové zhodnocení a porovnání

#### **Seznam literatury:**

firemní literatura výrobců měřících zařízení

MAREK, J.; NOVOTNÝ, L.; BŘEZINA, T.; BLECHA, P.; DOBŘICKÝ, J.; MRKVICA, I.; SULITKA, M.; DVOŘÁK, R.; KRÁL, M.; ŠOOŠ, L.; UČEŇ, O.; SVOBODA, J. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. MM Speciál. MM Speciál. 2014. 688 s. ISBN: 978-80-260-6780- 1

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se věnuje rešerší v oblasti měření přesnosti obráběcích strojů. Je zde popsána problematika měření obráběcích strojů, výpis geometrických tolerancí a hlavně popis nejmodernějších technologií dnešní doby zahrnující interferometr, laser tracker, laser tracer nebo třeba systém Ballbar. Tato práce se také zabývá měření přesnosti pěti-osých obráběcích strojů a popisu problematiky tohoto měření.

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis studies the measuring of machining centers. Studying issues in measuring of that centers, geometric tolerations and also description of modern and nowadays techonolgies including interferometer and systems like laser tracker, laser tracer or ballbar. This thesis studies also masuring of five-axis machining centers and issues in this measuring.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Geometrické tolerance, geometrická přesnost, volumetrická přesnost, interferometr, laser tracker, laser tracer, ballbar, měření přesnosti pěti-osých obráběcích strojů.

## **KEYWORDS**

Geometric tolerances, geometric accuracy, volumetric accuracy, interferometer, laser tracker, laser tracer, ballbar, measuring of five-axis machining centers.



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NEDBAL, D. *Aktuální trendy a principy měření obráběcích strojů a jejich dílců*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 48 s., Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Merenus.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Merenusovi za cenné rady, připomínky a odbornou pomoc při vypracování této bakalářské práce.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Merenuse a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....  
Nedbal David



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PŘESNOST</b> .....	<b>17</b>
2.1	Geometrická přesnost .....	17
2.1.1	Geometrické chyby obráběcích strojů .....	18
2.1.2	Geometrické chyby součástí .....	18
2.2	Volumetrická přesnost .....	19
2.3	Ovlivňující faktory měření přesnosti .....	20
2.3.1	Nejistota měření .....	20
2.3.2	Opakovatelnost měření .....	20
2.3.3	Podmínky okolního prostředí .....	20
<b>3</b>	<b>TOLERANCE GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI</b> .....	<b>23</b>
3.1	Přímost .....	24
3.2	Rovinnost .....	24
3.3	Kruhovitost .....	24
3.4	Válcovitost .....	25
3.5	Tvar profilu .....	25
3.6	Tvar plochy .....	25
3.7	Rovnoběžnost.....	26
3.8	Kolmost.....	26
3.9	Sklon .....	26
3.10	Umístění.....	27
3.11	Soustřednost a sousost .....	27
3.12	Souměrnost .....	28
3.13	Obvodové (kruhové) házení.....	28
3.14	Celkové házení.....	28
<b>4</b>	<b>POPIS TECHNOLOGIÍ PRO MĚŘENÍ PŘESNOSTI</b> .....	<b>29</b>
4.1	Interferometr .....	29
4.1.1	Michelsonův interferometr .....	29
4.1.2	Výrobci a jejich produkty .....	30
4.2	LaserTracker .....	31
4.3	LaserTracer .....	33
4.3.1	LaserTracer-NG .....	34
4.3.2	LaserTracer-MT .....	35
4.4	Ballbar.....	36
4.5	Digitální libely Wyler .....	38
4.5.1	BlueSYSTEM SIGMA .....	38
<b>5</b>	<b>MĚŘENÍ PŘESNOSTI PĚTI-OSÝCH OBRÁBĚCÍCH STROJŮ</b> .....	<b>41</b>
5.1	Problematika .....	41
5.2	Popis a geometrické chyby pěti-osého obráběcího stroje.....	42
5.3	Metody měření .....	43
5.3.1	Pomocí měřicí sondy .....	43
5.3.2	Ballbar .....	44
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>49</b>

<b>8</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>51</b>
8.1	Seznam tabulek.....	51
8.2	Seznam obrázků.....	51

# 1 ÚVOD

Mnoho lidí bere vše okolo sebe jako samozřejmost. Jen málokdo se zamyslí, jak všechny věci, součástky okolo nás vznikly a jak složitou technologií musela většina z nich projít. Svět okolo nás se neustále zrychluje a s tím samozřejmě i výroba dílců. Kvůli požadavkům na stále rychlejší, levnější a preciznější výrobu muselo být vymyšleno mnoho a mnoho technologií. Díky tomu šlo v posledních několika letech strojírenství mílovými kroky vpřed. Cesta k co nejrychlejší a zároveň přesné výrobě ale nebyla vůbec snadná.

Požadavky na výrobu donutily majitele firem co nejvíce eliminovat lidský faktor a to se v praxi děje výměnou ruční práce za práci počítačem řízených strojů nazývaných CNC (computer numeric control). S těmi stroji samozřejmě svou rychlostí a přesností nemůže žádný člověk soupeřit a právě proto jsou dnes v nejmodernějších výrobních halách vidět lidé jen zřídka.

Pro cílového zákazníka je hlavním parametrem především cena, se kterou velmi úzce souvisí strojní čas strávený na dílci. Ten, jak už jsem zmínil je ve prospěch strojů CNC a rozdíl v časech strávených při výrobě (člověk vs. stroj) rapidně roste se složitostí dílce. Dalším z parametrů je ve většině případů dnes také kvalita, potažmo i přesnost dílce. V přesnosti člověk do jisté míry s CNC stroji soupeřit může, problém ale nastává v případě velkých sérií, kdy bez počítačově řízených obráběcích strojů nejsme schopni udržet přesnost v úzké toleranci.

Pro přesnou výrobu je potřeba stroj perfektně navrhnout, přesně vyrobit součásti, ale také precizně smontovat. I když se podaří všechny zmíněné kroky naprosto dokonale, nikdy nebude stroj vyrábět dílce naprosto přesně. Jak velká je míra nepřesnosti v obráběcím stroji nám pomáhá určit celá řada technologií a s pomocí příslušných softwarů dokáží i velkou část chyb kompenzovat, neboli odstranit. V této bakalářské práci se budu těmito technologiím věnovat.





## 2 PŘESNOST

Tato kapitola se věnuje obecnému úvodu k problematice měření přesnosti. Příklady problematiky měření přesnosti i faktorům, které měření přesnosti ovlivňují.

Přesnost je kvalitativní pojem, pomocí kterého určujeme správnost a preciznost daných výrobků. Správnost je kvantifikována pomocí chyb v měření a preciznost je kvantifikována pomocí sadou měření a následným vyhodnocením charakteristiky odchylek od jmenovitého rozměru (1).

### 2.1 Geometrická přesnost

Přesnost obráběcích strojů a obrobků na nich vyráběných je dána především geometrickou přesností stroje samotného. Geometrická přesnost je vlastností stroje, která popisuje kvalitu výroby a přesnost montáže stroje, ale bez jeho zatížení. Tedy za klidu, nebo při chodu naprázdno, kdy na stroj ještě nepůsobí žádná zatěžující síla. Těmito vlastnostmi se rozumí například i vlastní váha stroje, odchylky v posuvech vřetene a stolu stroje vůči sobě, nebo třeba vůle v pohybových šroubech (1) (2).

Chyby v obrábění rozdělujeme na náhodné a systematické. Náhodné chyby jsou zapříčiněny kombinací několika faktorů, např. tření, vůle v uložení, nepřesnost měřicího zařízení při odměřování atd. a mají Gaussovo normální rozdělení. Kdežto systematické chyby posouvají střed rozložení jedním nebo druhým směrem. Jejich příčinou je tepelná roztažnost konstrukce při obrábění, statická poddajnost atd. Do této kategorie spadají geometrické chyby. Zapříčiňují systémové nepřesnosti rozměrů obrobku a jsou ze své podstaty polohově závislé (3).

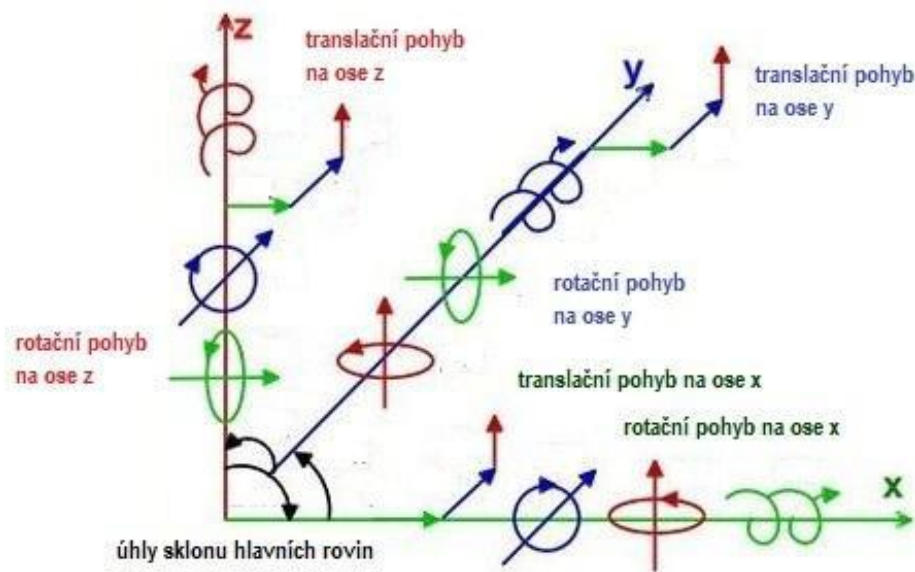
### 2.1.1 Geometrické chyby obráběcích strojů

Jedná se o nechtěné pohyby, které se liší se od ideální trajektorie nebo bodu. Chyby na obráběcích stroji se podle typu dají rozdělit na tři druhy:

- chyby polohování,
- chyby horizontální a vertikální přímosti,
- úhlové chyby (anglicky yaw, pitch a roll).

Na tříosém obráběcím stroji můžeme nalézt až 21 chybových parametrů (Obr. 1) (1):

- 3x3 chyby translační,
- 3x3 chyby úhlové,
- 3 chyby vzájemné kolmosti os.



Obr. 1) Geometrické chyby (4).

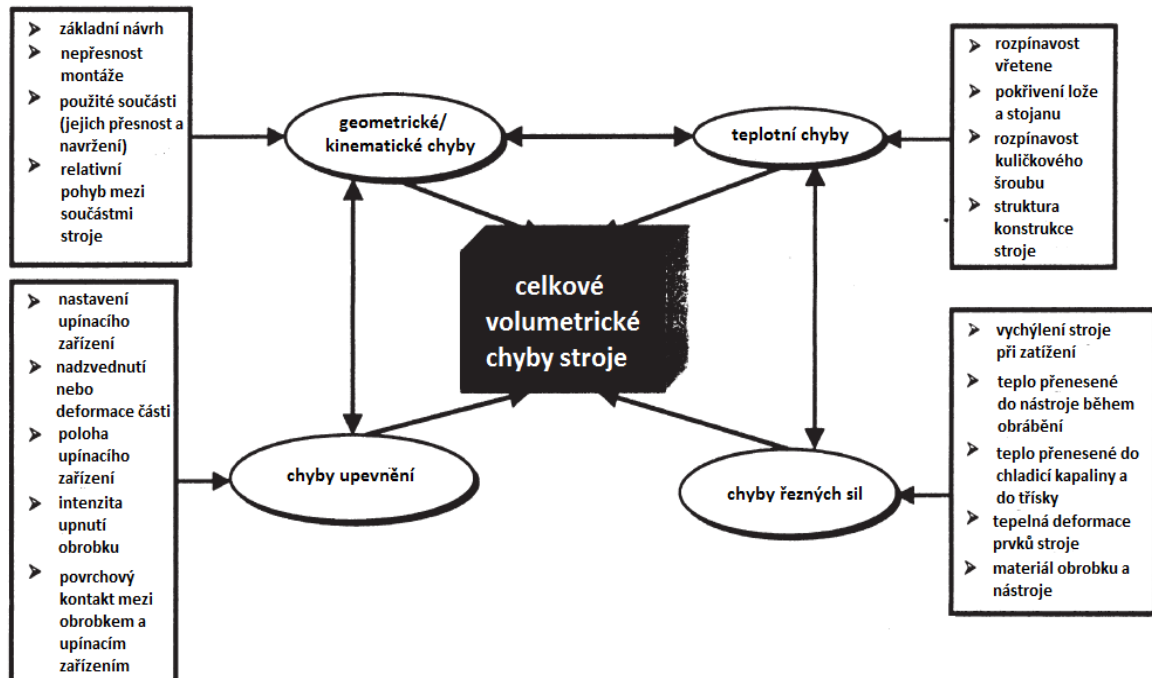
Na pěti-osém obráběcím stroji bychom potom našli 43 chyb pohybových os a navíc 5 chyb samotného vřetene (1).

### 2.1.2 Geometrické chyby součástí

Kromě chyb na obráběcích strojích existují také chyby jednotlivých obrobků. Chyby součástí jsou úzce spojeny s chybami strojů, mají stejný charakter i stejné definice. Tyto chyby jsou zapříčiněny chybami obráběcích strojů, jsou jejich důsledkem.

## 2.2 Volumetrická přesnost

V dnešní době má velký význam měření přesnosti polohování ne v jednotlivých osách odděleně, ale při jejich současné činnosti v prostoru. Toto měření se označuje jako tzv. volumetrická přesnost. Na obrázku (Obr. 2) je přehled faktorů ovlivňujících volumetrickou přesnost (4).



Obr. 2) Přehled chyb a jejich ovlivňující faktory (5).

Volumetrické chyby obsahují chyby polohové, chyby rovinnosti, chyby kolmosti a úhlové chyby. Měření volumetrických chyb lze provádět pomocí mapy pozic a orientačních vektorů nástroje při obecném pohybu ve stroji. Takto lze využít dvě metody, kdy je využíváno směru prostorové diagonály pracovního prostoru obráběcího centra (6) (4):

- souvislý způsob měření diagonály,
- sekvenční způsob měření diagonály – tímto způsobem je naměřeno 3x více dat a mohou být měřeny všechny složky celkové chyby.

Tyto metody jsou ale v moderním provozu nahrazeny multilaterační technikou LaserTracer, především kvůli přesnosti a rychlosti měření. Na ústupu je pak systém Ballbar, který nedosahuje zmíněné přesnosti LaserTraceru.

Nejvyšším přínosem možnosti měřit volumetrickou přesnost je zmapování geometrických chyb u obráběcích strojů a center velkých rozměrů, u kterých se často projevuje chyba kolmosti při pohybu v lineární ose. U pěti-osých strojů se taková chyba nejvíce projevuje při pohybu rotačních os. Maximálního přínosu numerické kompenzace lze docílit právě minimalizací rotačních a úhlových chyb (4).

## 2.3 Ovlivňující faktory měření přesnosti

### 2.3.1 Nejistota měření

Nejistota měření je parametr, který udává míru rozptýlení hodnot, jež by mohly být přisuzovány měřené veličině. (7) Pokud známe výslednou nejistotu měření, označíme např.  $U$  a naměřená hodnota má index např.  $Y$ , pak se skutečná hodnota měřené veličiny bude pohybovat v intervalu  $\langle Y-U; Y+U \rangle$ . Rozlišujeme dva druhy nejistot měření: nejistota typu A a nejistota typu B (1).

**Nejistota typu A** je způsobena několika náhodnými vlivy, jejíž příčiny nejsou známy. Hodnota této nejistoty se zmenšuje se zvyšujícím se počtem opakování měření. Při malém počtu měření totiž klesá věrohodnost nejistoty (7).

**Nejistota typu B** vzniká ze známých a odhadnutelných příčin, nemá náhodný charakter. Opakování měření na ni nemá vliv, vyskytuje se v každém měření. Jde tedy o nejistoty způsobené měřicími přístroji, metodou měření, podmínkami měření atd. (8).

V případě, kdy máme v měřicím řetězci více nejistot, stanovíme výslednou nejistotu sumací kvadrátů nejistot typu A a B (7):

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1)$$

### 2.3.2 Opakovatelnost měření

Je to velikost odchylky mezi výsledky po sobě jdoucích měření stejné měřené veličiny, provedených za stejných podmínek měření. Podmínkami měření rozumíme stejný postup měření, stejného pozorovatele, stejný měřicí přístroj, stejné podmínky okolního prostředí a opakování měření v malém časovém úseku. Opakovatelnost můžeme kvantitativně vyjádřit pomocí charakteristik rozptylu výsledků. Nejčastěji jsou používány: **rozpětí R**, nebo **směrodatná odchylka s**. Pokud tedy výrobce garantuje konkrétní hodnotu opakovatelnosti, musí vždy specifikovat, o jakou charakteristiku se jedná (1).

**Reprodukovatelnost** je velikost odchylky mezi výsledky měření stejné veličiny, které se ale změřily za jiných podmínek. Změněnými podmínkami se tedy rozumí jiný princip měření, pozorovatel, metoda měření, měřicí přístroj nebo místo měření. Reprodukovatelnost můžeme kvantitativně vyjádřit pomocí charakteristik rozptylu výsledků, stejně jako opakovatelnost měření (1).

### 2.3.3 Podmínky okolního prostředí

Podmínky okolního prostředí rozdělujeme na podmínky pracovní, které platí pro běžná, každodenní měření a na podmínky referenční. Referenční podmínky jsou používány pro měření při kalibraci, jsou tedy přísnější. Základní parametry okolního prostředí jsou tři a to konkrétně teplota, relativní vlhkost vzduchu a poslední je skupinka vibrace, hluk a prašnost (1).

Referenční teplota při měření je dle ČSN ISO 1 rovna 20°C. Při praktickém měření se teplota prostředí, stroje, součásti, měřidla, nebo etalonu prakticky nikdy přesně nerovnájí teplotě referenční, proto je nutné posoudit tepelnou deformaci a částečně, nebo úplně ji eliminovat pomocí korekce. Hodnota tepelné deformace závisí hlavně na (1):

- rozdílu skutečné, naměřené teploty a teploty referenční,
- koeficientu roztažnosti  $\alpha$  [ $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ] daného materiálu.

V praxi se běžně setkáváme s úpravou teploty okolí pomocí stavebního provedení budovy, nebo například klimatizací. Kromě požadavku na co nejmenší rozdíl mezi teplotou skutečnou










a teplotou referenční je velmi důležitá také stálost teploty, kterou definuje parametr s názvem: časový gradient teploty [ $^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ ]. Koeficient tepelné roztažnosti je závislý hlavně na materiálu. Nejpřesnější měřicí stroje mají důležité mechanické části z materiálů, jejichž koeficient  $\alpha$  je co nejbližší nule. Například granit může dosahovat hodnoty  $\alpha$  až  $6,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  (1) (9).

Relativní vlhkost vzduchu se udává v procentech. Nemá vliv na běžná měření s výjimkou měření pomocí laser interferometrických zařízení, kde relativní vlhkost vliv má. Ideální hodnota se pohybuje kolem 55%. Vibrace, hluk, prašnost a další negativní vlivy jsou k posouzení pro konkrétní případy (1).



### 3 TOLERANCE GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI

Pro správnou funkci součástí se kromě jiných parametrů významně podílí také geometricky přesný tvar funkčních ploch. Geometrických tolerancí existuje hned několik druhů. V zásadě se jedná o přípustné odchylky skutečných tvarů a poloh od tvarů a poloh teoreticky přesných. Základní rozdělení ukazuje následující tabulka (Obr. 3).

Geometrické tolerance		Značka
<b>Tvaru</b>	Přímosti	—
	Rovinnosti	
	Kruhovitosti	
	Válcovitosti	
	Tvaru profilu	
	Tvaru plochy	
<b>Směru</b>	Rovnoběžnosti	//
	Kolmosti	⊥
	Sklonu	
<b>Polohy</b>	Umístění	⊕
	Soustřednosti a souososti	
	Souměrnosti	≡
<b>Házení</b>	Kruhového	
	Celkového	

Obr. 3) Základní rozdělení geometrických tolerancí (10).

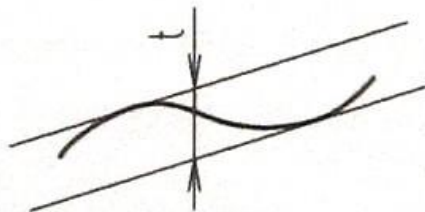
### 3.1 Přímost

Toleranční pole vymezují **dvě rovnoběžné přímky**, které jsou od sebe vzdáleny ve vyznačeném směru o hodnotu tolerance přímosti (10) (11).

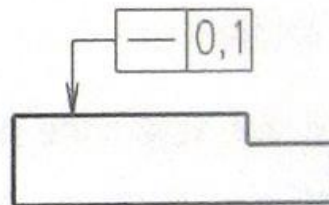
**Tolerance  
přímosti**



**Vysvětlení tolerance**



**Příklad předpisu**



Obr. 4) Značka, toleranční pole a příklad použití přímosti (10).

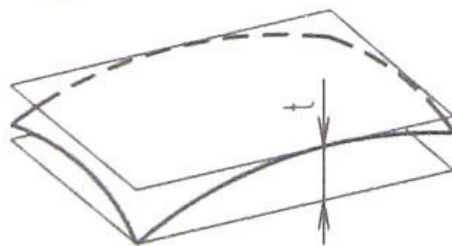
### 3.2 Rovinnost

Toleranční prostor je vymezen dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe ve vzdálenosti rovné hodnotě tolerance rovinnosti (10) (11).

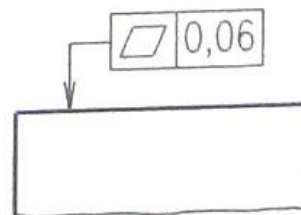
**Tolerance  
rovinnosti**



**Vysvětlení tolerance**



**Příklad předpisu**



Obr. 5) Značka, toleranční pole a příklad použití rovinnosti (10).

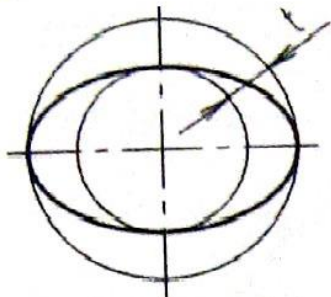
### 3.3 Kruhovitost

Toleranční pole je vymezeno v dané rovině dvěma soustřednými kružnicemi, jejichž rozdíl poloměrů je roven toleranci kruhovitosti (10) (11).

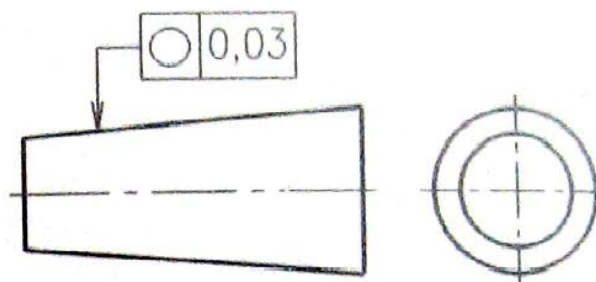
**Tolerance  
kruhovitosti**



**Vysvětlení tolerance**



**Příklad předpisu**

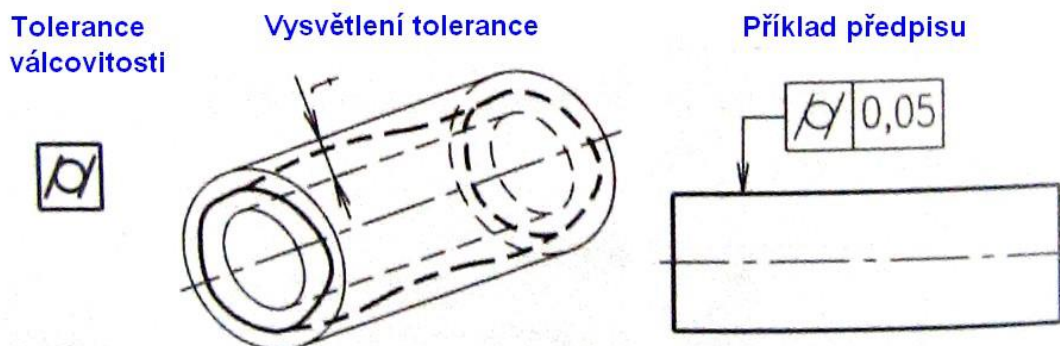


Obr. 6) Značka, toleranční pole a příklad použití kruhovitosti (10).



### 3.4 Válcovitost

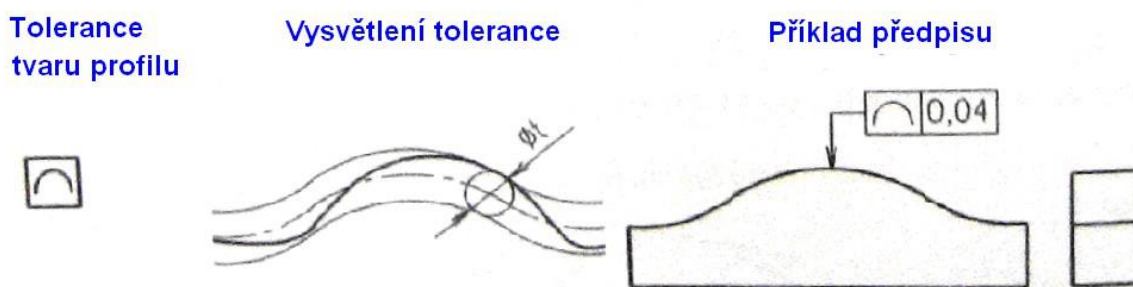
Toleranční prostor je vymezen dvěma souosými válci, jejichž rozdíl poloměrů je roven hodnotě toleranci válcovitosti (10) (11).



Obr. 7) Značka, toleranční pole a příklad použití válcovitosti (10).

### 3.5 Tvar profilu

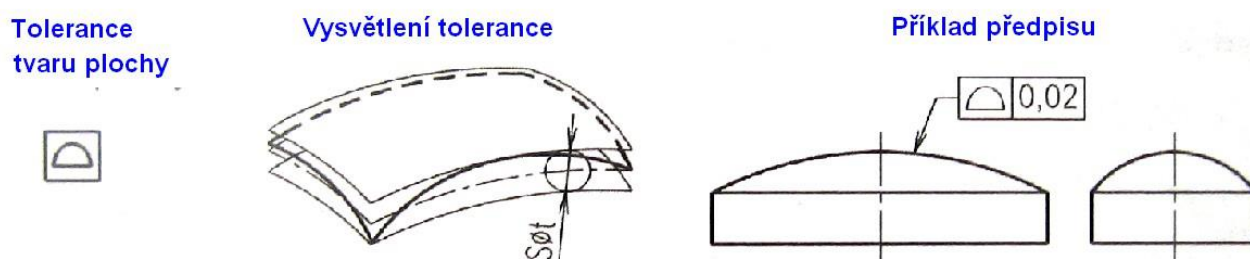
Toleranční pole je vymezeno v dané rovině dvěma čarami ekvidistantními k tvaru jmenovité čáry, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu tolerance tvaru profilu (10) (11).



Obr. 8) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance tvaru profilu (10).

### 3.6 Tvar plochy

Toleranční pole je vymezeno v prostoru dvěma plochami ekvidistantními ke jmenovitému tvaru plochy, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu tolerance tvaru plochy (10) (11).



Obr. 9) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance tvaru plochy (10).

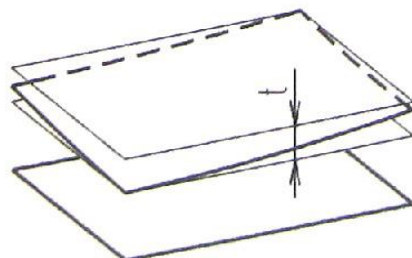
### 3.7 Rovnoběžnost

Toleranční prostor je vymezen dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu rovné toleranci rovnoběžnosti a jsou zároveň rovnoběžné ze základní rovinou (10) (11).

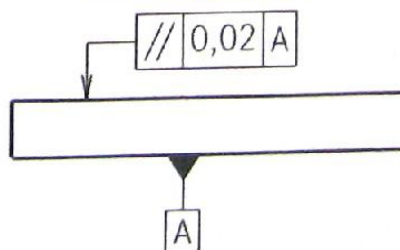
Tolerance rovnoběžnosti



Vysvětlení tolerance



Příklad předpisu



Obr. 10) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance rovnoběžnosti (10).

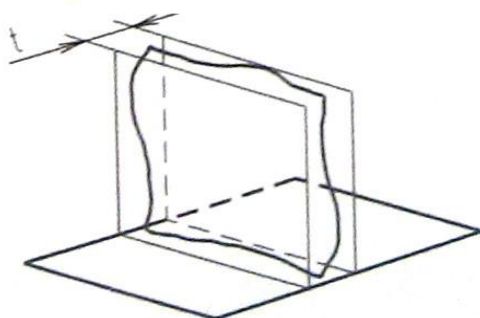
### 3.8 Kolmost

Toleranční prostor je vymezen dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu tolerance kolmosti a jsou zároveň kolmé k základní vztažné rovině (10) (11).

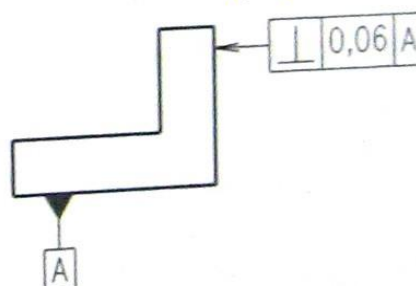
Tolerance kolmosti



Vysvětlení tolerance



Příklad předpisu



Obr. 11) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance kolmosti (10).

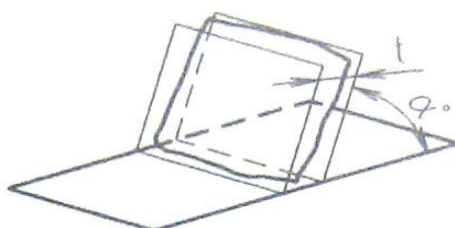
### 3.9 Sklon

Toleranční prostor je vymezen dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu rovné toleranci sklonu a které zároveň svírají se základní rovinou nebo základní přímkou jmenovitý úhel (10) (11).

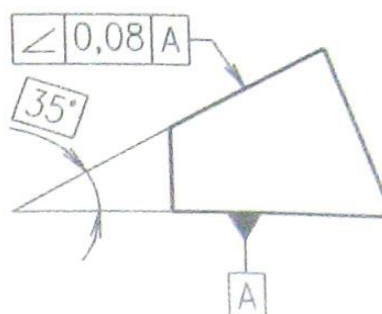
Tolerance sklonu



Vysvětlení tolerance



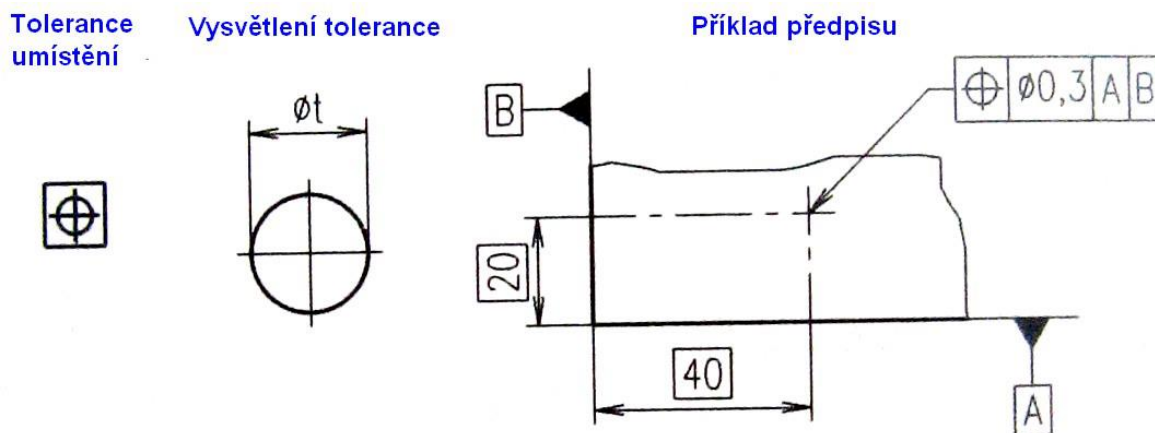
Příklad předpisu



Obr. 12) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance sklonu (10).

### 3.10 Umístění

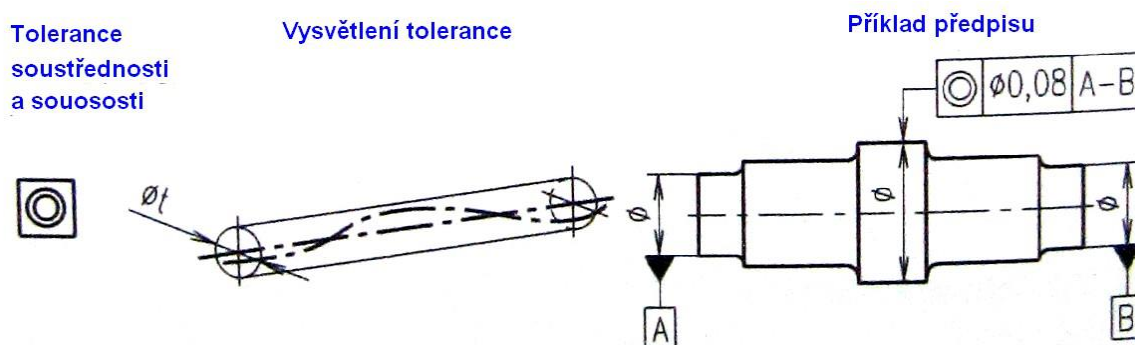
Je-li hodnota tolerance označena průměrem, je toleranční prostor vymezen kružnicí, jejíž průměr je roven toleranci umístění (10) (11).



Obr. 13) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance umístění (10).

### 3.11 Soustřednost a sousost

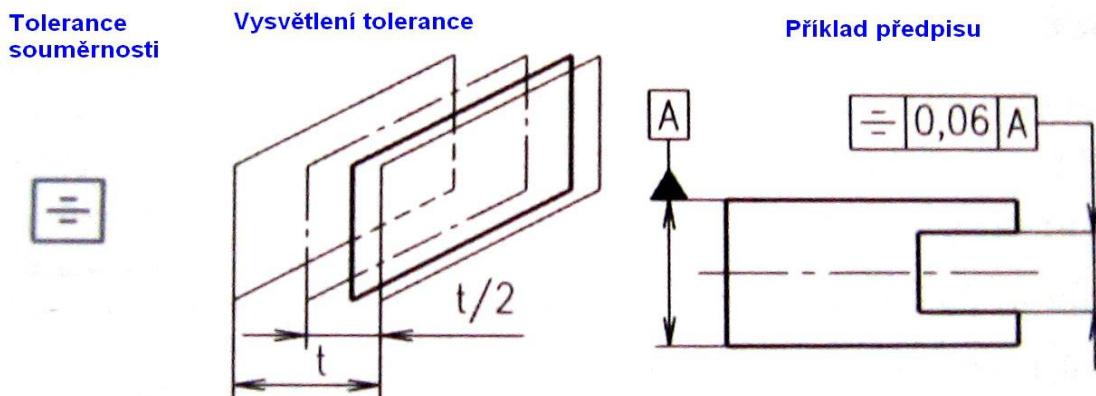
Toleranční pole, ve kterém může ležet střed (soustřednost) nebo osa (sousost) tolerovaného prvku je vymezeno kružnicí (soustřednost) nebo válcem (sousost) o průměru rovnu toleranci soustřednosti popř. sousosti. Střed kruhu je přitom ve středu základního prvku a totéž platí pro osu válce (10) (11).



Obr. 14) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance soustřednosti a sousosti (10).

### 3.12 Souměrnost

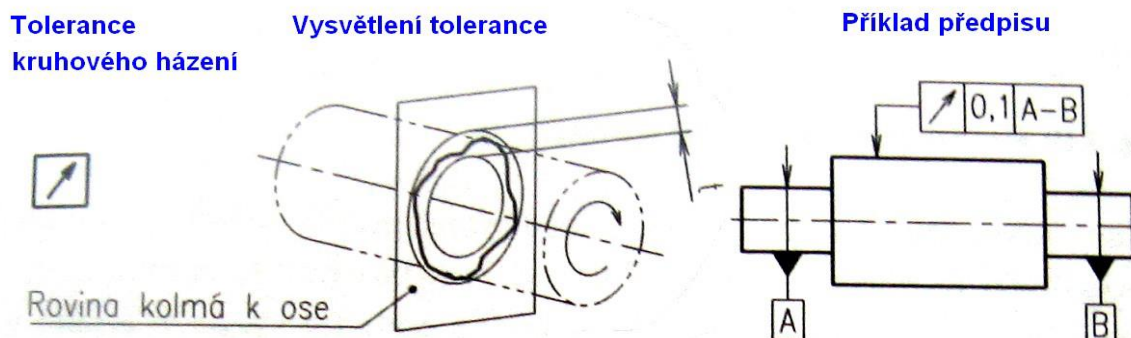
Toleranční prostor je vymezen dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu rovnou toleranci souměrnosti a jsou zároveň rovnoběžné se základní rovinou (10) (11).



Obr. 15) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance souměrnosti (10).

### 3.13 Obvodové (kruhové) házení

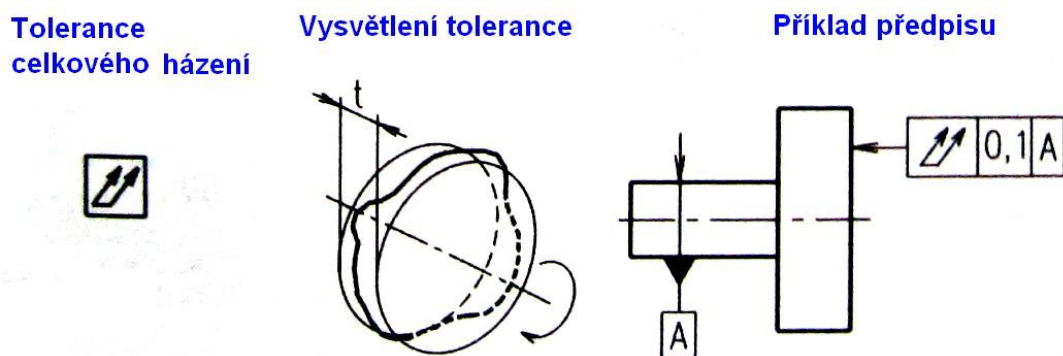
Toleranční pole v libovolné rovině kolmé na osu je vymezeno dvěma soustřednými kružnicemi, jejichž rozdíl poloměrů je roven toleranci obvodového házení (10) (11).



Obr. 16) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance obvodového házení (10).

### 3.14 Celkové házení

Toleranční prostor je vymezen dvěma souosými válci, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu celkového házení a jejich osa je shodná s osou základní (10) (11).



Obr. 17) Značka, toleranční pole a příklad použití tolerance celkového házení (10).

## 4 POPIS TECHNOLOGIÍ PRO MĚŘENÍ PŘESNOSTI

V této kapitole budou popsány jedny z nejmodernějších, nejpoužívanějších a nejpřesnějších přístrojů pro měření obráběcích strojů a obráběcích center. Těchto přístrojů je nepřeberné množství a neustále se vyvíjí nové přesnější zařízení i s jejich technologií.

### 4.1 Interferometr

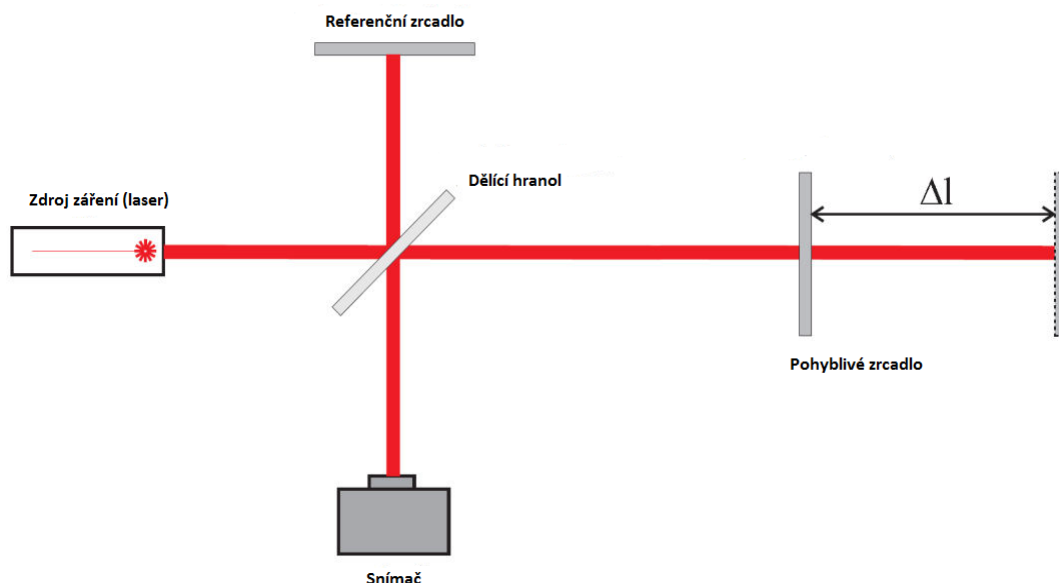
Laserový interferometr je přístroj pro velmi přesná měření. Princip interferometru spočívá v interferenci světla, tedy jeho skládání. Rozdělujeme je na 3 druhy: zařízení k měření délek tzv. *interferenční komparátory* (Michelsonův), zařízení, které jsou určeny ke stanovení relativní změny rychlosti a tím určit změnu indexu lomu plynů a nebo kapalin – *interferenční refraktometry* (Rayleighův, Mach-Zahnderův, Jaminův) a zařízení k určení struktury spektrálních čar, které nazýváme *interferenční spektroskopy* (Fabry-Perotův) (12).

Interferometry pro měření lze také rozdělit podle počtu svazků interferujících vln a to na dvousvazkové a třísvazkové. Mezi dvousvazkové interferometry patří Michelsonův, Mach-Zehnderův a Sagnacův interferometr. Nejznámější třísvazkový interferometr je Fabry-Perotův interferometr (13).

Interferometrické měření vyžaduje, aby se v měřeném prostoru vyskytovaly současně dvě nebo více optických vln. Výsledná vlna je pak interferencí (součtem) jednotlivých vln. Výsledná intenzita ovšem nemusí být nutně interferencí jednotlivých intenzit (14).

#### 4.1.1 Michelsonův interferometr

Pro měření přesnosti obráběcích strojů je nejlépe vhodný Michelsonův interferometr (Obr. 18). Jeho princip spočívá v porovnání referenčního a měřicího svazku. Světlo ze zdroje záření dopadá na dělicí hranol, který jej rozdělí na výše zmíněný referenční, který se odráží kolmo od zdroje a dopadá na referenční zrcadlo, a také zmíněný měřicí svazek, který prochází skrz na pohyblivé zrcadlo. Oba svazky se odráží zpět do hranolu a vstupují do snímače, který vyhodnotí fázové zpoždění obou svazků způsobené rozdílem optických drah těchto svazků (15).



Obr. 18) Princip Michelsonova interferometru (13).

#### 4.1.2 Výrobci a jejich produkty

Jedním z předních výrobců laserových interferometrů je společnost Renishaw, která má na trhu produkt s označením XL-80. Systém se skládá z laserové hlavičky XL-80 (Obr. 19), kompenzátoru okolního prostředí XC-80, stativu pro laserovou hlavu a dané optiky pro konkrétní měření.



Obr. 19) Interferometr Renishaw XL-80 (7).

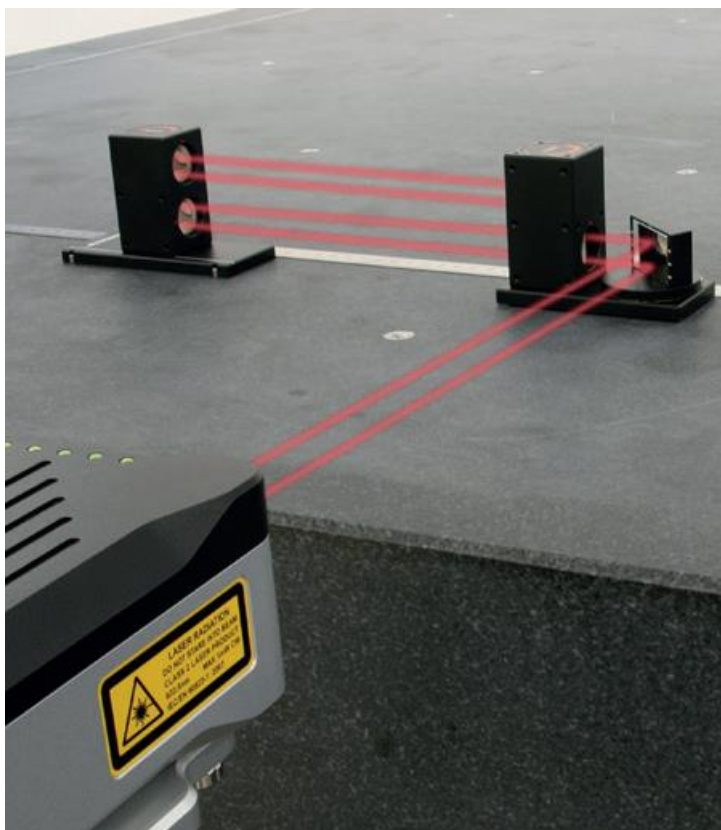
Výrobců interferometrů je ale celá řada. Pro porovnání jsem si vybral několik z nich. Jsou to konkrétně Renishaw (XL-80), Keysight, Feanor (LSP 30) a nakonec český výrobce LIMTEK (LS 100). Porovnání jejich parametrů nabízí následující tabulka (Tab 1).

Tab 1) Porovnání laser interferometrů (6) (16) (17) (18).

	XL-80	Keysight	LSP 30	LS 100
Měřicí rozsah	0 - 40 m	0 - 40 m	0 - 30 m	0 – 40 m
Rozlišení	1 nm		1 nm	1,25 nm
Max. rychlost	4 m/s		0,3 m/s	1 m/s
Přesnost měření	0,5 $\mu\text{m}$	0,1 $\mu\text{m}$	0,15 $\mu\text{m}/\text{m}$	0,7 $\mu\text{m}$

S vhodnou úpravou sestavení optiky jsou systémy schopny měřit:

- lineární polohování (až do 80m, přesnost 0,5 $\mu$ m/m),
- úhlové polohování (až do 15m),
- přímost (až do 30m),
- rovinnost (Obr. 20) (až do 15m),
- natočení (do 10m),
- kolmost.



Obr. 20) Ukázka měření rovinnosti přístrojem Renishaw XL-80 (7).

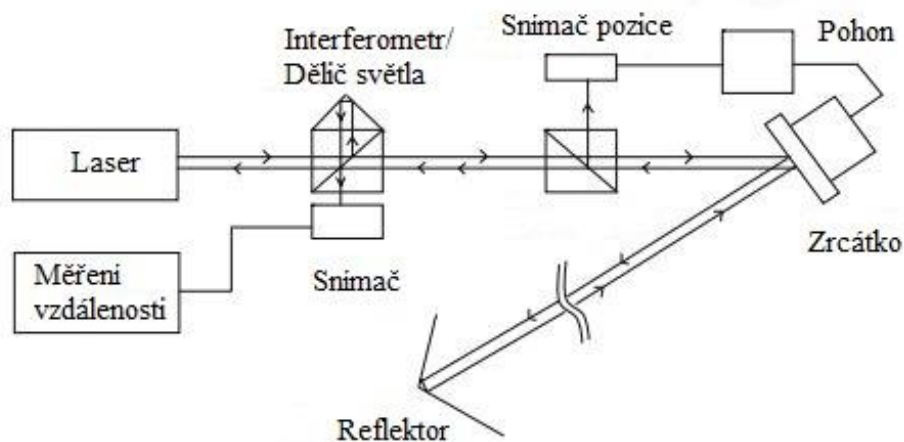
## 4.2 LaserTracker

LaserTracker je obecný název pro zařízení, která jsou schopná sledovat měřené objekty laserovým paprskem. Jedná se o mobilní 3D měřicí systémy určené k měření rozměrově velkých součástí, které bychom jen těžko měřili klasickými dotykovými metodami (1) (19).

LaserTracker využívá interferometrii pro měření vzdálenosti a dvojici snímačů úhlů s vysokým rozlišením pro měření úhlu paprsku v horizontálním a vertikálním směru. Obrázek (Obr. 21) ukazuje schematické sestavení komponent a princip přístroje LaserTracker. Tato technologie využívá laserového paprsku o známé vlnové délce, který prochází děličem světla (paprsku), kdy je rozdělen na paprsky dva. Jeden se odráží přímo do snímače jako paprsek referenční a druhý prochází skrz zrcátko do sférického reflektoru umístěného na měřeném objektu. Tento reflektor je koule, ve které je vložen roh krychlového zrcadla. Od reflektoru se odráží zpět do snímače pro měření vzdálenosti, který je pomocí příslušné elektroniky schopen spočítat jednotlivé vlny a tak i celkovou délku paprsku. Tuto délku pak porovná s délkou

paprsku referenčního, z čehož vypočítá skutečnou vzdálenost reflektoru, potažmo pak vzdálenost měřeného objektu (20).

LaserTrackery jsou považovány za jedny z nejuniverzálnější metrologických systémů dnešní doby. Jejich hlavní nevýhodou je fakt, že měřený bod musí být v přímé viditelnosti mezi hlavou LaserTrackeru a odražečem, který se díky svým rozměrům nedostane úplně do všech potřebných míst. Další nevýhodou je možnost sledování pouze jednoho bodu během měření. Některé LaserTrackery poskytují systém absolutního měření vzdálenosti, který moduluje laserový paprsek a zjišťuje fázi vracejícího se světla. Postupným snižováním modulační frekvence tak může být vzdálenost objektu stanovena s vysokým stupněm přesnosti. Tento systém je také více přívětivý pro uživatele, protože když se z nějakého důvodu přeruší viditelnost hlavy přístroje na reflektor, tracker si reflektor znovu najde bez nutnosti začít z počátečního bodu. Snadnost použití tady ale přichází s mírným poklesem přesnosti (20).



Obr. 21) Schéma principu LaserTrackeru (20).

Na trhu jsou tři nejvýznamnější výrobci systémů tohoto typu a to HMI (trackery Leica), API a FARO. Vybral jsem od každé z těchto společností jeden produkt pro srovnání z ostatními. Jedná se o API Radian (Obr. 22), FARO Vantage (Obr. 22) a Leica AT960 (Obr. 22). Srovnání nabízí následující tabulka (Tab 2) .



Obr. 22) Tři nejvýznamnější LaserTrackery dnešní doby (21) (22) (23).



Tab 2) Porovnání tří produktů LaserTracker na trhu (21) (22) (23).

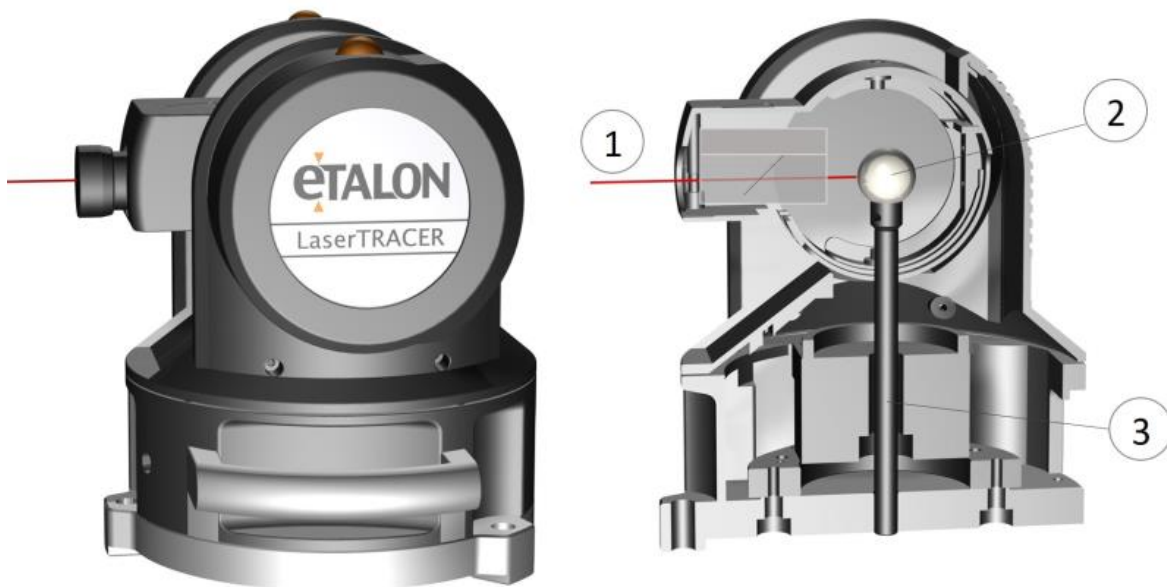
	API Radian	FARO Vantage	Leica AT960
Rozsah měření			
Vzdálenost*	Až 80 m	Až 80 m	Až 80 m
Osa azimutu	± 320°	± 320°	± 320°
Osa elevace	+79° až -60°	+77,9° až -52,1°	± 145°
Přesnost měření			
Délkové rozlišení	Až 0,08 μm*	0,5 μm	
Délková přesnost	Až 0,5 μm/m*	16 μm+0,8 μm/m	0,5 μm/m
Úhlové rozlišení	± 0,018 arc sec	± 2 arc sec	
Úhlová přesnost	3,5 μm/m	20 μm+5 μm/m	15 μm+6 μm/m
Rozlišení systému	0,1 μm	0,5 μm	
Celková přesnost systému	10 μm+5 μm/m	20 μm+5 μm/m	15 μm+6 μm/m
Fyzické parametry			
Rozměry v/š/d [mm]	355x177x177	416x224	477x258x255
Hmotnost trackeru [kg]	9	12,6	13,8
* Závisí na konkrétním provedení			

### 4.3 LaserTracer

LaserTracer je systém založený na dvou principech. Jedním je laser interferometrie a druhým je sekvenční multilaterace, což je hyperbolické polohování (stejněho principu využívá i systém GPS). Tracer se skládá z interferometru s nanometrovým rozlišením a odražeče, který je uchycen ve snímací hlavě měřicího stroje nebo ve vřetenu obráběcího stroje. Interferometr automaticky sleduje odražeč a měří vzájemnou vzdálenost mezi nimi. Odražeč projede předem nadefinovanou dráhu a po ukončení měření je vygenerována korekční mapa. Korekce jsou uloženy do řídicí jednotky měřeného obráběcího stroje. Výhodou tohoto systému je možnost sledování bodu na jakékoliv dráze v prostoru. Společnost Etalon nabízí dvě varianty tohoto systému a to LaserTracer-NG a LaserTracer-MT (19) (24).

### 4.3.1 LaserTracer-NG

Na rozdíl od konvenčních měřicích přístrojů, LaserTracer nabízí velmi vysokou přesnost středu otáčení a to díky patentované měřicí technice: kouli s tvarovou odchylkou pouze 50 nanometrů. Ta se používá jako reference pro interferometr. V důsledku toho jsou mechanické chyby otáčení a otočné osy plně kompenzovány. Na obrázku (Obr. 23) je schematicky popsán LaserTracer. Číslem 1 je označen paprsek interferometru, který má přesnost  $0,001\ \mu\text{m}$ , číslo 2 má referenční koule, která je vyrobena s přesností  $0,05\ \mu\text{m}$  a číslo 3 označuje pevný čep (24).



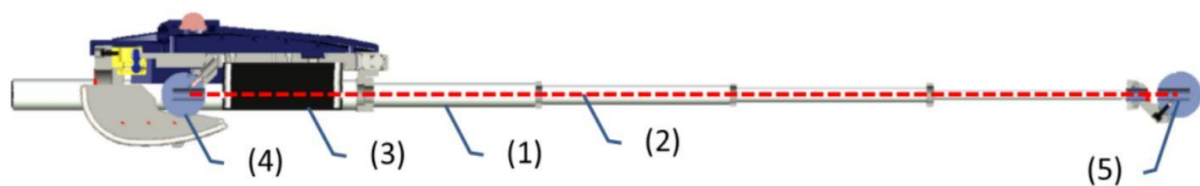
Obr. 23) LaserTracer Etalon-NG (17).

Pro samotné měření je LaserTracer umístěn v několika různých polohách uvnitř pracovního objemu stroje, zatímco odražeč je namontován do vřetene stroje. V následujícím automatizovaném měřicím procesu sleduje LaserTracer skutečnou dráhu imaginárního nástroje v podobě odražeče a to v celém jeho pracovním objemu. Dodávaný software TRAC-CAL nebo TRACK-CHECK okamžitě vyhodnocuje naměřená data. Výhody tohoto systému (24):

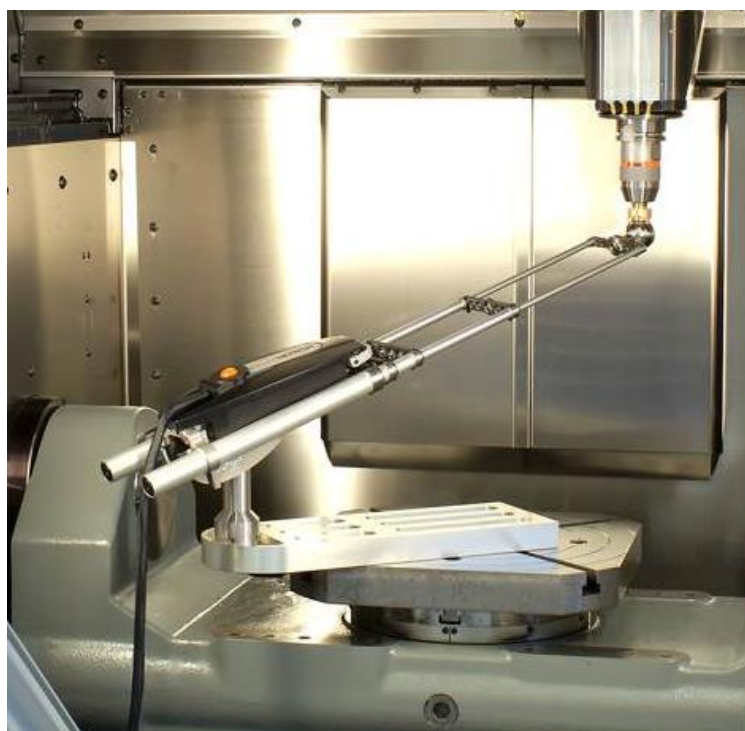
- jednoduché testování, kalibrace a volumetrická kompenzace obráběcích strojů,
- velmi rychlé měření v porovnání s běžnými měřicími přístroji,
- automatický přenos dat do softwaru a následná kompenzace,
- kombinace několika poloh měření vede ke zvýšení výsledné přesnosti.

### 4.3.2 LaserTracer-MT

Po tom, co se nastavily standardy v kalibraci obráběcích strojů pomocí aktivního LaserTraceru-NG, rozšířila společnost Etalon svůj sortiment také o pasivní verzi LaserTraceru speciálně určeného pro malé a střední obráběcí stroje s délkou os až 1,5m. Tato verze je vedena mechanicky a to vysoce přesnými a hladkými kulovými klouby a teleskopickou jednotkou. Na obrázku (Obr. 24) je číslem 1 označena teleskopická jednotka, číslo 2 označuje měřící paprsek interferometru, číslo 3 je samotný stabilizovaný interferometr, a čísla 4 a 5 označují kulové klouby pro uchycení ve stroji. Obrázek (Obr. 25) pak ukazuje použití menší verze LaserTraceru v praxi (24).



Obr. 24) Schéma přístroje LaserTracer-MT (24).



Obr. 25) Příklad použití přístroje LaserTracer-MT v praxi (24).

V následující tabulce (0) je porovnání základních parametrů menší a větší verze LaserTraceru.

Tab 3) Porovnání LaserTracerů NG a MT (24).

	Verze NG	Verze MT
Rozlišení interferometru	0,001 $\mu$ m	0,001 $\mu$ m
Přesnost měření	0,2 $\mu$ m + 0,3 $\mu$ m/m	1 $\mu$ m
Rozsah měření	0,2 – 20m	260 – 980mm
Úhlový rozsah elevační osy	-35° až 85°	-30° až 85°
Úhlový rozsah osy azimutu	-225° až 225°	neomezený
Hmotnost přístroje	8,5kg	2kg

#### 4.4 Ballbar

Se systémem Ballbar přišla na trh společnost Renishaw, která na trh dodává systém s označením QC20-W (Obr. 26). Název Ballbar vychází z anglických slov ball=koule a bar=tyč. Systém se stal velmi populárním právě díky jeho jednoduchosti a rychlosti použití, kdy výrobce udává, že test zabere okolo deseti minut.

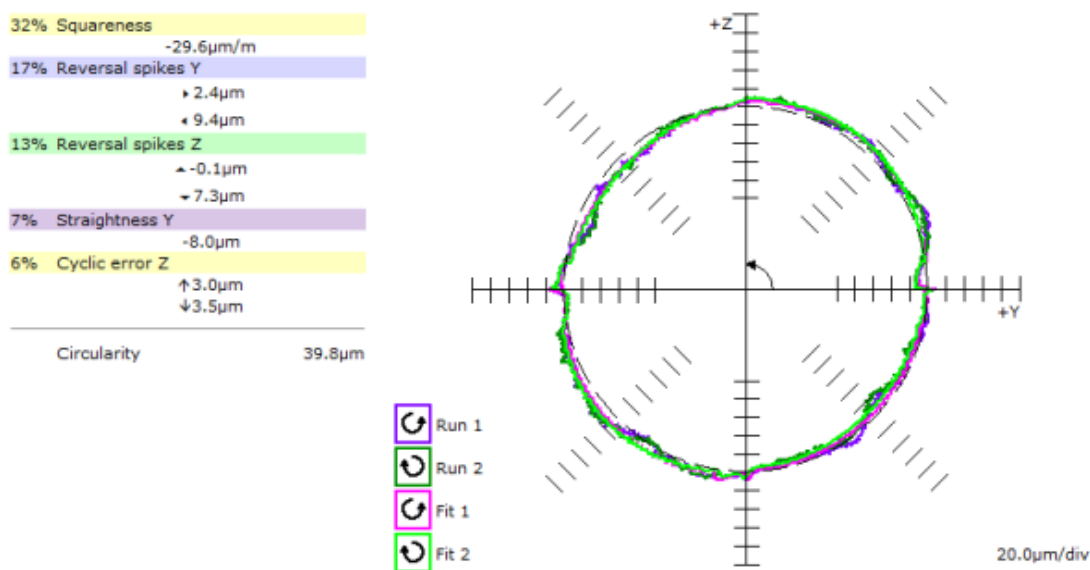


Obr. 26) Systém Ballbar QC20-W (7).

Samotný Ballbar je velmi přesný lineární snímač se dvojicí koulí na obou koncích. Pro použití se tyto koncové kuličky vloží do magnetických pouzder, z nichž jedno se připevní ke stolu stroje a druhé do vřetena stroje, nebo k jeho plášti (Obr. 27). Následně stroj vykoná naprogramovaný kruhový pohyb v libovolné ose a Ballbar převádí nasnímané odchylky od ideálního kruhu přes bluetooth do dodávaného softwaru v počítači. Ten z nasnímaných dat určí hodnoty nepřesnosti na stroji (Obr. 28), především kruhovitost nebo odchylku kruhovitosti, nicméně systém je schopen diagnostikovat až 15 polohovacích chyb stroje. V následující tabulce (Tab 4) jsou popsány technické parametry přístroje (6).



Obr. 27) Ukázka testování systému Ballbar v praxi (7).



Obr. 28) Výsledek testování stroje systémem Ballbar (18).

Tab 4) Technické parametry systému Ballbar CQ20-W (8).

Rozlišení snímače	0,1 $\mu\text{m}$
Přesnost snímače při 20°C	$\pm 0,5 \mu\text{m}$
Přesnost měření systému při 20°C	$\pm 1,25 \mu\text{m}$
Rozsah měření snímačem	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Max. rychlost snímání	1000Hz

## 4.5 Digitální libely Wyler

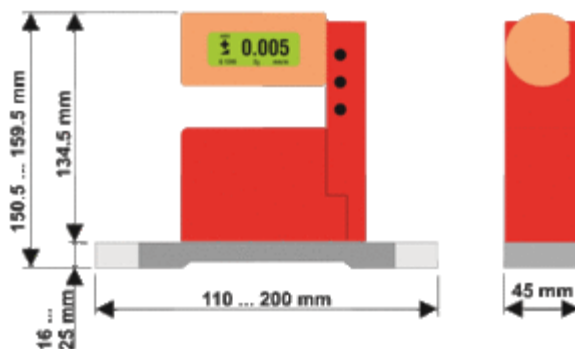
Digitální libely dnes vyrábí hned několik výrobců, jedním z nich je společnost Wyler se svou řadou libel s názvem Bluesystem. Moderní libely přináší možnost propojení hned několika z nich zároveň přes bezdrátové technologie s počítačem a tím tak měření mnohonásobně zrychlit. Základny libel bývají magnetické i nemagnetické, přičemž u magnetických variant je problém s udržení čistoty stykových ploch. Pomocí přiloženého softwaru je možno velice jednoduše měřit přednastavené geometrické úlohy, kdy výhoda spočívá v připravené grafické strategii, automatickém zapisování hodnot a okamžitém zpracování hodnot zahrnujícím tvorbu měřicího protokolu (1).

### 4.5.1 BlueSYSTEM SIGMA

Jedním z nejprodávanějších systémů od společnosti Wyler je systém s názvem BlueSystem Sigma (Obr. 29). Tento produkt obsahuje dvě digitální libely BlueLevel (Obr. 30) a ústředny BlueMeter Sigma, která je s libelami spojena bezdrátově pomocí Bluetooth a může být také připojena přímo k počítači pře USB kabel pro vyhodnocení dat a také pro průvodce měřením. Tyto libely mají nemagnetickou základnu. Součástí tohoto systému je také dálkové ovládání pro zapisování hodnot (25).



Obr. 29) Přístroje systému BlueSYSTEM SIGMA (25).



Obr. 30) Základní parametry digitální libely BlueSystem (25).

Těmito libelami se dá měřit mnoho parametrů stroje nebo i obrobku, které vychází z rozdílnosti úhlů, jako například rovinnost, přímost, rovnoběžnost, kolmost, sklon atd. Výsledná hodnota měření je stanovena aritmetickým průměrem ze série měření, přičemž časové rozpětí mezi

měřeními hlídá software podle uživatelem definované tolerance. Pomocí softwaru M-Soft od téže společnosti lze také aplikovat měření na konkrétní chyby a to konkrétně (25):

- kontrola horizontálních i vertikálních vedení,
- naklápění vřeteníku či smykadla za pohybu,
- odchylka vřetene od absolutní svislice,
- rovinnost a nesouběžnost nesouvislých ploch,
- kolmost vřetene a stolu,
- rovinnost a rovnoběžnost rotačních vedení,
- kolmost vřetene a stolu za rotace,
- rovinnost rotačních vedení i v radiálním směru,
- naklápění stolu za pohybu.

Při měření některých z těchto úloh jsou ale za potřeby speciální přípravky.





## 5 MĚŘENÍ PŘESNOSTI PĚTI-OSÝCH OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

V posledních několika letech dostávají pěti-osé obráběcí stroje na trhu stále větší prostor. Stalo se tak hlavně díky mnohým výhodám těchto strojů, například v podobě dvou rotačních os navíc oproti strojům tříosým. Díky těmto dvěma osám se otvírá možnost obrábět složitější dílce na jedno upnutí ve stroji, čímž odstraníme nepřesnosti vzniklé při druhém nebo třetím upínání obrobku a taky výrazně snížíme strojní časy.

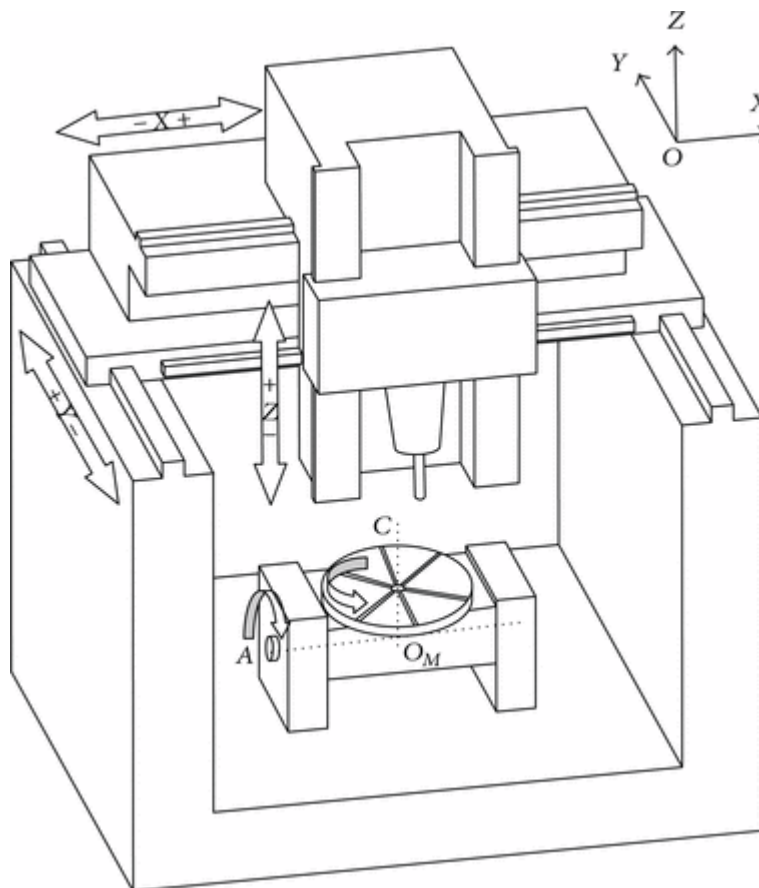
V této kapitole se budu věnovat druhům problémů týkajících se pěti-osých obráběcích center a hlavně pak možnostem, jak tyto problémy vyřešit.

### 5.1 Problematika

Výhody pěti-osých strojů jsou zřejmé, nicméně tyto stroje mají oproti tříosým taky pár nevýhod. Dvě osy navíc znamenají pro systém přesnosti další prostor pro chyby a dělá kinematické řetězce delší. To v důsledku znamená, že chyby se začnou překrývat a přesnost výroby může být snížena. Protože přesnost výroby je vždy nejdůležitějším parametrem pro posuzování kvality stroje, musíme se věnovat i kontrole těchto obráběcích strojů. Pro zlepšení přesnosti existují dvě cesty. Jednou je vyhnout se chybě a druhou je chybu kompenzovat. Vyhýbání se chybě znamená velmi pečlivě navrhnout, dokonale vyrobít a naprosto přesně smontovat stroj. Nejenže je to záležitost velkých peněžních nákladů, ale často nejsme ani schopni přesnějšího zpracování technicky dosáhnout. To je důvodem, proč se v moderním průmyslu uchýtila spíše metoda kompenzace chyby (26).

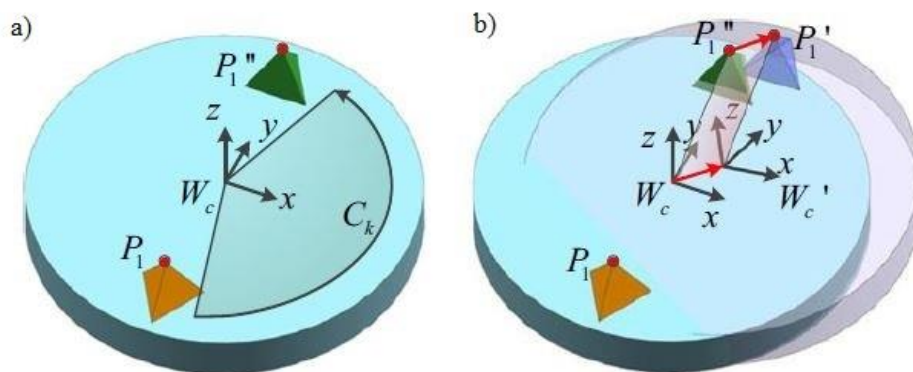
## 5.2 Popis a geometrické chyby pěti-osého obráběcího stroje

Pro tuto metodu řešení si uvedeme příklad pěti-osého obráběcího stroje (Obr. 31), kde čtvrtá (A) i pátá (C) osa jsou umístěny na stole obráběcího stroje. Tato metoda je ale univerzální, lze ji tedy použít na jakékoliv jiné sestavení pěti-osého obráběcího stroje. Jak už bylo zmíněno výše, na pěti-osém obráběcím stroji lze nalézt 48 chyb. Konkrétně se jedná o 18 chyb v translačních osách, 3 chyby kolmosti os (stejně jako u tří-osého stroje) a přidají se chyby na rotačních osách. Pro každou rotační osu jsou zde 3 translační chyby a 3 úhlové chyby, dále pak 2 chyby kolmosti a dohromady 6 chyb vzájemné polohy. Posledních 5 chyb jsou chyby samotného vřetene (27).



Obr. 31) Příklad pěti-osého obráběcího stroje a popis jednotlivých os (28).

Při měření geometrických chyb bychom měli vždy měřit zvlášť chyby rotační osy A a zvlášť měřit chyby rotační osy C, abychom se vyhnuli párování těchto chyb a mohli tak přesně určit, na které z těchto os se chyba nachází. Ukázka konkrétního případu volumetrické chyby zapříčiněné geometrickou chybou na ose C je na následujícím obrázku (Obr. 32). Bod  $P_1$  je počáteční bod rotace,  $P_1'$  je skutečný koncový bod rotace a  $P_1''$  je teoretický, neboli ideální koncový bod rotace.  $W_c$  je ideální počátek souřadnicového systému a  $W_c'$  je skutečný počátek tohoto systému (27).

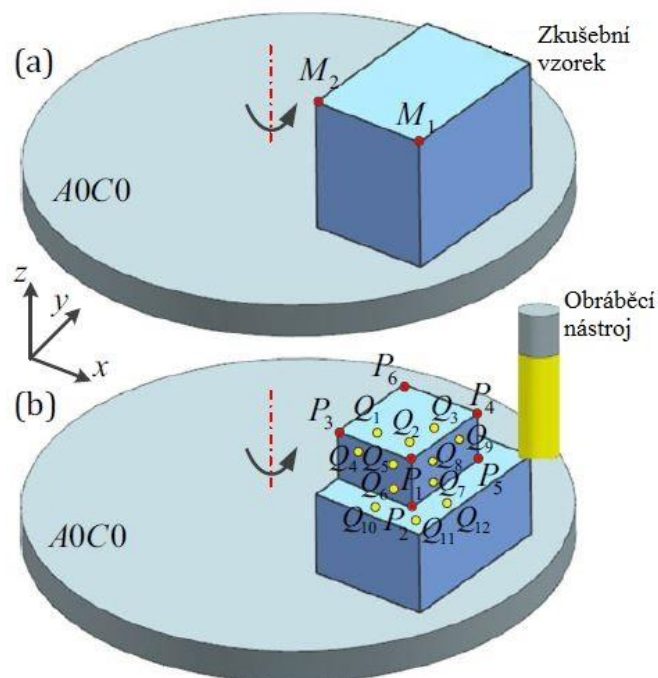


Obr. 32) Ideální a) a skutečná b) situace na rotační ose C (27).

### 5.3 Metody měření

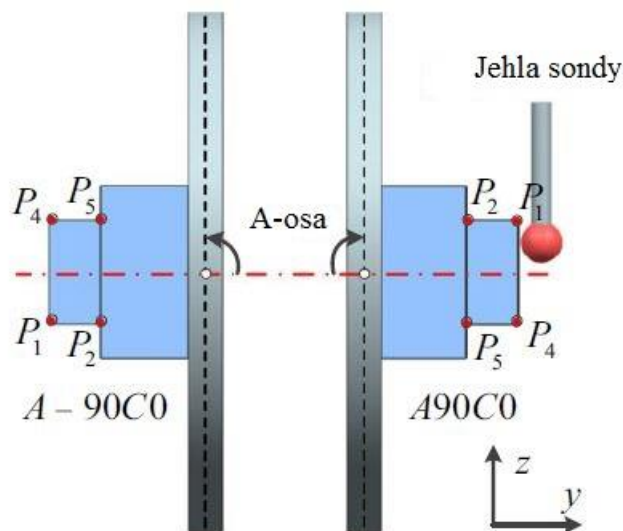
#### 5.3.1 Pomocí měřicí sondy

Materiál je předpřipraven jako zkušební vzorek. Pro usnadnění následné operace obrábění je hrana  $M_1 M_2$  přibližně rovnoběžná s osou X při instalaci zkušebního vzorku na A0C0 (Obr. 33). Před měřením je zkušební vzorek obroben dle obrázku (Obr. 33) čelní vřetovkou vždy se zapojením jen jedné lineární osy pro obrábění (např. osy X nebo osy Y). Pro připomenutí hrana  $P_1 P_3$  a  $P_4 P_6$  jsou rovnoběžné s osou X a hrana  $P_1 P_4$  je rovnoběžná s osou Y. Jelikož je vzorek obroben vertikálním nástrojem, jsou hrany  $P_1 P_2$  a  $P_4 P_5$  rovnoběžné s osou Z, což je pro tuto metodu velmi důležité. Abychom eliminovali vliv vychýlení nástroje, měly by být parametry obrábění vhodně zvoleny, například minimální hloubkou řezu. Šest referenčních bodů ( $P_1$ - $P_6$ ) je využíváno pro kalibraci geometrických chyb (27).



Obr. 33) Zkušební vzorek a referenční body: a) počáteční vzorek, b) obrobený zkušební vzorek (27).

V této metodě se osa otáčení pohybuje s přírůstkem 30 stupňů a v každé nové poloze se sondou změní tři body. Abychom se vyhnuli nežádoucímu rušení mezi zkušebním vzorkem a jehlou sondy během měření osy A (Obr. 34) jsou body  $P_1, P_2, P_3$  měřeny při otáčení osy v kladném směru a body  $P_4, P_5, P_6$  jsou měřeny při otáčení osy v záporném směru. Dohromady je vzorek měřen v 19 polohách. Je očividné, že dotyková sonda nemůže sledovat polohu bodů během otáčení přímo, ale výhodou je zde přesné určení referenčních bodů při nehybném vzorku. Pro určení roviny jsou potřeba tři body. Tři sousední roviny jsou potřeba pro určení jednoho průsečíku jako referenčního bodu. Jak je vidět na obrázku (Obr. 33), body  $Q_1$  až  $Q_9$  jsou měřeny pro určení referenčního bodu  $P_1$ . Body  $Q_1$  až  $Q_{12}$  jsou potřeba pro vytvoření referenčních bodů  $P_1$  a  $P_2$ , které sdílí dvě roviny. Pro určení třech referenčních bodů je tedy potřeba vždy 15 bodů naměřených sondou, dohromady tedy 285 bodů během celého měření (27).



Obr. 34) Měření bodů při kalibraci osy A (27).

### 5.3.2 Ballbar

Ballbar je pro svou jednoduchost a efektivitu široce využívaný nástroj pro měření pěti-osých strojů, který stále zvyšuje svoji pozornost. Tento systém byl vynalezen pro zhodnocení výkonnosti obráběcího stroje zahrnující tepelnou roztažnost, kolmost, vůle, nebo chyby pohonů. Později byl přijat i normou ISO 230-1 pro provádění kruhových testů na obráběcích strojích pro zhodnocení jeho vlastností (28).

Bylo dokázáno, že tento systém je schopný vyhodnotit osm chyb souvisejících s rotačními osami stroje a také osm chyb souvisejících s chybami v polohách os, což vede skrz matematickou analýzu a numerickou simulaci. Existuje více postupů, jak tímto systémem provést analýzu stroje. Lei a spol. navrhli specifickou kruhovou dráhu vytvořenou ze současného pohybu osy A i osy C tak, aby bylo možné zhodnotit přesnost pohybu pohonů zahrnující následující parametry: rychlost posuvu, přírůstky polohové smyčky, vlastní frekvenci a tlumící faktor. Khan a Chen představili metodu k oddělení chyby vzniklé osou A a osou B a následně provedli úspěšný experiment pro kompenzaci těchto chyb. Zhang a spol. navrhli metodu pro měření čtyř chyb osy C založenou chybovém modelu homogenní transformační matice. Zhu a spol. navrhli šest měřených drah pro kalibraci osmi chyb souvisejících s rotačními osami (28).

I přesto je zde stále mnoho prostoru pro vynalezení efektivnějších nebo přesnějších metod založených na systému Ballbar pro identifikaci chyb na rotačních osách strojů. Aby se předešlo

vlivům jiných chyb než chyb na rotačních osách, je lepší, když se během měření pohybuje osa A i osa C současně, zatímco translační osy X, Y, Z jsou statické. (28).



## 6 ZÁVĚR

Náplň této práce nám umožnila získat přehled o jednotlivých technologiích měření obráběcích strojů. Velké množství technologií použitelných pro toto měření nám napovídá, jak velké úsilí a prostředky jsou vynakládány pro zjišťování a zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů a taky co nejvíce eliminovat promítnutí chyb stroje do samotného obrobku.

Ve druhé a třetí kapitole jsem se věnoval úvodu do problematiky měření strojů. Přesněji pak popisu jednotlivých označení přesnosti se zaměřením na geometrickou přesnost, kdy celá druhá kapitola se věnuje vysvětlením jednotlivých geometrických tolerancí. Byla zde vysvětlena také úskalí víceosých obráběcích strojů, kdy více os znamená sice mnoho výhod, nicméně také pár záporů.

Čtvrtá kapitola je zaměřena na jednotlivé metody obráběcích strojů s důrazem na ty nejnovější technologie. Z prozkoumání trhu jsem si nemohl nevšimnout, že velkou roli hrají v nejmodernějších metodách laserové interferometry, které můžeme najít ať už v LaserTrackeru, LaserTraceru, nebo jej použijeme pro měření samostatně. Další z významných systémů je Ballbar, který se stal velmi populárním hlavně díky své jednoduchosti. Zmíněné systémy jsou použitelné v mnoha aplikacích, ale přece jen je možné nalézt pro každý systém více a méně vhodné použití. Interferometry jsou vhodné pro měření polohování přímých os, LaserTracker je vhodný pro měření obrobků a obráběcích strojů velkých rozměrů. Pro vyhodnocování úhlových měření je pak jistě nejvhodnější použít Libely.

V poslední kapitole této práce jsem se zaměřil na konkrétní problém a to problém měření pěti-osých obráběcích strojů. Tři osy těchto strojů se kontrolují, dá se říci, klasickým způsobem a proto jsem se zaměřil hlavně na ty dvě osy navíc, tedy osu A a osu C. Ukázalo se, že ne každá technologie je na tuto úlohu měření vhodná a dokonce i jednotlivé zdroje se ne příliš shodovali v metodice měření. Mnou nalezená studie číslo jedna využívala měřicí sondu, kdy se nejprve obrobí zkušební vzorek a ten se pak při pohybu v měřených osách dotykem kontroluje. Toto měření je ale v porovnání s metodou následující poněkud zdlouhavé, nicméně funkční. Studie číslo dvě využívala systém Ballbar a jeho kruhové dráhy. Studie popisovala hned čtyři skupiny vědců, kdy každá skupina přišla na svou jedinečnou dráhu pro toto měření a to jistě není zdaleka všechno, co Ballbar nabízí.





## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HOLUB, Ph.D, Ing. Michal, KNOBLOCH, MSc, Ing. Josef a PERNIKÁŘ, CSc, Doc. Ing. Jiří. *GTS Testování obráběcích strojů V4*. [Dokument] Brno : ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY, 2015.
- [2] ERAZIM, Karel. *Kontrola přesnosti obráběcích strojů*. Praha : SNTL, 1961.
- [3] MEHRABI, M.G. a O'NEAL, G. Improving machining accuracy in precision line boring. [Online] 2002. [Citace: 24. duben 2016].
- [4] IBARAKI, Soichi a KNAPP, Wolfgang. Indirect measurement of volumetric accuracy for three-axis and five-axis machine tools: Review. [Online] 2012. [Citace: 24. duben 2016].
- [5] RAMESH, R., M.A, MANNAN a A.N, POO. Error compensation in machine tools — a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. [Online] 2000, vol. 40, issue 9. [Citace: 24. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0890695500000092>
- [6] *Renishaw.com*. [Online] [Citace: 4. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com>
- [7] Nejistota měření. *Česká chromatografická škola*. [Online] [Citace: 24. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.hplc.cz/validace/nejistoty.html>
- [8] Nejistoty. *Fyzika.upol.cz*. [Online] [Citace: 24. duben 2016]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>
- [9] Microplan Group. *Materials*. [Online] [Citace: 24. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.microplan-group.com/>
- [10] Předepisování přesnosti rozměrů, tvarů a polohy. *COPTEL-Elektrotechnika.cz*. [Online] [Citace: 20. duben 2016]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=10931&instance=1>
- [11] Měření a kontrola tvaru. *Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno*. [Online] [Citace: 8. duben 2016]. Dostupné z: [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/mereni\\_a\\_kontrola\\_tvaru.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/mereni_a_kontrola_tvaru.pdf)
- [12] FUKA, Josef a HAVELKA, Bedřich. *I. Optika, fyzikální kompendium pro vysoké školy, díl IV*. místo neznámé : SPN Praha, 1961.
- [13] Interferometry a vlastnosti laserového záření. *optics.fjfi.cvut.cz*. [Online] [Citace: 10. duben 2016]. Dostupné z: [http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\_03.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf)
- [14] Michelsonův interferometr. *nanoed.tul.cz*. [Online] [Citace: 10. duben 2016]. Dostupné z: [https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/1580/mod\\_resource/content/1/Michelson%C5%A Fv%20interferometr.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/1580/mod_resource/content/1/Michelson%C5%A Fv%20interferometr.pdf)
- [15] MALÝ, Petr. *Optika*. místo neznámé : Karolinum, 2008. ISBN 9788024613420.

- [16] Laser & Measurement technique. *Limtek*. [Online] [Citace: 24. květen 2016.] Dostupné z: <http://www.limteklaser.com/>
- [17] Laser interferometer for calibration of length measurement and CMM machines. *Feanor*. [Online] [Citace: 24. květen 2016.] Dostupné z: <http://www.feanor.com/>
- [18] Leaser heads Keysight. *Keysight*. [Online] [Citace: 24. květen 2016.] Dostupné z: <http://www.keysight.com/>
- [19] *Měřicí přístroje*. [Online] [Citace: 20. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/>
- [20] WANG, Zheng, a další. Experimental comparison of dynamic tracking performance of iGPS and laser tracker. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. [Online] 2011, vol. 56, issue 1, 29. leden 2011. [Citace: 12. květen 2016]. Dostupné z: <http://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s00170-011-3166-0>
- [21] API Laser Tracker. *API Services*. [Online] [Citace: 11. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.apitechnical.com/>
- [22] Laser Tracker Systems. *Hexagon Manufacturing Intelligence*. [Online] [Citace: 11. květen 2016]. Dostupné z: <http://hexagonmi.com/>
- [23] Faro Laser Tracker. *Faro*. [Online] [Citace: 11. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.faro.com>
- [24] *Etalon AG*. [Online] [Citace: 20. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.etalon-ag.com/>
- [25] Measuring instruments. *Wylereg*. [Online] [Citace: 24. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.wylereg.com/>
- [26] FANGYU, Pan, MING, Li a JIAN, Yin. *Error Model and Accuracy Calibration of 5-Axis Machine Tool*. [Časopis] 2013. 2302-4046.
- [27] HUANG, Nuodi, a další. Identification of geometric errors of rotary axes on 5-axis machine tools by on-machine measurement. [Online] 27. srpen 2015. [Citace: 5. květen 2016].
- [28] WANG, Wei, ZHANG, Yi a YANG, Jianguo. Double Ballbar Measurement for Identifying Kinematic Errors of Rotary Axes on Five-Axis Machine Tools. *SAGE journals*. [Online] [Citace: 5. květen 2016]. Dostupné z: <http://ade.sagepub.com/content/5/198487>

## 8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

### 8.1 Seznam tabulek

TAB 1) POROVNÁNÍ LASER INTERFEROMETRŮ (6) (16) (17) (18).....	30
TAB 2) POROVNÁNÍ TŘÍ PRODUKTŮ LASERTRACKER NA TRHU (21) (22) (23). .....	33
TAB 3) POROVNÁNÍ LASERTRACERŮ NG A MT (24). .....	36
TAB 4) TECHNICKÉ PARAMETRY SYSTÉMU BALLBAR CQ20-W (8).....	37

### 8.2 Seznam obrázků

OBR. 1) GEOMETRICKÉ CHYBY (4).....	18
OBR. 2) PŘEHLED CHYB A JEJICH OVLIVŇUJÍCÍ FAKTORY (5).....	19
OBR. 3) ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ GEOMETRICKÝCH TOLERANCÍ (10). ..	23
OBR. 4) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ PŘÍMOSTI (10). .....	24
OBR. 5) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ ROVINNOSTI (10). .....	24
OBR. 6) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ KRUHOVITOSTI (10).....	24
OBR. 7) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ VÁLCOVITOSTI (10). .....	25
OBR. 8) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE TVARU PROFILU (10). .....	25
OBR. 9) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE TVARU PLOCHY (10).....	25
OBR. 10) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE ROVNOBĚŽNOSTI (10).....	26
OBR. 11) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE KOLMOSTI (10). .....	26
OBR. 12) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE SKLONU (10). .....	26
OBR. 13) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE UMÍSTĚNÍ (10). .....	27
OBR. 14) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE SOUSTŘEDNOSTI A SOUOSOSTI (10). .....	27
OBR. 15) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE SOUMĚRNOSTI (10). .....	28

<b>OBR. 16) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE OBVODOVÉHO HÁZENÍ (10).....</b>	<b>28</b>
<b>OBR. 17) ZNAČKA, TOLERANČNÍ POLE A PŘÍKLAD POUŽITÍ TOLERANCE CELKOVÉHO HÁZENÍ (10).....</b>	<b>28</b>
<b>OBR. 18) PRINCIP MICHELSONOVA INTERFEROMETRU (13).....</b>	<b>29</b>
<b>OBR. 19) INTERFEROMETR RENISHAW XL-80 (7).....</b>	<b>30</b>
<b>OBR. 20) UKÁZKA MĚŘENÍ ROVINNOSTI PŘÍSTROJEM RENISHAW XL-80 (7). .....</b>	<b>31</b>
<b>OBR. 21) SCHÉMA PRINCIPU LASERTRACKERU (20). .....</b>	<b>32</b>
<b>OBR. 22) TŘI NEJVÝZNAMNĚJŠÍ LASERTRACKERY DNEŠNÍ DOBY (21) (22) (23). .....</b>	<b>32</b>
<b>OBR. 23) LASERTRACER ETALON-NG (17). .....</b>	<b>34</b>
<b>OBR. 24) SCHÉMA PŘÍSTROJE LASERTRACER-MT (24).....</b>	<b>35</b>
<b>OBR. 25) PŘÍKLAD POUŽITÍ PŘÍSTROJE LASERTRACER-MT V PRAXI (24). .....</b>	<b>35</b>
<b>OBR. 26) SYSTÉM BALLBAR QC20-W (7).....</b>	<b>36</b>
<b>OBR. 27) UKÁZKA TESTOVÁNÍ SYSTÉMU BALLBAR V PRAXI (7). .....</b>	<b>37</b>
<b>OBR. 28) VÝSLEDEK TESTOVÁNÍ STROJE SYSTÉMEM BALLBAR (18). ....</b>	<b>37</b>
<b>OBR. 29) PŘÍSTROJE SYSTÉMU BLUESYSTEM SIGMA (25).....</b>	<b>38</b>
<b>OBR. 30) ZÁKLADNÍ PARAMETRY DIGITÁLNÍ LIBELY BLUESYSTEM (25). .....</b>	<b>38</b>
<b>OBR. 31) PŘÍKLAD PĚTI-OSÉHO OBRÁBĚCÍHO STROJE A POPIS JEDNOTLIVÝCH OS (28). .....</b>	<b>42</b>
<b>OBR. 32) IDEÁLNÍ A) A SKUTEČNÁ B) SITUACE NA ROTAČNÍ OSE C (27).</b>	<b>43</b>
<b>OBR. 33) ZKUŠEBNÍ VZOREK A REFERENČNÍ BODY: A) POČÁTEČNÍ VZOREK, B) OBROBENÝ ZKUŠEBNÍ VZOREK (27).....</b>	<b>43</b>
<b>OBR. 34) MĚŘENÍ BODŮ PŘI KALIBRACI OSY A (27).....</b>	<b>44</b>