

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Návrh měření kruhové interpolace strojů pomocí laser trackeru

2015

Bc. Petr Pánek

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 15.6.2015

.....
podpis

Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Jiřímu Švédovi, Ph.D., za vedení této diplomové práce, jeho podnětné rady a připomínky při jejím vypracování.

Dále děkuji svým konzultantům diplomové práce, pánům Ing. Martinu Morávkovi a Ing. Janu Vláčilovi, za jejich pomoc, cenné rady a připomínky, kterými mi byli nápomocni při vypracování této diplomové práce.

Děkuji také všem zaměstnancům firmy, ve které byl měřen reálný obráběcí stroj za množství hodnotných informací a připomínek, jež mi poskytli při tvorbě této diplomové práce.

Chtěl bych také velice poděkovat svým rodičům za nesmírnou podporu a trpělivost, se kterou mě podporovali v průběhu celého studia a tvorbě této diplomové práce.

Anotace

Autor:	Bc. Petr Pánek
Název diplomové práce:	Návrh měření kruhové interpolace strojů pomocí laser trackeru
Rozsah práce:	91 s.
Akademický rok vyhotovení:	2014/2015
Škola:	ČVUT v Praze
Fakulta:	strojní
Ústav:	Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Martin Morávek, Ing. Jan Vláčil
Zadavatel:	ČVUT FS, Ú12135
Využití:	Měření kruhové interpolace velkých průměrů pomocí laser trackeru Leica AT901
Klíčová slova:	kruhová interpolace, laser tracker, Leica AT901, kruhovitost, radiální odchylka
Anotace:	Diplomová práce se zabývá novým způsobem měření kruhové interpolace. Popisuje stávající možnosti měření kruhové interpolace. Dále se zabývá návrhem strategií měření kruhové interpolace laser trackerem a jejich simulačním porovnáním. Vybraná strategie měření je experimentálně ověřena na reálném stroji a výsledky porovnány se standardní metodou měření ballbarem.

Annotation

Author:	Bc. Petr Pánek
Title of thesis:	A Proposal of Machine Tool Circular Interpolation Measurement Using a Laser Tracker
Extent:	91 p.
Academic year:	2014/2015
University:	CTU in Prague
Faculty:	Mechanical Engineering
Department:	Department of production machines and equipment
Supervisor:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Consultant	Ing. Martin Morávek, Ing. Jan Vláčil
Submitter of the Theme:	CTU FME, D12135
Application:	Measurement of large diameter circular interpolation using a laser tracker Leica AT901
Key words:	circular interpolation (test), laser tracker Leica AT901, circular, radial deviation
Annotation:	The thesis deals with a new way of measuring the circular interpolation. Describes the current measurement options circular interpolation. It also deals with the draft strategy, measurement of circular interpolation with laser tracker and simulation comparison. Selected measurement strategy is experimentally verified on a real machine, and the results were compared to the standard method of measurement with ballbar.

Obsah

Obsah	8
Přehled použitých veličin a jednotek	11
1 Úvod.....	13
2 Cíle diplomové práce	14
3 Možnosti měření kruhové interpolace	16
3.1 BallBar	16
3.2 Laser / ballbar	19
3.3 Mřížkový snímač	20
3.4 Laser tracker	22
3.5 Lasertracer	24
3.6 Řídicí systém	25
3.7 Zkušební obrobek	26
3.8 Mikrometrický odpich	27
4 Laser tracker LEICA.....	29
4.1 Princip měření.....	29
4.2 Popis systému.....	29
4.3 Technické parametry.....	31
4.4 Řídicí jednotka	32
4.5 Reflektor.....	32
4.6 Bezpečnostní předpisy.....	33
5 Kruhová interpolace dle ČSN ISO 230.....	34
5.1 Vyhodnocení měření	34
5.1.1 Dvousměrná odchylka kruhovitosti $G(b)$	34
5.1.2 Odchylka kruhovitosti G	35
5.1.3 Průměrná dvousměrná radiální odchylka D	35

5.1.4	Radiální odchylka F	36
5.2	Podmínky zkoušky	36
5.2.1	Zkušební prostředí.....	36
5.2.2	Zkoušený stroj.....	36
5.2.3	Ohřátí stroje.....	37
5.3	Parametry zkoušky.....	37
5.4	Vliv odchylek stroje na kruhové dráhy.....	37
6	Návrh strategií měření.....	42
6.1	Varianta 1.....	42
6.1.1	Postup zkoušky	43
6.1.2	Nejistoty.....	48
6.1.3	Shrnutí nejistot.....	52
6.2	Varianta 2.....	53
6.2.1	Postup zkoušky	54
6.2.2	Nejistoty.....	58
6.2.3	Shrnutí nejistot.....	60
6.3	Varianta 3.....	61
6.3.1	Postup zkoušky	62
6.3.2	Nejistoty.....	65
6.3.3	Shrnutí nejistot.....	67
6.4	Simulační porovnání navržených strategií	68
7	Popis měřeného stroje	69
8	Vlastní měření.....	71
8.1	Měření obvodového házení.....	71
8.2	Měření kruhové interpolace laser trackerem	72
8.2.1	Výsledky měření kruhové interpolace s laser trackerem	74
8.3	Měření kruhové interpolace ball barem	77

8.3.1	Výsledky měření kruhové interpolace s ball barem	77
8.4	Ověření správné funkce programu na zpracování výsledků	79
8.5	Porovnání výsledků měření získaných z laser trackeru a z ball baru..	80
9	Závěr.....	83
	Seznam použité literatury.....	85
	Seznam použitých programů.....	87
	Seznam Obrázků	88
	Seznam Tabulek	90
	Seznam příloh	91

Přehled použitých veličin a jednotek

Veličina	Jednotka	Popis
d, d_1, d_2, d_3	mm	měřená vzdálenost LT
D	μm	průměrná dvousměrná radiální odchylka
F	μm	radiální odchylka
G	μm	odchylka kruhovitosti
$G(b)$	μm	dvousměrná odchylka kruhovitosti
k_r	-	koeficient rozšíření
L_{max}	mm	měřený rozměr mikrometrickým odpichem
$n_{\text{dílu}}$	-	počet nástavců odpichu
$r_{\text{ustaveni1}}, r_{\text{ustaveni2}}, r_{\text{str}}$	mm	vzdálenost LT od středu KI
$R, R_{1us}, R_1, R_g, R_n$	mm	poloměr kruhové interpolace
$U_{\text{Bvar1d}}, U_{\text{Bvar2d}}, U_{\text{Bvar3d}},$	μm	celková chyba měření vzdálenosti
$U_{\text{Bvar1F}}, U_{\text{Bvar2F}}, U_{\text{Bvar3F}},$	μm	celková chyba radiální odchylky
U_{ckball}	μm	výsledek kalibrace ball baru
U_{cku}	μm	výsledek kalibrace číselníkového úchylkoměru
U_{cpall}	μm	chyba vlastního provedení zkoušky ball bar
U_{cp}	μm	chyba vlastního provedení zkoušky LT
U_d	$\mu\text{m}/\text{m}$	chyba měření vzdálenosti LT katalog
$U_{\text{dR1}}, U_{\text{dR2}}, U_{\text{dR3}},$	μm	chyba měření vzdálenosti LT
U_{obv}	μm	chyba obvodového házení
U_{r1}, u_{r1}	μm	chyba reflektoru
U_z, U_{z1}	μm	chyba přímocárosti pohyba
$U_{\varphi v}$	rad	chyba měření vertikálního úhlu
$U_{\varphi v1}$	μm	chyba měření vertikálního úhlu
$U_{\varphi v2}$	μm	základní chyba měření vertikálního úhlu
$U_{\varphi v3}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	chyba vertikálního úhlu na každý další m vzd.
$U_{\varphi h1}, U_{\varphi h2}, U_{\varphi h3},$	rad	chyba měření horizontálního úhlu
$U_{\varphi v1}$	μm	chyba měření horizontálního úhlu
$U_{\varphi v2}$	μm	základní chyba měření horizontálního úhlu
$U_{\varphi v3}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	chyba horizontálního úhlu na každý další m vzd.
U_{ball}	μm	nejistota měření ball barem
$U_{\text{Bvar1F}}, U_{\text{Bvar2F}}, U_{\text{Bvar3F}},$	μm	rozšířená celková chyba radiální odchylky
U_{chobv}	μm	chyba měření obvodového házení
U_{odpich}	μm	chyba mikrometrického odpichu

x_c	mm	x-ová vzdálenost LT od KI
y_c	mm	y-ová vzdálenost LT od KI
X_{ch}	mm	x-ová složka naměřených dat
Y_{ch}	mm	y-ová složka naměřených dat
z	mm	vzdálenost vřetena nad LT
$\varphi_v, \varphi_{v0}, \varphi_{v1}, \varphi_{v2}, \varphi_{vg}$	°	vertikální úhel
φ_{vst}	°	vstupní úhel do reflektoru
φ_h	°	horizontální úhel

1 Úvod

V dnešní době rostou požadavky trhu z hlediska technických prostředků, díky těmto požadavkům, se vývoj obráběcích strojů zaměřuje hlavně na vysokou produktivitu při nejvyšší kvalitě a přesnosti výroby. V procesu obrábění je kladen stále větší důraz na přesnost nejen obrobené součásti, ale také samotného obráběcího stroje.

Důsledkem nepřesnosti výroby komponent obráběcího stroje a jeho špatnou instalací je stroj zatížen geometrickými chybami, které tvoří podstatnou část z celkové nepřesnosti při výrobě a musí být kompenzovány pro zlepšení stavu stroje a zvýšení kvality výrobku. K určení těchto chyb slouží různé měřicí metody a přístroje. Podmínky zkoušek a některé možné příčiny chyb jsou definovány v souboru norem ČSN ISO 230.

Práce se zabývá pouze částí normy zaměřenou na zkoušku kruhové interpolace dle ČSN ISO 230-4, která patří k jedné z nejčastěji používaných zkoušek pro zjištění stavu stroje, např. při přejímání stroje. Zkouška odhaluje chyby způsobené současným pohybem ve dvou lineárních osách v testované rovině, a tím i chyby nastavení regulačního obvodu pohonů.

Měření je určeno pro velké stroje. Standardně se u velkých strojů provádí více měření s malým poloměrem ve více polohách pracovního prostoru, což zabírá mnoho času a nepodává informaci o velkých poloměrech kruhové interpolace. Použitím laser trackeru je možno tyto nedostatky snížit. Tato práce je zaměřena na měření velkých průměrů kruhové interpolace pomocí systému laser tracker a na porovnání měření se standardní metodou měření za použití zařízení Ballbar.

2 Cíle diplomové práce

Cílem této práce je návrh měření kruhové interpolace velkých průměrů na strojích pomocí laser trackeru a vytvoření softwaru pro zpracování výsledků. Měření se bude provádět na velkých strojích za pomoci laser trackeru Leica AT901 a vytvořeného softwaru pro provedení a vyhodnocení měření.

- Rešerše v oblasti měření kruhové interpolace na strojích

Nejprve budou zjištěny a popsány možnosti měření kruhové interpolace obecně bez ohledu na měřený průměr. Poté budou tyto metody měření zhodnoceny.

V další kapitole bude popsáno měřící zařízení Leica AT901, jeho části a jeho možnosti měření.

Poté budou uvedeny odchylky, které jsou nutné podle normy ČSN ISO 230-4 vyhodnotit pro měření kruhové interpolace a stanoveny, jaké by mohly být jejich příčiny na stroji.

- Návrh strategií měření a výpočet nejistot

V další části budou navrženy možné strategie měření kruhové interpolace pomocí laser trackeru, jejich popis, zhodnocení a srovnání vhodnosti. Dále výpočet nejistot strategií a jejich porovnání.

- Vytvořit software a připravit experiment

Poté bude navržen program pro vyhodnocení měření, zaměřen na výpočet požadovaných odchylek dle normy ČSN ISO 230-4 a připraven experiment.

- Verifikace měřením na stroji

V poslední části bude provedeno měření na reálném obráběcím stroji, vyhodnocení kruhové interpolace podle normy a porovnání se standardní metodou měření pomocí přístroje ballbar.

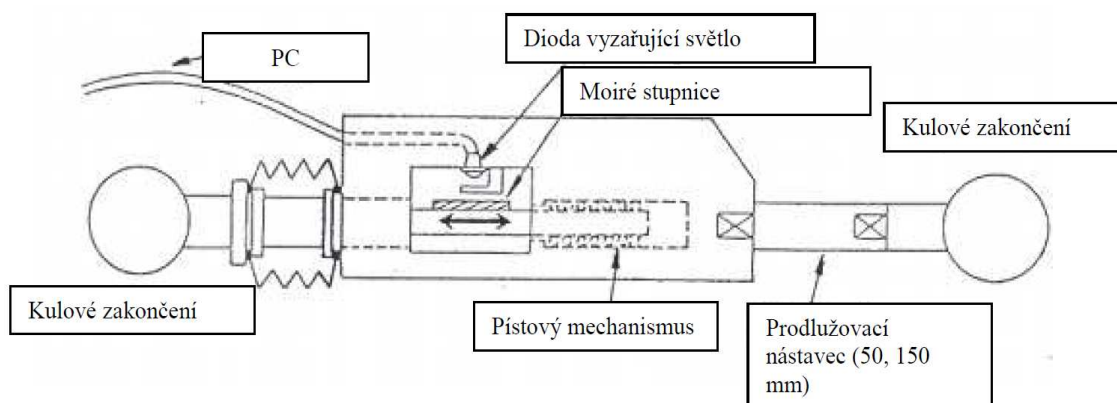
V závěru budou zhodnoceny všechny vytyčené cíle práce.

3 Možnosti měření kruhové interpolace

Možnosti měření kruhové interpolace (KI) jsou sestaveny bez ohledu na měřený poloměr kruhové interpolace.

3.1 BallBar

Středem celého systému je samotný ballbar, velmi přesný lineární snímač a dvojice přesných koulí na obou koncích. Snímač měří změnu vzdálenosti koulí dle Obr. 3.1. Při používání se kuličky kinematically umístí mezi přesnými magnetickými miskami, z nichž jedna je připevněna ke stolu stroje a druhá k vřetenu stroje nebo plášti vřetene. Díky tomuto uspořádání je ballbar schopen měřit i drobné změny poloměru naprogramované kruhové dráhy.



Obr. 3.1 Struktura systému ballbar [7]

Společnost Renishaw nabízí systém Ball bar QC20-W na Obr. 3.2, který vznikl modernizací systému QC10. S běžnou soupravou QC20-W je možno měřit na poloměrech od 100 do 600 mm a posuvovou rychlostí do 15 m/min, se speciálními nástavci je možno testovat na poloměrech 50 nebo 100 až 1350 mm, ale bez předchozí kalibrace. Výstup měření je vygenerován softwarem přímo v počítači. Software je schopen analyzovat provedená měření dle norem, nebo dle expertní analýzy Renishaw a odhalit pravděpodobné chyby stroje.

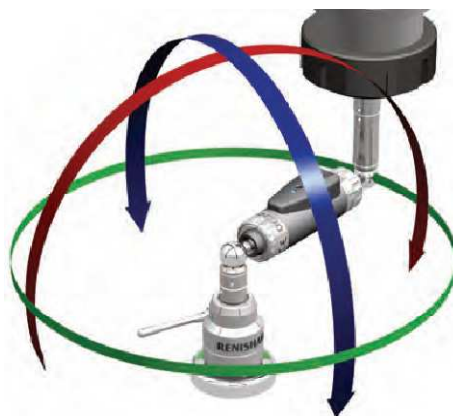


Obr. 3.2 Systém Renishaw ballbar QC20-W [7]

Před začátkem testu KI je zapotřebí synchronizovat obráběcí stroj s měřicím přístrojem. Hlavní parametry jsou rychlost posuvu, směr otáčení a poloměr, na kterém je test prováděn. Přičemž je možné zkoušku provádět na různých poloměrech, díky stavitelnosti měřicí sondy. Modifikovaná magnetická základna umožňuje provést měření ve všech třech rovinách při jednom upnutí základny. Základní rovina je změřena v celém rozsahu 360°. Další dvě ortogonální roviny lze změřit v rozsahu přibližně 220° viz. Obr. 3.3 a Obr. 3.4. Jsou tak postihnuty i chyby na kvadrantových přechodech těchto rovin. Díky jednomu upnutí základny je ze zjištěného souboru dat provedena volumetrická analýza stroje. Výsledkem je číselné vyhodnocení minima a maxima kulovitosti v měřené části pracovního prostoru.



Obr. 3.3 Možnost měření ortogonální roviny systémem ballbar QC20-W [7]



Obr. 3.4 Možnosti měření systémem ballbar QC20-W [7]

Samotné měření probíhá tak, že proti vřetenu na libovolný přípravek, který musí být dostatečně tuhý, je ustaven magnetický držák. Magnetický držák je zakončen dutou trubičkou, ve které jsou vytvořené tři výčnělky rozmístěné do trojúhelníku, aby byl zajištěn optimální kontakt mezi sondou a držákem. Do nástrojového držáku ve vřetenu je upnut druhý konec měřicí soustavy, který je zakončen stejně jako magnetický držák.

Dále je nutné určit nulový bod, ten se určí pomocí středící kuličky tak, že se najede s vřetenem přímo proti magnetickému držáku, který je zakončen pohyblivou trubičkou. Tím se snadněji srovná vřeteno vůči držáku. Po srovnání se magnetický držák zaaretuje.

Dalším krokem je najetí stroje na požadovaný poloměr, na kterém se bude měření provádět, přičemž díky programu obráběcí stroj nejprve najede na poloměr o 1,5 mm větší než je měřený. Měřicí sonda musí být před měřením kalibrována, ke kalibraci slouží dodávaný kalibrátor, který je podle typu do maximální délky 600 mm, větší rozměry lze měřit pouze bez kalibrace. Po najetí na počátek zvětšeného poloměru je vložena měřicí sonda mezi dva držáky. Tím, že je nastaven poloměr o 1,5 mm větší, nalézá se měřicí sonda mimo měřicí rozsah.

Při spuštění NC programu najede stroj na měřený poloměr a tím se spustí software pro měření, který následně zaznamenává průběh testu. Přenos hodnot ze sondy do PC je zajištěn pomocí bluetooth. [7]

Nejčastější metoda měření kruhové interpolace je pomocí systému Ball bar. Ball bar dokáže měřit maximální poloměr 1350 mm, ale bez předchozí kalibrace. Není tak vhodný pro měření velkých strojů. Ballbar neměří úhel natočení, je zapotřebí synchronizovat stroj s měřicím přístrojem. Hlavní parametry jsou rychlost posuvu, směr otáčení a poloměr KI. Měřicí rozsah systému Ball bar není příliš velký a lze měřit pouze poloměry stupňované podle nastavců, které jsou k dispozici. Pokud dojde k vychýlení středu KI od středu měřicího systému Ball bar o více než stanovený rozsah může být přesnost analýzy snížena a je zapotřebí opět seřadit vřeteno vůči držáku. Rozlišení snímače je 0,1 μm a maximální rychlost snímání je 1000 Hz.

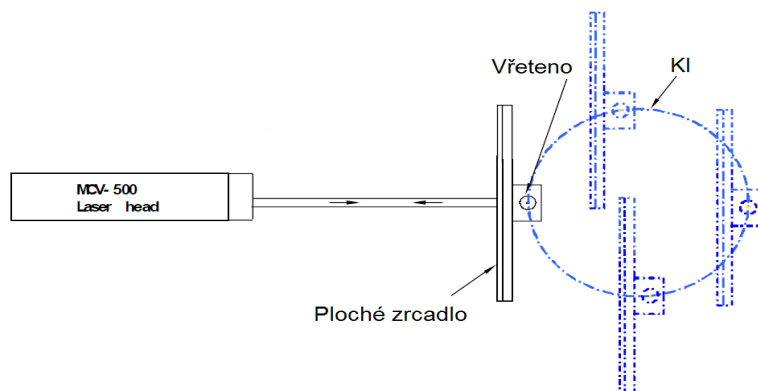
3.2 Laser / ballbar

Laserový ballbar poskytuje účinný způsob měření přesnosti pohybu stroje po kruhové dráze. Společnost OPTODYNE nabízí měřicí přístroj LB-500 LASER/BALLBAR na Obr. 3.5. Základem zařízení je laserová hlava a ploché zrcadlo. Měřidlo je upnuto na stole měřeného stroje a zrcadlo na vřetenu.



Obr. 3.5 Měření zařízením OPTODYNE LB-500 [9]

Zrcadlo musí být vyrovnáno kolmo k dopadajícímu laserovému paprsku, zrcadlo se pohybuje ve směru paprsku po kruhové dráze, tak aby laserový paprsek stále dopadal na zrcadlo. Měření se provádí ve dvou osách, aby mohl být vygenerován kruhový graf. Schéma měření je na Obr. 3.6. [9]

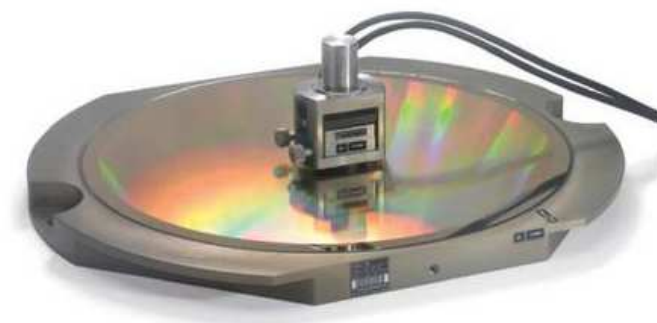


Obr. 3.6 Schéma měření laser / ballbarem [9]

Laser / Ballbar LB-500 dokáže měřit maximální poloměr 1016 mm a není tak vhodný pro měření velkých strojů. Měření je prostorově náročné, zrcadlo spojené s vřetenem stroje zabírá při měření více než dvojnásobek poloměru KI. Pro různé poloměry je vhodné použít různé velikosti zrcadel. Měření musí být provedeno ve dvou osách pro získání kruhového grafu. Rozlišení snímače je 0,005 μm a maximální rychlost snímání je 1000 Hz.

3.3 Mřížkový snímač

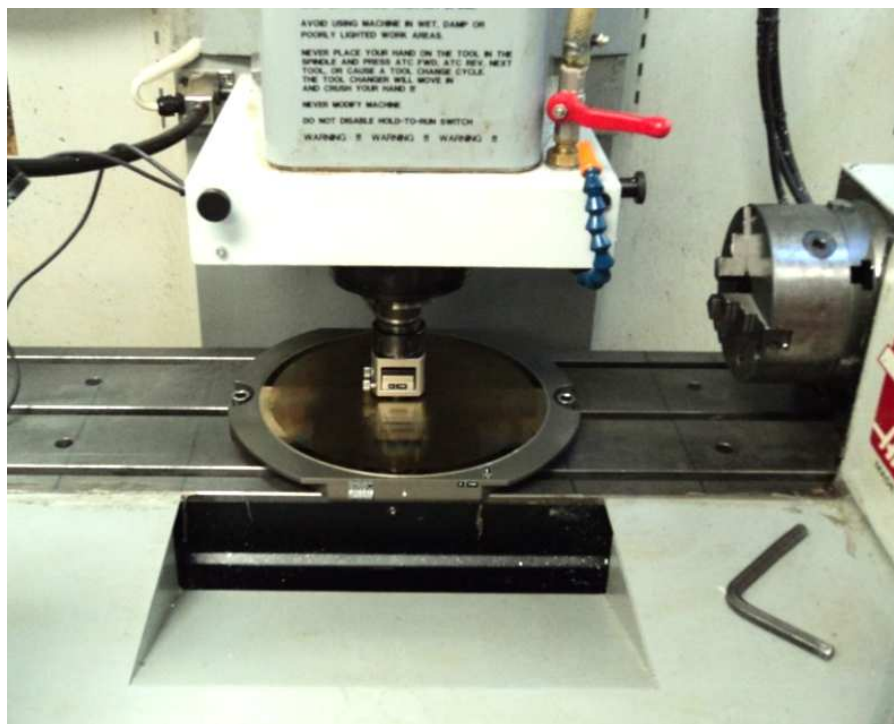
Mřížkové snímače HEIDENHAIN KGM dynamicky testují polohovou přesnost CNC řízeného obráběcího stroje. Snímač KGM 182, který je zobrazen na Obr. 3.7 je schopen vykonat test KI na poloměrech od. max. 230 mm až po 1 μm při rychlostech pohybu až 80 m/min. KGM může také provést test volného tvaru ve dvou osách. Výhodou KGM je na jedné straně bezkontaktní měření, které vylučuje vlivy vůlí kuličkových spojení, jako je tomu například u Ball-Bar. Na druhé straně chyba, způsobené geometrií stroje nemá vliv na výsledky měření KI na velmi malých poloměrech.



Obr. 3.7 Snímač HEIDENHAIN KGM 182 s měřicí deskou [8]

KGM je složeno z měřicí desky s křížovou mřížkou umístěné v kovové montážní desce a snímací hlavy. Během měření se snímací hlava pohybuje nad křížovou mřížkou bez vzájemného mechanického kontaktu. Pro měření je montážní deska upevněna místo obrobku např. na stole obráběcího centra a nastavena do roviny KI. Snímací hlava se upevňuje do držáku nástroje např. do vřetena obráběcího centra. Na Obr. 3.8 je vyobrazeno měření. Pomocí folie

se nastaví vzdálenost snímací hlavy od křížové mřížky na $0,5 \pm 0,05$ mm. Jemného nastavení se dosáhne pomocí šroubů na snímací hlavě. Tím se optimalizují měřicí signály, které se zobrazují pomocí vyhodnocovacího software ACCOM na PC.



Obr. 3.8 Měření snímačem HEIDENHAIN KGM 182 [VCSVTT]

Měřicí signály jsou dále zpracovány v PC. Vyhodnocení naměřených hodnot dle normy DIN ISO 230-2, DIN ISO 230-3 nebo VDI/DGQ směrnice 3441 obstará HEIDENHAIN software ACCOM. Programování testu KI zařizuje vyhodnocovací software ACCOM, který si vyžádá všechny pro měření nezbytné parametry a vytvoří i potřebný NC program, který lze odeslat přes sériové rozhraní nebo ethernet do řídicího systému stroje. [8]

Měření mřížkovým snímačem je vhodné pouze pro malé stroje, dokáže měřit poloměr maximálně 230 mm, při rychlostech pohybu až 80 m/min. Výhodou je možnost měření volného tvaru ale pouze ve dvou osách. Rozlišení snímače je $0,001 \mu\text{m}$.

3.4 Laser tracker

Principem měření je nepřetržité sledování koutového odražeče laserovým paprskem a odečítání polárních souřadnic (vzdálenost a 2 úhly) sondy na vzdálenost desítek metrů. Tyto souřadnice jsou přenášeny do počítače, software je vyhodnocuje a vytváří obraz měřené součásti. Na Obr. 3.9 a Obr. 3.10 je vyobrazen laser tracker Omnitrac a koutový odražeč od společnosti API, který je též možno použít pro měření KI namísto laser trackeru Leica.



Obr. 3.9 Laser tracker API Omnitrac [10]



Obr. 3.10 Koutový odražeč API (SMR) [10]

Produktivita měření pomocí laser trackeru (LT) je ohromující, software umožňuje okamžitou analýzu a zpracování výsledků, porovnání s CAD modely, tvorbu protokolů přímo na místě.

LT se uplatní v automobilovém a leteckém průmyslu, v energetice a těžkém strojírenství, ve stavebnictví i v průmyslu konstrukcí rozsáhlých celků. Rychlost pořízení dat při měření velkých dílů je klíčová i z důvodu minimalizace chyb způsobených teplotní roztažností materiálu vlivem kolísání teploty. Kromě měření dílů lze LT využívat i pro měření nástrojů, forem, pojezdů (interpolací všech druhů), dopravních a manipulačních systémů a manipulátorů. Lze je použít ke scanování povrchu součástí obecného tvaru i pro reverzní inženýrství, pro měření velkých svařenců, součástí turbín, vrtulí pro větrnou energetiku atd.

System je navržen pro práci v těžkém, průmyslovém i venkovním prostředí, pracuje s plnou přesností v rozsahu teplot od +10°C do +40°C

LT v sobě sdružuje přesný laserový interferometr IFM založený na dvojité helium neonové trubici, polovodičový laser, úhlový odměřovací a polohovací systém a kompletní laserové optiky v jediném kompaktním celku.

Díky unikátní technologii ADM (absolutní měření vzdálenosti) může být laserový paprsek interferometru v průběhu měření přerušen a po navázání paprsku je možno pokračovat v měření, ovšem s vyšší nejistotou měření. K dispozici je několik typů koutových odražečů.

Kompletní LT viz. Obr. 3.9 se skládá ze stojanu, optické hlavičky vyobrazené na Obr. 3.11 a kontroléru, do něj jsou napojena čidla teploty a tlaku vzduchu. Komunikace mezi kontrolérem a optickou hlavičkou je digitální, je to jediný speciální kabel s vysokou odolností proti elektrickému rušení. Komunikace mezi kontrolérem a notebookem může být buď síťová TCP/IP nebo bezdrátová. LT pracuje s laserovým zářením třídy 2, nevyžaduje použití ochranných brýlí. [10]



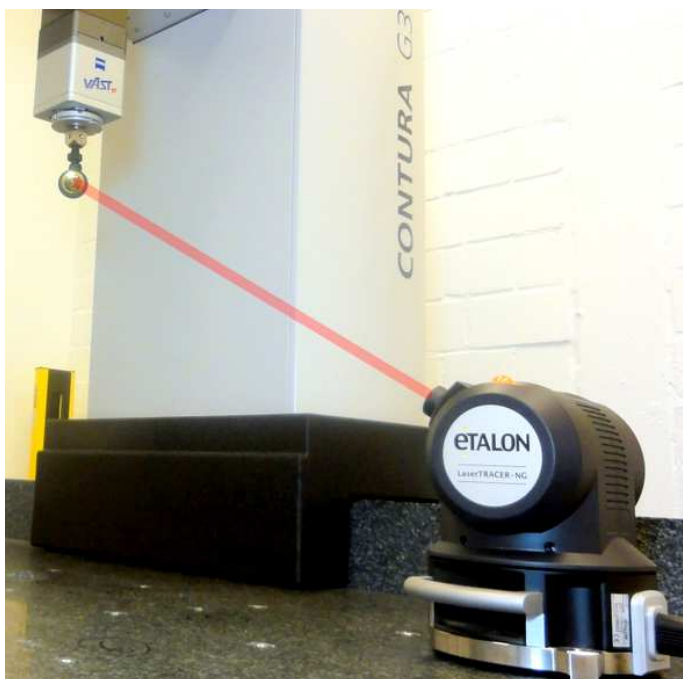
Obr. 3.11 Optická hlava laser trackeru API OMNITRAC [10]

Pro měření (KI) na velkých strojích je obecně vhodnější použití optických zařízení (např. lasery) ale i zařízení s nehmotnou referencí (např. vodováhy), které nepotřebují velký měřicí přípravek. LT má velký rozsah měření a není nutno vybírat z řady poloměrů. Při ustavení LT do středu KI není možné měření malých poloměrů, podle velikosti laserové hlavy. LT je složitý přístroj

a nevýhodou je jeho velká cena. Rozlišení snímače je 0,1 μm a maximální rychlost snímání je 1000 Hz.

3.5 Lasertracer

LaserTRACER-NG od společnosti ETALON na Obr. 3.13 byl vyvinut pro kalibraci a zlepšení přesnosti měřících strojů a obráběcích strojů. Jedná se o automatické sledování reflektoru laserovým interferometrem dle Obr. 3.12, a tedy umožňuje identifikaci geometrických odchylek s nejvyšší přesností.



Obr. 3.12 Měření zařízením ETALON LaserTRACER-NG [11]

Lasertracer je stacionárně umístěn v několika různých polohách uvnitř pracovního objemu stroje. Reflektor je namontován na nástroj nebo místo něj. V automatizovaném procesu měření, lasertracer sleduje skutečnou dráhu stroje v celém svém pracovním objemu, stroj může vykonávat i kruhovou interpolaci. Mezitím, systém získává vysoce přesné naměřené hodnoty, které jsou zpracovávány softwarovými balíčky TRAC-CAL a TRAC-CHECK pro analýzu chyb.



Obr. 3.13 Zařízení ETALON LaserTRACER-NG [11]

Software TRAC-CAL navádí obsluhu v procesu měření. Je schopen vykonat test KI na poloměrech až do 15 m. Nejistota měření pro prostorové posunutí je $0,3 \mu\text{m/m}$. Rozsah úhlu natočení laserové hlavy je -225° až 225° v ose azimutu a v ose elevace -38° až 85° . [11]

Lasertracer využívá laserového principu měření vzdálenosti jako LT, ale neuvažuje údaje z rotačních čidel. Pro měření KI je také vhodný. Rozlišení snímače je $0,001 \mu\text{m}$ a maximální rychlost snímání je 1000 Hz.

3.6 Řídicí systém

Největší výrobci řídicích systémů pro obráběcí stroje, jako jsou Heidenhain, Fanuc, Siemens a další nabízí ve svých řídicích systémech diagnostiku, jejíž součástí je i test kruhové interpolace. Potřebné hodnoty pro vyhodnocení zkoušky kruhovitosti jsou získávány zpětnou vazbou z pohonů a snímačů polohy stroje.

Vlastní měření probíhá tak, že v diagnostice systému se nadefinuje test KI. Druhým krokem je spuštění jednoduchého NC programu, jehož parametry musí být nadefinovány shodně s diagnostikou. Definujeme poloměr, na kterém test KI probíhá, dále posuvovou rychlost, kterou volíme blížící se hodnotám při obrábění, z důvodu relevantnosti výsledků, směr pohybu atd. Po spuštění programu musíme v diagnostice stroje spustit start testu. Měření kruhovitosti systémem probíhá pouze v jednom směru. Řídicí systém zaznamenává hodnoty obvykle až po odjetí půlkruhu na daném poloměru, poté zaznamená

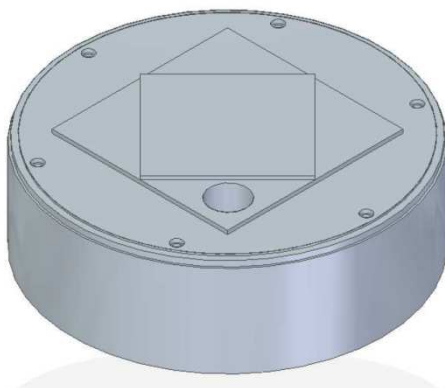
celých 360° a dojíždí na konečných 720°. Prvních a posledních 180° se neměří z důvodu výkytů při rozjíždění a dojíždění stroje. Při objíždění definovaného kruhu obráběcím strojem se zaznamenávají hodnoty z pohonů a snímačů polohy. Po skončení testu se na monitoru ovládacího panelu zobrazí graf s průběhem testu. Jednotlivé testy je možno v systému ukládat, jako kopii obrazovky. [3]

Test KI řídicím systémem není vhodný pro přesnou analýzu výsledků. Pro změření skutečného průběhu KI nejsou získané hodnoty ze systému dostačující, test podává informace pouze o správném nastavení regulačních obvodů pohonů.

3.7 Zkušební obrobek

Dalším způsobem, jak zjistit přesnost nejen kruhové interpolace, ale i výrobní přesnosti obráběcího stroje je obrobení zkušební obrobku a proměřením výkyvů rozměrů zkušební obrobku na CMM (souřadnicový měřicí stroj).

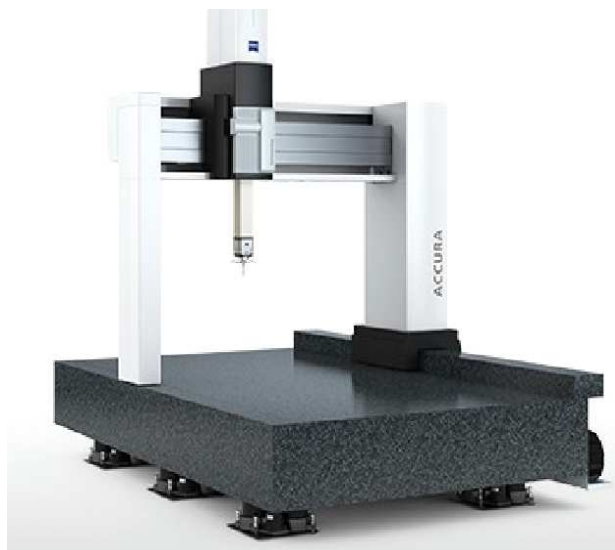
Zkušební obrobky se mohou lišit, existuje mnoho zkušebních obrobků. Výrobci OS používají vlastní obrobky ale i zákazníci si mohou navrhnout svůj zkušební obrobek (např. přímo pro KI). Zkušební obrobek by měl testovat stroj ve všech osách, i pro případ vzájemného působení os. Přesnost KI je zjištěna na kruhovém osazení. Ukázka 3-D modelu zkušební obrobku, který používá firma Toshulin je na Obr. 3.14 v izometrickém pohledu. [3]



Obr. 3.14 3-D model zkušební obrobku pro pracovní přesnost [3]

Pro obrobení zkušební obrobku je třeba sestavit NC program. Materiál obrobku volíme podle stroje, ale důležitým kritériem je cena. Na obrobení můžeme použít i více nástrojů.

Pro měření zkušební vzorku je ideální použít MMC např. od společnosti ZEISS na Obr. 3.15 pro maximální přesnost a rychlost. Méně vhodné jsou pak standardní měřicí přístroje např. mikrometr a hloubkoměr.



Obr. 3.15 Měřicí zařízení ZEISS ACCURA [12]

Způsob analýzy KI pomocí zkušební obrobku je vhodný pro malé stroje. Spotřeba materiálu při použití na velkých strojích je příliš nákladná. Další problém je s manipulací a změřením rozměrného vzorku. Výhodou je, že stroj vykonává KI v zatíženém stavu a podává lepší informaci o chování stroje. Zkušební obrobky se používají pro měření více parametrů, jde tedy o komplexnější test stroje.

3.8 Mikrometrický odpich

Slouží jak pro měření vnitřních rozměrů, tak k přenosu míry na třmenová měřidla a také k měření od pomocných základen. Běžně se používají odpichy pevné, vysouvací, mikrometrické a skládací, který je na Obr. 3.16.



Obr. 3.16 Mikrometrický odpich skládací digitální [13]

Mikrometrický odpich slouží pro měření vnitřních rozměrů. Měřicí rozsah lze rozšiřovat kombinací jednotlivých nastavných tyčinek. Nastavná tyčinka je chráněna trubkou, která se připevňuje k mikrometrické hlavici. [13]

Měření je zdlouhavé a při testu KI by vyžadovalo příliš mnoho vyráběných dílů, v podstatě výroba vlastního měřidla ballbar velkých rozměrů. Mikrometrické odpichy se spíše hodí pro statická měření.

Přesnost měření mikrometrickými odpichy závisí především na nastavení odpichu na jmenovitý rozměr, popř. na kalibraci odpichu. Značné ovlivnění přesnosti měření nastává změnou okolní teploty ale i samotným provedením zkoušky. Dále pak pružnými deformacemi, pro jejichž eliminaci se odpichy do délky 2000 mm podepírají v tzv. Besselových bodech, u rozměrů nad 2000 mm je podložení v Besselových bodech nepohodlné, proto je nutné dodržet zásadu, že odpich je podkládán ve stejných bodech při nastavování v délkoměru i při vlastním měření. Rozlišovací schopnost odpichu je 1 μm a dovolená chyba U_{odpich} dle vztahu (3.1) je např. pro měřený rozměr 1550 mm 41 μm .

$$U_{\text{odpich}} = \pm \left(3 + n_{\text{dilu}} + \frac{L_{\text{max}}}{50} \right) = 41 \mu\text{m} \quad (3.1)$$

$n_{\text{dilu}} = 7$... počet nástavců

$L_{\text{max}} = 1550 \text{ mm}$... měřený rozměr

4 Laser tracker LEICA

Kapitola popisuje základní funkce a vlastnosti laser trackeru (LT) AT 901 od společnosti LEICA, který bude použit pro měření kruhové interpolace (KI) velkých průměrů.

4.1 Princip měření

Základní princip měření je stejný jako u LT popsaném v rešerši. Koncové zařízení je detekováno laserovým paprskem z hlavy LT, měří se vzdálenost a dva úhly. Na každém koncovém zařízení je detekční zrcátko, nebo reflektor (koutový odražeč), mezi nímž a LT musí být přímá viditelnost. Při náhodném přerušení laserového paprsku v průběhu měření je možnost po opětovném navázání paprsku pokračovat v měření, ale s větší nejistotou měření. [4]

4.2 Popis systému

LT LEICA AT901 na Obr. 4.1 a Obr. 4.2 je mobilní optické zařízení, které vypočítává 3D-polohu reflektoru z horizontálního úhlu, vertikálního úhlu a vzdálenosti. Měření úhlů se provádí pomocí IRC snímačů s vysokým rozlišením. Vzdálenost se měří pomocí laserového interferometru (IFM) a absolutního délkoměru (ADM), které jsou integrovány do společného modulu s názvem absolutní interferometr (AIFM). Laserový paprsek je vychýlený sklopným zrcadlem do vstupu reflektoru. Odražený paprsek je snímán přijímačem a dvouosým fotosenzorem (PSD). Rozdíly PSD hodnot umožňují sledovací schopnost LT.

LT dokáže shromažďovat 3D souřadnice třemi způsoby: sledováním reflektoru, sledováním Leica T-Probe (ručního přenosného bezdrátového kontaktního snímače) nebo sledováním Leica T-Scan (bezkontaktního vysokorychlostního skeneru). Která měřící metoda bude použita, závisí na měřené aplikaci.

LT je složen z tripodu robustní konstrukce, z monobloku, na kterém je rychlým uvolňovacím mechanismem připojen snímač, tím je dosaženo spolehlivé stability, což je základ pro přesná měření. V každém okamžiku je odečítáno velké množství naměřených dat, které jsou korigovány podle

aktuálních vnějších vlivů. Teplotní vlivy jsou navíc korigovány připojenou meteostanicí.



Obr. 4.1 Laser tracker LEICA AT901 [4]



Obr. 4.2 Zjednodušený 3-D model laser trackeru LEICA AT901

Celý systém včetně kontroléru, kompletního příslušenství a kabeláže je umístěn v jediném transportním kufříku. LT lze ale provozovat i bez stojanu, lze ho například umístit i na měřeném dílu. [4]

4.3 Technické parametry

V Tab. 4.1 jsou uvedeny některé základní technická specifika LT LEICA AT 901 a použitých reflektorů.

Tab. 4.1 Technické parametry LEICA AT 901 [4]

Název	Hodnota	Jednotka
Velikost snímače	620 x 290 x 240	mm
Hmotnost	22	kg
Výška základu (tripod)	810	mm
Hmotnost tripodu	16	kg
Rozsah provozních teplot	0 až 40	°C
Měřicí rozsah IFM	0 až 40	m
Měřicí rozsah ADM	1 až 80	m
Měřicí rozsah horizontálního úhlu	360	°
Měřicí rozsah vertikálního úhlu (360° v horizontálním nastavení)	± 45	°
Přesnost měření vzdálenosti IFM	± 0,5	μm/m
Přesnost měření úhlu v prostoru 2,5 x 5 x 10 m	± 10 + 5	μm + μm/m
Rozsah úhlu vstupního laserového paprsku do reflektoru CER (CATEYE)	± 60	°
Rozsah úhlu vstupního laserového paprsku do reflektoru RRR 0.5	± 30	°
Přesnost reflektoru CER (CATEYE)	± 5	μm
Přesnost reflektoru RRR 0.5	± 2	μm

Přesnosti pro měření vzdálenosti uvedené v Tab. 4.1 jsou uvažovány při statickém měření. Dynamická přesnost měření (za pohybu) není přesně stanovena výrobcem, ale z dynamického testování LT v [5] je stanovena přibližně 2 až 4-krát větší než pro statická měření. [5]

4.4 Řídicí jednotka

ATController je řídicí jednotka LT. Obsahuje systémy pro ovládání, stejně jako potřebnou elektroniku k dekodování signálu z LT a jejich číselnou interpretaci. Obsahuje vlastní operační systém a firmware, který tvoří rozhraní mezi LT a měřicím softwarem. Systém, který běží v ATControlleru, se nazývá emScon a pomocí vhodného rozhraní dokáže ovládat všechny základní funkce trackeru. [4]

4.5 Reflektor

Reflektor (koutový odražeč) je zařízení zpravidla kulovitého tvaru přesných rozměrů, které v sobě obsahuje systém zrcadel nebo jiných odrazových ploch sloužících k odrazení přijatého laserového paprsku zpět do LT. Při tomto měření je odečten vždy jeden bod. Existuje několik druhů reflektorů, které se liší velikostí, použitým materiálem, odolností vůči pádu a podobně. Pro běžné měření se používá reflektor RRR na Obr. 4.3 různých rozměrů. Pro větší rozsah vstupního úhlu do reflektoru se používá reflector „cateye“ (CER) na Obr. 4.4, který je tvořen přesnou skleněnou polokoulí a odrazivou kulovou plochou uvnitř reflektoru. [4]



Obr. 4.3 Reflektor RRR 0.5 [4]



Obr. 4.4 Reflektor CER [4]

4.6 Bezpečnostní předpisy

Znalost funkce senzoru je základem pro bezpečné měření se systémem. Bezpečnostní štítek na senzoru upozorňuje operátora na zdroje nebezpečí, na které je nutné brát ohled během měření.

Laserový paprsek může způsobit poranění při přímém nebo nepřímém kontaktu s okem. Je vhodné se vyhýbat očnímu kontaktu s optickým otvorem. V Tab. 4.2 jsou uvedeny některé základní bezpečnostní specifika LT LEICA AT901 [4]

Tab. 4.2 Bezpečnostní specifika LEICA AT901 [4]

Bezpečnostní třída laseru	IEC 60825-1
Zdroj laseru	Laserová dioda
Vlnová délka	633/795 nm (viditelný/IR)
Maximální výkon	0,3 mW
Režim operace	pulzní

5 Kruhová interpolace dle ČSN ISO 230

Zásady a vyhodnocení měření přesnosti KI jsou dány normou ČSN ISO 230-4. Existují i další normy pro její měření, např. v USA jsou to normy ASME B5.54, ASME B5.57 a v Japonsku používaná norma JIS B6194. V této práci bude použita pouze norma ISO 230-4.

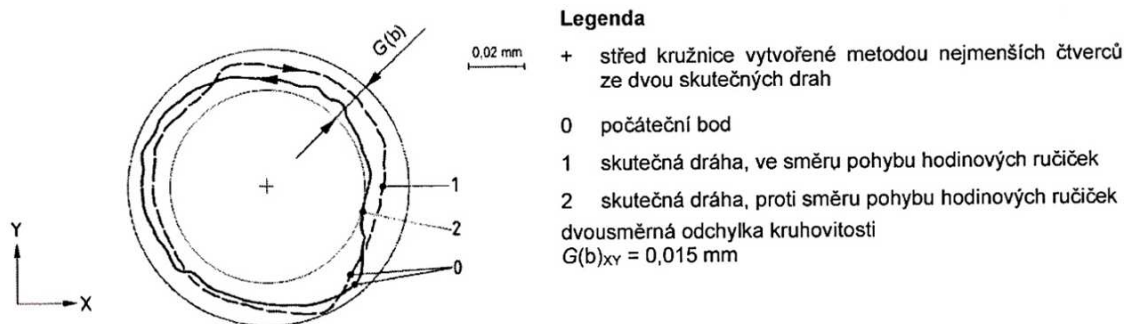
Norma ČSN ISO 230-4 je českou verzí mezinárodní normy ISO 230-4: 2005. Tato část ČSN ISO 230-4 specifikuje metody zkoušek a vyhodnocení dvousměrné odchylky kruhovitosti, odchylky kruhovitosti, průměrné dvousměrné radiální odchylky a radiální odchylky kruhové dráhy, která je tvořena současným pohybem ve dvou lineárních osách (v jedné ose sin průběh a ve druhé ose cos průběh). Tato část normy je zaměřena na vyhodnocení dat z měření KI na CNC strojích a na vlivy odchylek stroje na kruhovou dráhu.

5.1 Vyhodnocení měření

Číslicově řízená a naprogramovaná kruhová trajektorie, která by měla být při pohybu stroje vykonávána, se nazývá jmenovitá dráha. Tato kruhová trajektorie je tvořena přesnou kružnicí. Dráha vytvářená strojem ve snaze co nejpřesněji sledovat naprogramovanou jmenovitou dráhu je skutečná dráha. Skutečná dráha se liší od jmenovité dráhy vlivem nedokonalosti stroje, nepřesně vyrobených součástí stroje, nebo špatně naladěných pohonů atd.

5.1.1 Dvousměrná odchylka kruhovitosti $G(b)$

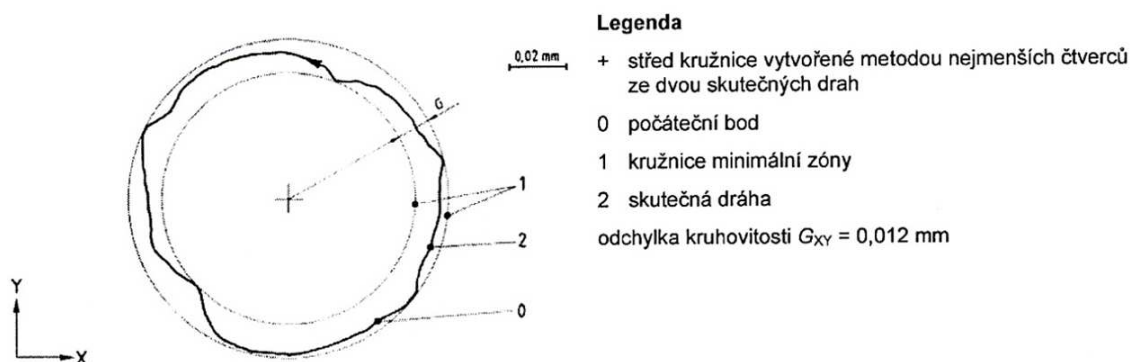
Dvousměrná odchylka kruhovitosti je minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic ohraničujících dvě skutečné dráhy, kde jedna je tvořena pohybem po směru hodinových ručiček (cw) a druhá proti směru (ccw), jak je patrné na Obr. 5.1. [1]



Obr. 5.1 Dvousměrná odchylka kruhovitosti [1]

5.1.2 Odchylka kruhovitosti G

Odchylka kruhovitosti na Obr. 5.2 je minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic ohraničujících skutečnou dráhu ve směru nebo proti směru pohybu hodinových ručiček (cw a ccw) vrstevnicové dráhy a která může být vyhodnocena jako maximální radiální rozsah okolo kružnice vytvořené pomocí metody nejmenších čtverců. [1]



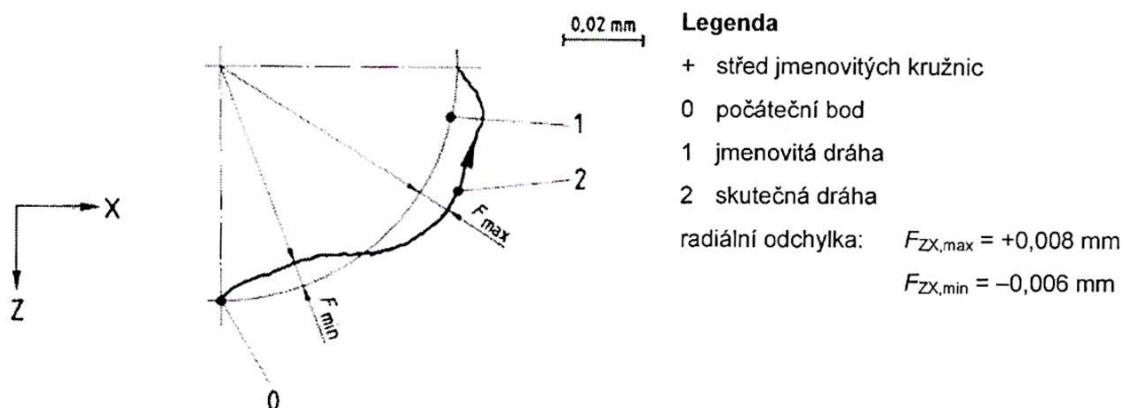
Obr. 5.2 Odchylka kruhovitosti pro směr ccw [1]

5.1.3 Průměrná dvousměrná radiální odchylka D

Průměrná dvousměrná radiální odchylka je odchylka mezi poloměrem jmenovité dráhy a poloměrem kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců dvou úplných kružnic skutečných drah, kde jedna dráha je provedena pohybem ve směru hodinových ručiček a druhá proti (cw a ccw). [1]

5.1.4 Radiální odchylka F

Radiální odchylka je odchylka mezi skutečnou dráhou a jmenovitou dráhou viz. Obr. 5.3. Střed jmenovité dráhy se stanoví měřením na stroji, nebo vhodným programem. Vyhodnocuje se maximální radiální odchylku od jmenovité dráhy směrem ke středu kružnice F_{\min} a maximální odchylku od jmenovité dráhy ve směru od středu kružnice F_{\max} . [1]



Obr. 5.3 Radiální odchylka [1]

5.2 Podmínky zkoušky

5.2.1 Zkušební prostředí

Pokud je možné regulovat teplotu prostředí, musí být nastavena na 20°C. Jinak musí být výstup z měřicího přístroje a jmenovité odečítání stroje nastaveny tak, aby dávaly výsledky opravené na 20° C (pouze pro měření radiální odchylky). [1]

5.2.2 Zkoušený stroj

Stroj musí být kompletně sestaven a připraven k používání. Všechny vyrovnání nezbytné k funkci stroje a funkční zkoušky musí být dokončeny před začátkem zkoušky KI. Všechny zkoušky KI musí být provedeny v nezatíženém stavu stroje, kdy na stroji není obrobek. [1]

5.2.3 Ohřátí stroje

Zkoušce KI musí předcházet vhodný proces ohřátí stroje daný výrobcem stroje, nebo dle domluvy všech zúčastněných stran.

Pokud nejsou žádné specifikace podmínek, je nutno omezit pohyby stroje pouze na pohyby potřebné pro seřízení měřicího přístroje. [1]

5.3 Parametry zkoušky

Pro prezentaci výsledků je vhodné uvádět tyto parametry zkoušky [1]:

- a) Poloměr, nebo průměr jmenovité dráhy KI
- b) Rychlost výsledného posuvu
- c) Smysl pohybu – ve směru cw, nebo ccw
- d) Souřadné osy, ve kterých je vykonáván pohyb KI
- e) Umístění přístroje v pracovním prostoru stroje
- f) Teplota (prostředí, měřicího přístroje a stroje)
- g) Způsob sběru dat
- h) Jakýkoliv způsob použité kompenzace v průběhu zkušebního cyklu
- i) Poloha ostatních pohyblivých částí stroje v osách, které nejsou zkoušeny

5.4 Vliv odchylek stroje na kruhové dráhy

Zde jsou uvedeny některé základní vlivy typických odchylek stroje na kruhový pohyb.

Případnou chybu odměřování lze identifikovat dlouhým nebo krátkým pohybem v ose X nebo Y, vznikne tak trajektorie připomínající elipsu než kružnici viz. Obr. 5.4.

Chyba kolmosti v pohybových osách X a Y se projeví změnou kruhové dráhy na eliptickou s osami skloněnými pod úhlem $\pm 45^\circ$, jak je znázorněno na Obr. 5.5.

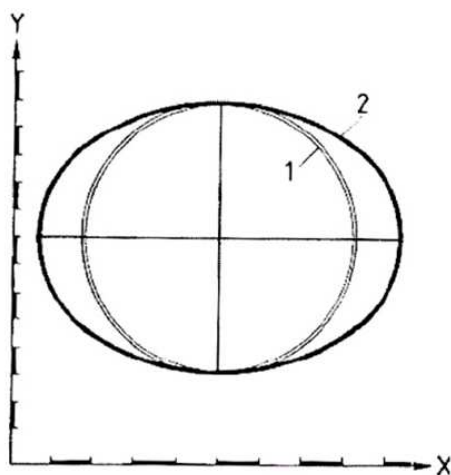
Vliv periodické odchylky se projeví dle obr. 5.6, pro periodickou odchylku polohy v ose Z. Tvar dráhy není eliptický.

Axiální chyba reverzace způsobuje „schody“ v bodech reverzace způsobené mrtvým chodem. Obr. 5.7 ukazuje tvar vzniklý při pohybu ccw.

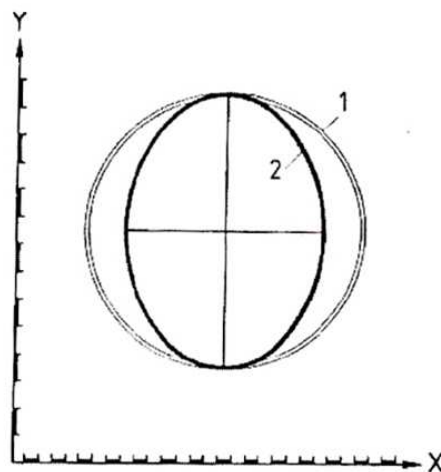
Chyba časového zpoždění, nebo vůle pohonu způsobuje špičky v bodech reverzace, jak ukazuje Obr. 5.8.

Při zvětšování rychlosti posuvu se zvětšuje i zrychlení v osách. Při špatném chování pohonu se mohou průměry drah zmenšovat od průměru jmenovité dráhy podle Obr. 5.9.

Nesprávné naladění zesílení polohové zpětné vazby se projeví skutečnou dráhou ve tvaru skloněné elipsy, nebo podle sledovaných zúčastněných chyb dle Obr. 5.10. Při zvyšování rychlosti posuvu, roste i odchylka od jmenovité dráhy. [1]



dlouhý pohyb v ose x

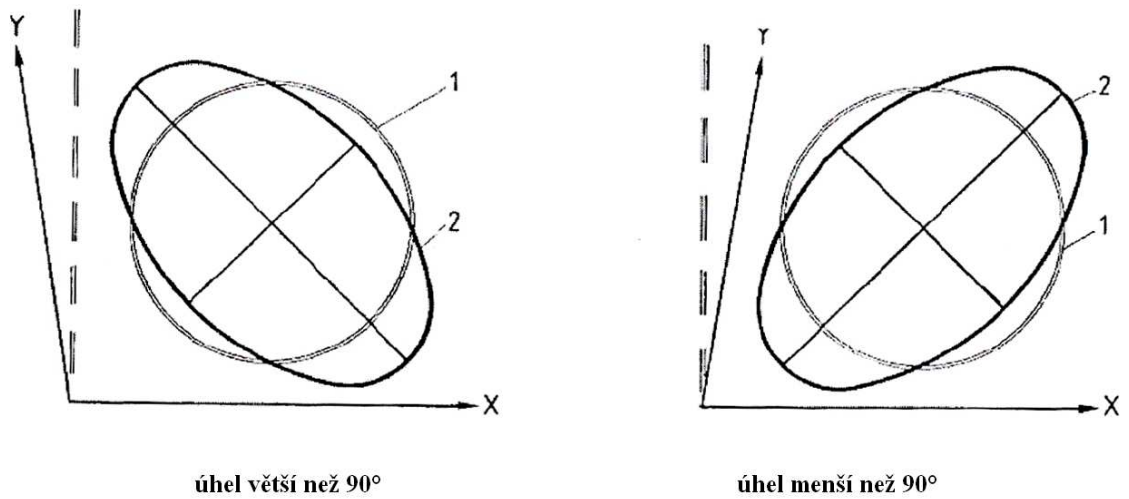


krátký pohyb v ose x

Legenda

- 1 jmenovitá dráha
- 2 skutečná dráha

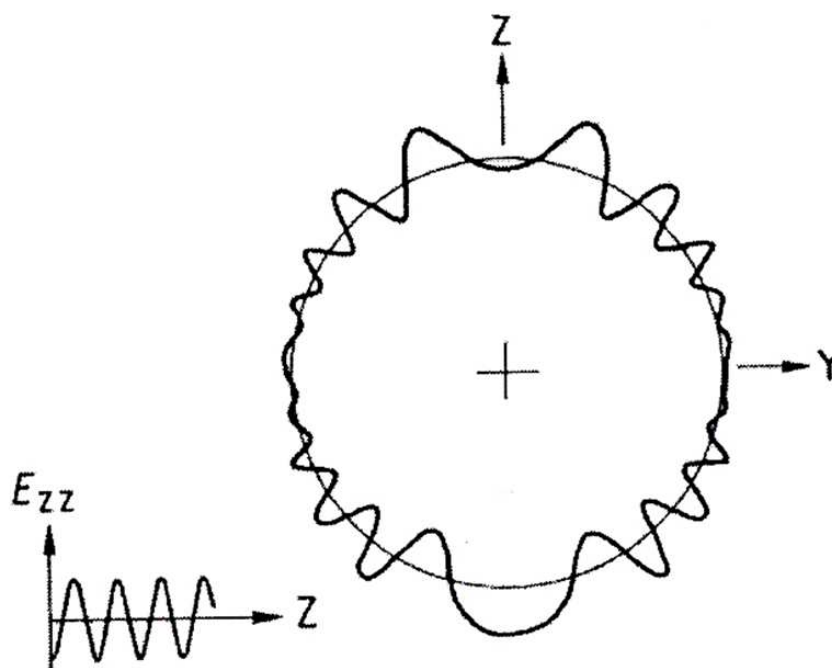
Obr. 5.4 Vliv krátkého a dlouhého pohybu v ose na kruhovou dráhu [1]



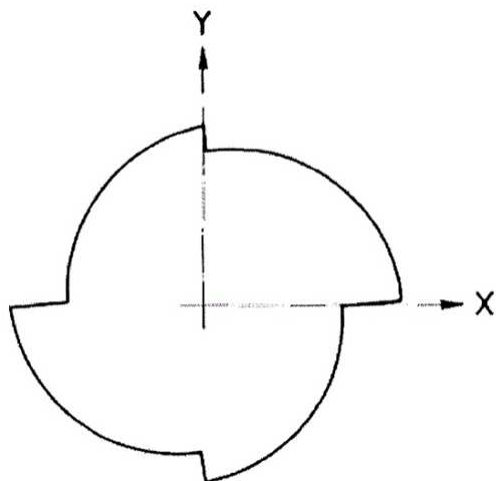
Legenda

- 1 jmenovitá dráha
- 2 skutečná dráha

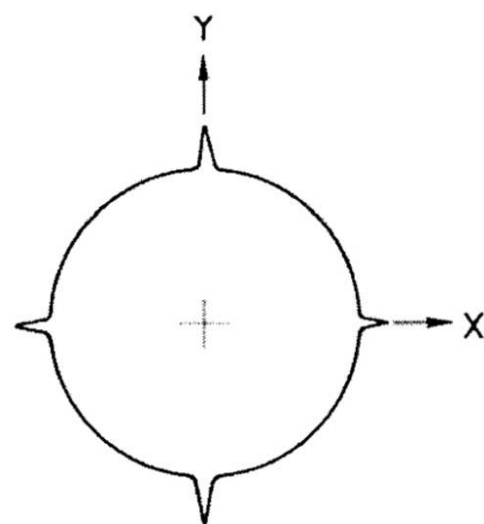
Obr. 5.5 Vliv nekolmosti os na kruhovou dráhu [1]



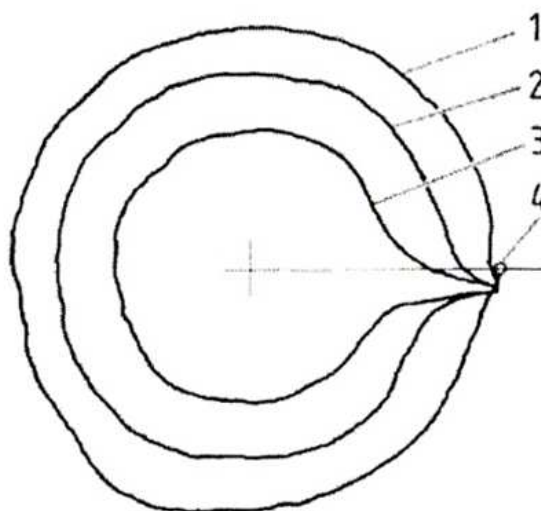
Obr. 5.6 Vliv periodické odchylky v ose Z [1]



Obr. 5.7 Schody způsobené chybou reverzace [1]



Obr. 5.8 Hroty v místech reverzace [1]

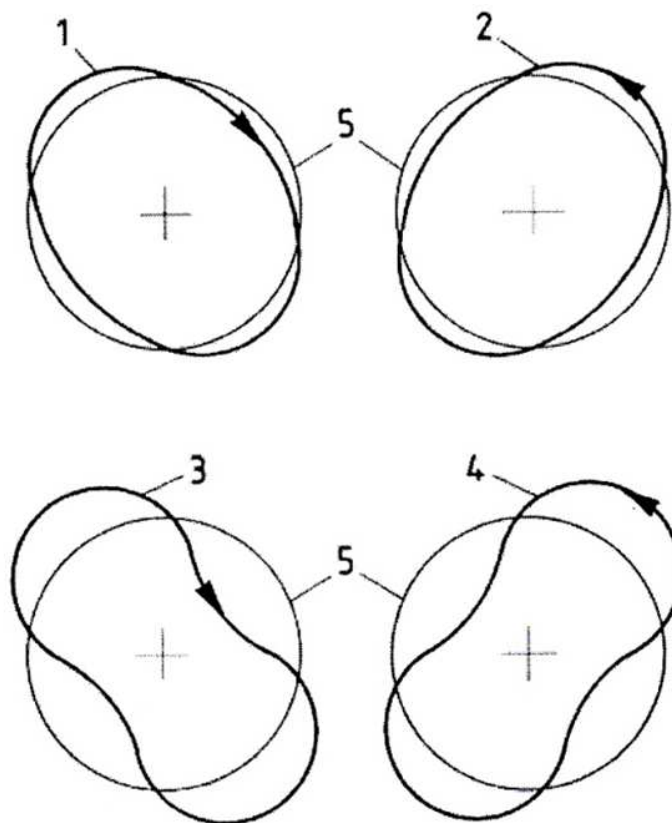


Legenda

Skutečné dráhy kruhových pohybů

- 1 s malou výslednou rychlostí posuvu
- 2 se střední výslednou rychlostí posuvu
- 3 s velkou výslednou rychlostí posuvu
- 4 počáteční a konečný bod

Obr. 5.9 Vliv zrychlení v osách [1]



Legenda

Skutečné dráhy s

- 1 malou výslednou rychlostí posuvu při pohybu ve směru pohybu hodinových ručiček
- 2 malou výslednou rychlostí posuvu při pohybu proti směru pohybu hodinových ručiček
- 3 velkou výslednou rychlostí posuvu při pohybu ve směru pohybu hodinových ručiček
- 4 velkou výslednou rychlostí posuvu při pohybu proti směru pohybu hodinových ručiček
- 5 jmenovitou dráhou

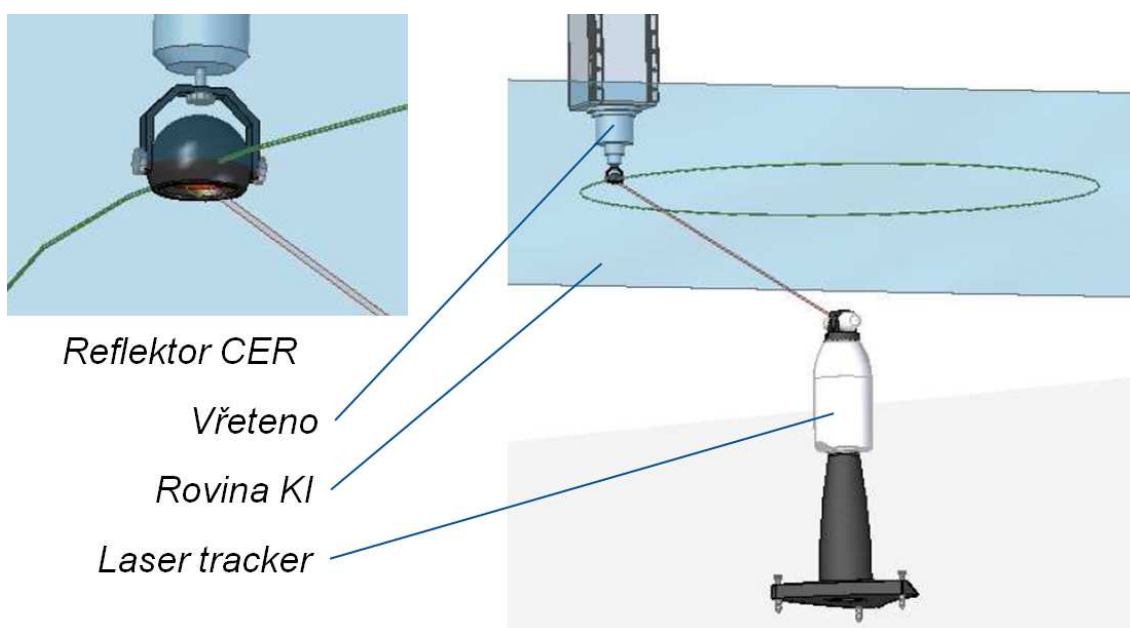
Obr. 5.10 Vliv rozdílných sledovaných chyb [1]

6 Návrh strategií měření

Varianty jsou navrženy a zobrazeny pro vykonávání KI v rovině X, Y. Pro test KI v jiných rovinách je nutno snímač LT natočit do roviny KI pomocí naklápěcího zařízení, nebo ustavit jiným způsobem.

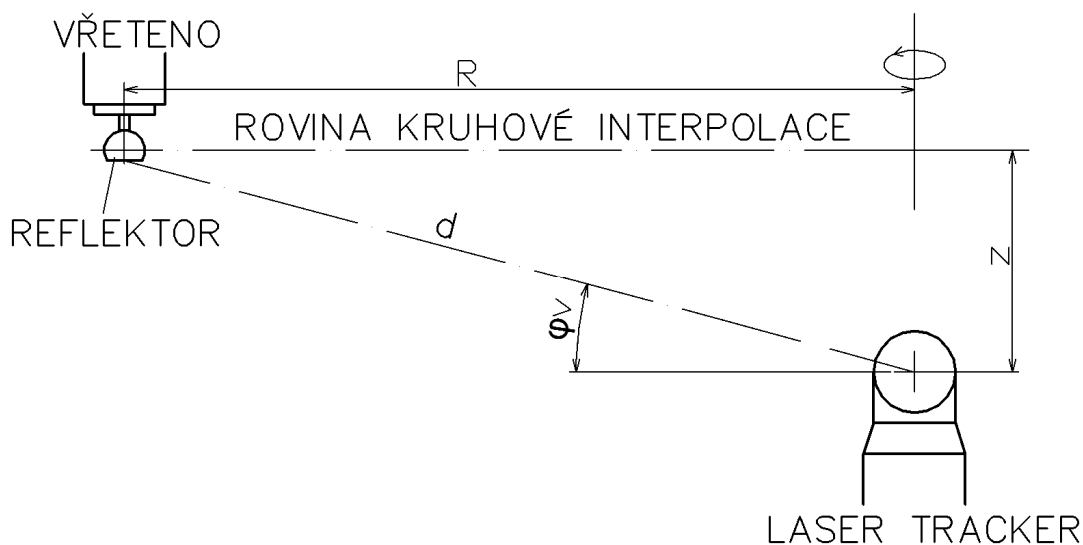
6.1 Varianta 1

LT je umístěn ve středu KI. Reflektor je upnut v držáku ve vřetenu stroje tak, aby vstup do reflektoru směřoval dolů kolmo k zemi viz Obr. 6.1. V této variantě je použit reflektor CER, z důvodu většího rozsahu vstupního úhlu ($\pm 60^\circ$) do reflektoru pro laserový paprsek. Vřeteno musí být nad hlavou LT vzdáleno o hodnotu z , která umožňuje vstup laserového paprsku do reflektoru a zároveň je v rozsahu naklonění hlavy LT, odkud vychází laserový paprsek.



Obr. 6.1 3-D model měření varianty 1

Vřeteno vykonává KI a LT odměřuje vzdálenost d , vertikální úhel φ_v a horizontální úhel φ_h . Z naměřených hodnot jsou v programu vypočítány vyhodnocované parametry podle normy ČSN ISO 230-4.



Obr. 6.2 Schéma měření varianty 1

z ... Vzdálenost vřetena nad osou LT

R ... Poloměr KI

φ_v ... Odměřený vertikální úhel hlavy LT (v rozsahu 30° až 45°)

d ... měřená vzdálenost

Problém je s přesným ustavením LT do středu KI, může být vyřešen odměřením krajních bodů KI a posunutím středu KI stroje na střed měření LT. Další možnost je v programu aproximovat naměřené hodnoty kružnicí, zjistit střed a vyhodnotit naměřené hodnoty vzhledem k tomuto středu.

Tato varianta potřebuje velký zdvih vřetena v ose Z (kolmo na rovinu KI). LT má výšku bez podstavce 620 mm a k této výšce je připočtena hodnota z, v závislosti na měřeném poloměru (např. 1500 mm) je hodnota z cca 870 mm, pro minimální úhel φ_v , stroj musí mít minimální zdvih v ose Z = 1490 mm. Výhodou je, že vřeteno se nemusí otáčet a nevnáší chybu do měření.

6.1.1 Postup zkoušky

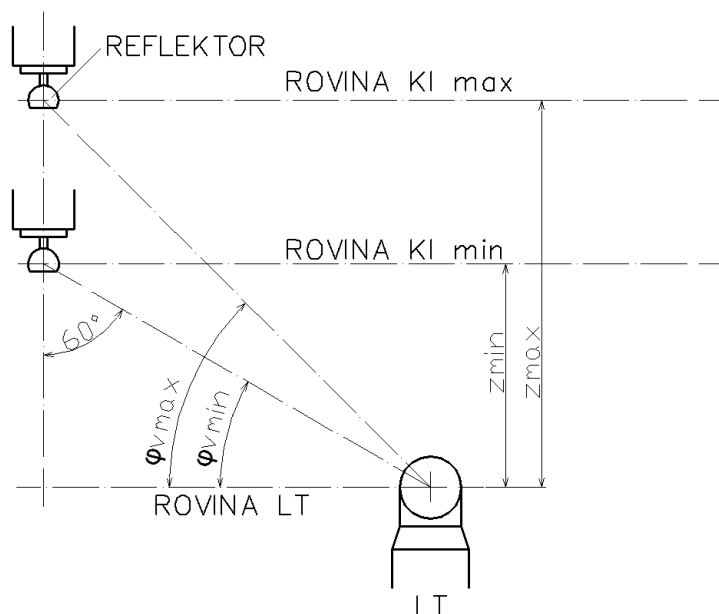
Zjednodušený popis postupu zkoušky KI podle navržené varianty 1 a popis vyhodnocení zkoušky.

S vřetenem se najede do středu KI.

Do vřetena se upne držák s reflektorem CER natočený směrem dolů.

S vřetenem se vyjede v ose Z o vzdálenost vyšší než výška LT, aby se vešel pod vřeteno s upnutým reflektorem.

LT je nutno ustavit do středu KI pod vřeteno. Přesnost ustavení vychází z omezeného rozsahu měření vertikálního úhlu φ_v . Maximální vstupní úhel do reflektoru je 60° , po přepočtu na hlavu LT je dán minimální vertikální úhel 30° , pod kterým se přeruší signál s reflektorem. Maximální natočení hlavy LT ve vertikální rovině je 45° . Rozsah je 30° až 45° jak znázorňuje Obr. 6.3. Výpočet přesnosti ustavení je následující.



Obr. 6.3 Rozsah měření vertikálního úhlu

Pro daný poloměr KI je volen počáteční vertikální úhel φ_{v0} v rozsahu φ_{vmin} až φ_{vmax} (30° až 45°).

Ze zvolených parametrů je vypočten zdvih vřetena z podle (6.1), nad hlavou LT.

$$z = R \cdot \tan \varphi_{v0} \quad (6.1)$$

Z hodnoty z lze dopočítat skutečný poloměr R_{1us} (6.2) změněný vlivem změny skutečného vertikálního úhlu φ_{v1} (vlivem nepřesného ustavení LT), který se musí pohybovat v daném rozsahu.

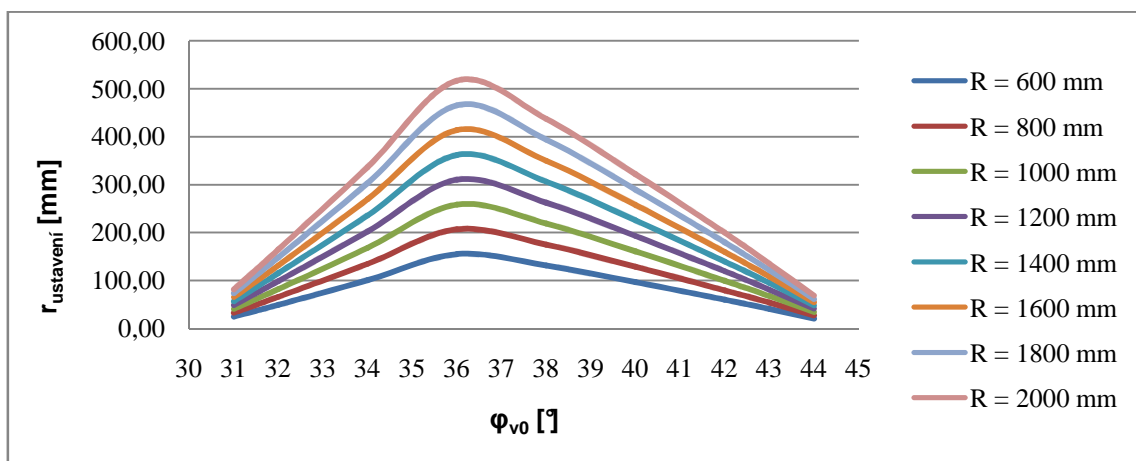
$$R_{1us} = \frac{z}{\tan \varphi_{v1}} \quad (6.2)$$

Pro výpočet přesnosti ustavení je nutné znát skutečný vertikální úhel φ_{v2} (6.3) na opačné straně, který se zmenšuje při zvětšujícím se úhlu φ_{v1} , úhel φ_{v2} též nesmí opustit rozsah 30° až 45°:

$$\varphi_{v2} = \arctan \frac{z}{2 \cdot R - R_{1us}} \quad (6.3)$$

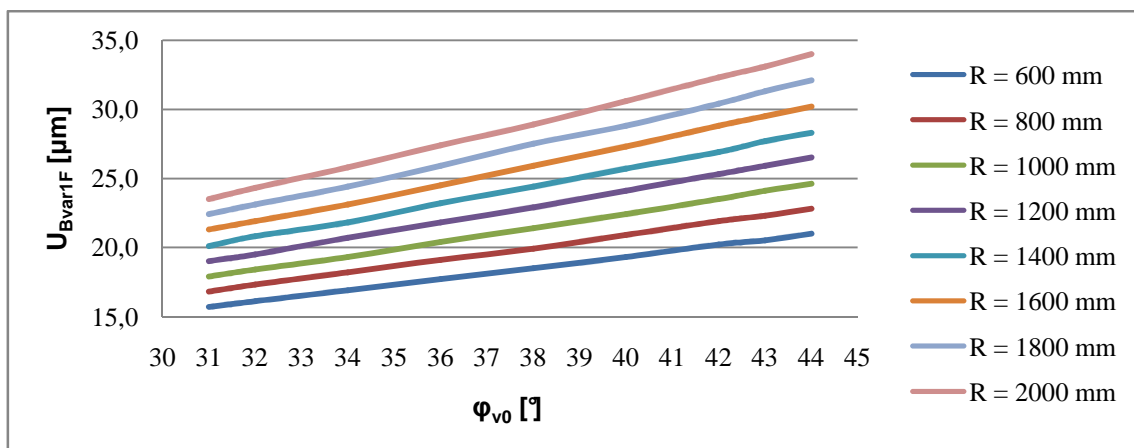
Maximální poloměr přesnosti ustavení LT od středu KI se stanoví jako rozdíl skutečného poloměru R_{1us} a jmenovitého poloměru R za podmínky, že úhel φ_{v2} konverguje hodnotu 30° zhora, nebo konverguje hodnotu 45° zdola, to zajišťuje maximální možný rozsah ustavení. Hodnota poloměru R_{1us} musí odpovídat nalezenému úhlu φ_{v2} splňujícímu podmínku. Hodnota $r_{ustaveni}$ je poloměr kružnice se středem ve středu KI, ve které musí být ustaven LT. Hodnoty přesnosti ustavení $r_{ustaveni}$ (6.4) pro různé zvolené hodnoty jmenovitého poloměru R a počátečního úhlu φ_{v0} jsou patrné na Obr. 6.4.

$$r_{ustaveni} = R - R_1 \quad (6.4)$$



Obr. 6.4 Požadovaná přesnost ustavení LT od středu KI v závislosti na počátečním úhlu φ_{v0}

Z grafu na Obr. 6.4 je patrné, jak ovlivní volba počátečního vertikálního úhlu φ_{v0} požadovanou přesnost ustavení LT od středu KI pro vybrané poloměry KI.



Obr. 6.5 Nejistota stanovení radiální odchylky varianty 1 v závislosti na úhlu ϕ_{v0}

V grafu na Obr. 6.5 je zobrazen vliv volby počátečního vertikálního úhlu ϕ_{v0} na nejistotě radiální odchylky U_{Bvar1F} pro vybrané poloměry KI. U_{Bvar1F} je zjištěna programem nejistotyvar1.m přiloženém v elektronické příloze. Volba počátečního vertikálního úhlu ϕ_{v0} by měla být co nejmenší vzhledem k přesnosti ustavení LT.

Vřeteno se přestaví do polohy počátečního bodu KI podle zvoleného poloměru. Vřeteno je vzdáleno o hodnotu z nad hlavou LT, která je měřena od nulové hodnoty vertikálního úhlu hlavy LT.

Po vyjetí vřetena o hodnotu z je nutné zkontrolovat příjem odraženého laserového paprsku do snímače z reflektoru CER. Správnou funkci indikuje zelená LED světelná signalizace. Po kontrole je možné spustit měření na LT. LT odměřuje vzdálenost d, vertikální úhel ϕ_v a horizontální úhel ϕ_h .

Na stroji se musí spustit test KI pro předem dohodnuté parametry zkoušky, pokud na stroji nelze spustit test KI, musí se sestavit NC program podobný NC programu ve variantě 2, s tím rozdílem, že vřeteno nerotuje ve vazbě na KI. Laserový paprsek nesmí být přerušen během celého procesu testu KI (zelená LED světelná signalizace).

Po skončení testu KI je nutno ukončit odměřování snímače LT.

Naměřené hodnoty musí být uloženy, nebo přeneseny do složky s programem na vyhodnocení měření. Naměřené hodnoty jsou uloženy ve formátu mat-file, se kterým matlab přímo komunikuje. Popřípadě mohou být uloženy jako textový soubor.

Program na vyhodnocení měření načte naměřená data jako matici a separuje z matice vektor naměřené vzdálenosti d , vektor naměřeného horizontálního úhlu φ_h a vektor naměřeného vertikálního úhlu φ_v .

Po startu testu KI stroj objede kruhovou dráhu s přejezdy 45° . Program vyhodnocuje KI pouze z hodnot bez přejezdů z důvodu eliminace chyby vnášející do měření rozběh a doběh stroje při KI. Vzdálenost d_1 je tedy uvažována pro horizontální úhel φ_h od 45° do 225° , to samé platí i pro vertikální úhel φ_{v1} . LT musí být ustaven co nejpřesněji do středu KI, z důvodu lepšího separování vektorů z naměřených dat podle horizontálního úhlu φ_h , protože je vyhodnocován celý kruhový oblouk není tato chyba zásadní pro vyhodnocení odchylek.

Vzdálenost d se přepočítá do roviny KI na poloměr R_1 dle (6.5).

$$R_1 = d_1 \cdot \cos \varphi_{v1} \quad (6.5)$$

Z poloměru R_1 a horizontálního úhlu φ_h jsou získány souřadnice X_{ch} a Y_{ch} pro každý bod měření (6.6) a (6.7).

$$X_{ch} = R_1 \cdot \cos \varphi_h \quad (6.6)$$

$$Y_{ch} = R_1 \cdot \sin \varphi_h \quad (6.7)$$

Pomocí metody Landau je ze souřadnic X_{ch} a Y_{ch} nalezena skutečná poloha LT x_c a y_c od středu KI. Metoda Landau aproximuje naměřené přepočtené hodnoty kružnicí, jejíž střed by měl být střed KI.

Landauův algoritmus je široce využíván v praxi díky své rychlosti a stabilitě. Srovnání různých metod aproximace a jejich popis viz [6].

Od hodnot souřadnic X_{ch} a Y_{ch} je odečten zjištěný střed x_c a y_c a výsledné hodnoty jsou přepočteny zpět na poloměr R_g (6.8) a horizontální úhel φ_g (6.9). Tyto hodnoty vyjadřují skutečnou změřenou dráhu přepočtenou na střed kruhové interpolace.

$$R_g = \sqrt{(X_{ch} - x_c)^2 + (Y_{ch} - y_c)^2} \quad (6.8)$$

$$\varphi_g = \arctan \frac{Y_{ch} - y_c}{X_{ch} - x_c} \quad (6.9)$$

Odchylna kruhovitosti G (6.10) je stanovena z poloměru R_g jako rozdíl z maximální a minimální hodnoty vektoru R_g .

$$G = \max(R_g) - \min(R_g) \quad (6.10)$$

Radiální odchylka F (6.11) a (6.12) je stanovena jako rozdíl maximálního a minimálního poloměru R_g od jmenovitého poloměru R .

$$F_{min} = R - \min(R_g) \quad (6.11)$$

$$F_{max} = \max(R_g) - R \quad (6.12)$$

Odchylky se vyhodnotí v jednom směru (ccw) a následně ve druhém směru (cw). Dvousměrná odchylka kruhovitosti $G(b)$ se vyhodnotí z dat naměřených v obou směrech stejným způsobem jako odchylka kruhovitosti. Průměrná dvousměrná radiální odchylka D (6.13) je stanovena jako rozdíl poloměru R_n zjištěného metodou Landau z naměřených dat a jmenovitého poloměru.

$$D = R_n - R \quad (6.13)$$

6.1.2 Nejistoty

Nejistota měření je parametrem, který bezprostředně souvisí s výsledkem měření. Udává rozsah hodnot, v němž lze s jistou pravděpodobností předpokládat výskyt skutečné hodnoty měřené veličiny. Nejistota postihuje všechny nedokonalosti stanovení výsledku měření. [14]

Nejistota typu A

Výpočet je založen na statistické analýze naměřených dat. Jde o statistické zpracování dat získaných opakovanými měřeními za stejných podmínek a nezávislých navzájem. Nejistota typu A se vypočte ze vzorce (6.14).

$$u_{Avar1} = k \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n(n-1)}} \quad (6.14)$$

k ... koeficient závislý na počtu opakovaných měření, uveden v Tab. 6.1

Tab. 6.1 Koeficient závislý na počtu opakování [14]

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7

x_i ... i -té měření

\bar{x}_i ... průměr ze všech měření

n ... počet měření

Výsledný interval $\pm u_{Avar1}$ definuje pravděpodobnost skutečné měřené veličiny přibližně 60 %, a proto je zaveden koeficient rozšíření k_r . V případě normálního rozdělení výsledků měření odpovídá $\pm U_{Avar1}$ (6.15) pravděpodobnosti 95 % hodnota $k_r = 2$. [14]

$$U_{Avar1} = k_r \cdot u_{Avar1} \quad (6.15)$$

Nejistoty typu A je možné stanovit až po skončení měření, a proto pro porovnání nejistot vybraných variant jsou použity pouze nejistoty typu B.

Nejistota typu B

Nejistoty typu B jsou vázány na známé, identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje. Výpočet vychází z úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině a jejích možných změnách. Možné zdroje nejistot jsou následující. [14]

Vybrané chyby měření varianty 1:

Nepřesnost reflektoru CER (6.16). U varianty 1 musí být použit reflektor typu CER, z důvodu maximálního naklonění hlavy LT φ_v max. 45°. Chyba u_{r1} je maximální odchylka, při skládání nejistot musí být uvažována v rozsahu \pm tedy poloviční. Hodnota je stanovena výrobcem.

$$u_{r1} = 5 \mu\text{m} \quad (6.16)$$

Nepřesnost měření vzdálenosti LT IFM (6.17). Měřená vzdálenost se během měření může měnit, např. vlivem ustavení LT. Pro započítání i největších měření je nutné počítat nejistotu z maximální naměřené hodnoty vzdálenosti.

$$u_{dR1} = u_d \cdot \max(d) \quad (6.17)$$

$u_d = \pm 0,5 \mu\text{m/m}$... přesnost měření vzdálenosti IFM
 $\max(d) = [\text{m}]$... maximální naměřená vzdálenost

Nepřesnost měření vertikálního úhlu v prostoru 2,5x5x10 m. Nepřesnost je udávána v μm jako kolmá odchylka na měřenou vzdálenost a to v nejvzdálenějším bodě. Hodnota nejistoty se musí přepočítat na nepřesnost

úhlu vztahem (6.18). Nejistota je největší při minimální naměřené vzdálenosti d , to je způsobeno vlivem zvětšujícího se naměřeného vertikálního úhlu, při němž vzdálenost d klesá, důkaz je v předchozí kapitole.

$$u_{\varphi v} = \arctan \frac{u_{\varphi v1}}{10^6 \cdot \min(d)} \quad (6.18)$$

$$u_{\varphi v1} = u_{\varphi v2} + u_{\varphi v3} \cdot \min(d) \quad (6.19)$$

$u_{\varphi v1} = [\mu\text{m}]$... nepřesnost měření vertikálního úhlu v prostoru 2,5x5x10 m (6.19)

$u_{\varphi v2} = \pm 10 \mu\text{m}$... základní nepřesnost měření vertikálního úhlu v 0 m

$u_{\varphi v3} = 5 \mu\text{m/m}$... nepřesnost na každý další m měřené vzdálenosti

$\min(d) = [\text{m}]$... minimální naměřená vzdálenost

Nepřesnost měření horizontálního úhlu v prostoru 2,5x5x10 m. Nepřesnost je udávána v μm jako kolmá odchylka na měřenou vzdálenost a to v nejvzdálenějším bodě. Hodnota nejistoty se musí přepočítat na nepřesnost úhlu vztahem (6.20). Nejistota je největší při maximální naměřené vzdálenosti d , čím větší vzdálenost, tím větší nepřesnost měření horizontálního úhlu.

$$u_{\varphi h1} = \arctan \frac{u_{\varphi h1}}{10^6 \cdot \max(d)} \quad (6.20)$$

$$u_{\varphi h11} = u_{\varphi h2} + u_{\varphi h3} \cdot \max(d) \quad (6.21)$$

$u_{\varphi h11} = [\mu\text{m}]$... nepřesnost měření horizontálního úhlu v prostoru 2,5x5x10 m (6.21)

$u_{\varphi h2} = \pm 10 \mu\text{m}$... základní nepřesnost měření horizontálního úhlu v 0 m

$u_{\varphi h3} = 5 \mu\text{m/m}$... nepřesnost na každý další m měřené vzdálenosti

$\max(d) = [\text{m}]$... maximální naměřená vzdálenost

Nepřesnost měření vlivem chyby přímocarosti pohybu stroje (6.22) vertikálně v rovině X, Y, ve které stroj vykonává Kl. Díky měřené vzdálenosti nakloněné pod vertikálním úhlem se projeví do celkové nejistoty i chyba přímocarosti pohybu stroje. Přímocarost měřeného stroje není předem známa a stanovení skutečné přímocarosti by zabralo příliš mnoho času měření, proto pro výpočet musí být užita maximální povolená hodnota povolena normou pro daný typ stroje podle ISO 10791-2. Nejistotu je nutno přepočítat do směru

měření vzdálenosti d , pro výpočet celkové nejistoty. Chyba u_{z1} je maximální odchylka, při skládání nejistot musí být uvažována v rozsahu \pm tedy poloviční.

$$u_z = \left(\sqrt{R^2 + \left(z + \frac{u_{z1}}{2000}\right)^2} - \sqrt{R^2 + z^2} \right) \cdot 1000 \quad (6.22)$$

$u_{z1} = 10 \mu\text{m}$... maximální možná chyba přímočarosti pohybu dle normy

$R = [\text{mm}]$... jmenovitý poloměr KI

$z = [\text{mm}]$... vzdálenost reflektoru (vřetena) od hlavy LT v ose Z

Vybrané chyby varianty 1 (6.23) jsou všechny přepočteny do směru měření vzdálenosti d , nebo měřených úhlů.

$$u_{Bvar1d} = \sqrt{\left(\frac{u_{r1}}{2}\right)^2 + u_{dR1}^2 + u_z^2} \quad (6.23)$$

Pro zjištění celkové nejistoty varianty 1 je nutno zohlednit vliv vstupních parametrů (chyb) při výpočtu vyhodnocovaných odchylek.

Pro stanovení nejistoty varianty 1 je použita metoda Monte Carlo. Do programu na zpracování a vyhodnocení měření jsou vnášeny náhodně generované hodnoty s normálním rozložením v rozsahu sečtených chyb odpovídající měřené veličině. Měřené parametry jsou uvažovány jmenovité bez chyb (ideální kružnice). Při dostatečném počtu cyklů metodou Monte Carlo je nejistota stanovena s velkou přesností. Při počtu cyklů větší než 500 se nejistota nemění na úrovni $0,1 \mu\text{m}$. Nejistota $u_{Bvar1Fs}$ se určí jako směrodatná odchylka ze všech cyklů.

Nepřesnost vlastního provedení zkoušky (6.24) stanovené ze zvyklostí. Nepřesnosti především vycházející z nezkušenosti obsluhy.

$$u_{cp} = \pm 2 \mu\text{m} \quad (6.24)$$

Celková nejistota typu B (6.25) vznikne kombinací všech uvažovaných nepřesností uvedených výše.

$$u_{Bvar1F} = \sqrt{u_{Bvar1Fs}^2 + u_{cp}^2} \quad (6.25)$$

Výsledný interval $\pm u_{Bvar1F}$ definuje pravděpodobnost skutečné měřené veličiny přibližně 60 %, a proto je zaveden koeficient rozšíření k_r . V případě normálního rozdělení výsledků měření odpovídá pravděpodobnosti 95 % hodnota $k_r = 2$. Rozšířená výsledná chyba varianty 1 $\pm U_{Bvar1F}$ je dle (6.26).

$$U_{Bvar1F} = k_r \cdot u_{Bvar1F} \quad (6.26)$$

Nejistota typu C

Nejistota typu C je kombinací rozšířených nejistot typu A a B. Lze ji stanovit až po skončení měření. Vypočte se ze vzorce (6.27).

$$U_{Cvar1F} = \sqrt{U_{Avar1}^2 + U_{Bvar1F}^2} \quad (6.27)$$

Nejistoty varianty 1 jsou uvažovány pouze pro statická měření. Nejistota měření vzdálenosti LT pro dynamická měření (za pohybu) není přesně stanovena, ale z dostupných zdrojů je možno uvažovat přibližně 2 až 4-krát větší než pro statická měření. [5]

Při simulaci výpočtu nejistoty varianty 1 byl uvažován pouze 1 měřený oblouk.

6.1.3 Shrnutí nejistot

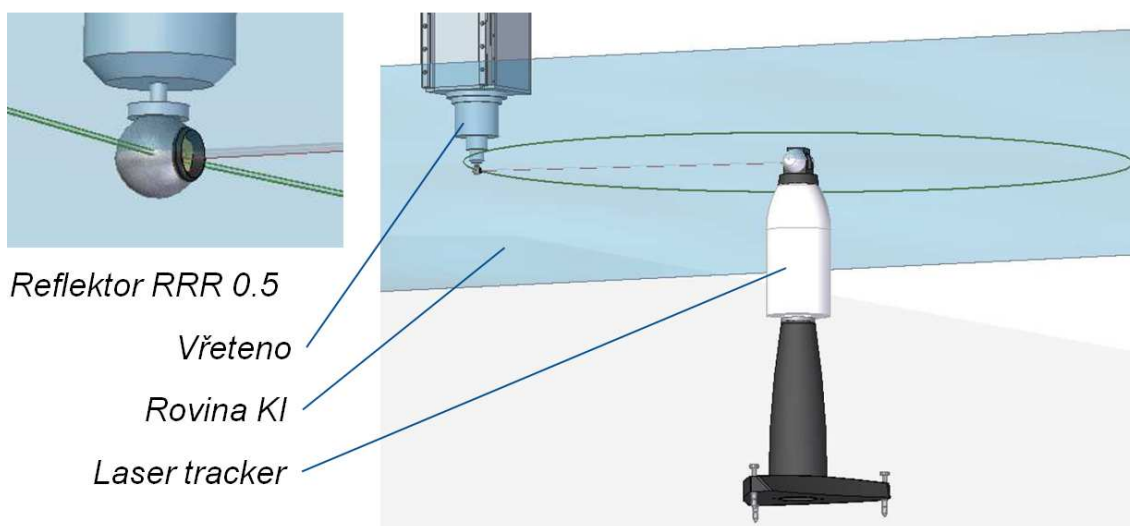
Vybrané chyby ovlivňující měření spočítané pro poloměr $R = 1500$ mm jsou v Tab. 6.2. Celková nejistota je uvažována pro dynamická měření. Pro výpočet je uvažováno postavení LT přesně ve středu KI. Program nejistotyvar1.m na výpočet nejistot je v elektronické příloze.

Tab. 6.2 Vybrané nejistoty varianty 1

Chyba	Označení	Hodnota [μm]
Reflektor CER	u_{r1}	5
Měření vzdálenosti IFM (dynamické měření)	u_{dR1}	$\pm 1,8$
Měření vertikálního úhlu	$u_{\varphi v1}$	$\pm 18,8$
Měření horizontálního úhlu	$u_{\varphi h11}$	$\pm 18,8$
Přímocarost pohybu stroje	u_z	$\pm 2,6$
Vlastní provedení zkoušky	u_{cp}	± 2
Celková rozšířená nejistota typu B pro radiální odchylku	U_{Bvar1F}	$\pm 21,4$

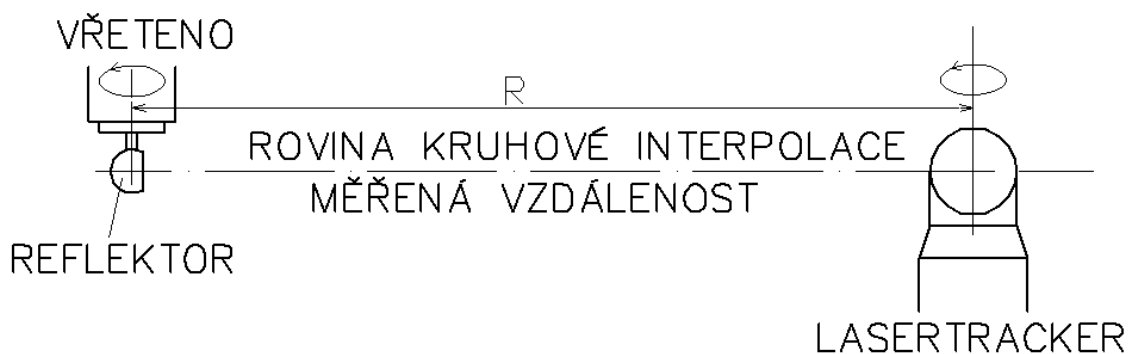
6.2 Varianta 2

LT je umístěn ve středu KI. Reflektor je upnut magneticky v držáku ve vřetenu stroje a natočen tak aby vstup do reflektoru směřoval přímo na hlavu LT viz Obr. 6.6, to musí být zajištěno po celou dobu měření. Reflektor a hlava LT leží ve stejné rovině a pokud je LT ustaven přesně ve středu KI je měřen přímo skutečný poloměr KI. U této varianty je použit reflektor typu RRR, který má menší chybu než reflektor CER. Rozsah vstupního úhlu do reflektoru pro laserový paprsek nemusí být tak velký, jako u varianty 1, z důvodu rotace vřetena udržující stálou přímou viditelnost s hlavou LT.



Obr. 6.6 3-D model měření varianty 2

Stroj vykonává KI a vřeteno rotuje souběžně s pohybem stroje. LT odměřuje vzdálenost R_{ch} a horizontální úhel φ_h . Z naměřených hodnot jsou v programu vypočteny vyhodnocované parametry podle normy ČSN ISO 230-4.



Obr. 6.7 Schéma měření varianty 2

R ... Poloměr kruhové interpolace

d ... měřená vzdálenost

Problém je, že LT není ustaven přesně do středu KI. Možnosti řešení jsou stejné jako u varianty 1.

Vřeteno musí umožňovat natáčení reflektoru. Vřeteno se otáčí kolem své osy a zároveň vykonává KI. Tyto dva pohyby musí být programově spřaženy. Další možnost je zkonstruovat mechanismus, který bude otáčet vřetenem a tím i reflektorem. Otáčení vřetena vnáší do měření další chyby. Reflektor musí být upnut ve vřetenu tak, aby nebyl omezen vstup laserového paprsku do reflektoru.

6.2.1 Postup zkoušky

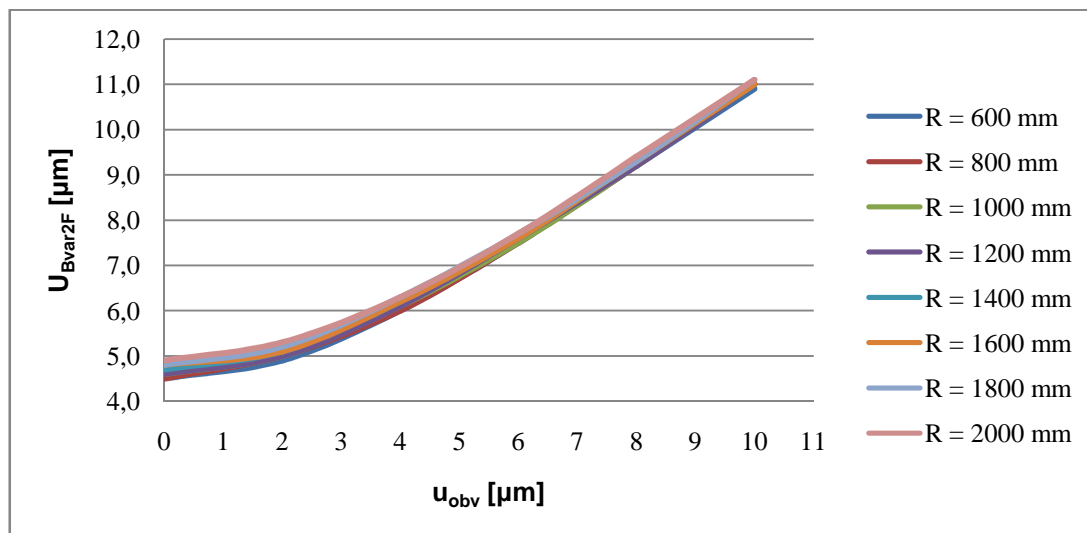
Zjednodušený popis postupu zkoušky kruhové interpolace podle navržené varianty 2 a popis vyhodnocení zkoušky.

Do vřetena musí být upnut držák pro reflektor RRR a do držáku reflektor RRR, který musí být natočen vstupem směrem dolů.

Do stojánku je upnut úchylkoměr a hrot nastaven na reflektor tím způsobem, aby bylo možné změřit obvodové házení přímo na reflektoru, pro nejvíce informací řetězce uložení reflektoru. Reflektor má stanovenou chybu kulovitosti danou výrobcem.

S vřetenem se otočí alespoň o 1 otáčku a na úchylkoměru se odečte maximální hodnota výchylky, tím je změřeno obvodové házení, které vnáší do měření nyní známou chybu. Vliv chyby obvodového házení vřetena na celkovou nejistotu varianty 2, je znázorněno v grafu na Obr. 6.8.

Po skončení měření obvodového házení u_{obv} je odstraněn stojánek s úchylkoměrem.

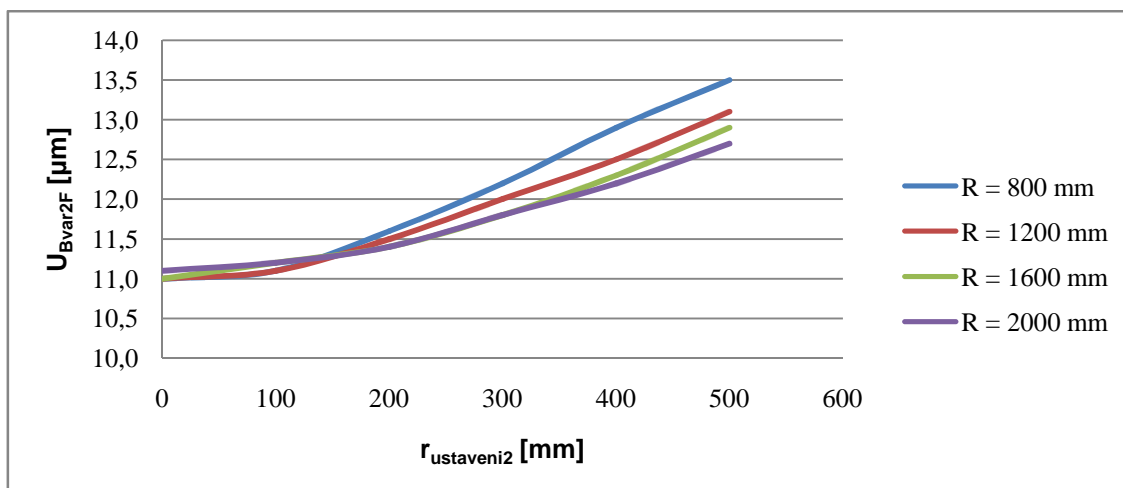


Obr. 6.8 Vliv chyby obvodového házení na celkovou nejistotu varianty 2

Z grafu je patrné, že čím menší je chyba obvodového házení, tím menší je celková nejistota varianty 2 U_{Bvar2F} , pro různé poloměry KI. U_{Bvar2F} je zjištěna programem nejistotyvar2.m přiloženém v elektronické příloze. Pro srovnání variant musí být použita největší povolená chyba obvodového házení vřeten pro daný typ stroje podle ISO 8636-2 činí 10 μm , ale po zjištění skutečného obvodového házení se celková nejistota varianty 2 může zlepšit odečtením od měření. Z Obr. 6.8 je dále zřejmá malá citlivost na změnu jmenovitého poloměru R KI.

S vřetenem se najede do středu KI. S vřetenem se vyjede v ose Z o vzdálenost vyšší než výška LT, aby se vešel pod vřetenem s upnutým reflektorem.

Do pracovního prostoru stroje se ustaví LT do středu KI pod vřetenem a zvolí se nulový bod na stroji. Přesnost ustavení LT $r_{ustaveni2}$ není omezena, ale ovlivňuje celkovou nejistotu U_{Bvar2F} varianty 2, jak je patrné na Obr. 6.9. Přesnost ustavení LT od středu KI by měla být co nejmenší, z důvodu dalšího zpracování výsledků.



Obr. 6.9 Vliv přesnosti ustavení LT na nejistotě radiální odchylky se započteným obvodovým házením

V grafu na Obr. 6.9 je zobrazen vliv přesnosti ustavení LT na nejistotě radiální odchylky U_{Bvar2F} pro vybrané poloměry KI. LT nemusí být ustaven tak přesně jako u varianty 1.

S vřetenem se najede na počáteční bod KI a v ose Z do roviny hlavy LT.

Reflektor se pootočí vstupem směrem na hlavu LT, který nalezne reflektor a začne přijímat odražený laserový paprsek. Pro nalezení stejné roviny vřetena a hlavy LT je využito přestavování vřetena v ose Z a odměřování vertikálního úhlu, který musí být nulový, při vodorovném ustavení LT.

Na základě zvoleného poloměru a rychlosti posuvu je programem `varianta2_pripava.m` vytvořeném v matlabu vypsán NC kód, pro řízení testu KI. Program je v elektronické příloze. NC kód dále zajišťuje souvislost dvou vykonávaných pohybů a to rotace vřetena v závislosti na KI, pro stálé sledování reflektoru laserovou hlavou. NC kód je generován a vypsán do textového editoru.

NC kód musí být přenesen do stroje. NC kód musí být před přenesením do stroje ve správném typu souboru podle řídicího systému. NC kód nemusí fungovat na každém stroji správně, proto je nutné upravit NC kód podle řídicího systému na místě.

Na stroji se musí spustit sestavený NC kód pro předem dohodnuté parametry zkoušky. Vřetenem je v počátečním bodu KI a nulový bod je stanoven

ve středu KI. Dále přestaví vřeteno do počátečního bodu KI posunutého vzdálenost dle NC kódu (2 mm) a natočí vřeteno do nulové polohy.

Nyní je v NC kódu naprogramované podmíněné spuštění, NC kód nebude pokračovat, dokud nebude znovu spuštěn.

Reflektor se znovu pootočí vstupem směrem na hlavu LT a spojí reflektor a hlavu LT, pro měření. Správnou funkci indikuje zelená LED světelná signalizace na hlavě LT. Po kontrole je možné spustit měření. LT odměřuje vzdálenost d a horizontální úhel φ_h . Laserový paprsek nesmí být přerušen během celého procesu testu KI.

Po opětovném spuštění NC kódu vřeteno přejede na počáteční bod KI a vykoná potřebné KI pro vyhodnocení měření. Vřeteno se zastaví na počátečním bodu posunutém o vzdálenost dle NC kódu.

Po skončení testu KI je nutno ukončit odměřování snímače LT.

Naměřené hodnoty musí být uloženy, nebo přeneseny do složky s programem `varianta2_vyhodnoceni_kr_300mm_ZX_1.m`, který zajišťuje vyhodnocení měření varianty 2. Program je v elektronické příloze. Naměřené hodnoty jsou uloženy ve formátu `mat-file`, se kterým matlab přímo komunikuje. Popřípadě mohou být uloženy jako textový soubor.

Program na vyhodnocení měření načte naměřená data jako matici a separuje z matice vektor naměřené vzdálenosti d a vektor naměřeného horizontálního úhlu φ_h .

Po startu testu KI stroj objede kruhovou dráhu s přejezdy 45° . Program vyhodnocuje KI pouze z hodnot bez přejezdů z důvodu eliminace chyby vnášející do měření rozběh a doběh stroje při KI. Vzdálenost d_2 je tedy uvažována pro horizontální úhel φ_h od 45° do 225° . LT musí být ustaven co nejpřesněji do středu KI, z důvodu lepšího separování vektorů z naměřených dat podle horizontálního úhlu φ_h , protože je vyhodnocován celý kruhový oblouk není tato chyba zásadní pro vyhodnocení odchylek.

Ze vzdálenosti d_2 a horizontálního úhlu φ_h jsou získány souřadnice X_{ch} a Y_{ch} pro každý bod měření z (6.28) a (6.29).

$$X_{ch} = d_2 \cdot \cos \varphi_h \quad (6.28)$$

$$Y_{ch} = d_2 \cdot \sin \varphi_h \quad (6.29)$$

Následující postup vyhodnocení je shodný s variantou 1. Program `varianta2_vyhodnoceni_kr_300mm_ZX_1.m` na vyhodnocení varianty 2 je v elektronické příloze. Program musí být upraven pro jiný poloměr měření.

6.2.2 Nejistoty

Nejistota měření je parametrem, který bezprostředně souvisí s výsledkem měření. Udává rozsah hodnot, v němž lze s jistou pravděpodobností předpokládat výskyt skutečné hodnoty měřené veličiny. Nejistota postihuje všechny nedokonalosti stanovení výsledku měření. [14]

Nejistoty typu A a C je možno stanovit až po skončení měření, jejich výpočet je shodný jako u varianty 1. Pro porovnání nejistot variant jsou uvedeny pouze nejistoty typu B.

Nejistota typu B

Nejistoty typu B jsou vázány na známé, identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje. Výpočet vychází z úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině a jejích možných změnách. Možné zdroje nejistot jsou následující. [14]

Vybrané chyby měření varianty 2:

Nepřesnost reflektoru RRR. U varianty 2 není klíčový rozsah vstupu paprsku do reflektoru a je tedy možno použít přesnějšího reflektoru. Chyba u_{r2} (6.30) je stanovena výrobcem jako maximální odchylka, při skládání nejistot musí být uvažována v rozsahu \pm tedy poloviční.

$$u_{r2} = 2 \mu\text{m} \quad (6.30)$$

Nepřesnost měření vzdálenosti LT IFM (6.31). Měřená vzdálenost se během měření může měnit, např. vlivem ustavení LT. Pro započítání i největších měření je nutné počítat nejistotu z maximální naměřené hodnoty vzdálenosti.

$$u_{dR2} = u_d \cdot \max(d) = \pm[\mu\text{m}] \quad (6.31)$$

$u_d = \pm 0,5 \mu\text{m/m}$... přesnost měření vzdálenosti IFM
 $\max(d) = [m]$... maximální naměřená vzdálenost

Nepřesnost měření horizontálního úhlu v prostoru 2,5x5x10 m. Nepřesnost je udávána v μm jako kolmá odchylka na měřenou vzdálenost a to v nejbližším bodě. Hodnota nejistoty se musí přepočítat na nepřesnost úhlu vztahem (6.32). Nejistota je největší při maximální naměřené vzdálenosti d , čím větší vzdálenost, tím větší nepřesnost měření horizontálního úhlu.

$$u_{\phi h2} = \arctan \frac{u_{\phi h1}}{10^6 \cdot \max(d)} = \pm [\text{rad}] \quad (6.32)$$

$$u_{\phi h12} = u_{\phi h2} + u_{\phi h3} \cdot \max(d) \quad (6.33)$$

$u_{\phi h12} = [\mu\text{m}]$... nepřesnost měření horizontálního úhlu v prostoru 2,5x5x10 m (6.33)

$u_{\phi h2} = \pm 10 \mu\text{m}$... základní nepřesnost měření horizontálního úhlu v 0 m

$u_{\phi h3} = 5 \mu\text{m/m}$... nepřesnost na každý další m měřené vzdálenosti

$\max(d) = [m]$... maximální naměřená vzdálenost

Nepřesnost měření vlivem chyby obvodového házení kuželové dutiny vřetena u_{obv} (6.34). Chyba obvodového házení vřetene není předem známa ale je možno ji jednoduše změřit a odečíst od změřených dat, ale potom vstupuje do výpočtu nejistota měření obvodového házení. Pro porovnání nejistot variant je použita maximální povolená chyba obvodového házení daná normou ISO 8636-2 pro měřený stroj. Obvodové házení je měřeno přímo na reflektoru pro zjištění co nejvíce chyb vnesených do měření. Chyba u_{obv} je maximální odchylka, při skládání nejistot musí být uvažována v rozsahu \pm tedy poloviční.

$$u_{obv} = 10 \mu\text{m} \quad (6.34)$$

Vybrané chyby varianty 2 (6.35) jsou všechny stanoveny ve směru měření vzdálenosti d , nebo měřených úhlů.

$$u_{Bvar2d} = \sqrt{\left(\frac{u_{r2}}{2}\right)^2 + u_{dR2}^2 + \left(\frac{u_{obv}}{2}\right)^2} \quad (6.35)$$

Pro zjištění celkové nejistoty varianty 2 je nutno zohlednit vliv vstupních parametrů (chyb) při výpočtu vyhodnocovaných odchylek.

Pro stanovení nejistoty varianty 2 je použita metoda Monte Carlo. Vyhodnocení probíhá za stejných parametrů a stejným způsobem jako

v případě varianty 1. Nejistota $u_{Bvar2Fs}$ se určí stejným způsobem jako u varianty 1.

Nepřesnost vlastního provedení zkoušky (6.36) stanovené ze zvyklostí. Nepřesnosti především vycházející z nezkušenosti obsluhy.

$$u_{cp} = \pm 2 \mu\text{m} \quad (6.36)$$

Celková nejistota typu B (6.37) vznikne kombinací všech uvažovaných nepřesností uvedených výše.

$$u_{Bvar2F} = \sqrt{u_{Bvar2Fs}^2 + u_{cp}^2} \quad (6.37)$$

Výsledný interval $\pm u_{Bvar2F}$ definuje pravděpodobnost skutečné měřené veličiny přibližně 60 %, a proto je zaveden koeficient rozšíření k_r . V případě normálního rozdělení výsledků měření odpovídá pravděpodobnosti 95 % hodnota $k_r = 2$. Rozšířená výsledná chyba varianty 2 $\pm U_{Bvar1F}$ je dle (6.38).

$$U_{Bvar2F} = k_r \cdot u_{Bvar2F} \quad (6.38)$$

Nejistoty varianty 2 jsou uvažovány pouze pro statická měření. Nejistota měření vzdálenosti LT pro dynamická měření (za pohybu) není přesně stanovena, ale z dostupných zdrojů je možno uvažovat přibližně 2 až 4-krát větší než pro statická měření. [5]

Při simulaci výpočtu nejistoty varianty 2 byl uvažován pouze 1 měřený oblouk.

6.2.3 Shrnutí nejistot

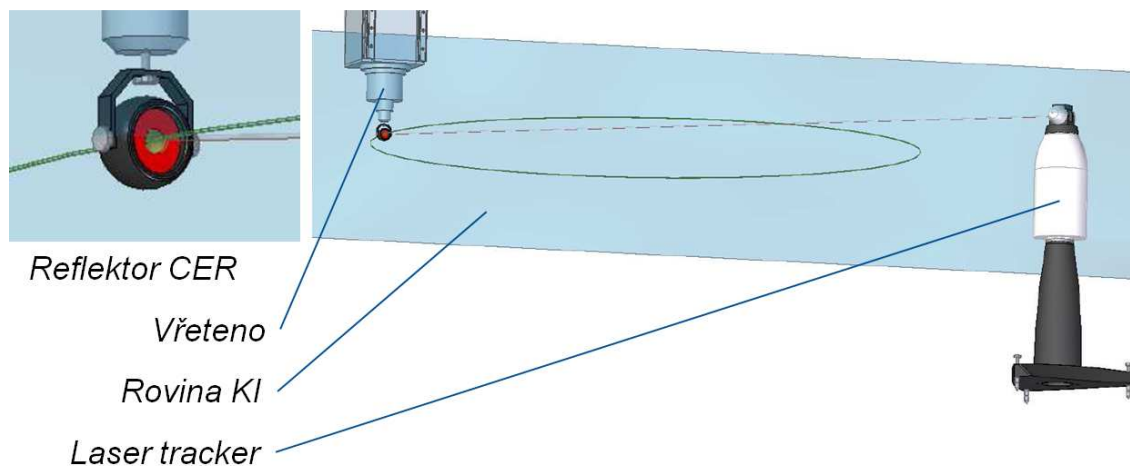
Vybrané chyby ovlivňující měření spočítané pro poloměr $R = 1500$ mm jsou v Tab. 6.3. Celková nejistota je uvažována pro dynamická měření. Pro výpočet je uvažováno postavení LT přesně ve středu KI. Program nejistotyvar2.m na výpočet nejistot je v elektronické příloze.

Tab. 6.3 Vybrané nejistoty varianty 2

Chyba	Označení	Hodnota [μm]
Reflektor PLX BMR	u_{r2}	2
Měření vzdálenosti IFM (dynamické měření)	u_{dR2}	$\pm 1,5$
Měření horizontálního úhlu	$u_{\phi h12}$	$\pm 17,5$
Obvodové házení kuželové dutiny vřetena	u_{obv}	10
Vlastní provedení zkoušky	u_{cp}	± 2
Celková rozšířená nejistota typu B pro radiální odchylku	U_{Bvar2F}	$\pm 11,3$

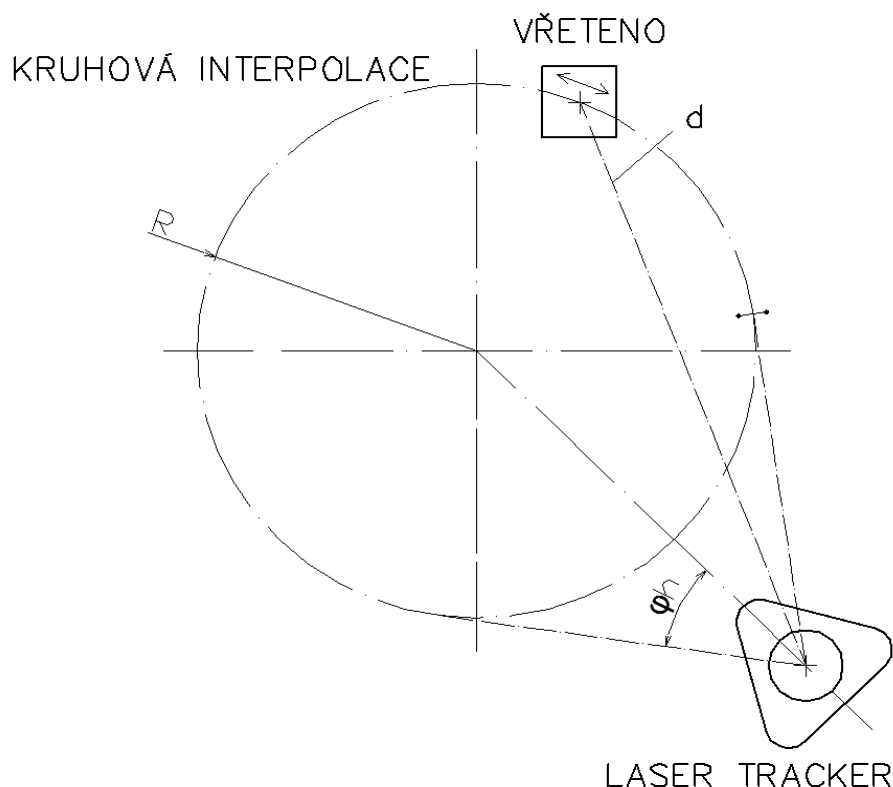
6.3 Varianta 3

LT je umístěn mimo stroj. Reflektor je upnut v držáku ve vřetenu stroje tak aby vstup do reflektoru směřoval přímo na hlavu LT, to musí být zajištěno po celou dobu měření. Reflektor a hlava LT leží ve stejné rovině. Varianta 3 využívá reflektor typu CER, který má větší rozsahu vstupního úhlu ($\pm 60^\circ$) do reflektoru pro laserový paprsek.



Obr. 6.10 3-D model měření varianty 3

Vřeteno vykonává KI a LT odměřuje vzdálenost d a horizontální úhel ϕ_h . Z naměřených hodnot jsou v programu vypočítány vyhodnocované parametry podle normy ČSN ISO 230-4.



Obr. 6.11 Schéma měření varianty 3

R ... Poloměr kruhové interpolace

φ_h ... Odměřený horizontální úhel natočení hlavy laser trackeru

d ... měřená vzdálenost

LT je postaven mimo stroj a tím zabírá další místo u stroje a je zde i možnost, že se LT nedá postavit vedle stroje v dostatečné vzdálenosti.

Možnost jak vyhodnotit výsledky měření je v programu aproximovat naměřené hodnoty kružnicí, zjistit střed a vyhodnotit naměřené hodnoty vzhledem k tomuto středu.

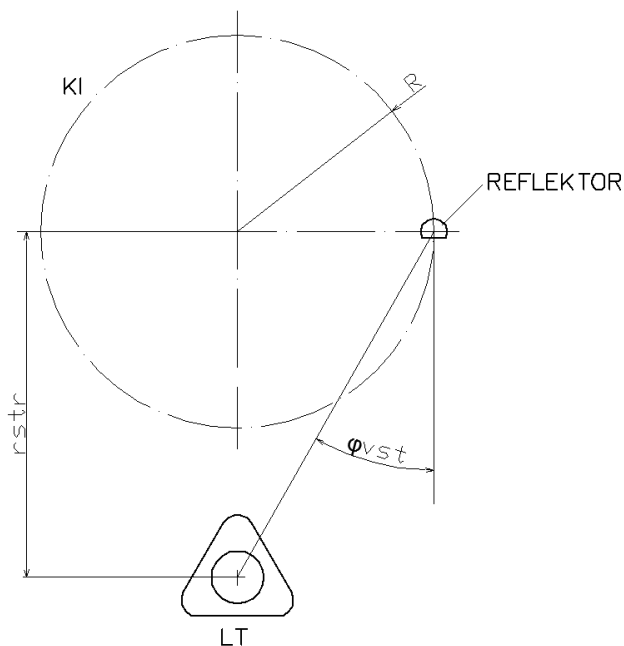
6.3.1 Postup zkoušky

Zjednodušený popis postupu zkoušky KI podle navržené varianty 3 a popis vyhodnocení zkoušky.

S vřetenem se najede do středu KI.

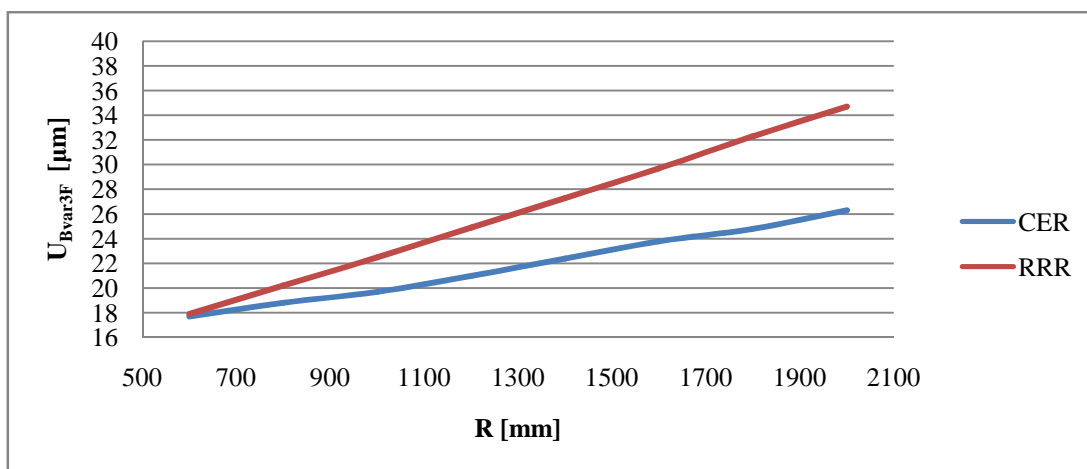
LT musí být ustaven do vzdálenosti minimálně r_{str} (6.39) od středu KI viz Obr. 6.12, z důvodu omezení vstupního úhlu do reflektoru. Je možné použít reflektor typu RRR, který má vyšší přesnost než reflektor CER, ale menší

vstupní úhel. Vstupní úhel φ_{vst} ovlivňuje minimální vzdálenost ustavení LT od středu KI. Vliv použití různých reflektorů na celkovou nejistotu U_{Bvar3F} , je znázorněn v grafu pro různé poloměry KI na Obr. 6.13. U_{Bvar3F} je zjištěna programem nejistotyvar3.m v elektronické příloze. Ustavení LT r_{str} dále závisí na možnostech postavení LT kolem měřeného stroje.



Obr. 6.12 Ustavení LT od středu KI

$$r_{str} = \frac{R}{\tan \varphi_{vst}} \quad (6.39)$$



Obr. 6.13 Srovnání použití reflektorů při měření

Z grafu na Obr. 6.13 je patrná menší chyba při použití reflektoru CER v celém zkoušeném rozsahu.

Do vřetena se upne držák reflektoru CER a do držáku reflektor CER, který musí být natočen vstupem do reflektoru směrem na hlavu LT, který nalezne reflektor a začne přijímat odražený laserový paprsek. Pro nalezení stejné roviny vřetena a hlavy LT je využito přestavování vřetena v ose Z a odměřování vertikálního úhlu, který musí být nulový, LT musí být vyrovnan do vodorovné polohy.

Vřeteno se přestaví do polohy počátečního bodu KI podle zvolených parametrů.

Po přestavení vřetena je nutné zkontrolovat příjem odraženého laserového paprsku do snímače z reflektoru CER. Správnou funkci indikuje zelená LED světelná signalizace na hlavě LT. Po kontrole je možné spustit měření na LT. LT odměřuje vzdálenost d a horizontální úhel φ_h .

Na stroji se musí spustit test KI pro předem dohodnuté parametry zkoušky, pokud na stroji nelze spustit test KI, musí se sestavit NC program podobný NC programu ve variantě 2, s tím rozdílem, že vřeteno nerotuje ve vazbě na KI a přejezd KI může být větší, zde není ovlivněn omezením měření horizontálního úhlu. Laserový paprsek nesmí být přerušen během celého procesu testu KI (zelená LED světelná signalizace).

Po skončení testu KI je nutno ukončit odměřování snímače LT.

Naměřené hodnoty musí být uloženy, nebo přeneseny do složky s programem na vyhodnocení měření. Naměřené hodnoty jsou uloženy ve formátu mat-file, se kterým matlab přímo komunikuje. Popřípadě mohou být uloženy jako textový soubor.

Program na vyhodnocení měření načte naměřená data jako matici a separuje z matice vektor naměřené vzdálenosti d_3 , vektor naměřeného horizontálního úhlu φ_h .

Po startu testu KI stroj objede dvakrát kruhovou dráhu. Program vyhodnocuje KI pouze z hodnot bez první a bez poslední poloviny oblouku z důvodu eliminace chyby vnášející do měření rozběh a doběh stroje při KI. Vzdálenost d_3 je tedy uvažována pro horizontální úhel φ_h od prvního maxima

úhlu do druhého maxima úhlu (1 otáčka). LT nesmí být ustaven tak, aby počáteční bod KI byl max. nebo min. z φ_h .

Ze vzdálenosti d_3 a horizontálního úhlu φ_h jsou získány souřadnice X_{ch} a Y_{ch} pro každý bod měření z (6.40) a (6.41).

$$X_{ch} = d_3 \cdot \cos \varphi_h \quad (6.40)$$

$$Y_{ch} = d_3 \cdot \sin \varphi_h \quad (6.41)$$

Následující postup vyhodnocení je shodný s variantou 1.

6.3.2 Nejistoty

Nejistota měření je parametrem, který bezprostředně souvisí s výsledkem měření. Udává rozsah hodnot, v němž lze s jistou pravděpodobností předpokládat výskyt skutečné hodnoty měřené veličiny. Nejistota postihuje všechny nedokonalosti stanovení výsledku měření. [14]

Nejistoty typu A a C je možno stanovit až po skončení měření, jejich výpočet je shodný jako u varianty 1. Pro porovnání nejistot variant jsou uvedeny pouze nejistoty typu B.

Nejistota typu B

Nejistoty typu B jsou vázány na známé, identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje. Výpočet vychází z úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině a jejích možných změnách. Možné zdroje nejistot jsou následující. [14]

Vybrané chyby měření varianty 3:

Nepřesnost reflektoru CER. U varianty 3 je vhodnější použít reflektor typu CER, jak je dokázáno v grafu na Obr. 6.13. Chyba u_{r1} je stanovena výrobcem jako maximální odchylka, při skládání nejistot musí být uvažována v rozsahu \pm tedy poloviční.

$$u_{r1} = 5 \mu\text{m} \quad (6.42)$$

Nepřesnost měření vzdálenosti LT IFM (6.43). Měřená vzdálenost se během měření mění vlivem postavení LT. Pro započítání i největších měření je nutné počítat nejistotu z maximální naměřené hodnoty vzdálenosti.

$$u_{dR3} = u_d \cdot \max(d_3) = \pm[\mu\text{m}] \quad (6.43)$$

$u_d = \pm 0,5 \mu\text{m/m}$... přesnost měření vzdálenosti IFM

$\max(d_3) = [\text{m}]$... maximální naměřená vzdálenost

Nepřesnost měření horizontálního úhlu v prostoru $2,5 \times 5 \times 10 \text{ m}$. Nepřesnost je udávána v μm jako kolmá odchylka na měřenou vzdálenost a to v nejbližším bodě. Hodnota nejistoty se musí přepočítat na nepřesnost úhlu vztahem (6.44). Nejistota je největší při maximální naměřené vzdálenosti d_3 , čím větší vzdálenost, tím větší nepřesnost měření horizontálního úhlu.

$$u_{\phi h31} = \arctan \frac{u_{\phi h1}}{10^6 \cdot \max(d_3)} = \pm[\text{rad}] \quad (6.44)$$

$$u_{\phi h13} = u_{\phi h2} + u_{\phi h3} \cdot \max(d_3) \quad (6.45)$$

$u_{\phi h13} = [\mu\text{m}]$... nepřesnost měření horizontálního úhlu v prostoru $2,5 \times 5 \times 10 \text{ m}$ (6.45)

$u_{\phi h2} = \pm 10 \mu\text{m}$... základní nepřesnost měření horizontálního úhlu v 0 m

$u_{\phi h3} = 5 \mu\text{m/m}$... nepřesnost na každý další m měřené vzdálenosti

$\max(d_3) = [\text{m}]$... maximální naměřená vzdálenost

Vybrané chyby varianty 3 (6.46) jsou stanoveny ve směru měření vzdálenosti d_3 , nebo měřeného úhlu.

$$u_{Bvar3d} = \sqrt{\left(\frac{u_{r1}}{2}\right)^2 + u_{dR3}^2} \quad (6.46)$$

Pro zjištění celkové nejistoty varianty 3 je nutno zohlednit vliv vstupních parametrů (chyb) při výpočtu vyhodnocovaných odchylek.

Pro stanovení nejistoty varianty 3 je použita metoda Monte Carlo. Vyhodnocení probíhá za stejných parametrů a stejným způsobem jako v případě varianty 1. Nejistota $u_{Bvar3Fs}$ se určí stejným způsobem jako u varianty 1.

Nepřesnost vlastního provedení zkoušky (6.47) stanovené ze zvyklostí. Nepřesnosti především vycházející z nezkušenosti obsluhy.

$$u_{cp} = \pm 2 \mu\text{m} \quad (6.47)$$

Celková nejistota typu B (6.48) vznikne kombinací všech uvažovaných nepřesností uvedených výše.

$$u_{Bvar3F} = \sqrt{u_{Bvar3Fs}^2 + u_{cp}^2} \quad (6.48)$$

Výsledný interval $\pm u_{Bvar3F}$ definuje pravděpodobnost skutečné měřené veličiny přibližně 60 %, a proto je zaveden koeficient rozšíření k_r . V případě normálního rozdělení výsledků měření odpovídá pravděpodobnosti 95 % hodnota $k_r = 2$. Rozšířená výsledná chyba varianty 3 $\pm U_{Bvar3F}$ je dle (6.49).

$$U_{Bvar3F} = k_r \cdot u_{Bvar3F} \quad (6.49)$$

Nejistoty varianty 3 jsou uvažovány pouze pro statická měření. Nejistota měření vzdálenosti LT pro dynamická měření (za pohybu) není přesně stanovena, ale z dostupných zdrojů je možno uvažovat přibližně 2 až 4-krát větší než pro statická měření. [5]

Při simulaci výpočtu nejistoty varianty 3 byl uvažován pouze 1 měřený oblouk

6.3.3 Shrnutí nejistot

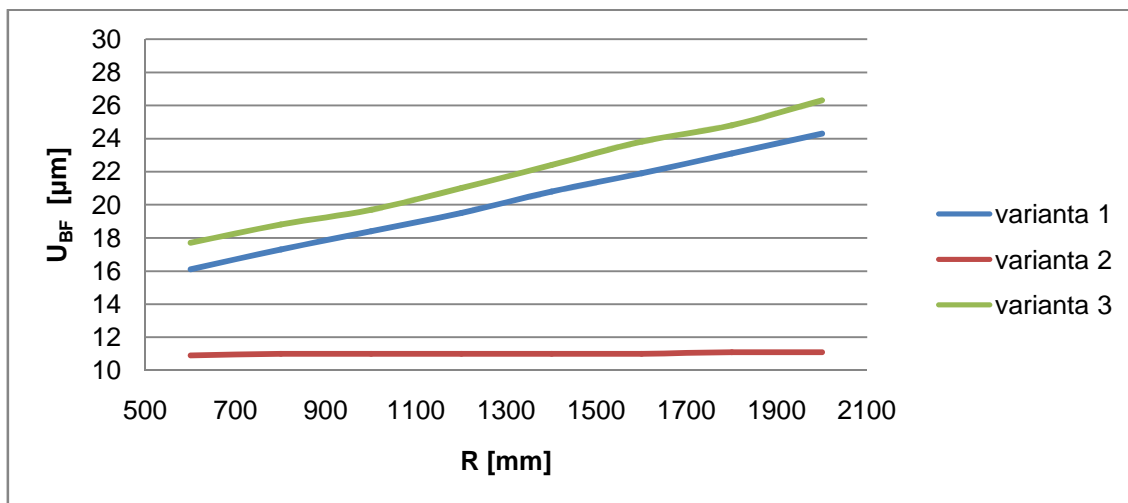
Vybrané chyby ovlivňující měření spočítané pro poloměr $R = 1500$ mm jsou v Tab. 6.4. Celková nejistota je uvažována pro dynamická měření. Pro výpočet je uvažováno postavení LT mimo KI cca 2 m od středu. Program nejistotyvar3.m na výpočet nejistot je v elektronické příloze.

Tab. 6.4 Vybrané nejistoty varianty 3

Chyba	Označení	Hodnota [μm]
Reflektor CATEYE	u_{r1}	5
Měření vzdálenosti IFM (dynamické měření)	u_{dR3}	$\pm 3,5$
Měření horizontálního úhlu	$u_{\phi h13}$	$\pm 27,8$
Vlastní provedení zkoušky	u_{cp}	± 2
Celková rozšířená nejistota typu B pro radiální odchylku	U_{Bvar3F}	$\pm 23,4$

6.4 Simulační porovnání navržených strategií

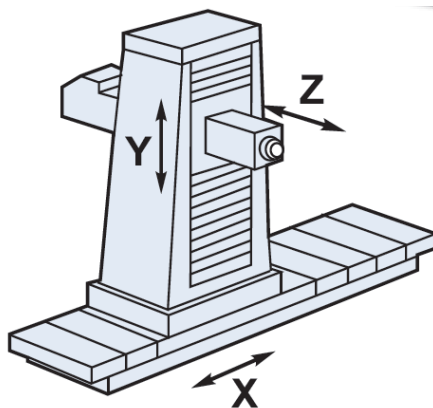
Pro navržené strategie měření byly vytvořeny simulační programy na vyhodnocení výsledků, pomocí těchto programů byly určeny nejistoty variant. Nejistoty variant byly porovnány pro různé poloměry měření KI a zobrazené na Obr. 6.14. Programy na výpočet nejistot variant jsou v elektronických přílohách.



Obr. 6.14 Srovnání nejistot radiálních odchylek variant pro různé poloměry měření

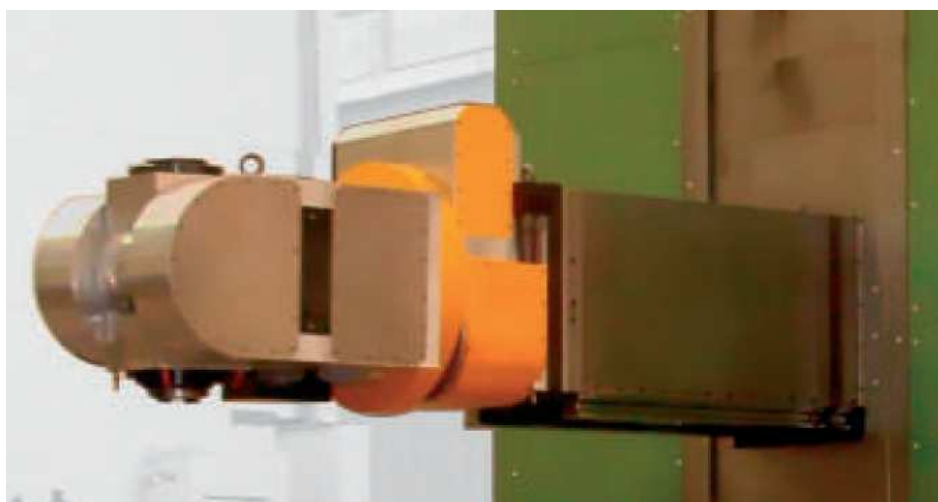
7 Popis měřeného stroje

Měření bylo provedeno na reálném obráběcím stroji. Měřený obráběcí stroj vychází z horizontálního vyvrtávacího stroje deskového typu dle Obr. 7.1



Obr. 7.1 Horizontální vyvrtávačka desková [15]

Deskové obráběcí stroje jsou vhodné pro obrábění obrobků velkých rozměrů a hmotností. Stroj je vybaven smykadlem, na jehož čele je aplikována frézovací hlava, která je zobrazena na Obr. 7.2. Na Obr. 7.3 je pohled na měřený stroj. V Tab. 7.1 jsou vybrané základní údaje o měřeném stroji.



Obr. 7.2 Frézovací hlava na smykadle



Obr. 7.3 Měřený obráběcí stroj

Tab. 7.1 Technické parametry obráběcího stroje

Příčné přestavení stojanu X	4000	mm
Svislé přestavení vřeteníku Y	3000	mm
Výsuv smykadla Z	1500	mm
Rozměry výsuvného smykadla	500x500	mm
Rozsah otáček hlavního motoru	10 až 5000	1/min
Řídicí systém MEFI		

8 Vlastní měření

8.1 Měření obvodového házení

Obvodové házení bylo změřeno nejprve pomocí přesného měřicího trnu u čela vřetena a následně bylo změřeno na upnutém reflektoru RRR v držáku. Výsledky měření jsou v Tab. 8.1. Měření bylo provedeno v celém rozsahu 1 otočení vřetena po 10°. Pohled na měření je na Obr. 8.1.

Tab. 8.1 Naměřené hodnoty obvodového házení

Obvodové házení kuželové dutiny vřetene u čela [μm]		4	
Obvodové házení změřené na reflektoru			
Natočení vřetena W [°]	Naměřená odchyška u_{obv} [μm]	Natočení vřetena W [°]	Naměřená odchyška u_{obv} [μm]
0	0	180	17
10	3	190	13
20	9	200	29
30	15	210	2
40	19	220	-2
50	23	230	-6
60	27	240	-11
70	31	250	-14
80	33	260	-16
90	35	270	-17
100	35	280	-18
110	35	290	-18
120	35	300	-18
130	35	310	-18
140	33	320	-16
150	30	330	-14
160	27	340	-10
170	23	350	-5



Obr. 8.1 Měření obvodového házení

Naměřené hodnoty byly lineárně interpolovány a odečteny od měření LT pro eliminaci chyby. Do vyhodnocení KI musí být zahrnuta nejistota měření obvodového házení vypočtená vztahem (8.1).

$$U_{chobv} = k_r \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{cku}}{2}\right)^2 + u_{cpobv}^2} = 4 \mu\text{m} \quad (8.1)$$

$u_{cku} = 2,5 \mu\text{m}$

... výsledek kalibrace číselníkového úchylkoměru

$u_{cpobv} = 1 \mu\text{m}$

... chyba vlastního provedení zkoušky ze zvyklostí

$k_r = 2$

... koeficient rozšíření odpovídající 95% chyby

8.2 Měření kruhové interpolace laser trackerem

Měření bylo provedeno na 2 poloměrech. Na poloměru 300 mm pro srovnání měření se standardní metodou ball barem a na poloměru 500 mm pro ověření funkčnosti měření větších poloměrů.

Ustavení LT do středu KI pod vřeteno je vidět na Obr. 8.2. Pro přesnější ustavení je naměřen 1 kruhový oblouk, ze kterého jsou zjištěny souřadnice středu LT od středu KI. Program varianta2_vyhod_ustaveni.m na zjištění středu je v elektronické příloze. NC kód pro test ustavení je vypsán programem varianta2_pripava (NC_program_ustaveni), v elektronické příloze. NC kód pro

ustavení je vypsán v příloze č. 1. Souřadnice jsou připočteny k nulovému bodu stroje (středu KI) a tím je posunut střed KI na střed LT.



Obr. 8.2 Ustavení LT do středu KI

Do stroje byl nahrán NC kód pro měření KI, která byla následně naměřena. NC kód pro test KI je vypsán programem *varianta2_priprava* (NC_program), v elektronické příloze. NC kód pro test KI na poloměru 300 mm je vypsán v příloze č. 2. Ukázka z měření je na Obr. 8.3.



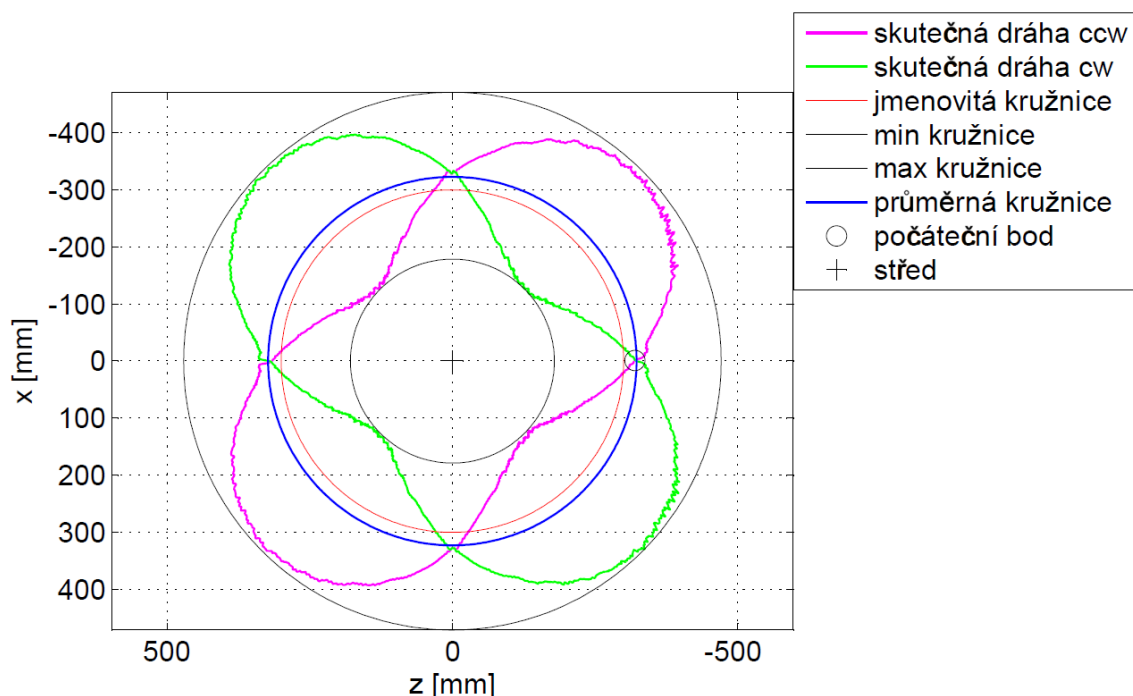
Obr. 8.3 Měření KI laser trackerem

8.2.1 Výsledky měření kruhové interpolace s laser trackerem

Měření probíhalo na dvou poloměrech KI. Pro poloměr 300 mm jsou parametry testu v Tab. 8.2. Vyhodnocení podle ČSN ISO 230-4 je na Obr. 8.4 (odchyly jsou multiplikované 800x) a výsledky testu KI v Tab. 8.3 pro směr ccw, Tab. 8.4 pro směr cw a Tab. 8.5 pro oba směry. Program varianta2_vyhodnoceni_kr_300mm_ZX_1.m na vyhodnocení měření pro poloměr 300 mm je vypsán v elektronické příloze.

Tab. 8.2 Parametry testu KI měřeno LT pro R 300

Poloměr	300 mm
Vzorkovací frekvence	500 Hz
Posuv	4 000 mm/min
Směr snímání	ccw/cw
Rovina testu	ZX
Souřadnice středu KI na stroji	X = 1200, Y = 400, Z = -870 mm
Vyhodnocovaná kružnice	45° až 405°
Přejezd	45°



Obr. 8.4 KI LT Dvousměrná odchylna kruhovitosti pro R = 300 mm, Rmin = 299,848 mm, Rmax = 300,214 mm, odchyly jsou 800x zvětšené

Tab. 8.3 Výsledky testu KI měřeno LT pro R 300 ve směru ccw

Kruhovitost G	356 μm
Maximální radiální odchylka Fmax	206,6 μm
Pozice Fmax	42,8°
Minimální radiální odchylka Fmin	-149,4 μm
Pozice Fmin	134,4°

Tab. 8.4 Výsledky testu KI měřeno LT pro R 300 ve směru cw

Kruhovitost G	365,4 μm
Maximální radiální odchylka Fmax	213,7 μm
Pozice Fmax	315,6°
Minimální radiální odchylka Fmin	-151,7 μm
Pozice Fmin	41,8°

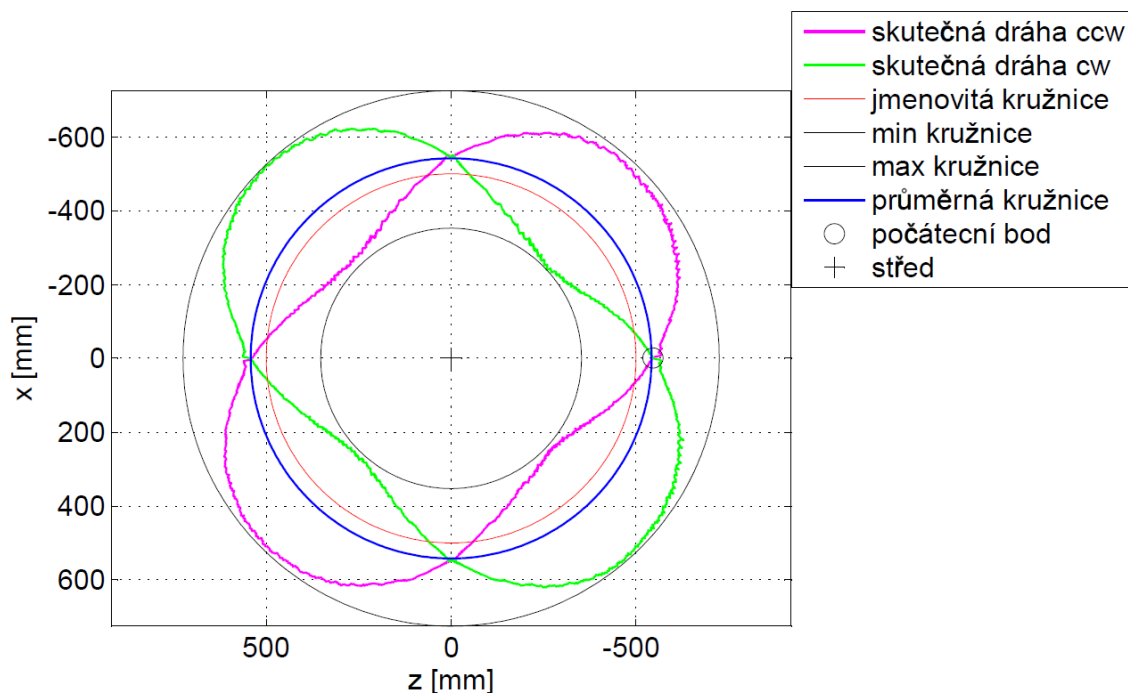
Tab. 8.5 Výsledku testu KI měřeno LT pro R 300 v obou směrech

Dvousměrná odchylka kruhovitosti G(b)	365,4
Průměrná dvousměrná radiální odchylka D	28,4

Pro poloměr 500 mm jsou parametry testu v Tab. 8.6. Vyhodnocení podle ČSN ISO 230-4 je na Obr. 8.5 (odchylky jsou multiplikované 1000x) a výsledky testu KI v Tab. 8.7 pro směr ccw, Tab. 8.8 pro směr cw a Tab. 8.9 pro oba směry. Program je obdobný jako při testu KI na poloměru 300 mm.

Tab. 8.6 Parametry testu KI měřeno LT pro R 500

Poloměr	500 mm
Vzorkovací frekvence	500 Hz
Posuv	4 000 mm/min
Směr snímání	ccw/cw
Rovina testu	ZX
Souřadnice středu KI na stroji	X = 1200, Y = 400, Z = -870 mm
Vyhodnocovaná kružnice	45° až 405°
Přejezd	45°



Obr. 8.5 KI LT Dvousměrná odchylna kruhovitosti pro $R = 500$ mm, $R_{min} = 499,853$ mm, $R_{max} = 500,225$ mm, odchylny jsou 1000x zvětšené

Tab. 8.7 Výsledky testu KI měřeno LT pro R 500 ve směru ccw

Kruhovitosť G	353,1 μm
Maximální radiální odchylna Fmax	215,9 μm
Pozice Fmax	226,8°
Minimální radiální odchylna Fmin	-137,2 μm
Pozice Fmin	316,6°

Tab. 8.8 Výsledky testu KI měřeno LT pro R 500 ve směru cw

Kruhovitosť G	372,6 μm
Maximální radiální odchylna Fmax	225,2 μm
Pozice Fmax	133,7°
Minimální radiální odchylna Fmin	-147,4 μm
Pozice Fmin	42,9°

Tab. 8.9 Výsledku testu KI měřeno LT pro R 500 v obou směrech

Dvousměrná odchylna kruhovitosti G(b)	372,6 μm
Průměrná dvousměrná radiální odchylna D	42,1 μm

8.3 Měření kruhové interpolace ball barem

Měření bylo provedeno na poloměru 300 mm, pro větší poloměr nebyl k dispozici kalibrátor. Měření probíhalo ve stejné rovině jako test KI s LT. Střed KI byl zvolen stejný jako test KI s LT.

Do stroje byl nahrán NC kód pro měření KI, která byla následně naměřena. NC kód pro test KI na poloměru 300 mm je vypsán v příloze č. 3. Ukázka z měření je na Obr. 8.6.



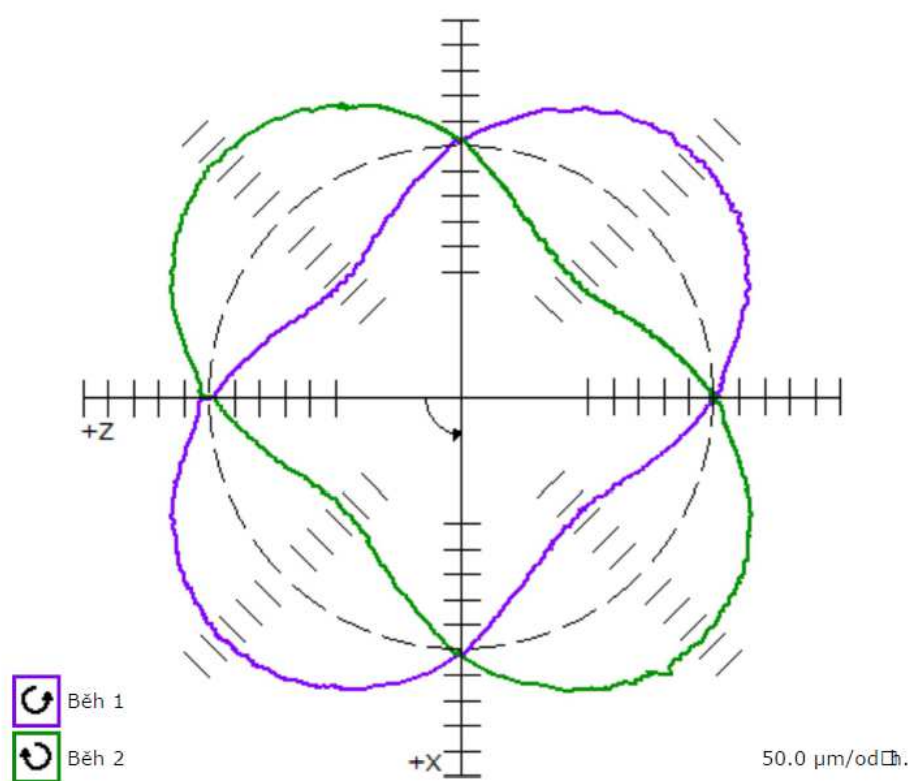
Obr. 8.6 Měření KI ball barem

8.3.1 Výsledky měření kruhové interpolace s ball barem

Parametry testu jsou v Tab. 8.10. Vyhodnocení podle ČSN ISO 230-4 je na Obr. 8.7 a výsledky testu KI v Tab. 8.11 pro směr ccw, Tab. 8.12 pro směr cw a Tab. 8.13 pro oba směry. Test KI je vyhodnocen softwarem od společnosti RENISHAW.

Tab. 8.10 Parametry testu KI ball barem

Poloměr	300 mm
Vzorkovací frekvence	50 Hz
Posuv	4 000 mm/min
Směr snímání	ccw/cw
Rovina testu	ZX
Souřadnice středu KI na stroji	X = 1200, Y = 400, Z = -870 mm
Vyhodnocovaná kružnice	180° až 180°
Přejezd	180°



Obr. 8.7 KI ball bar kruhová hystereze

Tab. 8.11 Výsledky testu KI měřeno ball barem ve směru ccw

Kruhovitost G	352,7 μm
Maximální radiální odchylka Fmax	201,8 μm
Pozice Fmax	45,1°
Minimální radiální odchylka Fmin	-150,9 μm
Pozice Fmin	136,8°

Tab. 8.12 Výsledky testu KI měřeno LT ve směru cw

Kruhovitost G	365 μm
Maximální radiální odchylka Fmax	210,2 μm
Pozice Fmax	127,2°
Minimální radiální odchylka Fmin	-154,8 μm
Pozice Fmin	39,6°

Tab. 8.13 Výsledku testu KI měřeno ball barem v obou směrech

Kruhová hystereze	353,7 μm
Pozice Kruhové hystereze	44,3°

8.4 Ověření správné funkce programu na zpracování výsledků

Správná funkce programu na vyhodnocení výsledků z měření musí být nejprve ověřena srovnáním s výsledky z měření ball barem. Naměřené hodnoty z ball baru jsou vyhodnoceny softwarem od společnosti RENISHAW na Obr. 8.7. Program na vyhodnocení hodnot testu KI změřené ball barem `bb_vyhodnoceni_kr_300mm_ZX_1.m` je v elektronické příloze.

Naměřené hodnoty z ball baru jsou načteny z textového editoru, na rozdíl od LT, kde jsou načteny z mat-filu. Ball bar neodměřuje horizontální úhel, a proto je generován podle počtu naměřených hodnot.

Parametry testu jsou v Tab. 8.14, protože byly použity stejné hodnoty. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 8.15 a Tab. 8.16.

Tab. 8.14 Parametry testy pro ověření správné funkce programu na vyhodnocení

Poloměr	300 mm
Vzorkovací frekvence	50 Hz
Posuv	4 000 mm/min
Směr snímání	ccw/cw
Rovina testu	ZX
Souřadnice středu KI na stroji	X = 1200, Y = 400, Z = -870 mm
Vyhodnocovaná kružnice	180° až 180°
Přejezd	180°

Tab. 8.15 Srovnání výsledků testu KI pro směr ccw

Radiální odchylka	Sestavený program	Renishaw
Fmin [μm]	-150,9	-150,9
Fmax [μm]	201,8	201,8
Kruhovitost		
G [μm]	352,7	352,7
Chyba středění		
zc [μm]	-12,5	-12,5
xc [μm]	-140,5	-140,5

Tab. 8.16 Srovnání výsledků testu KI pro směr cw

Radiální odchylka	Sestavený program	Renishaw
Fmin [μm]	-154,8	-154,8
Fmax [μm]	210,2	210,2
Kruhovitost		
G [μm]	365	365
Chyba středění		
zc [μm]	-12,5	-12,5
xc [μm]	-140,5	-140,5

Souřadnice polohy středu ball baru od středu KI jsou nutné znát pro správnou funkci ball baru, v případě větší souřadnice středu než stanovená hodnota musí být ball bar znovu a přesněji ustaven na střed.

Z výsledků je patrná shoda a dá se očekávat správnou funkci sestaveného programu na vyhodnocení měření.

8.5 Porovnání výsledků měření získaných z laser trackeru a z ball baru

Porovnání hodnot lze provést pouze na poloměru 300 mm. Parametry testu KI, prováděném LT jsou v Tab. 8.17 a pro ball bar v Tab. 8.18. Vyhodnocené tvary měření jsou na Obr. 8.8 a Obr. 8.9. Společnost RENISHAW nevyhodnocuje Dvousměrnou odchylku kruhovitosti a Průměrnou dvousměrnou

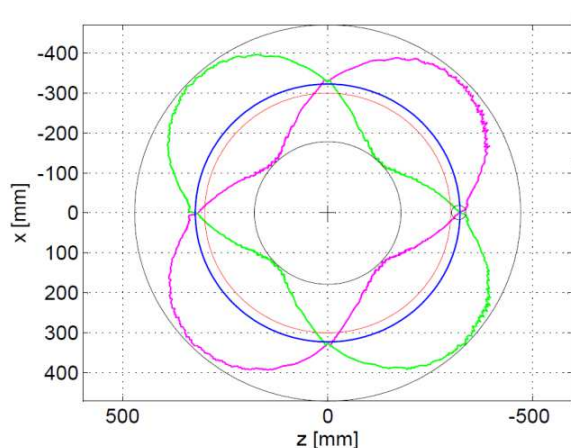
radiální odchylku, proto jsou v Tab. 8.19 a Tab. 8.20 porovnány pouze radiální odchylky a kruhovitosti pro oba směry.

Tab. 8.17 Parametry testu KI LT

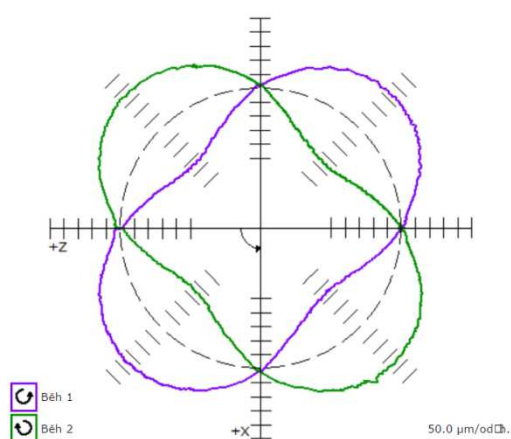
Poloměr	300 mm
Vzorkovací frekvence	500 Hz
Posuv	4 000 mm/min
Směr snímání	ccw/cw
Rovina testu	ZX
Souřadnice středu KI na stroji	X = 1200, Y = 400, Z = -870 mm
Vyhodnocovaná kružnice	45° až 405°
Přejezd	45°

Tab. 8.18 Parametry testu KI ball barem

Poloměr	300 mm
Vzorkovací frekvence	50 Hz
Posuv	4 000 mm/min
Směr snímání	ccw/cw
Rovina testu	ZX
Souřadnice středu KI na stroji	X = 1200, Y = 400, Z = -870 mm
Vyhodnocovaná kružnice	180° až 180°
Přejezd	180°



Obr. 8.8 Tvar naměřené KI LT



Obr. 8.9 Tvar naměřené KI ball barem

Tab. 8.19 Porovnání výsledků (LT a ball bar) pro směr ccw

Radiální odchylka	Měřeno LT	Měřeno ball barem
Fmin [μm]	-149,4 \pm 6,7	-150,9 \pm 2,8
Fmax [μm]	206,6 \pm 6,7	201,8 \pm 2,8
Kruhovitost		
G [μm]	356 \pm 11,5	352,7 \pm 2,8

Tab. 8.20 Porovnání výsledků (LT a ball bar) pro směr cw

Radiální odchylka	Sestavený program	Renishaw
Fmin [μm]	-151,7 \pm 6,7	-154,8 \pm 2,8
Fmax [μm]	213,7 \pm 6,7	210,2 \pm 2,8
Kruhovitost		
G [μm]	365,4 \pm 11,5	365 \pm 2,8

Nejistota měření LT pro radiální odchylku stanovená simulačním programem v matlabu nejistotavar2.m, viz el. příloha, rozšířená pro dynamická [5] měření je uvedena v (8.2) a pro odchylku kruhovitosti v (8.3)

$$U_{Bvar2Fdyn} = \pm 6,7 \mu\text{m} \quad (8.2)$$

$$U_{Bvar2Gdyn} = \pm 11,5 \mu\text{m} \quad (8.3)$$

Nejistota měření ball barem se vypočítá ze vztahu (8.4).

$$U_{ball} = k_c \cdot \sqrt{u_{ckball}^2 + u_{cpball}^2} = \pm 2,8 \mu\text{m} \quad (8.4)$$

$u_{ckball} = 1 \mu\text{m}$... výsledek kalibrace ball baru kalibrátor Zerodur

$u_{cpball} = 1 \mu\text{m}$... chyba vlastního provedení zkoušky ze zvyklostí

$k_c = 2$... koeficient rozšíření odpovídající 95% chyby

Rozdíl měření KI mezi LT a ball barem je ve stanovené mezi nejistoty. LT lze tedy použít pro měření KI. Z porovnání vypočtených nejistot lze usuzovat, že měření KI LT není tak přesné jako při použití systému ball bar

9 Závěr

Nejprve byly v rešerši popsány možné způsoby měření kruhové interpolace na strojích obecně bez ohledu na měřený poloměr. U každé metody měření je zhodnocení použití na velkých strojích a uvedeny základní parametry měření. Nejpoužívanější metodou měření kruhové interpolace je pomocí systému ball bar, který byl vybrán jako standardní metoda pro porovnání s metodou měření za pomoci zařízení laser tracker.

V další části rešerše je popsáno měřicí zařízení laser tracker LEICA AT901 a také jeho příslušenství potřebné pro provedení testu kruhové interpolace. Dále jsou popsány jeho měřicí možnosti a uvedeny základní technické parametry.

Závěr rešerše je věnován normě ČSN ISO 230-4, která je zaměřena na test kruhové interpolace. Z normy jsou zjednodušeně vypsány odchylky, které je nutno vyhodnotit, podmínky zkoušky a dále pak možný vliv odchylek stroje na tvar kruhové dráhy

Poté byly navrženy možné způsoby měření kruhové interpolace zařízením laser tracker LEICA AT901. Byly navrženy 3 varianty a pro každou variantu simulace měření kruhové interpolace. Ze simulací měření byly stanoveny nejistoty každé varianty. Podle nejistot byla vybrána varianta s nejmenší chybou měření, která byla použita při testu kruhové interpolace. Pro každou variantu byl sestaven zjednodušený postup měření.

Pro vybranou variantu byl sestaven program na vyhodnocení testu kruhové interpolace podle normy ČSN ISO 230-4. Dále byly připraveny programy na vypsání NC kódu potřebné pro měření.

V poslední části bylo provedeno měření na obráběcím stroji nejprve zařízením laser tracker a poté ve stejném místě zařízením ball bar. Měření

obráběcí stroj byl popsán a byly uvedeny základní technické parametry stroje. Obráběcí stroj byl horizontální vyvrtávací deskového typu.

Měření pomocí obou systémů je uvedeno v předchozích kapitolách. Z porovnání měření obou systémů je zřejmé, že rozdíl obou měření je menší než stanovená nejistota měření laser trackerem. Provedení testu kruhové interpolace zařízením laser tracker je možné. Z porovnání vypočtených nejistot lze usuzovat, že měření kruhové interpolace laser trackerem není tak přesné jako při použití systému ball bar. Výhoda měření kruhové interpolace laser trackerem je v možnosti měřit mnoho různých poloměrů i větších, než umožňuje systém ball bar. Měření za použití obou zařízení zabrala přibližně stejně času.

Seznam použité literatury

- [1] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 09/2010
- [2] Bach, Pavel a Stanislav URBÁNEK. *Testování výrobních strojů*. Vyd. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992, 163 s. ISBN 80-01-00747-2
- [3] Jiří Marek a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Praha: Nakladatelství MM publishing, s.r.o., 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3
- [4] *Leica AT901 User Manual*. Switzerland: Leica Geosystems AG, 2012. 66 s.
- [5] MORSE, Edward a Victoria WELTY. *Dynamic testing of laser trackers*. USA: University of North Carolina at Charlotte, 2015. 4 s.
- [6] CHERNOV, N. a C. LESORT. *Least squares fitting of circles*. Birmingham (USA): University of Alabama at Birmingham (Department of Mathematics), 2008. 23 s.
- [7] RENISHAW. *Teleskopické systémy ballbar*. [online]. 15.6.2015, Dostupné z: <<http://www.renishaw.cz/cs/teleskopicke-systemy-ballbar--6813>>
- [8] HEIDENHAIN. *Mříškové snímače KGM 181 a KGM 182*. [online]. 15.6.2015, Dostupné z: <http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty-a-pouziti/porovnavaci-snimace/kgm/>
- [9] OPTODYNE, INC. *LB 500 LASER/BALLBAR*. [online]. 15.6.2015, Dostupné z: <<http://www.optodyne.com/opnew5/products/lb500.html>>

- [10] API. *OMNITRAC*. [online]. 15.6.2015, Dostupné z: <<http://www.apisensor.com.br/laser-tracker-Omnitrack.html>>
- [11] ETALON. *LaserTRACER - NG*. [online]. 15.6.2015, Dostupné z: <<http://www.etalon-ag.com/products/lasertracer/?lang=en>>
- [12] ZEISS. *ZEISS ACCURA*. [online]. 15.6.2015, Dostupné z: <http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/systemy/bridge-type-cmms/accura.html>
- [13] UNIMETRA. *Odpichy mikrometrická skládací digitální*. [online]. 15.6.2015, Dostupné z: <http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/43_1.pdf>
- [14] AUTOMA. *Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření*. [online]. 15.6.2015, Dostupné z: <<http://automa.cz/download/au100152.pdf>>
- [15] TOS VARNSDORF. *Vyvrtačka desková GRATA*. [online]. 15.6.2015, Dostupné z: <<http://www.tosvarnsdorf.cz/cz/produkty/horizontalni-vyvrtavacky-deskove/grata/>>

Seznam použitých programů

Microsoft Office Word 2007

Microsoft Office Excel 2007

MATLAB

RENISHAW Ballbar 5 HPS

Solid Edge ST6

AutoCAD Mechanical

Seznam Obrázků

Obr. 3.1	Struktura systému ballbar [7].....	16
Obr. 3.2	Systém Renishaw ballbar QC20-W [7].....	17
Obr. 3.3	Možnost měření ortogonální roviny systémem ballbar QC20-W [7] ..	17
Obr. 3.4	Možnosti měření systémem ballbar QC20-W [7].....	17
Obr. 3.5	Měření zařízením OPTODYNE LB-500 [9].....	19
Obr. 3.6	Schéma měření laser / ballbarem [9].....	19
Obr. 3.7	Snímač HEIDENHAIN KGM 182 s měřicí deskou [8].....	20
Obr. 3.8	Měření snímačem HEIDENHAIN KGM 182 [VCSVTT]	21
Obr. 3.9	Laser tracker API Omnitrac [10].....	22
Obr. 3.10	Koutový odražeč API (SMR) [10].....	22
Obr. 3.11	Optická hlava laser trackeru API OMNITRAC [10].....	23
Obr. 3.12	Měření zařízením ETALON LaserTRACER-NG [11].....	24
Obr. 3.13	Zařízení ETALON LaserTRACER-NG [11].....	25
Obr. 3.14	3-D model zkušebního obrobku pro pracovní přesnost [3].....	26
Obr. 3.15	Měřicí zařízení ZEISS ACCURA [12]	27
Obr. 3.16	Mikrometrický odpich skládací digitální [13]	28
Obr. 4.1	Laser tracker LEICA AT901 [4]	30
Obr. 4.2	Zjednodušený 3-D model laser trackeru LEICA AT901	30
Obr. 4.3	Reflektor RRR 0.5 [4]	32
Obr. 4.4	Reflektor CER [4]	32
Obr. 5.1	Dvousměrná odchylka kruhovitosti [1].....	35
Obr. 5.2	Odchylka kruhovitosti pro směr ccw [1].....	35
Obr. 5.3	Radiální odchylka [1].....	36
Obr. 5.4	Vliv krátkého a dlouhého pohybu v ose na kruhovou dráhu [1].....	38
Obr. 5.5	Vliv nekolmosti os na kruhovou dráhu [1].....	39
Obr. 5.6	Vliv periodické odchytky v ose Z [1].....	39
Obr. 5.7	Schody způsobené chybou reverzace [1].....	40
Obr. 5.8	Hroty v místech reverzace [1].....	40
Obr. 5.9	Vliv zrychlení v osách [1].....	40
Obr. 5.10	Vliv rozdílných sledovaných chyb [1].....	41
Obr. 6.1	3-D model měření varianty 1	42

Obr. 6.2 Schéma měření varianty 1	43
Obr. 6.3 Rozsah měření vertikálního úhlu.....	44
Obr. 6.4 Požadovaná přesnost ustavení LT od středu KI v závislosti na počátečním úhlu φ_{v0}	45
Obr. 6.5 Nejistota stanovení radiální odchyly varianty 1 v závislosti na úhlu φ_{v0}	46
Obr. 6.6 3-D model měření varianty 2	53
Obr. 6.7 Schéma měření varianty 2	54
Obr. 6.8 Vliv chyby obvodového házení na celkovou nejistotu varianty 2	55
Obr. 6.9 Vliv přesnosti ustavení LT na nejistotě radiální odchyly se započteným obvodovým házením.....	56
Obr. 6.10 3-D model měření varianty 3	61
Obr. 6.11 Schéma měření varianty 3	62
Obr. 6.12 Ustavení LT od středu KI.....	63
Obr. 6.13 Srovnání použití reflektorů při měření	63
Obr. 6.14 Srovnání nejistot radiálních odchylek variant pro různé poloměry měření.....	68
Obr. 7.1 Horizontální vyvrtávačka desková [15].....	69
Obr. 7.2 Frézovací hlava na smykadle.....	69
Obr. 7.3 Měřený obráběcí stroj.....	70
Obr. 8.1 Měření obvodového házení.....	72
Obr. 8.2 Ustavení LT do středu KI.....	73
Obr. 8.3 Měření KI laser trackerem	73
Obr. 8.4 KI LT Dvousměrná odchylnka kruhovitosti pro $R = 300$ mm, $R_{min} = 299,848$ mm, $R_{max} = 300,214$ mm, odchylnky jsou 800x zvětšené	74
Obr. 8.5 KI LT Dvousměrná odchylnka kruhovitosti pro $R = 500$ mm, $R_{min} = 499,853$ mm, $R_{max} = 500,225$ mm, odchylnky jsou 1000x zvětšené	76
Obr. 8.6 Měření KI ball barem.....	77
Obr. 8.7 KI ball bar kruhová hystereze.....	78
Obr. 8.8 Tvar naměřené KI LT	81
Obr. 8.9 Tvar naměřené KI ball barem.....	81

Seznam Tabulek

Tab. 4.1 Technické parametry LEICA AT 901 [4].....	31
Tab. 4.2 Bezpečnostní specifiky LEICA AT901 [4].....	33
Tab. 6.1 Koeficient závislý na počtu opakování [14]	48
Tab. 6.2 Vybrané nejistoty varianty 1	52
Tab. 6.3 Vybrané nejistoty varianty 2	61
Tab. 6.4 Vybrané nejistoty varianty 3	67
Tab. 7.1 Technické parametry obráběcího stroje	70
Tab. 8.1 Naměřené hodnoty obvodového házení	71
Tab. 8.2 Parametry testu KI měřeno LT pro R 300	74
Tab. 8.3 Výsledky testu KI měřeno LT pro R 300 ve směru ccw.....	75
Tab. 8.4 Výsledky testu KI měřeno LT pro R 300 ve směru cw.....	75
Tab. 8.5 Výsledku testu KI měřeno LT pro R 300 v obou směrech.....	75
Tab. 8.6 Parametry testu KI měřeno LT pro R 500	75
Tab. 8.7 Výsledky testu KI měřeno LT pro R 500 ve směru ccw.....	76
Tab. 8.8 Výsledky testu KI měřeno LT pro R 500 ve směru cw.....	76
Tab. 8.9 Výsledku testu KI měřeno LT pro R 500 v obou směrech.....	76
Tab. 8.10 Parametry testu KI ball barem.....	78
Tab. 8.11 Výsledky testu KI měřeno ball barem ve směru ccw	78
Tab. 8.12 Výsledky testu KI měřeno LT ve směru cw	79
Tab. 8.13 Výsledku testu KI měřeno ball barem v obou směrech	79
Tab. 8.14 Parametry testy pro ověření správné funkce programu na vyhodnocení.....	79
Tab. 8.15 Srovnání výsledků testu KI pro směr ccw	80
Tab. 8.16 Srovnání výsledků testu KI pro směr cw	80
Tab. 8.17 Parametry testu KI LT	81
Tab. 8.18 Parametry testu KI ball barem.....	81
Tab. 8.19 Porovnání výsledků (LT a ball bar) pro směr ccw	82
Tab. 8.20 Porovnání výsledků (LT a ball bar) pro směr cw	82

Seznam příloh

Textové přílohy

Příloha č. 1 – NC kód odladěný na stroji pro zjištění ustavení

NC_kod_ustaveni500.NCP

Příloha č. 2 – NC kód odladěný na stroji pro test KI prováděnou laser trackerem

NC_kod300.NCP

Příloha č. 3 – NC kód odladěný na stroji pro test KI prováděnou ball barem

BALLBAR300.NCP

Elektronické přílohy

Textová část diplomové práce a textové přílohy v .pdf

Pánek_DP_měření_KI.pdf

Všechny programy použité v diplomové práci jsou v adresáři

Pánek_DP_měření_KI_matlab

V adresáři jsou následující programy:

Program na výpočet nejistoty varianty 1

nejistotavar1.m

Program na výpočet nejistoty varianty 2

nejistotavar2.m

Program na výpočet nejistoty varianty 3

nejistotavar3.m

Program na vypisování NC kódů a výpočet časů měření

varianta2_pripava.m

Program na vyhodnocení ustavení

varianta2_vyhod_ustaveni.m

Program na vyhodnocení měření testu KI laser trackerem

varianta2_vyhodnoceni_kr_300mm_ZX_1.m

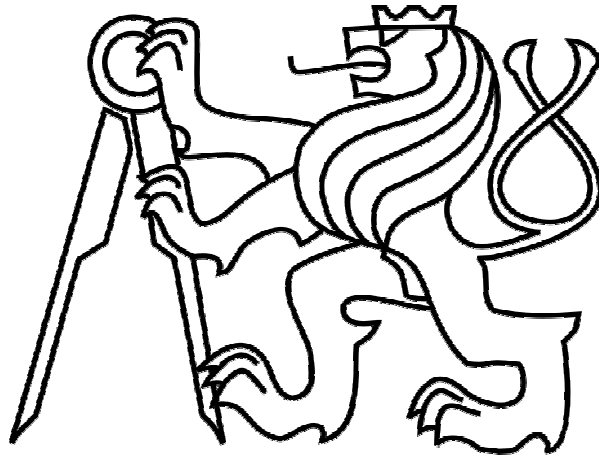
Program na vyhodnocení měření testu KI ball barem

bb_vyhodnoceni_kr_300mm_ZX_1.m

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Návrh měření kruhové interpolace strojů pomocí laser trackeru

Textové přílohy

2015

Bc. Petr Pánek

Příloha č. 1 – NC kód odladěný na stroji pro zjištění ustavení

NC_kod_ustaveni500.NCP

N10 G23 G57 G90 G17
N20 G94
N40 F4000
N50 M19
N55 W0
N60 M00
N70 G01 X0 Z-500
N80 G03 X0 Z-500 I0 K500 W360
N90 M02

Příloha č. 2 – NC kód odladěný na stroji pro test KI prováděnou laser trackerem

NC_kod300.NCP

N10 G23 G57 G90 G17
N20 G94
N40 F4000
N50 G01 X215.668 Z-215.668
N60 M19
N65 W0
N70 M00
N80 G01 X212.132 Z-212.132
N90 G03 X212.132 Z-212.132 I-212.132 K212.132 W360
N100 G03 X-212.132 Z-212.132 I-212.132 K212.132 W450
N110 G01 X-215.668 Z-215.668
N120 G04 F2
N130 G01 X-212.132 Z-212.132
N140 G02 X-212.132 Z-212.132 I212.132 K212.132 W90
N150 G02 X212.132 Z-212.132 I212.132 K212.132 W0

N160 G01 X215.668 Z-215.668

N170 M30

**Příloha č. 3 – NC kód odladěný na stroji pro test KI prováděnou ball barem
BALLBAR300.NCP**

N0010 G23 G57 G90 G18

N0020 G94

N0080 F4000

N0090 G01 X0.000 Z301.500

N0100 M00

N0110 G01 X0.000 Z300.000

N0120 G03 X0.000 Z300.000 I0.000 K-300.000

N0130 G03 X0.000 Z300.000 I0.000 K-300.000

N0140 G01 X0.000 Z301.500

N0150 G04 F5

N0160 G01 X0.000 Z300.000

N0170 G02 X0.000 Z300.000 I0.000 K-300.000

N0180 G02 X0.000 Z300.000 I0.000 K-300.000

N0190 G01 X0.000 Z301.500

N0200 M30
